Н. В. ЧЕРНОБРОВОВ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

Издание четвертое, переработанное и дополненное

Допущено Министерством энергетики и электрификации СССР в качестве учебного пособия для учащихся энергетических и энергостроительных техникумов

«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1971

6П2.11
Ч 49
УДК 621.316.925(075)

Чернобровов Н. В.

Ч 49 Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1971.
624 с. с илл.

В книге рассмотрена релейная защита электрических сетей, оборудования электростанций и сборных шин распределительных устройств.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для учащихся энергетических техникумов и может быть использована студентами электротехнических и энергетических вузов, а также инженерами и техниками, занимающимися эксплуатацией, монтажом и проектированием релейной защиты электростанций и сетей.

3-3-9
72-71

6П2.11

ПРЕДИСЛОВИЕ

Четвертое издание настоящей книги, как и предыдущее, является учебным пособием по курсу релейной защиты для энергетических техникумов. Книга в значительной степени учитывает также запросы студентов высших учебных заведений, особенно заочных, и специалистов, занимающихся релейной защитой в энергосистемах. Релейная защита является важнейшей и наиболее ответственной частью автоматики, применяемой в современных энергетических системах.

Курс релейной защиты, изучаемый в высших и средних технических учебных заведениях, охватывает обширный комплекс вопросов по автоматической ликвидации повреждений и ненормальных режимов, возникающих в электрической части энергосистем. Задачи релейной защиты, ее роль и значение в обеспечении надежной работы энергосистем и бесперебойного энергоснабжения потребителей непрерывно растут. Это обусловлено усложнением схем и ростом электрических сетей и систем, объединением энергосистем в единые электрически связанные системы в пределах нескольких областей, всей страны или даже нескольких государств; сооружением дальних и сильно загруженных электропередач высокого и сверхвысокого напряжения; строительством мощных электростанций; ростом единичной мощности генераторов и трансформаторов. В связи с этим требования к быстроте действия, чувствительности и надежности релейной защиты повышаются, а сама техника релейной защиты быстро развивается и совершенствуется. Разрабатываются и внедряются новые виды защит для дальних электропередач, для крупных генераторов, трансформаторов и автотрансформаторов.

Углубляются и разрабатываются теоретические вопросы релейной техники. Большое внимание уделяется исследованию и изучению электромагнитных процессов в первичных и вторичных цепях защиты и ее поведению под влиянием этих процессов. В связи с ростом токов короткого замыкания, вызванного увеличением генераторной мощности энергосистем, актуальное значение приобретает проблема точности трансформации первичных токов, питающих

измерительные органы устройств релейной защиты. Для решения этой проблемы ведутся дальнейшие исследования поведения трансформаторов тока, разрабатываются меры по повышению точности их работы, определяются более совершенные способы расчетов вторичных токов и токов намагничивания.

Все большее распространение получают релейные защиты с использованием полупроводниковых приборов (диодов, триодов и отчасти тиристоров). Применение полупроводниковых элементов открывает большие возможности по улучшению параметров устройств релейной защиты, а также созданию новых видов защит, в частности быстродействующих и высокочувствительных.

При подготовке нового издания книги автор старался отразить основные достижения и новые разработки в технике релейной защиты, нашедшие за последние годы применение в эксплуатации или имеющие достаточное теоретическое и экспериментальное обоснование для их применения в ближайшем будущем. В соответствии с этим разделы книги, посвященные рассмотрению измерительных органов и логических схем, расширены и дополнены материалом о новых принципах выполнения реле и схем с использованием полупроводниковых приборов.

С учетом того, что отечественная промышленность перешла на изготовление дистанционных реле на выпрямленном токе, соответственно переработана одиннадцатая глава. Внесены дополнения и изменения, связанные с усовершенствованием защит мощных генераторов, трансформаторов и блоков. Более подробно рассмотрены принципы устройства резервирования отказа выключателей.

Отдельные разделы и главы книги подверглись переработке с целью улучшения изложения. Для лучшего пояснения принципов выполнения схем защит на полупроводниковых приборах в приложении рассмотрена максимальная защита, полностью выполненная на типовых логических и функциональных элементах ВНИИЭлектропривода.

Несмотря на постепенное вытеснение защит с электромеханическими реле защитами на полупроводниковых приборах автор не мог существенно сократить изложение теории и принципов выполнения релейной защиты, построенной на электромеханических реле, так как основная часть защитных устройств, находящихся в эксплуатации, выполнена на электромеханических конструкциях.

Для удобства учащихся бóльшая часть материала, выходящего за пределы программы учебного курса, выделена петитом.

Автор приносит глубокую благодарность доктору техн. наук, проф. А. Д. Дроздову, инженерам М. А. Берковичу, Н. Ф. Шибенко, М. М. Филиппову за полезные замечания и помощь при переработке книги. Все пожелания и замечания автор просит направлять по адресу: Москва, М-114, Шлюзовая набережная, 10, издательство «Энергия».

Автор

Глава первая

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

1-1. НАЗНАЧЕНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

В энергетических системах на электрооборудовании электростанций, в электрических сетях и на электроустановках потребителей электроэнергии могут возникать повреждения и ненормальные режимы.

Повреждения в большинстве случаев сопровождаются значительным увеличением тока и глубоким понижением напряжения в элементах энергосистемы.

Повышенный ток выделяет большое количество тепла, вызывающее разрушения в месте повреждения и опасный нагрев неповрежденных линий и оборудования, по которым этот ток проходит.

Понижение напряжения нарушает нормальную работу потребителей электроэнергии и устойчивость параллельной работы генераторов и энергосистемы в целом.

Ненормальные режимы обычно приводят к отклонению величин напряжения, тока и частоты от допустимых значений. При понижении частоты и напряжения создается опасность нарушения нормальной работы потребителей и устойчивости энергосистемы, а повышение напряжения и тока угрожает повреждением оборудования и линий электропередачи.

Таким образом, повреждения нарушают работу энергосистемы и потребителей электроэнергии, а ненормальные режимы создают возможность возникновения повреждений или расстройства работы энергосистемы.

Для обеспечения нормальной работы энергетической системы и потребителей электроэнергии необходимо возможно быстрее выявлять и отделять место повреждения от неповрежденной сети, восстанавливая таким путем нормальные условия работы энергосистемы и потребителей.

Опасные последствия ненормальных режимов также можно предотвратить, если своевременно обнаружить отклонение от нор-

мального режима и принять меры к его устранению (например: снизить ток при его возрастании, повысить напряжение при его снижении и т. д.).

В связи с этим и возникает необходимость в создании и применении автоматических устройств, выполняющих указанные операции и защищающих систему и ее элементы от опасных последствий повреждений и ненормальных режимов.

Первоначально в качестве защитных устройств применялись плавкие предохранители. Однако по мере роста мощности и напряжения электрических установок и усложнения их схем коммутации такой способ защиты стал недостаточным, в силу чего были созданы защитные устройства, выполняемые при помощи специальных автоматов — реле, получившие название релейной защиты.

Релейная защита является основным видом электрической автоматики, без которой невозможна нормальная и надежная работа современных энергетических систем. Она осуществляет непрерывный контроль за состоянием и режимом работы всех элементов энергосистемы и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов.

При возникновении повреждений защита выявляет и отключает от системы поврежденный участок, воздействуя на специальные силовые выключатели, предназначенные для размыкания токов повреждения.

При возникновении ненормальных режимов защита выявляет их и в зависимости от характера нарушения производит операции, необходимые для восстановления нормального режима, или подает сигнал дежурному персоналу.

В современных электрических системах релейная защита тесно связана с электрической автоматикой, предназначенной для быстрого автоматического восстановления нормального режима и питания потребителей.

К основным устройствам такой автоматики относятся: автоматы повторного включения (АПВ), автоматы включения резервных источников питания и оборудования (АВР) и автоматы частотной разгрузки (АЧР).

Рассмотрим более подробно основные виды повреждений и ненормальных режимов, возникающих в электрических установках, и их последствия.

1-2. ПОВРЕЖДЕНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Большинство повреждений в электрических системах приводит к коротким замыканиям фаз между собой или на землю (рис. 1-1). В обмотках электрических машин и трансформаторов, кроме того, бывают замыкания между витками одной фазы.

Основными причинами повреждений являются: нарушения изоляции, вызванные старением ее, неудовлетворительным со-

стоянием, перенапряжениями и механическими повреждениями (обрыв проводов, наброс на провода и др.), ошибки персонала при операциях (отключение разъединителей под нагрузкой, включение под напряжение на оставленную закоротку и т. п.).

Все повреждения являются следствием конструктивных недостатков или несовершенства оборудования, некачественного его изготовления, дефектов монтажа, ошибок при проектировании, неудовлетворительного или неправильного ухода за оборудованием,

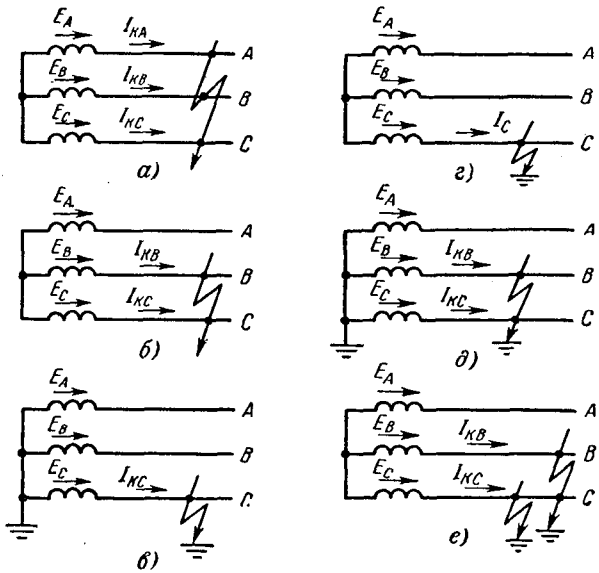


Рис. 1-1. Виды повреждений в электрических установках.

а, *б*, *в* и *д* — трехфазное, двухфазное, однофазное и двухфазное на землю к. з.; *г* и *е* — замыкания одной фазы и двух фаз на землю в сети с изолированной нейтралью.

ненормальных режимов работы оборудования. Поэтому повреждения нельзя считать неизбежными, но в то же время нельзя и не учитывать возможность их возникновения.

Короткие замыкания (к. з.) являются наиболее опасным и тяжелым видом повреждения. При к. з. э. д. с. E источника питания (генератора) замыкается «накоротко» через относительно малое сопротивление генераторов, трансформаторов и линий (см., например, рис. 1-1, *а*—*в*).

Поэтому в контуре замкнутой накоротко э. д. с. возникает большой ток $I_{к.з}$, называемый током короткого замыкания.

Короткие замыкания подразделяются на трехфазные, двухфазные и однофазные в зависимости от числа замкнувшихся фаз; замы-

кания с землей и без земли; замыкания в одной и двух точках сети (рис. 1-1).

При к. з. вследствие увеличения тока возрастает падение напряжения в элементах системы, что приводит к понижению напряжения во всех точках сети, так как напряжение в любой точке M (рис. 1-2, *а*) $\dot{U}_M = \dot{E} - \dot{I}_{к.з} z_M$, где $\dot{E}$ — э. д. с. источника питания, а z_M — сопротивление от источника питания до точки M.

Наибольшее снижение напряжения происходит в месте к. з. и в непосредственной близости от него. В точках сети, удаленных от места повреждения, напряжение снижается в меньшей степени.

Происходящие в результате к. з. увеличение тока и снижение напряжения приводят к ряду опасных последствий:

а) Ток к. з. $I_{к.з}$ согласно закону Джоуля — Ленца выделяет в активном сопротивлении r цепи, по которой он проходит в течение времени t, тепло $Q = kI^2rt$.

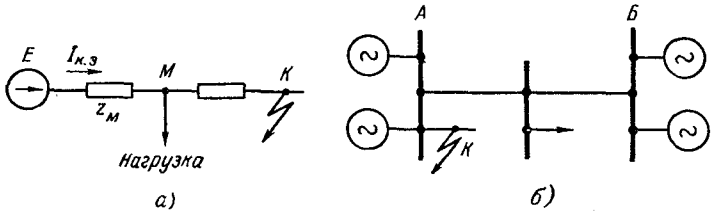


Рис. 1-2. Влияние понижения напряжения при к. з.
а — на работу потребителей; *б* — на энергосистему.

В месте повреждения это тепло и пламя электрической дуги производят большие разрушения, размеры которого тем больше, чем больше ток $I_{к.з}$ и время t.

Проходя по неповрежденному оборудованию и линиям электропередачи, ток к. з. $I_{к.з}$ нагревает их выше допустимого предела, что может вызвать повреждение изоляции и токоведущих частей.

б) Понижение напряжения при к. з. нарушает работу потребителей.

Основным потребителем электроэнергии являются асинхронные электродвигатели. Момент вращения двигателей пропорционален квадрату напряжения на их зажимах: $M_д = kU^2$.

Поэтому при глубоком снижении напряжения момент вращения электродвигателей может оказаться меньше момента сопротивления механизмов, что приводит к их остановке.

Нормальная работа осветительных установок, составляющих вторую значительную часть потребителей электроэнергии, при снижении напряжения также нарушается.

Особенно чувствительны к понижениям напряжения вычислительные и управляющие электронные машины, широко внедряемые в последнее время.

в) Вторым, наиболее тяжелым последствием снижения напряжения является нарушение устойчивости параллельной работы

генераторов. Это может привести к распаду системы и прекращению питания всех ее потребителей. Причины такого распада можно пояснить на примере системы, приведенной на рис. 1-2, *б*. В нормальном режиме механический момент вращения турбин уравновешивается противодействующим моментом, создаваемым электрической нагрузкой генераторов, в результате чего скорость вращения всех турбогенераторов постоянна и равна синхронной. При возникновении к. з. в точке *К* у шин электростанции *А* напряжение на них станет равным нулю, в результате этого электрическая нагрузка, а следовательно, и противодействующий момент генераторов также станут равными нулю. В то же время в турбину поступает прежнее количество пара (или воды) и ее момент остается неизменным. Вследствие этого скорость вращения турбогенератора начнет быстро увеличиваться, так как регулятор скорости турбины действует медленно и не сможет предотвратить ускорения вращения турбогенераторов станции *А*.

В иных условиях находятся генераторы станции *Б*. Они удалены от точки *К*, поэтому напряжение на их шинах может быть близким к нормальному. Вследствие того что генераторы электростанции *А* разгрузились, вся нагрузка системы ляжет на генераторы станции *В*, которые при этом могут перегрузиться и уменьшить скорость вращения. Таким образом, в результате к. з. скорость вращения генераторов электростанций *А* и *Б* становится различной, что приводит к нарушению их синхронной работы.

При длительном к. з. может также произойти нарушение устойчивости работы асинхронных электродвигателей. При понижении напряжения скорость вращения асинхронных электродвигателей уменьшается. Если скольжение превзойдет критическое, двигатель перейдет в область неустойчивой работы и произойдет его опрокидывание и полное торможение.

С увеличением скольжения реактивная мощность, потребляемая асинхронными двигателями, растет, что может привести после отключения к. з. к дефициту реактивной мощности и как следствие этого к лавинообразному снижению напряжения во всей системе и прекращению ее работы.

Аварии с нарушением устойчивости системы по величине ущерба, наносимого электроснабжению, являются самыми тяжелыми.

Рассмотренные последствия к. з. подтверждают сделанный выше вывод, что они являются тяжелым и опасным видом повреждения, требующим быстрого отключения (см. § 1-4).

Замыкание на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью. На рис. 1-1, *г* видно, что замыкание на землю не вызывает короткого замыкания, так как э. д. с. E_C поврежденной фазы *С* не шунтируется появившимся в точке *К* соединением с землей. Возникающий при этом ток в месте повреждения замыкается через емкость проводов относительно земли и имеет поэтому, как правило, небольшую величину, например несколько десятков ампер. Линейные

напряжения при этом виде повреждения остаются неизменными (см. гл. 9).

Благодаря этому по своим последствиям однофазное замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью существенно отличается от к. з. Оно не отражается на работе потребителей и не нарушает синхронной работы генераторов. Однако этот вид повреждения создает ненормальный режим, вызывая перенапряжения, что представляет опасность с точки зрения возможности нарушения изоляции относительно земли двух неповрежденных фаз и перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное к. з.

1-3. НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ

К ненормальным относятся режимы, связанные с отклонениями от допустимых значений величин тока, напряжения и частоты, опасные для оборудования или устойчивой работы энергосистемы.

Рассмотрим наиболее характерные ненормальные режимы.

а) **Перегрузка оборудования,** вызванная увеличением тока сверх номинального значения. Номинальным называется максимальный ток, допускаемый для данного оборудования в течение неограниченного времени.

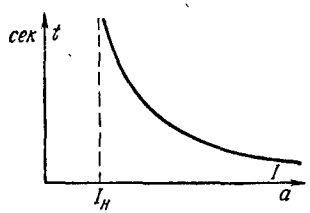


Рис. 1-3. Зависимость допустимой длительности перегрузки от величины тока $t = f(I)$.

$I_н$ — номинальный ток оборудования.

Если ток, проходящий по оборудованию, превышает номинальное значение, то за счет выделяемого им дополнительного тепла температура токоведущих частей и изоляции через некоторое время превосходит допустимую величину, что приводит к ускоренному износу изоляции и ее повреждению. Время, допустимое для прохождения повышенных токов, зависит от их величины. Характер этой зависимости показан на рис. 1-3 и определяется конструкцией оборудования и типом изоляционных материалов. Для предупреждения повреждения оборудования при его перегрузке необходимо принять меры к разгрузке или отключению оборудования.

б) **Снижение частоты,** вызываемое недостатком генераторной мощности, обычно возникает при внезапном отключении части работающих генераторов. При снижении частоты понижается производительность механизмов и нарушается технологический процесс тех агрегатов, для которых имеет значение постоянство скорости вращения электродвигателей.

Глубокое снижение частоты (ниже 47—45 *гц*) ведет к тяжелым авариям с прекращением работы всей энергетической системы. Для предотвращения такой аварии необходимо восстановить баланс генерируемой и потребляемой мощностей путем быстрого (авто-

матического) включения резервных генераторов, или путем автоматического отключения части потребителей.

в) **Повышение напряжения** сверх допустимого значения возникает обычно на гидрогенераторах при внезапном отключении их нагрузки. Разгрузившийся гидрогенератор увеличивает скорость вращения, что вызывает возрастание э. д. с. статора до опасных для его изоляции значений. Защита в таких случаях должна снизить ток возбуждения генератора или отключить его.

Опасное для изоляции оборудования повышение напряжения может возникнуть также при одностороннем отключении или включении длинных линий электропередачи с большой емкостной проводимостью.

Кроме отмеченных ненормальных режимов, имеются и другие, ликвидация которых возможна при помощи релейной защиты.

1-4. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

а) Селективность

Селективностью, или избирательностью, защиты называется способность защиты отключать при к. з. только поврежденный участок сети.

На рис. 1-4 показаны примеры селективного отключения повреждений. Так, при к. з. в точке K_1 защита должна отключить по-

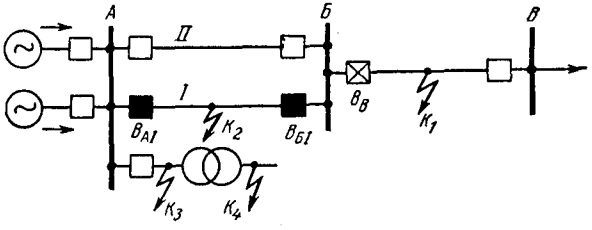


Рис. 1-4. Селективное отключение поврежденного участка при к. з. в сети.

врежденную линию выключателем $В_В$, т. е. выключателем, ближайшим к месту повреждения. При этом все потребители, кроме питавшихся от поврежденной линии, остаются в работе.

В случае к. з. в точке K_2 при селективном действии защиты должна отключаться поврежденная линия *I*, линия *II* остается в работе. При таком отключении все потребители сети сохраняют питание. Этот пример показывает, что если подстанция связана с сетью несколькими линиями, то селективное отключение к. з. на одной из линий позволяет сохранить связь этой подстанции с сетью, обеспечив тем самым бесперебойное питание потребителей.

Таким образом, требование селективности является основным условием для обеспечения надежного питания потребителей. Несе-

лективное действие защиты приводит к развитию аварий и поэтому является ее существенным недостатком. Как будет показано ниже, неселективные отключения могут допускаться, но только в тех случаях, когда это диктуется необходимостью и не отражается на питании потребителей.

б) Быстрота действия

Отключение к. з. должно производиться с возможно большей быстротой для ограничения размеров разрушения оборудования, повышения эффективности автоматического повторного включения линий и сборных шин, уменьшения продолжительности снижения напряжения у потребителей и сохранения устойчивости параллельной работы генераторов, электростанций и энергосистемы в целом. Последнее из перечисленных условий является главным.

Допустимое время отключения к. з. по условию сохранения устойчивости зависит от ряда факторов. Важнейшим из них является величина остаточного напряжения на шинах электростанций и узловых подстанций энергосистемы. Чем меньше остаточное напряжение, тем хуже условия устойчивости и, следовательно, тем быстрее нужно отключать к. з. *Наиболее тяжелыми по условиям устойчивости являются трехфазные к. з. и двухфазные к. з. на землю* в сети с глухозаземленной нейтралью, так как при этих повреждениях происходят наибольшие снижения всех междуфазных напряжений.

В современных энергосистемах для сохранения устойчивости требуется весьма малое время отключения к. з. Так, например, на электропередачах 300—500 *кв* необходимо отключать повреждение за 0,1—0,12 *сек* после его возникновения, а в сетях 110—220 *кв* за 0,15—0,3 *сек*. В распределительных сетях 6 и 10 *кв* к. з., отделенных от источников питания большим сопротивлением, можно отключать со временем примерно 1,5—3 *сек*, так как они не влияют на устойчивость системы.

Точная оценка допустимого времени отключения производится с помощью специальных расчетов устойчивости, проводимых для этой цели.

В качестве приближенного критерия (меры) необходимости применения быстродействующих защит Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [Л. 1] рекомендуют определять остаточное напряжение на шинах электростанций и узловых подстанций, при трехфазных к. з. в интересующей нас точке сети. *Если остаточное напряжение получается меньше 60% номинального, то для сохранения устойчивости следует применять быстрое отключение повреждений*, т. е. применять быстродействующую защиту.

Полное время отключения повреждения $t_{откл}$ складывается из времени работы защиты $t_з$ и времени действия выключателя $t_в$, разрывающего ток к. з., т. е. $t_{откл} = t_з + t_в$. Таким образом, для ускорения отключения нужно ускорять действие как защиты, так

и выключателей. Наиболее распространенные выключатели действуют со временем 0,15—0,06 *сек*.

Чтобы обеспечить при таких выключателях указанное выше требование об отключении к. з., например, с $t = 0{,}2$ *сек*, защита должна действовать с временем 0,05—0,12 *сек*, а при необходимости отключения с $t = 0{,}12$ *сек* и действии выключателя с 0,08 *сек* время работы защиты не должно превышать 0,04 *сек*.

Защиты, действующие с временем до 0,1—0,2 *сек*, считаются быстродействующими. Современные быстродействующие защиты могут работать с временем 0,02—0,04 *сек*.

Требование быстродействия является в ряде случаев определяющим условием, обеспечивающим устойчивость параллельной работы электростанций и энергосистем.

Создание селективных быстродействующих защит является важной и трудной задачей техники релейной защиты. Эти защиты получаются достаточно сложными и дорогими, поэтому они должны применяться только в тех случаях, когда более простые защиты, работающие с выдержкой времени, не обеспечивают требуемой быстроты действия.

В целях упрощения допускается применение простых быстродействующих защит, не обеспечивающих необходимой селективности. При этом для исправления неселективности используется АПВ, быстро включающее обратно неселективно отключившийся элемент.

Требование к времени действия защиты от ненормальных режимов зависит от их последствий. Часто ненормальные режимы носят кратковременный характер и ликвидируются сами, например кратковременная перегрузка при пуске асинхронного электродвигателя. В таких случаях быстрое отключение не только не является необходимым, но может причинить ущерб потребителям. Поэтому отключение оборудования при ненормальном режиме должно производиться только тогда, когда наступает действительная опасность для защищаемого оборудования, т. е. в большинстве случаев с выдержкой времени.

в) Чувствительность

Для того чтобы защита реагировала на отклонения от нормального режима, которые возникают при к. з. (увеличение тока, снижение напряжения и т. п.), она должна обладать определенной чувствительностью в пределах установленной зоны ее действия. Каждая защита (например, *I* на рис. 1-5) должна отключать повреждения на том участке *АБ*, для защиты которого она установлена (первый участок защиты *I*), и, кроме того, должна действовать при к. з. на следующем, втором участке *БВ*, защищаемом защитой *II*. Действие защиты на втором участке называется дальним резервированием. Оно необходимо для отключения к. з. в том случае, если защита *II* или выключатель участка *БВ* не сра-

ботает из-за неисправности. *Резервирование следующего участка является важным требованием.* Если оно не будет выполняться, то при к. з. на участке *БВ* и отказе его защиты или выключателя повреждение останется неотключенным, что приведет к нарушению работы потребителей всей сети.

Действие защиты *I* при к. з. на третьем участке не требуется, так как при отказе защиты третьего участка или его выключателя должна подействовать защита *II*. Одновременный отказ защиты на двух участках (третьем и втором) маловероятен, и поэтому с таким случаем не считаются.

Некоторые типы защит по принципу своего действия не работают за пределами первого участка. Чувствительность таких защит должна обеспечить их надежную работу в пределах первого участка. Для обеспечения резервирования второго участка в этом случае устанавливается дополнительная защита, называемая резервной.

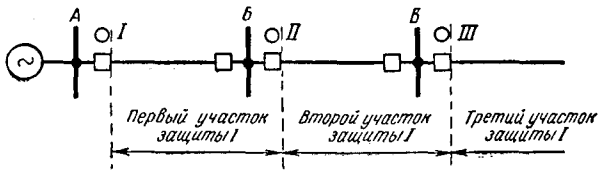


Рис. 1-5. Зоны действия защиты.

Каждая защита должна действовать не только при металлическом к. з., но и при замыканиях через переходное сопротивление, обусловливаемое электрической дугой.

Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она могла подействовать при к. з. в минимальных режимах системы, т. е. в таких режимах, когда изменение величины, на которую реагирует защита (ток, напряжение и т. п.), будет наименьшей. Например, если на станции *А* (рис. 1-2, *б*) будет отключен один генератор, то ток к. з. уменьшится, но чувствительность защит должна быть достаточной для действия и в этом минимальном режиме.

Таким образом, чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она действовала при к. з. в конце установленной для нее зоны в минимальном режиме системы и при замыканиях через электрическую дугу.

Чувствительность защиты принято характеризовать коэффициентом чувствительности $k_ч$. Для защит, реагирующих на ток к. з.,

$$k_ч = \frac{I_{к.з.мин}}{I_{с.з}}, \qquad (1\text{-}1)$$

где $I_{к.з.мин}$ — минимальный ток к. з.; $I_{с.з}$ — наименьший ток, при котором защита начинает работать (ток срабатывания защиты).

г) Надежность

Требование надежности состоит в том, что *защита должна безотказно работать при к. з. в пределах установленной для нее зоны и не должна работать неправильно в режимах, при которых ее работа не предусматривается.*

Требование надежности является весьма важным. Отказ в работе или неправильное действие какой-либо защиты всегда приводит к дополнительным отключениям.

Например, при к. з. в точке K (рис. 1-6) и отказе защиты B_I сработает защита B_{III}, в результате чего дополнительно отключаются подстанции *II* и *III*, а при неправильной работе в нормальном режиме защиты B_{IV} в результате отключения линии $Л_{IV}$ потеряют питание потребители подстанций: *I*, *II*, *III* и *IV*. Таким образом, ненадежная защита сама становится источником аварий.

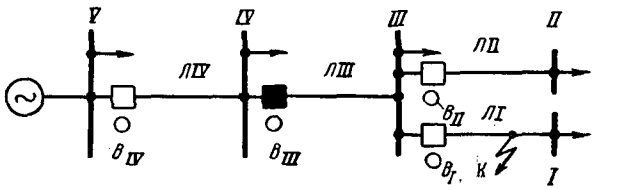


Рис. 1-6. Неселективное отключение к. з. из-за отказа защиты вследствие ее неисправности.

Надежность защиты обеспечивается простотой схемы, уменьшением в ней количества реле и контактов, простотой конструкции и качеством изготовления реле и другой аппаратуры, качеством монтажных материалов, самого монтажа и контактных соединений, а также уходом за ней в процессе эксплуатации.

В последнее время ведутся разработки методики оценки и анализа надежности устройств релейной защиты с помощью теории вероятности [Л. 33].

В СССР общие принципы выполнения релейной защиты регламентируются ПУЭ [Л. 1], а типовые схемы релейной защиты и их расчет — «Руководящими указаниями по релейной защите» [Л. 2—6].

1-5. ЭЛЕМЕНТЫ ЗАЩИТЫ, РЕЛЕ И ИХ РАЗНОВИДНОСТИ

Обычно устройства релейной защиты состоят из нескольких реле, соединенных друг с другом по определенной схеме.

Р е л е представляет собой автоматическое устройство, которое приходит в действие (срабатывает) при определенном значении воздействующей на него входной величины.

В релейной технике применяются р е л е с к о н т а к т а м и — электромеханические — и б е с к о н т а к т н ы е — на полупроводниках или на ферромагнитных элементах. У первых при сраба-

тывании замыкаются или размыкаются контакты. У вторых — при определенном значении входной величины скачкообразно меняется выходная величина, например напряжение.

Каждое устройство защиты и его схема подразделяются на две части: реагирующую и логическую.

Реагирующая (или измерительная) часть является главной, она состоит из основных реле, которые непрерывно получают информацию о состоянии защищаемого элемента и реагируют на повреждения или ненормальные режимы, подавая соответствующие команды на логическую часть защиты.

Логическая часть (или оперативная) является вспомогательной, она воспринимает команды реагирующей части и, если их последовательность и сочетание соответствуют заданной программе, производит заранее предусмотренные операции и подает управляющий импульс на отключение выключателей. Логическая часть может выполняться с помощью электромеханических реле или схем с использованием электронных приборов — ламповых или полупроводниковых.

В соответствии с этим подразделением защитных устройств реле так же делятся на две группы: на основные, реагирующие на повреждения, и вспомогательные, действующие по команде первых и используемые в логической части схемы.

Признаком появления к. з. могут служить возрастание тока I, понижение напряжения U и уменьшение сопротивления защищаемого участка, характеризуемого отношением напряжения к току в данной точке сети, $z = U/I$.

Соответственно этому в качестве реагирующих реле применяют реле токовые, реагирующие на величину тока, реле напряжения, реагирующие на величину напряжения, и реле сопротивления, реагирующие на изменение сопротивления.

В сочетании с указанными реле часто применяются реле мощности, реагирующие на величину и направление (знак) мощности к. з., проходящей через место установки защиты.

Реле, действующие при возрастании величины, на которую они реагируют, называются максимальными, а реле, работающие при снижении этой величины, называются минимальными.

Для защит от ненормальных режимов, так же как и для защит от к. з., используются реле тока и напряжения. Первые служат в качестве реле, реагирующих на перегрузку, а вторые — на опасное повышение или снижение напряжения в сети. Кроме того, применяется ряд специальных реле, например, реле частоты, действующие при недопустимом снижении или повышении частоты; тепловые реле, реагирующие на увеличение тепла, выделяемого током при перегрузках, и некоторые другие.

К числу вспомогательных реле относятся: реле времени, служащие для замедления действия защиты; реле указа-

тельные — для сигнализации и фиксации действия защиты; реле промежуточные, передающие действие основных реле на отключение выключателей и служащие для осуществления взаимной связи между элементами защиты.

Каждое реле можно подразделить на две части: воспринимающую и исполнительную. Воспринимающий элемент в электромеханических конструкциях имеет обмотку, которая питается током или напряжением защищаемого элемента в зависимости от типа реле (токовые или напряжения).

Реле мощности и реле сопротивления имеют две обмотки (тока и напряжения). Через обмотки реле воспринимает изменение той электрической величины, на которую оно реагирует.

Исполнительный элемент электромеханического реле представляет собой подвижную систему, которая, перемещаясь под воздействием сил, создаваемых воспринимающим элементом, действует на контакты реле, заставляя их замыкаться или размыкаться.

Имеются также реле, в которых подвижная система реле действует непосредственно механическим путем на отключение выключателя.

1-6. СПОСОБЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ РЕЛЕ И СХЕМ ЗАЩИТЫ НА ЧЕРТЕЖАХ

Применяются два принципиально различных способа изображения схем защит и реле на чертежах.

По первому способу реле показываются в совмещенном виде (рис. 1-7, *а*) и изображаются в виде прямоугольника с полукругом наверху. Обмотки реле подразумеваются расположенными в нижней части (прямоугольнике) и обычно не показываются, контакты реле рисуют в верхней части изображения (таким образом, контакты и обмотки реле совмещаются в одном изображении). Тип реле обозначается начальной буквой наименования реле в нижней части изображения. Например: токовое реле обозначается буквой *Т*, реле напряжения — *Н*, промежуточное — *П*, мощности — *М* и т. д.

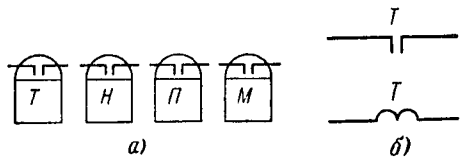


Рис. 1-7. Условное изображение реле на принципиальных схемах.

По второму способу реле показываются в развернутом виде (рис. 1-7, *б*). Обмотки реле и их контакты рисуют раздельно, в разных частях схемы, исходя из соображений большей наглядности схемы, и обозначают соответствующей буквой (см. рис. 4-20, *б, в, г*).

В развернутых схемах цепи, питающиеся током сети, напряжением сети и источником оперативного тока, показываются раз-

435006
БИБЛИОТЕКА
ТИИИМСХ

дельно, что облегчает рассмотрение («чтение») схем с большим числом реле и сложной связью между ними.

В 1964 г. в СССР введен стандарт (ГОСТ 7624-62) [Л. 7] на графические изображения электрических схем. В дальнейшем изложении все схемы изображаются в соответствии с этим стандартом. Положение контактов реле на схемах условились изображать в состоянии, соответствующем отсутствию тока в обмотках реле. В книге, в отдельных случаях (для облегчения понимания схемы) контакты реле показываются в положении готовности устройства к действию (т. е. для нормального состояния защищаемого объекта). Такие случаи оговариваются в подписях под рисунками.

1-7. СПОСОБЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ

Обмотки реле могут включаться на ток и напряжение сети непосредственно или через измерительные трансформаторы тока и напряжения (рис. 1-8). Реле первого типа называются п е р в и ч н ы м и, второго типа — в т о р и ч н ы м и.

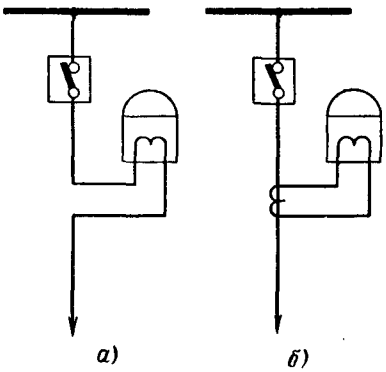


Рис. 1-8. Способы включения токовых реле.
а — первичных; *б* — вторичных.

Наибольшее распространение имеют реле вторичные, преимущества которых по сравнению с первичными состоят в том, что они изолированы от высокого напряжения, располагаются на некотором расстоянии от защищаемого элемента, в удобном для обслуживания месте и могут выполняться стандартными на одни и те же номинальные токи 5 или 1 *а* и номинальные напряжения 100 *в* независимо от напряжения и тока первичной цепи защищаемого элемента.

Достоинством первичных реле является то, что для их включения не требуется измерительных трансформаторов, источников оперативного тока (см. § 1-8) и контрольного кабеля. Первичные реле находят применение на электродвигателях, мелких трансформаторах и линиях малой мощности в сетях 3—6—10 *кв*, т. е. там, где защита осуществляется по простейшим схемам посредством реле тока и напряжения и не требует большой точности. Во всех остальных случаях применяются вторичные реле.

1-8. СПОСОБЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ НА ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ

Существуют два способа воздействия защиты на отключение выключателя: п р я м о й и к о с в е н н ы й. Защита со вторичными реле прямого действия *1* показана на рис. 1-9. Реле *1* срабатывает, когда электромагнитная сила $F_э$, создаваемая обмоткой реле,

станет больше силы $F_п$ противодействующей пружины. При срабатывании реле его подвижная система *2* воздействует непосредственно (прямо) на расцепляющий рычаг *3* выключателя, после чего выключатель отключается под действием пружины *4*.

Реле прямого действия устанавливаются непосредственно в приводе выключателя, поэтому их часто называют встроенными.

Защита с вторичным реле косвенного действия изображена на рис. 1-10. При срабатывании реле *1* его контакты замыкают цепь обмотки электромагнита *2*, называемого катушкой отключения выключателя. Под действием напряжения *U*, подводимого к зажимам этой цепи от специального источника, в катушке отключения появляется ток, сердечник *3* катушки отключения, втягиваясь, освобождает защелку *4*, после чего выключатель отключается под действием пружины *5*.

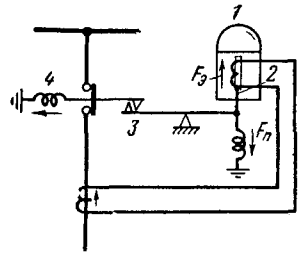


Рис. 1-9. Вторичное реле прямого действия.

После отключения выключателя ток в обмотке реле исчезает и контакты реле размыкаются. Чтобы облегчить их работу по размыканию цепи, в которой проходит ток катушки отключения, предусмотрен вспомогательный блокировочный контакт *БК*, который размыкает цепь катушки отключения еще до того, как начнут размыкаться контакты реле.

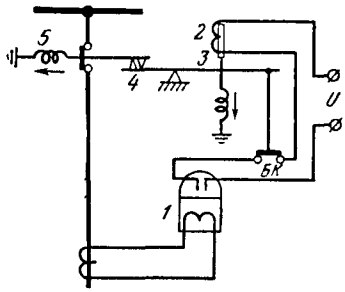


Рис. 1-10. Вторичное реле косвенного действия.

Как видно из схемы на рис. 1-10, для защиты с реле косвенного действия необходим вспомогательный источник напряжения — источник оперативного тока. Защита с реле прямого действия не требует источника оперативного тока, но реле этой защиты должны развивать большие усилия для того, чтобы непосредственно расцепить механизм выключателя. Поэтому реле прямого действия не могут быть очень точными и имеют большое потребление мощности.

Усилия, развиваемые реле косвенного действия, могут быть незначительными, поэтому они отличаются большей точностью и малым потреблением. Кроме того, в защитах, которые состоят из нескольких реле, взаимодействие между ними проще осуществляется при помощи оперативного тока, а не механическим путем. В силу изложенного наиболее широко применяется защита со вторичными реле косвенного действия.

Для простых токовых защит имеются вполне надежные конструкции токовых реле прямого действия, которые часто применяются

в сетях среднего напряжения 3, 6, 10, 30 *кв* там, где отмеченные недостатки защит прямого действия не являются существенными.

1-9. ИСТОЧНИКИ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА

а) Назначение и общие требования

Оперативным током называется ток питающий цепи дистанционного управления выключателями, оперативные цепи релейной защиты, автоматики, телемеханики и различные виды сигнализации.

Питание оперативных цепей и особенно тех ее элементов, от которых зависит отключение поврежденных линий и оборудования, должно отличаться особой надежностью. Поэтому главное требование, которому должен отвечать источник оперативного тока, состоит в том, чтобы во время к. з. и при ненормальных режимах в сети напряжение источника оперативного тока и его мощность имели достаточную величину как для действия вспомогательных реле защиты и автоматики, так и для надежного отключения и включения соответствующих выключателей.

Для питания оперативных цепей применяются источники п о с т о я н н о г о и п е р е м е н н о г о т о к а.

б) Постоянный оперативный ток

В качестве источника постоянного тока используются аккумуляторные батареи с напряжением 110—220 *в*, а на небольших подстанциях 24—48 *в*, от которых осуществляется централизованное питание оперативных цепей всех присоединений (рис. 1-11). Для повышения надежности сеть постоянного тока секционируется на несколько участков, имеющих самостоятельное питание от сборных шин батареи.

Самым ответственным участком являются цепи защиты, автоматики и катушек отключения, питаемые от шинок управления *ШУ*. Вторым очень важным участком являются цепи катушек включения, питаемые от отдельных шинок *ШВ* вследствие больших токов (400—500 *а*), потребляемых катушками включения масляных выключателей. И, наконец, третьим, менее ответственным участком является сигнализация, питающаяся от шинок *ШС*. Остальные потребители постоянного тока (аварийное освещение, двигатели собственных нужд) питаются по отдельной сети. Защита оперативных цепей от к. з. осуществляется предохранителями или специальными автоматами (реагирующими на увеличение тока).

Для своевременного выявления неисправностей в оперативных цепях состояние отдельных элементов цепи контролируется с помощью специальных устройств.

Исправность предохранителей контролируется реле *РС* (рис. 1-11). Целость цепи отключения *КО* и блок-контактов *БК*

обычно контролируется реле $РК$, дающим сигнал при обрыве цепи (рис. 1-12, *а*).

В сетях постоянного тока возможны замыкания на землю. В случае замыканий на землю в точках $К_1$ и $К_2$ (рис. 1-12, *б*) кон-

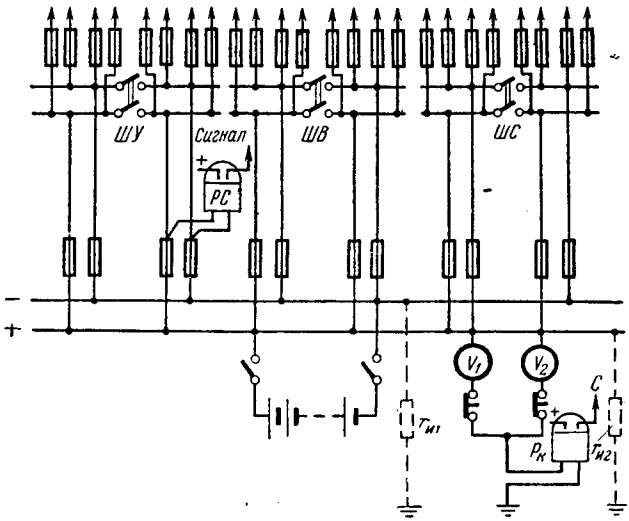


Рис. 1-11. Принципиальная схема питания оперативных цепей защиты, цепей управления и сигнализации постоянным током.

такты реле $РЗ$ шунтируются и в катушке отключения $КО$ появляется ток, под действием которого выключатель может отключиться.

Чтобы предупредить подобные отключения, применяется контроль за появлением «земли» на постоянном токе. Контроль осуществ-

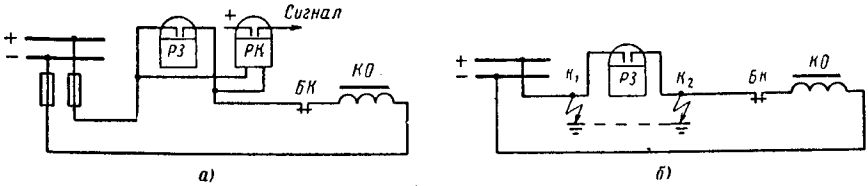


Рис. 1-12. Цепь отключения выключателя.

а — контроль целости цепи с помощью последовательно включенного реле ($РК$); *б* — образование ложной цепи на отключение выключателя при замыкании на землю и двух точках сети постоянного тока.

ляется при помощи вольтметров V_1 и V_2 и сигнального реле $Р_к$, как показано на рис. 1-11.

Аккумуляторные батареи обеспечивают питание оперативных цепей в любой момент времени с необходимым уровнем напряжения

и мощности независимо от состояния основной сети и поэтому *являются самым надежным источником питания.*

В то же время аккумуляторные батареи значительно дороже других источников оперативного тока, для них требуются зарядные агрегаты, специальное помещение и квалифицированный уход.

Кроме того, из-за централизации питания создается сложная, протяженная и дорогостоящая сеть постоянного тока.

В связи с этим за последнее время получает широкое применение и переменный оперативный ток.

в) Переменный оперативный ток

Для питания оперативных цепей переменным током используется ток или напряжение сети. В соответствии с этим в качестве источников переменного оперативного тока служат трансформаторы тока, трансформаторы напряжения и трансформаторы собственных нужд.

Трансформаторы тока являются весьма надежным источником питания оперативных цепей для защит от к. з. При к. з. ток и напряжение на зажимах трансформаторов тока увеличиваются, поэтому в момент срабатывания защиты мощность трансформаторов тока возрастает, что и обеспечивает надежное питание оперативных цепей.

Однако трансформаторы тока не обеспечивают необходимой мощности при повреждениях и ненормальных режимах, не сопровождающихся увеличением тока на защищаемом присоединении. Поэтому их нельзя использовать для питания защит от замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью, защит от витковых замыканий в трансформаторах и генераторах или защит от таких ненормальных режимов, как повышение или понижение напряжения и понижение частоты.

Трансформаторы напряжения и трансформаторы собственных нужд непригодны для питания оперативных цепей защит от к. з., так как при к. з. напряжение в сети резко снижается и может в неблагоприятных случаях стать равным нулю. В то же время при повреждениях и ненормальных режимах, не сопровождающихся глубокими понижениями напряжения в сети, трансформаторы напряжения и трансформаторы собственных нужд могут использоваться для питания таких защит, как, например, защиты от перегрузки, от замыканий на землю, повышения напряжения и т. д.

Заряженный конденсатор. Помимо непосредственного использования мощности трансформаторов тока и напряжения можно использовать энергию, накопленную в предварительно заряженном конденсаторе.

Разрядный ток конденсатора, имеющий необходимые величину и продолжительность, может питать оперативную цепь в момент действия защиты независимо от характера повреждения или ненор-

мального режима в сети. Предварительный заряд конденсатора обычно осуществляется в нормальном режиме от напряжения сети. При исчезновении напряжения на подстанции запасенная конденсатором энергия сохраняется. Поэтому заряженный конденсатор может использоваться также для питания защит и автоматов, которые должны работать при исчезновении напряжения на подстанции.

Питание цепей управления выключателей. Дистанционное управление выключателями и их автоматическое включение от АПВ или АВР должно производиться при любых нагрузках на присоединении и при отсутствии напряжения на шинах подстанции, чего не обеспечивают трансформаторы тока. Поэтому питание цепей дистанционного управления, АПВ и АВР производится от трансформаторов напряжения, трансформаторов собственных нужд и заряженных конденсаторов. Чтобы обеспечить производство операции по включению при отсутствии напряжения на шинах, трансформаторы, питающие цепи управления, подключаются к линиям, питающим подстанцию (рис. 1-18, *б*), или на выключателях устанавливаются механические приводы, действующие за счет энергии поднятого груза или сжатой пружины.

Таким образом, каждый источник переменного оперативного тока имеет свою, рассмотренную выше, область применения. При этом возможность использования того или иного источника определяется мощностью, которую он может дать в момент производства операций.

Мощность источника питания должна с некоторым запасом превосходить мощность, потребляемую оперативными цепями, основной составляющей которой является мощность, затрачиваемая приводом на отключение и включение выключателей.

Наибольшие затруднения из-за недостаточной мощности возникают при применении трансформаторов тока и трансформаторов напряжения. Учитывая, что включение и отключение выключателей является кратковременной операцией, можно допускать значительные перегрузки измерительных трансформаторов без ущерба для них.

На практике встречаются две схемы питания от трансформаторов тока:

а) с непосредственным питанием оперативных цепей током основных трансформаторов тока;

б) с питанием оперативных цепей от вспомогательных — промежуточных трансформаторов тока *ПНТ*.

Первая схема с непосредственным использованием тока основных трансформаторов тока показана на рис. 1-13.

В нормальном режиме катушка отключения выключателя *2* зашунтирована контактами реле *1* и ток в ней отсутствует. При к. з. реле *1* срабатывает, его контакты размыкаются и ток трансформаторов тока поступает в катушку отключения *2*, приводя ее в действие.

Вторая схема изображена на рис. 1-14. При возникновении к. з. в реле *1* появляется ток к. з. $I_р$, под действием которого оно срабатывает, замыкая своими контактами цепь вторичной обмотки ПНТ *2*, в результате чего в катушке отключения *3* появляется ток и выключатель отключается.

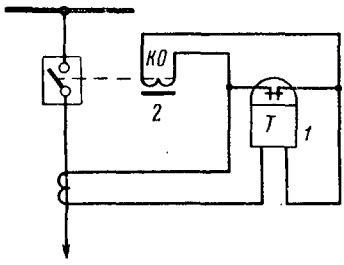


Рис. 1-13. Принципиальная схема питания оперативных цепей защиты переменным током непосредственно от трансформатора тока.

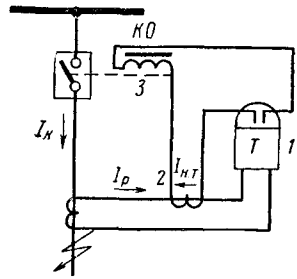


Рис. 1-14. Принципиальная схема питания оперативных цепей защиты переменным током от трансформатора тока через вспомогательный насыщающийся трансформатор тока ПНТ.

Источником, непосредственно питающим оперативную цепь, является ПНТ *2*, который должен быть рассчитан на работу с разомкнутой вторичной обмоткой, что следует из схемы на рис. 1-14.

Для облегчения условий работы контактов реле, замыкающих вторичную обмотку ПНТ, и уменьшения тока в катушке отключения выключателя вторичный ток вспомогательного трансформатора ограничивается до величины, достаточной для надежного действия катушки отключения.

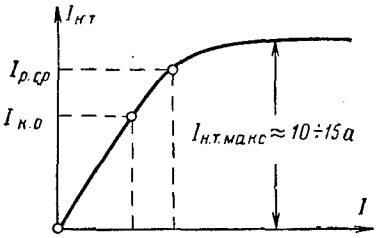


Рис. 1-15. Зависимость вторичного тока $I_{н.т}$ от первичного тока I вспомогательного насыщающегося трансформатора тока, $I_{к.о}$ — ток срабатывания катушки отключения.

Для выполнения поставленных требований ПНТ изготовляются с магнитопроводом, начинающим насыщаться при токах срабатывания реле $I_{с.р}$. Примерный характер зависимости вторичного тока $I_{н.т}$ такого насыщающегося трансформатора от первичного тока I изображен на рис. 1-15.

Рекомендуется к применению первая схема (рис. 1-13) как более простая и надежная. При этом нужно иметь в виду, что контакт реле *1*, осуществляющий в этой схеме дешунтирование катушки отключения, должен быть рассчитан на операцию с большими токами (примерно 100—150 *а*). Практическое применение получила

схема, приведенная на рис. 4-18, 4-19, в которой используются реле со специальными мощными переключающими контактами.

Вторая схема не рекомендуется к использованию, так как при больших токах к. з. и насыщении трансформаторов тока и ПНТ в их вторичных обмотках возникают пикообразные импульсы высокого

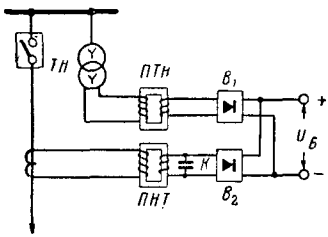


Рис. 1-16. Принципиальная схема комбинированного блока питания для питания оперативных цепей защиты выпрямленным переменным током.

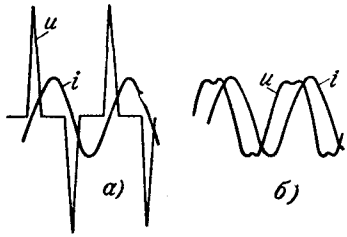


Рис. 1-17. Влияние конденсатора C на напряжение и ток насыщающегося трансформатора ПНТ блока.

а — кривые тока и напряжения ПНТ без конденсатора; *б* — то же при наличии конденсатора C.

напряжения (рис. 1-17, *а*), опасные для изоляции ПНТ и основных трансформаторов тока [Л. 13].

Схемы комбинированного питания от трансформаторов тока и трансформаторов напряжения. Для повышения мощности и создания универсального источника, пригодного для питания защит как от к. з., так и от повреждений и ненормальных режимов, не сопровождающихся увеличением тока, ВНИИЭ разработаны специальные блоки питания. Принципиальная схема комбинированного блока питания приведена на рис. 1-16.

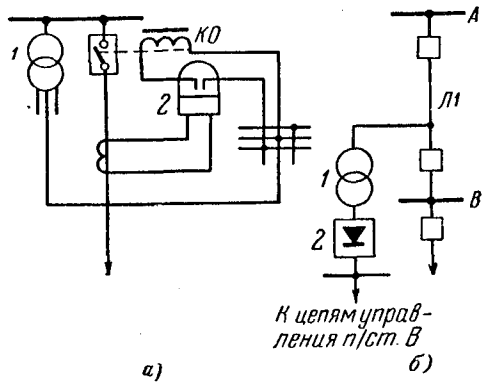


Рис. 1-18. Схема питания оперативных цепей от трансформатора напряжения (*а*) или трансформатора собственных нужд (б).

Ток от трансформатора тока и напряжение от трансформатора напряжения подводятся к промежуточным трансформаторам ПНТ и ПТН. Их вторичное напряжение выпрямляется выпрямителями B_1 и B_2, суммируется и подается на оперативные цепи защиты. В последнее время блоки тока БПТ и напряжения БПН выпускаются раздельно, что позволяет применять их порознь и вместе. При этом комбинированный блок легко

получается параллельным включением выходных цепей БПТ и БПН. Для ограничения величины вторичного тока трансформатор ПНТ выполняется, как и в схеме на рис. 1-14, насыщающимся. Чтобы избежать появления опасных пиков напряжений (рис. 1-17, *а*), во вторичной цепи ПНТ установлен конденсатор *К*, сглаживающий кривую вторичного напряжения, как показано на рис. 1-17, *б*. Напряжение на выходе блока $U_Б$ определяется током и напряжением сети. При к. з. необходимое значение выходного напряжения обеспечивается за счет трансформаторов тока, а при повреждениях и ненормальных режимах с малым током — за счет трансформатора напряжения. Таким образом, комбинированный блок может питать защиты от всех видов повреждения и ненормальных режимов, и в то же время позволяет иметь на выключателе только одну катушку отключения.

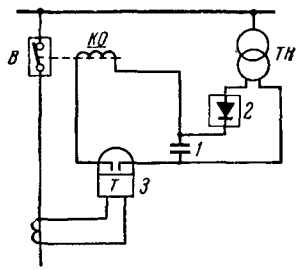


Рис. 1-19. Принципиальная схема питания оперативных цепей защиты переменным током с использованием энергии заряда конденсатора.

Блоки питания особенно удобны для питания защит, имеющих сложную схему оперативных цепей, состоящую из большого числа вспомогательных реле.

Схемы с питанием от трансформаторов напряжения или собственных нужд показаны на рис. 1-18, *а*, *б*. Схема на рис. 1-18, *а* применяется только для питания оперативных цепей защит. Для питания цепей управления и включения обычно используется выпрямленный ток (рис. 1-18, *б*). Выпрямление осуществляется селеновыми выпрямителями *2*. Трансформатор *1*, питающий цепи управления, необходимо подключать к питающей линии *Л1*. При включении *Л1* со стороны питающей подстанции *А* трансформатор *1* получает напряжение, после чего появляется возможность проведения операций на подстанции *В*, не имеющей напряжения.

Схема с питанием от заряженного конденсатора. На рис. 1-19 изображена упрощенная схема питания оперативных цепей от заряженного конденсатора. Конденсатор *1* питается от трансформатора напряжения через выпрямитель *2*. В нормальном режиме конденсатор заряжен. При действии защиты он замыкается на катушку отключения, питая ее током разряда.

Рассмотренные схемы питания оперативных цепей от источников переменного тока отличаются простотой и достаточной надежностью [Л. 8]. Однако вопросы применения оперативного переменного тока для сложных защит, мощных выключателей, а также на больших электростанциях и подстанциях еще недостаточно разработаны, что и ограничивает применение источников переменного тока.

В СССР питание оперативных цепей от источников переменного тока получило широкое применение в электрических сетях 6, 10 и 35 *кв* и отчасти 110 *кв* [Л. 24, 80].

Глава вторая

РЕЛЕ

2-1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕ

В схемах релейной защиты и электрической автоматики применяются электромеханические реле, реле на полупроводниковых приборах (диодах и транзисторах) и реле с использованием насыщающихся магнитных систем. Наибольшее распространение пока имеют электромеханические реле.

Однако наличие таких недостатков электромеханических реле, как большие размеры, значительное потребление мощности от трансформаторов тока и напряжения, трудности в обеспечении надежной работы контактов побудили к поискам более совершенных принципов выполнения реле. Новые принципы исполнения реле с помощью полупроводниковых приборов позволяют существенно улучшить параметры и характеристики реле и перейти полностью или частично на бесконтактные схемы защит. Постепенно новые принципы выполнения реле находят все большее практическое применение.

Помимо реле, реагирующих на электрические величины, для защиты электрических машин и аппаратов применяются реле, реагирующие на неэлектрические величины, косвенным образом характеризующие появления повреждений или ненормальных режимов в них. Например, имеются реле, реагирующие на появления газов или повышение давления в кожухах маслонаполненных трансформаторов и реакторов; реле, реагирующие на повышение температуры трансформаторов и электрических машин и т. д.

Реле, реагирующие на электрические величины, можно подразделить на три группы:

реле, реагирующие на одну электрическую величину: ток или напряжение;

реле, реагирующие на две электрические величины: ток и напряжение сети или два напряжения U_{I} и U_{II}, каждое из которых является линейной функцией тока и напряжения сети;

реле, реагирующие на три или больше электрических величины, например: три тока и три напряжения сети, или несколько напряжений, представляющих линейные функции токов и напряжения сети.

К первой группе относятся реле тока и реле напряжения. Ко второй принадлежат однофазные реле: мощности, сопротивления и некоторые другие. К третьей относятся трехфазные реле мощности, многофазные реле сопротивления и другие устройства.

В данной главе рассматриваются наиболее распространенные принципы устройства основных типов электромеханических реле и реле на полупроводниковых приборах, применяемые во всех видах защит.

Принципы действия и устройство реле, предназначенных для отдельных защит: дифференциальных, дистанционных и других — рассматриваются в главах, посвященных этим защитам.

2-2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

Электромеханические реле могут выполняться на электромагнитном, индукционном, электродинамическом, индукционно-динамическом и магнитоэлектрическом принципах. Отечественная промышленность изготовляет электромеханические реле в основном на электромагнитном и индукционном принципах, которые позволяют создать все требующиеся в эксплуатации разновидности реле.

Переходя к рассмотрению электромеханических конструкций, следует отметить некоторые наиболее важные и общие требования, предъявляемые к основным элементам этих реле: контактам и обмоткам.

К о н т а к т ы р е л е являются очень ответственным элементом в схемах защит. Они должны обеспечить надежное замыкание и размыкание тока в управляемых ими цепях и быть рассчитаны на многократное действие.

Коммутационная способность контактов условно характеризуется мощностью, при которой они обеспечивают замыкание и размыкание цепей. Величина этой мощности $S_к$ выражается как произведение напряжения источника оперативного тока U на наибольший ток $I_к$, прохождение которого допускается через контакт, т. е. $S_к = UI_к$.

О б м о т к и р е л е должны обладать термической устойчивостью, характеризуемой в зависимости от типа реле величинами тока или напряжения, допускаемыми длительно и кратковременно, и иметь приемлемую потребляемую мощность $S_р$, характеризуемую произведением тока $I_р$, проходящего по обмотке, на напряжение $U_р$ на зажимах этой обмотки.

Потребляемая мощность $S_р$ зависит от усилий, которые должны создать намагничивающие силы обмоток для приведения в действие подвижной системы реле.

2-3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ

а) Принцип действия

На рис. 2-1 представлены три основные разновидности конструкций электромагнитных реле.

Каждая конструкция включает в себя электромагнит *1*, состоящий из стального сердечника и обмотки, стальной подвижный якорь *2*, несущий подвижный контакт *3*, неподвижные контакты *4* и противодействующую пружину *5*.

Проходящий по обмотке электромагнита ток $I_р$ создает намагничивающую силу (н. с.) $I_р w_р$, под действием которой возникает маг-

нитный поток Ф, замыкающийся через сердечник электромагнита, воздушный зазор и якорь, который намагничивается и в результате этого притягивается к полюсу электромагнита. Переместившись в конечное положение, якорь своим подвижным контактом *3* замыкает неподвижные контакты реле *4*. Начальное положение якоря ограничивается упором *6*.

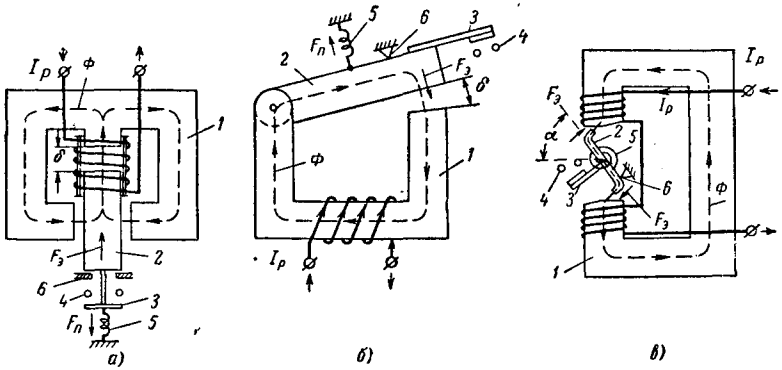


Рис. 2-1. Типы электромагнитных реле.

а — с втягивающимся якорем; *б* — с поворотным якорем; *в* — с поперечным движением якоря.

Электромагнитная сила, притягивающая стальной якорь к электромагниту, пропорциональна квадрату магнитного потока Ф в воздушном зазоре[1].

$$F_э = k\Phi^2. \tag{2-1}$$

Магнитный поток Ф и создающий его ток $I_р$ связаны соотношением

$$\Phi = \frac{I_1 w_р}{R_м}, \tag{2-2}$$

где $R_м$ — магнитное сопротивление пути, по которому замыкается магнитный поток Ф, а $w_р$ — количество витков обмотки реле.

Подстановка выражения (2-2) в (2-1) дает:

$$F_э = k\frac{w_р^2}{R_м^2} I_р^2 = k' I_р^2. \tag{2-3}$$

У реле с поворотным якорем и с поперечным движением якоря (рис. 2-1, *б* и *в*) электромагнитная сила образует вращающий момент:

$$M_э = F_э l_р = k'' I_р^2, \tag{2-4}$$

где $l_р$ — плечо силы $F_э$.

---

[1] При питании обмотки реле переменным током под Ф подразумевается мгновенное значение потока.

Коэффициенты k' и k'' в выражениях (2-3) и (2-4) зависят от $R_м$ и поэтому сохраняют постоянное значение только при отсутствии насыщения.

Из (2-3) и (2-4) следует, что сила притяжения $F_э$ или ее момент $M_э$ пропорциональны квадрату тока $I_р$ в обмотке реле и имеют, следовательно, постоянное направление, не зависящее от направления (знака) этого тока. Поэтому электромагнитный принцип пригоден для выполнения реле как постоянного, так и переменного тока и широко используется для изготовления реле тока, напряжения, промежуточных, сигнальных и реле времени.

При перемещении якоря электромагнитного реле уменьшаются воздушный зазор δ (рис. 2-1) и соответственно $R_м$. При постоянстве тока в реле уменьшение $R_м$ вызывает увеличение магнитного потока Ф [см. формулу (2-3)], что обусловливает в свою очередь соответствующее возрастание силы $F_э$.

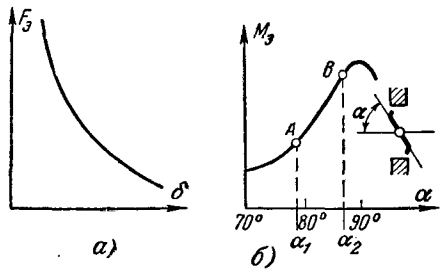


Рис. 2-2. Зависимость электромагнитной силы $F_э$ и электромагнитного момента $M_э$ от воздушного зазора.

а — реле с поворотным якорем $F_э = f(\delta)$; *б* — реле с поперечным движением якоря $M_э = f(\alpha)$.

Таким образом, сила $F_э$ и момент $M_э$ являются некоторой функцией положения якоря, характеризуемого зазором δ [а в системах с поперечным движением якоря (рис. 2-1, *в*) — углом α], и возрастают с уменьшением воздушного зазора.

Наиболее просто эта зависимость находится для реле с поворотным якорем (рис. 2-1, *б*), у которых магнитное поле в воздушном зазоре однородно. В этом случае магнитное сопротивление воздушного зазора $R_м = \delta/4\pi s$. Подставляя его в (2-3) и пренебрегая магнитным сопротивлением пути по стали, получаем:

$$F_э = k\frac{I_р^2}{\delta^2}. \qquad (2\text{-}5)$$

Следовательно, сила притяжения у реле с поворотным якорем обратно пропорциональна квадрату воздушного зазора δ.

У реле с поперечным движением якоря и с втягивающимся якорем поле в воздушном зазоре нельзя считать однородным. Для этих конструкций зависимость $F_э = f(\delta)$ имеет сложный характер (рис. 2-2, *а* и *б*). Ее можно выразить через производную магнитной проводимости воздушного зазора [Л. 9] уравнением

$$F_э = \frac{1}{2} w_р^2 I_р^2 \frac{dG_м}{d\delta}, \qquad (2\text{-}6)$$

где $G_м$ — магнитная проводимость, равная $1/R_м$.

Это выражение носит общий характер. Оно справедливо при отсутствии насыщения для всех конструкций электромагнитных реле и обычно используется при их расчетах.

Кривые на рис. 2-2 построены в предположении, что ток при перемещении якоря не меняется, т. е. что он не зависит от реактивного сопротивления $x_р$ обмотки реле, изменяющегося при изменении магнитного потока Ф. К этой группе реле относятся токовые реле, питающиеся переменным током сети ($I_р$), на который не влияют параметры реле, и реле постоянного тока, у которых $I_р$ не зависит от $x_р$.

б) Ток срабатывания, ток возврата и коэффициент возврата

Для срабатывания реле необходимо, чтобы электромагнитная сила или ее момент превосходили силы сопротивления пружины $F_п$, трения и веса $F_т$. Реле начинает действовать, когда

$$F_э = F_{э.с.р} = F_п + F_т \text{ или } M_э = M_{э.с.р} = M_п + M_т. \qquad (2\text{-}7)$$

Величине $M_{э.с.р}$ соответствует определенный ток $I_р$, необходимый для срабатывания.

Наименьший ток, при котором реле срабатывает, называется током срабатывания и обозначается $I_{с.р}$.

Подставляя в (2-4) $M_{с.р}$ вместо $M_э$, находим ток

$$I_р = I_{с.р} = \frac{R_м}{w_р}\sqrt{\frac{M_{с.р}}{k}}, \qquad (2\text{-}8)$$

где $M_{с.р} = M_п + M_т$.

В большинстве конструкций предусматривается возможность регулирования $I_{с.р}$, которое, как это следует из (2-8), можно осуществлять путем изменения числа витков обмотки реле $w_р$; величины момента $M_п$ противодействующей пружины; величины воздушного зазора δ с учетом, что $R_м = f(\delta)$.

Наиболее простыми и удобными для практического исполнения являются два первых способа.

Регулирование пружиной позволяет изменять ток срабатывания плавно. При регулировании изменением числа витков ток срабатывания меняется ступенями.

Возврат притянутого якоря в исходное положение при уменьшении тока в обмотке реле происходит под действием пружины *5* (рис. 2-1). Для возврата необходимо, чтобы момент $M_п$ преодолел электромагнитный момент $M_{э.воз}$ и момент трения $M_т$. Условия возврата определяются из уравнения равновесия сил или моментов:

$$F_п = F_{э.воз} + F_т \text{ или } M_п = M_{э.воз} + M_т. \qquad (2\text{-}9)$$

Моменту $M_{э.воз}$ соответствует ток $I_р$, при котором обеспечивается условие (2-9).

Наибольший ток в реле, при котором якорь реле возвращается в начальное положение, называется током возврата реле $I_{воз}$.

Отношение токов $I_{воз}/I_{с.р}$ называется коэффициентом возврата $k_{воз}$. С учетом (2-4)

$$k_{воз} = \frac{I_{воз}}{I_{с.р}} = \sqrt{\frac{M_{воз}}{M_{с.р}}}. \qquad (2\text{-}10)$$

У реле, реагирующих на возрастание тока, $I_{с.р} > I_{воз}$ и $k_{воз} < 1$. Величина $k_{воз}$ у различных конструкций колеблется в довольно широких пределах, от 0,1 до 0,98. Из (2-10) следует, что $k_{воз}$ зависит от соотношения $M_{с.р}$ и $M_{воз}$. Для выяснения этого соотношения следует рассмотреть диаграмму моментов, действующих на якорь реле в функции от величины воздушного зазора δ (рис. 2-3).

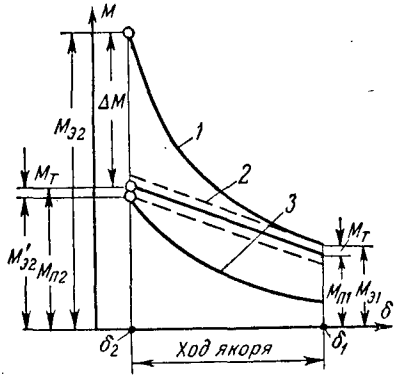


Рис. 2-3. Диаграмма электромагнитных и механических сил при срабатывании и возврате токового реле.

1 — $M_э = f(\delta)$ при $I_р = I_{с.р} = $ пост.; *2* — $M_п = f(\delta)$; *3* — $M_э = f(\delta)$ при $I_р = I_{в.р} = $ пост.

Предположим, что в обмотку электромагнитного реле (например, с поворотным якорем — рис. 2-1, *б*) подан ток, равный току срабатывания. Возникающий при этом электромагнитный момент $M_{э1}$ преодолевает сопротивление пружины и трение ($M_{п1}$ и $M_т$) и приводит в движение якорь. Началу движения якоря соответствует соотношение моментов: $M_{э1} = M_{п1} + M_т$.

По мере перемещения якоря воздушный зазор δ уменьшается от начального значения δ_1 до конечного δ_2 (рис. 2-3), противодействующая пружина растягивается и ее момент $M_п$ (прямая *2*) при этом нарастает по линейному закону (обратно пропорционально изменению δ). Электромагнитный момент $M_э$ (кривая *1*) также увеличивается, но по нелинейной зависимости (2-5), имеющей для реле с поворотным якорем вид параболы. Когда якорь достигает конечного положения δ_2, то благодаря более быстрому нарастанию $M_э$ по сравнению с $M_п$ образуется избыточный момент $\Delta M = M_{э2} - M_{п2}$, обеспечивающий необходимое давление на контактах реле. Для возврата якоря необходимо уменьшить ток в обмотке реле от $I_{с.р}$ до значения $I_{в.р}$ при котором электромагнитный момент $M_э$ снизится от $M'_{э2} = k\frac{I^2_{с.р}}{\delta_2^2}$ до $M'_{э2} = k\frac{I^2_{воз}}{\delta_2^2}$ (рис. 2-3).

При этом условии момент пружины $M_{п2}$ преодолевает электромагнитный момент $M'_{э2}$ и момент трения $M_т$, и якорь реле возвращается в начальное положение δ_1.

Из диаграммы следует, что чем больше избыточный момент ΔM и трение $M_т$, тем больше разница между $I_{воз}$ и $I_{с.р}$ и, следовательно, меньше $k_{воз}$.

Для улучшения коэффициента возврата необходимо обеспечить:

а) совпадение или наибольшее сближение характеристик изменения моментов $M_э$ и $M_п$ (прямая *2* и кривая *1*), что достигается подбором такого участка кривой $M_э = f(\delta)$, где имеется лучшее совпадение с характеристикой пружины $M_п = f(\delta)$. На диаграмме рис. 2-2, *б* таким участком является отрезок AB, которому соответствует угол поворота якоря от α_1 до α_2.

Улучшения $k_{воз}$ можно достигнуть также за счет сокращения хода подвижной системы изменением конечного положения якоря δ_2, что приводит к уменьшению ΔM (рис. 2-3);

б) уменьшение трения в осях подвижной системы (якоря) реле.

Некоторое ухудшающее влияние на $k_{воз}$ оказывает гистерезис.

в) Реле максимального и минимального действия

Рассмотренные реле действуют при возрастании тока в их обмотке и поэтому являются максимальными.

Реле, действующие при уменьшении тока, называются минимальными. В нормальных условиях якорь минимального реле находится в притянутом положении (рис. 2-4); при этом $M_э > M_п$ и контакты реле разомкнуты. Для срабатывания реле необходимо уменьшить ток в реле до такого значения, при котором момент пружины превзойдет по величине электромагнитный момент и момент трения $M_п > M_э + M_т$, в результате чего якорь реле отойдет и контакты реле замкнутся.

Током срабатывания минимального реле называется наибольший ток, при котором отпадает якорь реле, а током возврата — наименьший ток, при котором притягивается якорь реле. Как у максимальных реле, отношение $I_{в.р}$ к $I_{с.р}$ называется коэффициентом возврата реле. У минимальных реле $I_{воз} > I_{с.р}$, поэтому $k_{воз} > 1$.

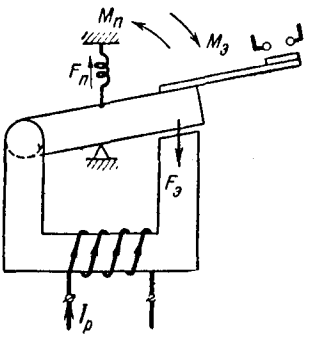


Рис. 2-4. Принцип устройства реле минимального тока или напряжения.

г) Вибрация якоря реле при работе реле на переменном токе

Реле переменного тока питается током $i_р = I_m \sin \omega t$, при этом мгновенное значение $F_{эt} = kI_р^2 = kI_m^2 \sin^2 \omega t$. С учетом, что $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$, получим $F_{эt} = kI_m^2 - kI_m^2 \cos 2\omega t$.

Следовательно, мгновенное значение $F_{эt}$ содержит две составляющие: п о с т о я н н у ю kI_m^2 и п е р е м е н н у ю $kI_m^2 \cos 2\omega t$, изменяющуюся с двойной частотой. Результирующая электромагнитная сила $F_э$ имеет пульсирующий характер, дважды изменяясь от нуля до максимального значения в течение каждого периода (рис. 2-5). В то же время противодействующая сила пружины $F_п$ имеет неизменное значение.

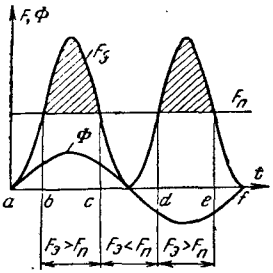


Рис. 2-5. Изменение силы притяжения якоря $F_э$ электромагнитного реле при прохождении по его обмотке переменного тока.

В результате в период времени *ab*, *cd*, *ef* и т. д. (рис. 2-5), когда $F_п > F_{эt}$, якорь реле стремится отпасть, а в периоды времени *bc*, *de* и т. д., когда $F_{эt} > F_п$ — вновь втянуться. Притянутый якорь при этом непрерывно вибрирует вследствие периодического изменения знака действующей на него результирующей силы $F_{рез} = F_{эt} - F_п$.

Вибрация якоря оказывает вредное влияние на работу реле, вызывает вибрацию контактов при срабатывании, что приводит к их подгоранию, а также вызывает износ осей и цапф, на которые они опираются.

При большом моменте инерции якоря он не успевает следовать за быстрым изменением знака результирующей силы $F_{рез} = F_э - F_п$, в таких случаях вибрации не наблюдается. Если же момент инерции якоря недостаточен, то для устранения вибрации применяется расщепление магнитного потока обмотки на две составляющие, сдвинутые по фазе. Расщепление достигается или при помощи короткозамкнутого витка *К* (рис. 2-6), или путем выполнения обмотки реле в виде двух параллельных секций с разными угловыми сдвигами, расположенных на разных магнитопроводах (рис. 2-9).

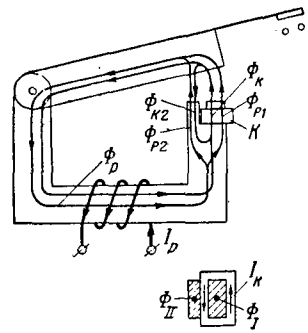


Рис. 2-6. Принцип устройства электромагнитного реле с короткозамкнутым витком.

В реле, изображенном на рис. 2-6, короткозамкнутый виток охватывает часть сечения магнитопровода. Под влиянием магнитного потока, пронизывающего виток, в нем возникает ток $I_к$, создающий поток $\Phi_к$. На рис. 2-6 показаны положительные направления магнитных потоков и пути, по которым они замыкаются.

Из-под сечения, охваченного короткозамкнутым витком, выходит результирующий поток Φ_I, состоящий из части потока обмотки реле $\Phi_{р1}$ и потока $\Phi_к$, проходящих через это сечение:

$$\dot{\Phi}_I = \dot{\Phi}_{р1} + \dot{\Phi}_к. \qquad (2\text{-}11)$$

Из-под сечения, не охваченного короткозамкнутым витком, выходит магнитный поток $\dot{\Phi}_{II}$, состоящий из потока обмотки реле $\dot{\Phi}_{p2}$ и части магнитного потока короткозамкнутого витка $\dot{\Phi}_{к2}$:

$$\dot{\Phi}_{II} = \dot{\Phi}_{p2} - \dot{\Phi}_{к2}. \qquad (2\text{-}12)$$

Построение диаграммы на рис. 2-7 начинается с вектора $\dot{\Phi}_I$. Затем строится э. д. с. $E_к$, наведенная в короткозамкнутом витке потоком $\dot{\Phi}_I$, отстающая от него на 90°. Ток в короткозамкнутом витке $\dot{I}_к$ почти совпадает с э. д. с. $\dot{E}_к$ вследствие малой индуктив-

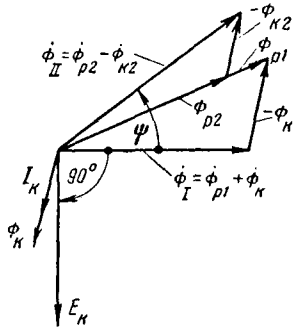


Рис. 2-7. Векторная диаграмма магнитных потоков реле на рис. 2-6.

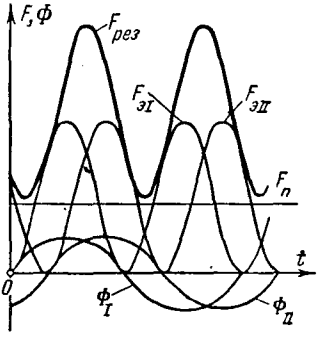


Рис. 2-8. Изменение силы притяжения якоря $F_{рез}$ у электромагнитного реле с короткозамкнутым витком при прохождении по его обмотке переменного тока.

ности витка. Пренебрегая потерями на намагничивание, поток $\Phi_к$ показываем совпадающим с создающим его током $\dot{I}_к$.

Зная $\dot{\Phi}_I$ и $\dot{\Phi}_к$, из выражения (2-11) находим:

$$\dot{\Phi}_{p1} = \dot{\Phi}_I - \dot{\Phi}_к.$$

Магнитный поток $\dot{\Phi}_{p2}$ совпадает по фазе с потоком $\dot{\Phi}_{p1}$, так как они создаются одной и той же н. с. ($I_p w_p$) и имеют однородное магнитное сопротивление. На основании выражения (2-12) находится поток $\dot{\Phi}_{II}$.

Полученная векторная диаграмма (рис. 2-7) показывает, что магнитный поток $\dot{\Phi}_I$ всегда сдвинут относительно потока $\dot{\Phi}_{II}$ на угол ψ. Сдвиг по фазе магнитных потоков обусловлен наличием потока $\dot{\Phi}_к$.

Каждый из магнитных потоков (рис. 2-8) $\Phi_I = \Phi_{I\,макс} \times \sin \omega t$ и $\Phi_{II} = \Phi_{II\,макс} \sin(\omega t + \psi)$ создает силы $F_{эI}$ и $F_{эII}$, кривые изменения которых смещены так же, как и магнитные потоки. В результате этого при уменьшении одного из потоков второй нарастает, не позволяя электромагнитной силе понизиться до нуля. Для устранения вибрации результирующая сила

$$F_{рез} = F_{эI} + F_{эII} = k_1 \Phi_I^2 \sin^2 \omega t + k \Phi_{II}^2 \sin^2(\omega t + \psi) \qquad (2\text{-}12а)$$

должна в каждый момент времени превышать $F_п$. Наилучшие результаты получаются при $\psi = 90°$ и $\Phi_I = \Phi_{II}$; в этом случае $F_{рез}$ имеет постоянное значение (см. 12-2а).

Аналогичный результат достигается при исполнении обмотки реле в виде двух секций: *1* и *2*, расположенных на двух полюсах магнитопровода (рис. 2-9, *а*).

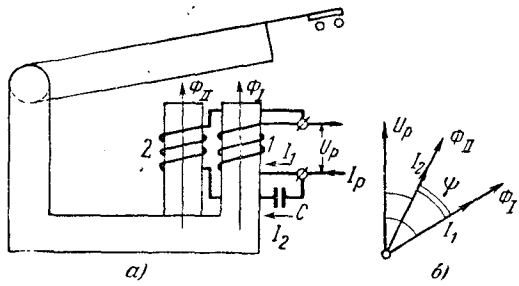


Рис. 2-9. Принцип устройства электромагнитного реле с расщепленным магнитопроводом.
а — устройство реле; *б* — векторная диаграмма.

Обмотка *1* подключается непосредственно к источнику питания, а обмотка *2* — через конденсатор *C*. В результате токи I_1 и I_2 имеют различные сдвиги относительно напряжения $U_р$ на зажимах реле. Построив векторную диаграмму (рис. 2-9, *б*) токов и потоков, устанавливаем, что потоки Φ_I и Φ_{II} имеют сдвиг по фазе ψ. Следовательно, результирующая электромагнитная сила $F_{рез} = F_{эI} + F_{эII}$ имеет такой же характер, как и на рис. 2-8.

2-4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

а) Токовые реле

При включении обмотки электромагнитного реле на ток сети непосредственно или через трансформаторы тока его электромагнитный момент $M_э = kI_c^2$. Такое реле называется токовым, так как его поведение зависит от тока сети I_c.

Для уменьшения нагрузки на трансформаторы тока токовые реле должны иметь по возможности малое потребление мощности. Обмотки токовых реле должны рассчитываться на длительное прохождение токов нагрузки и кратковременное — токов к. з. Коэффициент возврата реле должен приближаться к единице.

Конструкция токового реле типа ЭТ-520 показана на рис. 2-10 [Л. 10, 11]. Время действия этого реле имеет величину примерно 0,02—0,04 *сек*; потребление 0,1 *ва* на минимальной уставке срабатывания; коэффициент возврата не менее 0,85. Ток срабатывания регулируется плавно изменением натяжения пружины. Обмотка реле состоит из двух секций, что позволяет путем параллельного и

последовательного включений секций изменять пределы регулирования тока срабатывания в 4 раза.

На рис. 2-11 приведена конструкция нового токового реле с поперечным движением якоря типа РТ-40. В этом реле улучшена

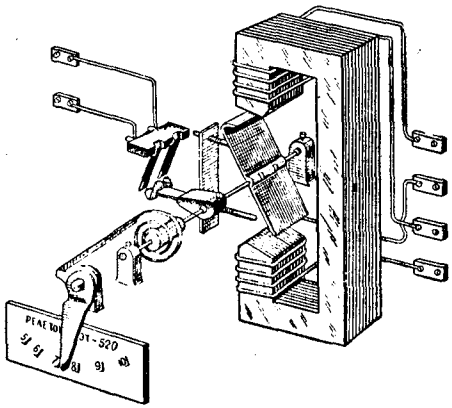


Рис. 2-10. Токовое электромагнитное реле типа ЭТ-521.

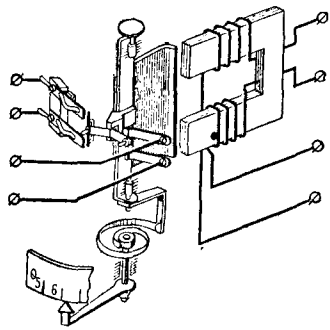


Рис. 2-11. Токовое электромагнитное реле типа РТ-40.

контактная система и увеличен противодействующий момент, в результате последнего потребление мощности у него больше, чем у реле ЭТ. Потребление РТ-40 на минимальной уставке для реле разной чувствительности колеблется от 0,2 до 8 *ва*.

б) Реле напряжения

Включая обмотку реле на напряжение сети непосредственно или через трансформатор напряжения, получим реле, реагирующее на величину напряжения сети $U_с$.

Действительно, $M_э = kI_р^2$, но ток в реле $I_р = U_р/z_р$, где $z_р$ — сопротивление обмотки реле; $U_р$ — напряжение на зажимах реле.

Следовательно, $M_э = k'U_р^2$ или с учетом, что $U_р = U_с/n_н$, $M_э = k''U_с^2$. Это означает, что поведение реле определяется напряжением сети.

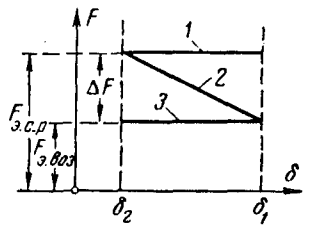


Рис. 2-12. Диаграмма электромагнитных и механических сил при срабатывании и возврате реле напряжения.

1 — $F_э = f(\delta)$ при $U_р = U_{ср} = \text{пост.}$; *2* — $F_п = f(\delta)$; *3* — $F_э = f(\delta)$ при $U_р = U_{воз} = \text{пост.}$

При движении якоря изменение воздушного зазора δ не вызывает изменения потока и силы $F_э$; в этом состоит важное отличие реле напряжения от токовых реле. Причина этого заключается в том, что при уменьшении δ возрастает индуктивное сопротивление обмотки реле $x_р = \omega L$, вызывающее уменьшение тока в реле $I_р = U_р/x_р$. Одновременно с этим уменьшается и сопротивление магнитной цепи реле $R_м$. При этом влияние изменения тока $I_р$ компенсируется соответствующим изменением магнитного сопротивления $R_м$, в результате чего магнитный поток реле $\Phi = I_р w_р/R_м$ остается неизменным.

Сопоставляя кривые $F_э = f_1(\delta)$ и $F_п = f_2(\delta)$ на рис. 2-12, легко видеть, что коэффициент возврата реле будет низким. Для повышения коэффициента возврата обмотки реле напряжения делают с преобладанием активного сопротивления. Изменение реактивного сопротивления при таких условиях не оказывает заметного влияния на величину тока, и последний остается неизменным.

Тогда характер зависимости $F_э = f_1(\delta)$ будет соответствовать рис. 2-2, что обеспечивает удовлетворительный коэффициент возврата.

Отечественные заводы изготовляют реле типов ЭН-520 и РН-50, конструкции их аналогичны изображенным на рис. 2-10 и 2-11 соответственно.

2-5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ РЕЛЕ

а) Назначение реле и требования к ним

Промежуточные реле являются вспомогательными и применяются, когда необходимо одновременно замыкать или размыкать несколько независимых цепей или когда требуется реле с мощными контактами для замыкания и размыкания цепи с большим током.

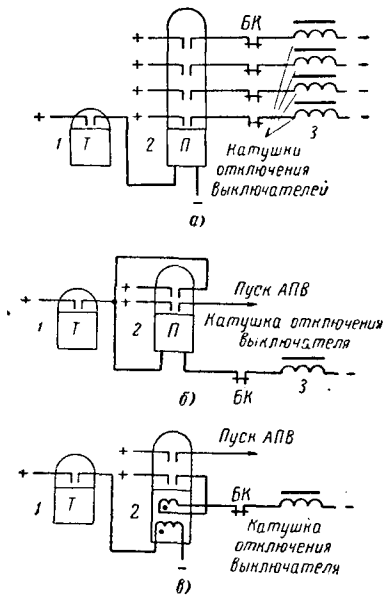


Рис. 2-13. Схема включения промежуточных реле.

а — параллельное включение; *б* — последовательное включение; *в* — параллельное включение с удерживающей последовательно включенной катушкой.

Простейший пример использования промежуточного реле в схемах защиты приведен на рис. 2-13, *а — в*.

Промежуточные реле по способу включения подразделяются на реле параллельного (рис. 2-13, *а*) и последовательного (рис. 2-13, *б*) включения.

Обмотки первых включаются на полное напряжение источника питания, а вторых — последовательно с катушкой отключения выключателя или какого-либо другого аппарата или реле на ток цепи.

Кроме того, выпускаются реле с дополнительными удерживающими катушками, например реле параллельного включения с удерживающей обмоткой, включаемой последовательно в управляемую контактами реле цепь (рис. 2-13, *в*). Такое реле, подействовав от кратковременного импульса, поданного в параллельно включенную обмотку, остается в сработанном состоянии под действием тока удерживания, пока не завершится операция.

Для одновременного замыкания нескольких не связанных друг с другом цепей промежуточные реле имеют несколько контактов.

Мощность контактов должна быть достаточной для замыкания и размыкания цепей защиты (обычно потребляющих 50—200 *вт*) или цепей управления выключателей (1 500—2 000 *вт*).

Потребление обмоток реле параллельного включения стремятся ограничить до 3—6 *вт*, с тем чтобы их цепь могли замыкать реле с маломощными контактами.

Потребление обмоток реле последовательного включения выбирается из условия минимального падения напряжения в сопротивлении обмотки этого реле, которое допускается не более 5—10% нормального напряжения источника оперативного тока.

Промежуточные реле должны надежно действовать не только при нормальном напряжении, но и при возможном в условиях эксплуатации его понижении, достигающем 15—20%.

С учетом запаса напряжение срабатывания реле параллельного включения принимается 60—70% номинального значения.

К коэффициенту возврата промежуточных реле не предъявляется каких-либо требований, так как их возврат происходит при отсутствии тока в обмотке реле.

В схемах защиты промежуточные реле вносят нежелательное замедление, поэтому, за исключением особых случаев, их время должно быть очень малым, особенно когда они применяются в быстродействующих защитах.

Быстродействующие промежуточные реле должны работать со временем не более 0,01—0,02 *сек*. Время срабатывания обычных промежуточных реле колеблется в зависимости от конструкции от 0,02 до 0,1 *сек*.

б) Конструкции промежуточных реле [Л. 10]

Большинство промежуточных реле выполняется при помощи системы с поворотным якорем, позволяющей создавать большую

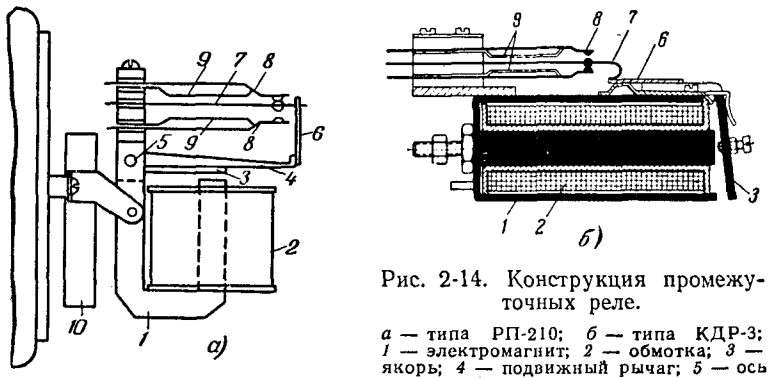


Рис. 2-14. Конструкция промежуточных реле.

а — типа РП-210; *б* — типа КДР-3; *1* — электромагнит; *2* — обмотка; *3* — якорь; *4* — подвижный рычаг; *5* — ось якоря; *6* — изолирующая пластина якоря; *7* — подвижные контакты; *8* — неподвижные контакты; *9* — упорные пластины; *10* — сопротивление добавочное.

электромагнитную силу при относительно малом потреблении и удобной для изготовления многоконтактных реле. Применяются также системы с втягивающимся якорем. На рис. 2-14 показаны

образцы промежуточных реле. Реле типа РП-210 (рис. 2-14, *а*) имеют четыре контакта. Время их срабатывания равно 0,01 *сек*, потребление 5—8 *вт*, разрывная мощность контактов 50 *вт*. Широкое распространение получили кодовые реле (КДР) (рис. 2-14, *б*). Время срабатывания этих реле равно 0,01 ÷ 0,02 *сек*, потребление обмотки не более 3 *вт*.

Реле последовательного включения отличаются от реле параллельного включения лишь обмоточными данными.

в) Время действия промежуточных реле

При включении обмотки промежуточного реле на напряжение $U_р$ ток в обмотке устанавливается не сразу. Он нарастает в течение некоторого времени от нуля до установившегося значения $I_{р.у} = U_р/r_р$, как показано на рис. 2-15.

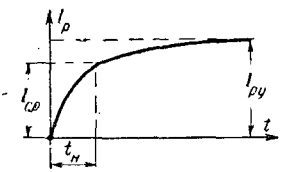


Рис. 2-15. Нарастание тока в обмотке промежуточного реле постоянного тока при замыкании ее цепи.

Кривая нарастания тока в реле [Л. 9] выражается уравнением

$$I_р = \frac{U_р}{r_р}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \qquad (2\text{-}13)$$

где $T = L_р/r_р$ называется постоянной времени цепи обмотки реле.

Движение якоря начинается спустя некоторое время $t_н$, когда ток в реле достигнет значения $I_{с.р}$, необходимого для действия реле (рис. 2-15).

Перемещение якоря из начального положения в конечное, при котором замыкаются контакты реле, также требует некоторого времени $t_д$.

Таким образом, *полное время действия реле* $t_р$ *складывается из времени нарастания тока в обмотке якоря* $t_н$ *до значения* $I_{с.р}$ *и времени движения якоря* $t_д$:

$$t_р = t_н + t_д. \qquad (2\text{-}14)$$

Из диаграммы на рис. 2-15 следует, что $t_н$ зависит от скорости нарастания тока $I_р$, которая определяется постоянной времени T; величины тока $I_{с.р}$, определяемой силой противодействующей пружины реле; величины установившегося тока $I_{р.у}$.

Составляющая $t_д$ зависит от величины хода якоря и скорости его перемещения.

Абсолютное значение $t_д$ невелико (составляет тысячные доли секунды), поэтому у реле постоянного тока время действия практически определяется $t_н$.

Для получения быстродействующих промежуточных реле нужно уменьшать T, ослаблять противодействующую пружину реле и увеличивать кратность тока $k = I_{р.у}/I_{с.р}$.

При включении реле в его сердечнике появляются вихревые токи, замедляющие нарастание магнитного потока и увеличиваю-

щие, таким образом, время $t_н$. Поэтому у быстродействующих реле магнитная система выполняется из шихтованной стали.

Уменьшение $t_д$ в быстродействующих реле достигается в основном путем облегчения подвижной системы и уменьшения трения.

К числу быстродействующих реле, применяемых в отечественных защитах, относятся реле типа РП-210, кодовые реле КДР-1 и реле МКУ; их время действия $t_р = 0{,}01$ *сек*.

г) Промежуточные реле постоянного тока замедленного действия

В ряде случаев в схемах защиты и автоматики требуются промежуточные реле, замыкающие или размыкающие свои контакты с некоторым замедлением. Замедление в таких реле получается за счет повышения составляющей $t_н$ (2-14) путем увеличения постоянной времени T обмотки.

Замедленное действие реле при втягивании якоря достигается размещением на магнитопроводе короткозамкнутой обмотки *2*, выполняемой в виде медной цилиндрической гильзы, поверх которой наматывается основная обмотка *1* (рис. 2-16), или в виде медных шайб.

При включении обмотки *1* на напряжение $U_р$ магнитный поток $Ф_1$ в магнитопроводе реле устанавливается не сразу.

В момент включения в обмотке *2* возникает ток I_2, создающий магнитный поток $Ф_2$, который противодействует нарастанию тока в обмотке *1*. В результате этого скорость нарастания тока в обмотке реле уменьшается (рис. 2-17), а время $t_н$ увеличивается.

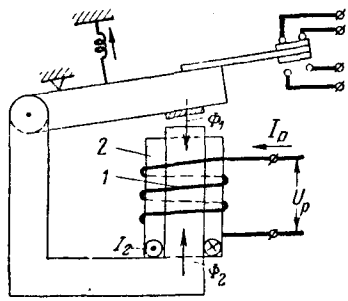


Рис. 2-16. Принцип устройства промежуточного реле замедленного действия.

Для увеличения времени действия реле необходимо располагать обмотки *1* и *2* концентрически так, чтобы весь магнитный поток $Ф_2$ обмотки *2* пронизывал обмотку *1*, и увеличивать магнитный поток обмотки *2*. Для этого следует увеличивать сечение медной гильзы (отчего возрастает ток I_2) и уменьшать сопротивление магнитопровода реле.

Практически выдержка времени на втягивание якоря в промежуточных реле с короткозамкнутой обмоткой относительно невелика и не превосходит 0,5 *сек*.

Замедленное действие при отпадании якоря также может быть получено при помощи короткозамкнутой обмотки *2* (рис. 2-16).

В момент отключения тока в обмотке *1* магнитный поток $Ф_1$ начинает затухать (рис. 2-18). При этом в обмотке *2* возникает ток I_2, создающий магнитный поток $Ф_2$, который противодействует исчезновению потока $Ф_1$, и поэтому совпадает с ним по направлению.[1]

[1] В этом случае ток I_2 и поток $Ф_2$ направлены противоположно показанному на рис. 2-16.

Таким образом, несмотря на прекращение тока I_1, в магнитопроводе реле продолжает существовать суммарный поток $\dot{\Phi}_р = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2$, поддерживаемый в основном током I_2.

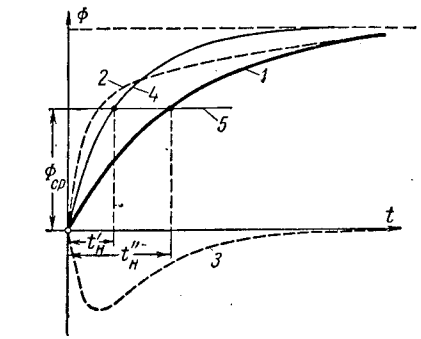


Рис. 2-17. Изменение тока в обмотке промежуточного реле постоянного тока замедленного действия.

1 — результирующий магнитный поток в магнитопроводе при наличии короткозамкнутого витка; *2* — магнитный поток основной обмотки реле; *3* — магнитный поток короткозамкнутого витка; *4* — магнитный поток в магнитопроводе при отсутствии короткозамкнутого витка; *5* — магнитный поток, необходимый для срабатывания реле.

Ток I_2, а вместе с ним поток Φ_2 и, следовательно, поток $\Phi_р$ постепенно затухают (рис. 2-18).

При отсутствии обмотки *2* затухание потока в магнитопроводе $\Phi_р$ происходило бы значительно быстрее, так как в этом случае он поддерживался бы только вихревыми токами, возникающими в стали магнитопровода, влияние которых незначительно.

Чем больше постоянная времени короткозамкнутой обмотки $T_2 = L_2/r_2$, тем медленнее будет спадать магнитный поток Φ_2. Через время $t'_н$ магнитный поток $\Phi_р$ снизится до величины $\Phi_{воз}$; при этом сила пружины превзойдет электромагнитную силу и якорь реле начнет отходить. Спустя время $t'_д$ он переместится в конечное положение. Таким образом, полное время отпадания реле равно $t'_н + t'_д$, при этом $t'_д \ll t'_н$.

Увеличение $t'_н$ достигается уменьшением $\Phi_{воз}$, увеличением начального значения $\Phi_1 = \Phi_{р.у}$ (рис. 2-18) и снижением скорости затухания Φ_2; для последнего необходимо повышать постоянную времени короткозамкнутой обмотки T_2.

Практически для увеличения времени замедления на отпадание якоря реле следует уменьшать зазор (при втянутом якоре), увеличивать размеры гильзы, намагничивающую силу обмотки *1* и ослаблять противодействующую пружину (рис. 2-16).

Отечественные заводы изготовляют реле типов РП-250, КДР-3, РЭВ-81, РЭВ-810, РЭВ-880, имеющие замедленный возврат.

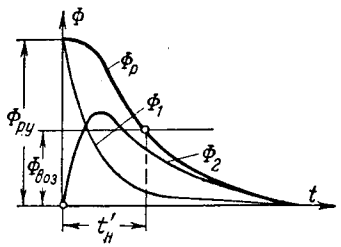


Рис. 2-18. Затухание магнитных потоков в магнитопроводе промежуточного реле замедленного действия при размыкании цепи его обмотки.

Замедление с помощью контура C **и** r. Замедление при размыкании цепи промежуточных реле может достигаться при помощи схем, состоящих из активного сопротивления r и конденсатора C, как показано на рис. 2-19, *а*, *б*. В схеме на рис. 2-19, *а* конденсатор C разряжается на обмотку $П$ при размыкании контактов K_1, благо-

даря чему время отхода якоря увеличивается. Сопротивление r ограничивает ток через конденсатор в момент включения реле $П$. При замыкании контактов K_1 на обмотку реле $П$ подается полное напряжение, и поэтому нарастание тока в ней определяется только ее параметрами.

В схеме на рис. 2-19, *б* действие реле замедляется как при замыкании, так и при размыкании цепи обмотки реле $П$. В момент замыкания контактов K_1 происходит заряд конденсатора C. В нем появляется ток I_C, создающий повышенное падение напряжения на сопротивлении r. Вследствие этого напряжение на зажимах обмотки реле $П$ уменьшается: $U_П = U - (I_C + I_П)\,r$, где U — напряжение источника питания; $U_П$ — напряжение на обмотке реле $П$; I_C и $I_П$ — токи в конденсаторе и обмотке реле. Пропорционально этому уменьшается и ток в обмотке $П$.

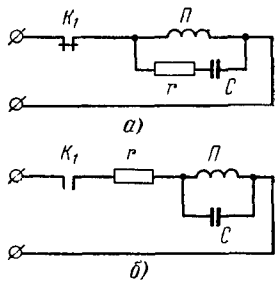


Рис. 2-19. Схемы замедления промежуточных реле.

$П$ — обмотка промежуточного реле; K_1 — контакты промежуточного реле.

По окончании заряда конденсатора прохождение тока I_C прекратится и на обмотке реле $П$ установится нормальное напряжение $U_П = U - I_П r$. При размыкании контактов K_1 конденсатор C разряжается на обмотку реле $П$, удерживая реле в сработанном состоянии до тех пор, пока ток в обмотке не снизится до значения $I_{воз}$. Чем больше емкость C, тем больше замедлится действие реле.

Недостатком замедленных реле является значительный разброс их времени действия, в частности за счет колебания уровня напряжения источника оперативного тока.

2-6. УКАЗАТЕЛЬНЫЕ РЕЛЕ

Указательные реле служат для фиксации действия защиты в целом или каких-либо ее элементов. На рис. 2-20 показано указательное реле *1*, сигнализирующее действие защиты на отключение выключателя. При срабатывании защиты по обмотке реле *1* проходит ток, приводящий реле *1* в действие.

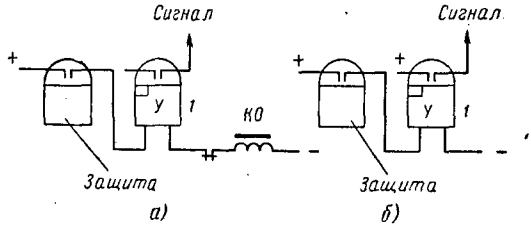


Рис. 2-20. Схемы включения указательных реле.

а — последовательного; б — параллельного.

Ввиду кратковременности прохождения тока в обмотке указательных реле они выполняются так, что сигнальный флажок и контакты реле остаются в сработанном состоянии до тех пор, пока их не возвратит на место обслуживающий персонал.

Указанные реле изготовляются для последовательного (рис. 2-20, *а*) и параллельного (рис. 2-20, *б*) включения. Реле последовательного включения более удобны и поэтому имеют весьма широкое применение. Общий вид указательного реле типа РУ-21 приведен на рис. 2-21.

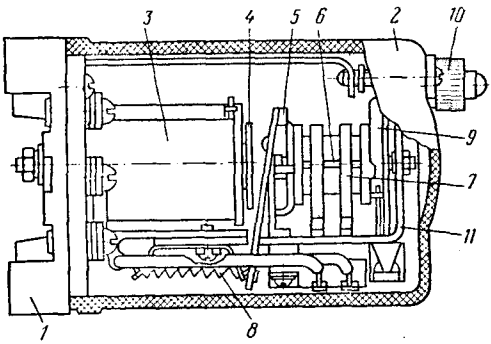


Рис. 2-21. Конструкция указательного реле типа РУ-21.

1 — цоколь; *2* — кожух; *3* — катушка; *4* — сердечник; *5* — якорь; *6* — контактный мостик; *7* — контактные пластины; *8* — возвратная пружина; *9* — флажок; *10* — кнопка возврата; *11* — скоба.

При появлении тока в обмотке *3* якорь реле *5* притягивается и освобождает флажок *9*. Последний падает под действием собственного веса, принимая вертикальное положение. В этом положении флажок виден через прозрачный кожух *2*. Возврат флажка в начальное положение производится кнопкой *10*.

2-7. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

а) Назначение и основные требования

Реле времени служит для искусственного замедления действия устройств релейной защиты и электроавтоматики.

На схеме рис. 2-22 показано применение реле времени в защите. При замыкании контактов токового реле *1* плюс оперативного тока подводится к обмотке реле времени *2*, которое спустя определенный интервал времени замыкает контакты и производит отключение выключателя. Время, проходящее с момента подачи напряжения на обмотку реле времени до замыкания его контактов, называется выдержкой времени реле.

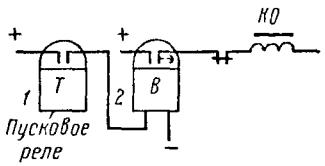


Рис. 2-22. Схема включения реле времени.

Основным требованием, предъявляемым к реле времени, применяемым в схемах релейной защиты, является точность. Погрешность во времени действия реле не должна превосходить $\pm 0{,}25$ *сек*, а в ряде случаев $\pm 0{,}06$ *сек*. В схемах сигнализации и некоторых устройствах автоматики допускается меньшая точность работы реле времени.

Реле времени должно надежно срабатывать начиная с 80% номинального напряжения, и его выдержка времени не должна зависеть от возможных в эксплуатации колебаний оперативного напряжения. Потребление обмотки современных реле времени колеблется от 20 до 30 *вт*.

Для быстрой готовности к повторному действию реле времени должно иметь мгновенный возврат после отключения его катушки от источника оперативного тока.

б) Конструкции реле времени

Реле времени имеют много конструктивных разновидностей, но принципы их устройства однородны и могут быть рассмотрены на примере конструкции, изображенной на рис. 2-23.

При появлении тока в обмотке *1* якорь *2* мгновенно втягивается, освобождая рычаг *4* с зубчатым сегментом *5*. Под действием ведущей пружины *6* рычаг *4* приходит в движение, которое, однако, не является свободным, так как оно замедляется специальным устройством выдержки времени *7*. Через некоторое время $t_р$, зависящее от расстояния l (или угла α) и скорости движения $\omega_р$ рычага *4*, последний переместится на угол α и замкнет контакты реле *8*. Таким образом, реле сработает с выдержкой времени $t_р = \alpha/\omega_р$.

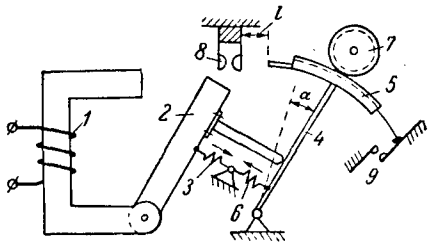


Рис. 2-23. Принцип устройства реле времени.

Устройство выдержки времени может выполняться различными способами; в современных отечественных конструкциях оно осуществляется с помощью часового механизма, основным элементом которого является анкерное устройство.

При исчезновении тока в реле якорь и рычаг *4* должны мгновенно возвратиться в начальное положение под действием возвратной пружины *3*. Это обеспечивается с помощью храпового механизма или фрикционного устройства, обладающих свободным расцеплением при обратном ходе сегмента *5*.

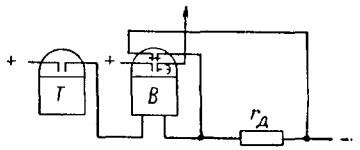


Рис. 2-24. Термически устойчивое реле времени.

Регулирование выдержки времени осуществляется изменением угла α путем перемещения контактов реле *8*. В некоторых конструкциях предусматривается мгновенный контакт *9*, позволяющий замыкать цепь с малой, обычно нерегулируемой выдержкой времени (порядка 0,15—0,2 *сек*).

Для уменьшения размеров реле катушка реле времени не рассчитывается на длительное прохождение тока. Поэтому реле, предназначаемые для длительного включения под напряжение, выполняются с добавочным сопротивлением $r_д$, включаемым последовательно с обмоткой реле, как показано на рис. 2-24. Нормально сопротивление $r_д$ зашунтировано размыкающимся мгновенным контактом

реле. После срабатывания реле этот контакт размыкается и сопротивление $r_д$ вводится в цепь реле, ограничивая проходящий в ней ток до величины, допустимой по условиям нагрева и достаточной для удержания реле в сработанном состоянии.

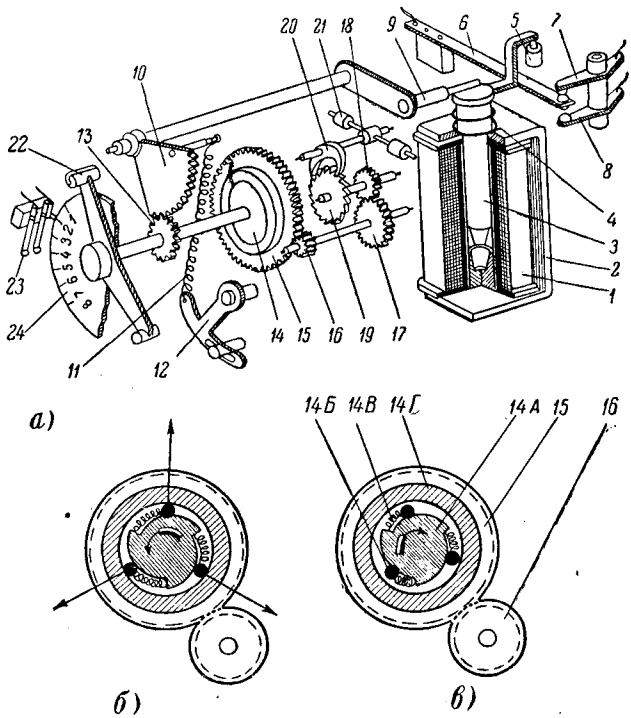


Рис. 2-25. Кинематическая схема реле времени типа ЭВ-110 (ЭВ-130) Чебоксарского электроаппаратного завода.

1 — обмотка; *2* — магнитопровод; *3* — якорь; *4* — возвратная пружина; *5* — поводок; *6* — подвижный мгновенный контакт; *7* и *8* — неподвижные мгновенные контакты; *9* — палец; *10* — зубчатый сектор; *11* — ведущая пружина; *12* — скоба для изменения натяжения пружины; *13* — зубчатое колесо; *14* — фрикционное сцепление (*14А* — звездочка; *14Б* — шарик; *14В* — пружина; *14Г* — обойма;); *15* — ведущее зубчатое колесо; *16* — трибка часового механизма; *17* и *18* — промежуточные зубчатые колеса часового механизма; *19* — анкерное зубчатое колесо; *20* — анкерная скоба; *21* — грузики; *22* — подвижный контакт; *23* — неподвижный контакт; *24* — шкала.

Отечественные заводы выпускают реле постоянного тока типов ЭВ-110, ЭВ-120, ЭВ-130, ЭВ-140 и переменного тока ЭВ-210, ЭВ-220, ЭВ-230, ЭВ-240 [Л. 10]. Устройство этих реле показано на рис. 2-25,*а*.

В этой конструкции роль рычага *4* (рис. 2-23) выполняет сектор *10*, приводимый в движение ведущей пружиной *11*. Сектор *10* через ведущую шестеренку *13* приводит в движение подвижный контакт реле *22* и фрикционное сцепление *14*, показанное отдельно

рис. 2-25, *б* и *в*. Фрикционное сцепление связывает подвижную стему реле с часовым механизмом. Через шестеренки *15*, *16*, *17* *18* движение передается на анкерное колесо *19*. Скорость вращения следнего ограничивается колебательным движением анкерной обы *20*, которое зависит от ее момента инерции, определяемого узиками *21*. Выдержка времени изменяется положением неподжного контакта *23*.

Реле времени ЭВ-133 выполняются термически устойчивыми схеме на рис. 2-24.

Кроме рассмотренных электромагнитных реле времени, приме-ются реле времени, выполняемые с помощью синхронных микро-игателей, и реле с контуром из емкости и активного сопротивле-я (см. § 4-8 и 11-17, *в*).

. ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ РЕЛЕ

Поляризованные реле являются разновидностью электромаг-тных конструкций. В отличие от рассмотренных выше электро-гнитных реле якорь поляризованного реле находится под воздей-вием двух магнитных потоков, из которых один создается током, тающим обмотку реле, а второй — постоянным магнитом. Маг-тный поток обмотки называется рабочим, а постоянного магнита — ляризующим. Поляризованные реле выполняются в двух вариан-х: с дифференциальной магнитной системой и мостовой.

Обе конструкции состоят из сердечника *1*, обмотки *2*, постоянного гнита *3*, якоря *4* и контактной системы *5* (рис. 2-26).

Рассмотрим принцип действия реле на примере более простой ффференциальной системы (рис. 2-26). Поляризующий магнитный ток $\Phi_п$ постоянного магнита выходит из северного полюса N и зветвляется на две части $\Phi_{па}$ и $\Phi_{пб}$, замыкающиеся через воздуш-е зазоры $\delta_а$ и $\delta_б$ и соответствующие половины сердечника *1*. мотка *2*, обтекаемая током $I_р$, создает рабочий магнитный по-к $\Phi_р$, который замыкается по сердечнику *1*.

Для простоты рассмотрения часть магнитного потока, ответв-ющаяся через якорь, не учитывается. В воздушном зазоре $\delta_а$ гнитные потоки $\Phi_п$ и $\Phi_р$ суммируются, а в $\delta_б$ вычитаются, образуя зультирующие магнитные потоки:

$$\Phi_а = \Phi_{па} + \Phi_р \quad \text{и} \quad \Phi_б = \Phi_{пб} - \Phi_р. \qquad (2\text{-}15)$$

Под воздействием магнитного потока $\Phi_а$ якорь притягивается левому полюсу *а* с силой $F_а = k\Phi_а^2$. Силе $F_а$ противодействует ла $F_б = k\Phi_б^2$, стремящаяся притянуть якорь к правому полюсу *б*.

При определенном токе $I_р \geqslant I_{с.р}$ магнитный поток $\Phi_а$ стано-тся больше магнитного потока $\Phi_б$, сила $F_а > F_б$ и якорь реле клоняется влево, к полюсу *а*.

При изменении направления тока $I_р$ поток $\Phi_р$ также меняет свое правление, вследствие чего в зазоре $\delta_а$ возникает разность магнит-х потоков, а в зазоре $\delta_б$ их сумма. Тогда при $I_р \geqslant I_{с.р}$ поток

$\Phi_б > \Phi_а$, сила $F_б > F_а$ и якорь реле отклоняется вправо. Таким образом, благодаря наличию поляризующего потока реле становится направленным и реагирует не только на величину тока, но и на его направление (полярность).

Аналогичным образом работает реле и с мостовой магнитной системой, приведенное на рис. 2-26, *б*.

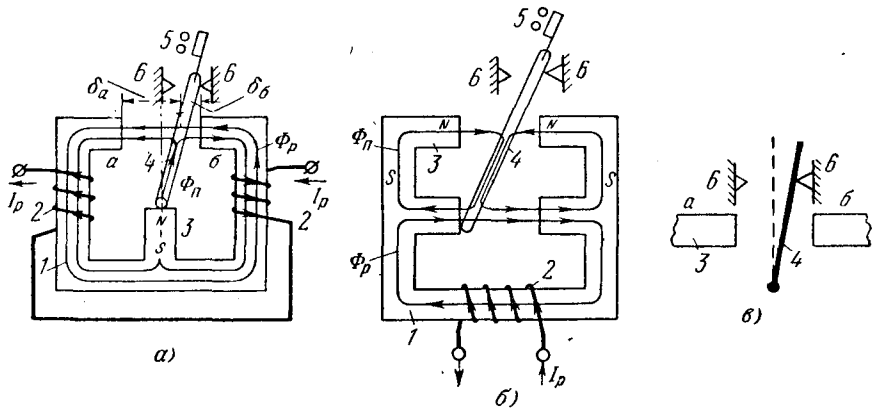


Рис. 2-26. Принцип устройства поляризованных реле.

а — с дифференциальной магнитной системой; *б* — с мостовой магнитной системой; *в* — «нейтральная» регулировка контактов.

При питании реле переменным током якорь реле вибрирует, следуя за изменением направления тока. По этой причине поляризованные реле не пригодны для работы на переменном токе.

Поляризованные реле могут выполняться с односторонним и двусторонним действием, с фиксацией и без фиксации начального положения якоря. Реле одностороннего действия с фиксацией начального положения якоря показано на рис. 2-26, *а*, *б*. У этого реле упоры *б*, ограничивающие ход якоря, устанавливаются так, чтобы при любом положении якоря преобладало влияние одного из полюсов, например правого *б*. Для этой цели зазор $\delta_а$ взят больше $\delta_б$. Тогда при отсутствии тока $I_р$ поляризующий магнитный поток $\Phi_{пб} > \Phi_{па}$, соответственно сила $F_б > F_а$ и якорь реле прижимается к правому упору под действием преобладающей силы $F_б$. При появлении $I_р > I_{с.р}$ якорь отклоняется влево, замыкая контакты реле. После исчезновения тока $I_р$ якорь возвращается под действием поляризующего поля в начальное положение.

Такая регулировка называется настройкой с «преобладанием». Реле подобного типа наиболее часто применяется в схемах защиты.

Если упоры *б* расположить симметрично по отношению к среднему положению якоря в зазоре (рис. 2-26, *в*), то такая регулировка называется нейтральной. В зависимости от направления $I_р$ якорь отклоняется вправо или влево, замыкая соответствующие контакты реле. При исчезновении $I_р$ якорь остается в том положении, в каком он находился при действии $I_р$. Следовательно, такое реле работает как реле двустороннего действия, но не имеет фиксированного начального положения якоря.

Поляризованные реле обладают важными преимуществами, к которым следует отнести: 1) высокую чувствительность и малое потребление, достигающее при минимальном токе срабатывания

и зазоре между контактами около 0,5 *мм*, примерно 0,005 *вт*; 2) высокую кратность тока термической устойчивости, равную (20 ÷ 50) $I_{с.р.мин}$, у обычных электромагнитных реле термическая кратность не превышает 1,5 $I_{с.р.мин}$; 3) быстроту действия, которая достигает 0,005 *сек*.

Недостатками поляризованных реле являются: малая мощность контактов; небольшой зазор между ними, от 0,1 до 0,5 *мм* и относительно невысокий коэффициент возврата.

Поляризованные реле применяются в схемах релейной защиты как вспомогательные реле постоянного тока при необходимости быстродействия и высокой чувствительности, а также в качестве реагирующих органов в схемах реле на выпрямленном токе.

2-9. ИНДУКЦИОННЫЕ РЕЛЕ

а) Принцип действия

На рис. 2-27 показан принцип выполнения индукционных реле. Реле состоит из подвижной системы *3*, расположенной в поле двух магнитных потоков Φ_I и Φ_{II}. Магнитные потоки создаются токами, проходящими по обмоткам неподвижных электромагнитов *1* и *2*. Подвижная система выполняется в виде медного или алюминиевого диска или цилиндра (барабанчика), закрепленного на оси, которая может вращаться. При вращении против часовой стрелки подвижная система преодолевает момент пружины *5* и замыкает контакты *4*.

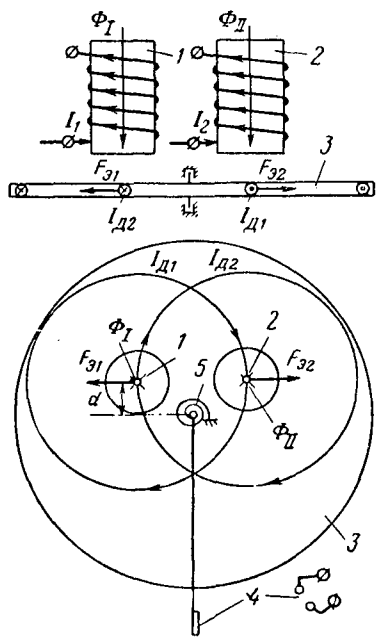


Рис. 2-27. Принцип устройства индукционного реле.

Обмотки реле *1* и *2* питаются переменными (синусондальными) токами I_1 и I_2, которые создают переменные магнитные потоки Φ_I и Φ_{II}, показанные на рис. 2-27. Пренебрегая потерями на намагничивание, считают, что потоки Φ_I и Φ_{II} совпадают по фазе с создающим их током, как изображено на векторной диаграмме (рис. 2-28).

Пронизывая подвижную систему *3*, магнитный поток Φ_I наводит в ней э. д. с. $E_{д1} = -\frac{d\Phi_I}{dt}$, аналогично поток Φ_{II} создает э. д. с. $E_{д2} = -\frac{d\Phi_{II}}{dt}$. Согласно закону индукции наведенные э. д. с. отстают по фазе на 90° от вызвавших

их магнитных потоков (рис. 2-28). Под действием э. д. с. $E_{д1}$ и $E_{д2}$ в подвижной системе возникают вихревые токи $I_{д1}$ и $I_{д2}$, замыкающиеся вокруг оси индуктирующего их магнитного потока. Положительные направления $I_{д1}$ и $I_{д2}$, определенные с помощью правила «буравчика» по положительному направлению потоков Φ_I и Φ_{II}, показаны на рис. 2-27. Вследствие малой величины индуктивного сопротивления контура вихревых токов они принимаются совпадающими по фазе с соответствующей э. д. с. (рис. 2-28).

Из теории электротехники известно, что между магнитным потоком и током, находящимся в его поле, возникают электромагнитные силы взаимодействия. В рассматриваемой конструкции возникают две силы: $F_{э1}$, обусловленная взаимодействием магнитного потока Φ_I и тока $I_{д2}$, и $F_{э2}$, вызванная взаимодействием Φ_{II} с $I_{д1}$ (рис. 2-27).

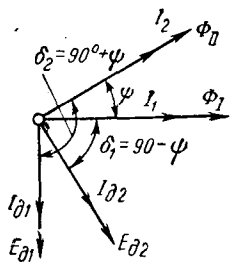


Рис. 2-28. Векторная диаграмма э. д. с., токов и магнитных потоков индукционного реле.

Как известно, сила взаимодействия между магнитным потоком и контуром тока, индуктированного этим потоком, равна нулю, при условии что магнитный поток создает равномерное магнитное поле. В индукционных реле это условие выполняется, и поэтому силы взаимодействия между Φ_I и $I_{д1}$ и Φ_{II} и $I_{д2}$ отсутствуют. Направление сил $F_{э1}$ и $F_{э2}$ для положительного значения потоков и токов, определяется по правилу «левой руки» и показано на рис. 2-27. Можно доказать, что мгновенное значение сил $F_{э1}$ и $F_{э2}$ меняет свой знак в течение периода $T = 1/f$ 4 раза, поэтому поведение реле (вращение подвижной системы) зависит от знака среднего значения сил $F_{э1}$ и $F_{э2}$. Знак и направление каждой силы определяется углом сдвига фаз между магнитным потоком и взаимодействующим с ним током $I_д$. Силы $F_{э1}$ и $F_{э2}$ образуют результирующую электромагнитную силу $F_э$, равную их алгебраической сумме $F_э = F_{э1} + F_{э2}$.

Результирующая сила $F_э$ создает вращающий момент $M_э = F_э d$, где d — плечо силы $F_э$. Электромагнитная сила и момент ($F_э$ и $M_э$) приводят в движение подвижную систему *3*, которая в зависимости от знака $M_э$ замыкает или размыкает контакты реле *4*.

Из сказанного следует, что *принцип работы индукционных реле основан на взаимодействии двух магнитных потоков с вихревыми токами, индуктируемыми в подвижной системе реле.*

б) Электромагнитная сила и ее момент

Величина и знак электромагнитной силы $F_э$ выражаются через магнитные потоки Φ_I и Φ_{II}, угол сдвига фаз между ними ψ и частоту переменного тока f уравнением

$$F_э = k' f \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi. \qquad (2\text{-}16)$$

Соответственно электромагнитный момент

$$M_э = F_э d = k'' f \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi = k \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi. \qquad (2\text{-}17)$$

Вывод уравнений (2-16) и (2-17) приводится ниже.

Среднее значение силы взаимодействия между магнитным потоком Ф и током I, находящимся в поле этого потока:

$$F_э = k \Phi I \cos \delta, \qquad (2\text{-}18)$$

где δ — угол сдвига фаз между потоком Ф и током I. Отсюда среднее значение силы:

$$F_{э1} = k_1 \Phi_I I_{д2} \cos \delta_1, \qquad (2\text{-}19)$$

$$F_{э2} = k_2 \Phi_{II} I_{д1} \cos \delta_2. \qquad (2\text{-}20)$$

Как видно из векторной диаграммы (рис. 2-28), $\delta_1 = 90 - \psi$, $\delta_2 = 90 + \psi$. В соответствии с этим $\cos \delta_1 = \sin \psi$, а $\cos \delta_2 = -\sin \psi$.

Сделав соответствующую замену в выражениях (2-19) и (2-20), найдем среднее значение результирующей электромагнитной силы, действующей на подвижную систему реле:

$$F_э = F_{э1} + F_{э2} = k_1 \Phi_I I_{2д} \sin \psi + k_2 \Phi_{II} I_{1д} \sin \psi. \qquad (2\text{-}21)$$

С учетом, что $I_{д1} \equiv \Phi_I$ и $I_{д2} \equiv \Phi_{II}$,

$$F_э = k' \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi, \qquad (2\text{-}22)$$

а

$$M_э = k \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi, \qquad (2\text{-}23)$$

где $k' = k_1 + k_2$; $k = k'd$ — постоянные величины, зависящие от размеров и материала (сопротивления r) диска, расположения полюсов относительно оси диска (плечо d) и частоты тока f.

Анализируя выражение электромагнитного момента (2-17), можно установить следующее:

1. Для получения электромагнитного момента конструкция реле должна обеспечивать создание не менее двух переменных магнитных потоков (Φ_I и Φ_{II}), пронизывающих подвижную систему в разных точках и сдвинутых по фазе на угол $\psi \neq 0$.

2. Величина момента $M_э$ пропорциональна амплитудам магнитных потоков Φ_I и Φ_{II} и их частоте f и зависит от сдвига фаз ψ между потоками.

Реле имеет наибольший момент при сдвиге фаз магнитных потоков на 90°. При $\psi = 0$ реле не может работать, так как $M_э = 0$.

3. Знак момента зависит от $\sin \psi$. Иначе говоря, он зависит от сдвига фаз ψ между магнитными потоками Φ_I и Φ_{II} или создающими их токами I_1 и I_2. При значениях ψ в пределах от 0 до 180° момент $M_э$ положителен, при этом магнитный поток Φ_{II} опережает поток Φ_I, а сила $F_э$ направлена от оси опережающего магнитного потока Φ_{II} к оси отстающего Φ_I. При $-\psi$ в пределах от 180° до 360° момент $M_э$ отрицателен. В этом случае поток Φ_{II} отстает от Φ_I, а сила $F_э$ направлена в обратную сторону — от оси Φ_I к оси Φ_{II}. Таким образом, *результирующая сила $F_э$ всегда направлена от оси опережающего к оси отстающего магнитного потока.*

4. На индукционном принципе могут выполняться только реле переменного тока. Это объясняется тем, что токи в диске или цилиндре индуктируются при условии, что электромагниты питаются переменным током. Индукционный принцип получил весьма широкое распространение. На этом принципе выполняются реле тока, направления мощности и многие другие виды реле.

2-10. ИНДУКЦИОННЫЕ РЕЛЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

а) Реле с короткозамкнутыми витками (экранами)

Реле (рис. 2-29) имеет электромагнит *1*, охватывающий своими полюсами укрепленный на оси диск *2*. На верхнем и нижнем полюсах электромагнита насажены короткозамкнутые медные витки *3*, охватывающие часть сечения полюсов. Токи в обмотке реле $I_р$ и короткозамкнутом витке $I_к$ создают магнитные потоки $\Phi_р$ и $\Phi_к$, положительные направления которых показаны на рис. 2-29. Из-под сечения полюса *I*, охваченного короткозамкнутым витком, выходит результирующий магнитный поток $\dot{\Phi}_I = \dot{\Phi}_{р1} + \dot{\Phi}_{к1}$. Из-под второй части полюса (сечение *II*) выходит магнитный поток $\dot{\Phi}_{II} = \dot{\Phi}_{р2} - \dot{\Phi}_{к2}$. Оба магнитных потока пронизывают диск, индуктируя в нем вихревые токи.

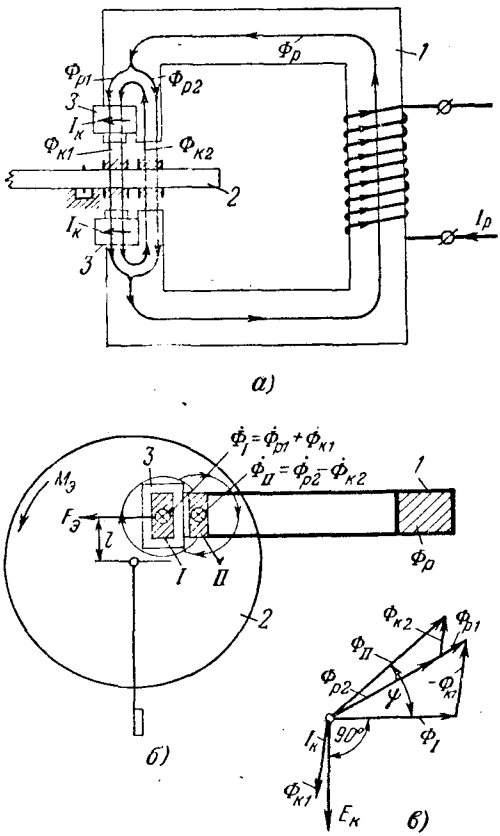


Рис. 2-29. Принцип устройства индукционного реле тока или напряжения с короткозамкнутыми витками.

а и *б* — принцип устройства; *в* — векторная диаграмма.

Векторная диаграмма потоков показана на рис. 2-29, *в*. Она строится так же, как и для электромагнитных реле с короткозамкнутым витком (рис. 2-7).

Векторная диаграмма показывает, что магнитные потоки Φ_I и Φ_{II} сдвинуты по фазе на угол ψ, причем Φ_{II} опережает Φ_I. Следо-

вательно, конструкция с короткозамкнутым витком обеспечивает создание двух сдвинутых по фазе и смещенных в пространстве магнитных потоков за счет расщепления на две составляющие магнитного потока, создаваемого обмоткой реле. Взаимодействие магнитных потоков Φ_{I} и Φ_{II} с индуктированными в диске токами создает электромагнитную силу $F_э$ и действующий на диск момент

$$M_э = F_э d = k\Phi_{\text{I}}\Phi_{\text{II}} \sin \psi. \qquad (2\text{-}24)$$

Поскольку оба магнитных потока пропорциональны току $I_р$ и угол ψ при изменении тока $I_р$ остается неизменным, выражение (2-24) можно представить в виде

$$M_э = k' I_р^2. \qquad (2\text{-}25)$$

При питании обмотки реле током сети $I_с$ ток $I_р$ пропорционален последнему. Поэтому момент реле $M_э = kI_с^2$, и, следовательно, реле является токовым. Если же обмотку реле выполнить с большим сопротивлением и питать напряжением сети $U_с$, то ток в обмотке реле $I_р = U_с/n_н \cdot z_р$, где $n_н$ — коэффициент трансформации трансформатора напряжения; $z_р$ — сопротивление обмотки реле.

Отсюда

$$M_э = kU_с^2. \qquad (2\text{-}26)$$

Поведение реле определяется напряжением сети $U_с$; следовательно, такое реле является реле напряжения.

б) Время действия индукционных реле

Конструкция индукционных реле позволяет выполнять их с выдержкой времени без применения специальных часовых механизмов. Время действия индукционного реле зависит от угла α, на который должен повернуться диск для замыкания контактов K реле, и угловой скорости движения диска $\omega_р$ (рис. 2-30, *а*). Если допустить, что скорость постоянна, то $t_р = \alpha/\omega_р$.

Движение диска происходит под влиянием избыточного момента $M_{вр} = M_э - M_с$, представляющего собой разность электромагнитного момента и противодействующего ему момента сопротивления $M_с$.

Момент вращения преодолевает момент инерции подвижной системы $J \frac{d\omega}{dt}$, сообщая ей ускорение $d\omega/dt$;

$$M_{вр} = J \frac{d\omega}{dt}. \qquad (2\text{-}27)$$

Составляющие момента сопротивления $M_с$ показаны на рис. 2-30, *а*. Чем больше избыточный момент $M_{вр}$, тем больше скорость вращения диска $\omega_р$. С увеличением тока $I_р$ в обмотке реле избыточный момент возрастает за счет увеличения электромагнитного момента, который пропорционален $I_р^2$. В результате этого возрастает скорость $\omega_р$ и соответственно уменьшается время действия реле $t_р$.

Таким образом, время действия индукционного реле является функцией тока: с увеличением тока время $t_р$ уменьшается. Такая характеристика времени действия реле называется зависимой и изображена кривой *1* на рис. 2-30, *б*. На практике часто применяются токовые реле с ограниченно зависимой характеристикой выдержки времени, имеющей вид кривой *2* на рис. 2-30, *б*. Особенность этой характеристики состоит в том, что, начиная с некоторого значения тока в реле, время действия реле остается неизменным, т. е. не зависящим от тока. Эта часть характеристики называется независимой.

Для получения ограниченно зависимой характеристики параметры реле подбираются так, чтобы при токах, соответствующих

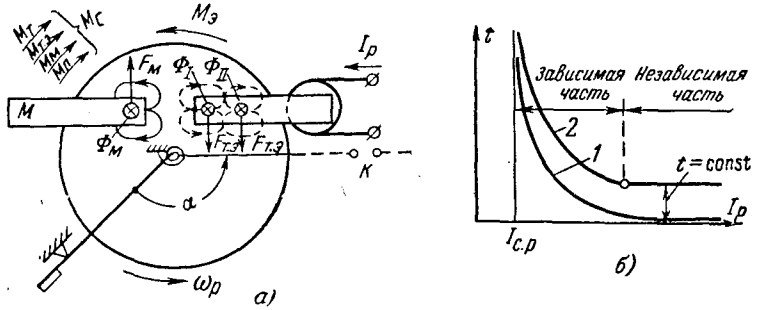


Рис. 2-30. Моменты, действующие на диск индукционного реле при его вращении (*а*), и характеристика реле $t = f(I_р)$ (*б*); $M_п$ — момент пружины; $M_т$ — момент трения; $M_м$ — момент от токов «резания», наведенных потоком $\Phi_м$ постоянного магнита; $M_{т.э}$ — момент от токов «резания», наводимых потоками Φ_I и Φ_{II}.

независимой части характеристики, магнитопровод реле насыщался. При насыщении магнитопровода увеличение тока $I_р$ не вызывает увеличения магнитных потоков Φ_I и Φ_{II}, в результате чего избыточный момент и обусловленные им скорость вращения диска и выдержка времени реле остаются неизменными.

Для повышения выдержки времени индукционных реле устанавливается постоянный магнит *М*, охватывающий своими полюсами диск (рис. 2-30, *а*). При вращении диск пересекает силовые линии магнитного потока $\Phi_м$ постоянного магнита, в результате чего в нем наводятся токи «резания». От их взаимодействия с магнитным потоком $\Phi_м$ возникает момент

$$M_м = k\Phi_м^2\omega_р, \qquad (2\text{-}28)$$

противодействующий движению диска. Момент $M_м$ уменьшает избыточный момент за счет чего уменьшается скорость $\omega_р$ и возрастает выдержка времени $t_р$.

Аналогичное влияние на вращение диска оказывают моменты $M_{т.э1}$ и $M_{т.э2}$ от токов «резания», наводимых основными магнитными потоками Φ_I и Φ_{II}. Суммарный момент

$$M_{т.э} = M_{т.э1} + M_{т.э2}. \qquad (2\text{-}29)$$

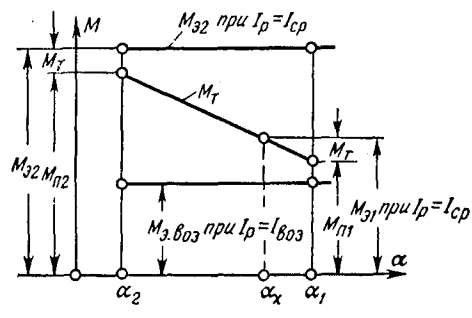
Моменты $M_м$ и $M_{т.э}$ не влияют на условия срабатывания реле, так как в неподвижном диске токов «резания» не возникает, и поэтому моменты $M_м$ и $M_{т.э}$ отсутствуют.

Время действия индукционных реле обычно регулируется изменением расстояния между подвижным и неподвижным контактами K.

Индукционные реле мгновенного действия выполняются без постоянных магнитов и с минимальным ходом подвижной системы. Кроме того, для повышения быстродействия реле принимаются меры к увеличению скорости движения подвижной системы. Из уравнения $M_{вр} = J\frac{d\omega}{dt}$ следует, что чем меньше момент инерции J, тем быстрее будет вращаться подвижная система реле. Поэтому вместо систем с диском, имеющих большой момент инерции за счет значительного диаметра, используются системы с цилиндрическим ротором, который имеет малый диаметр и поэтому его момент инерции значительно меньше момента инерции диска. Реле с цилиндрическим ротором могут действовать со временем около 0,02—0,04 *сек*, а минимальное время действия реле с диском приближается к 0,1 *сек*.

в) Характеристики моментов $M_э$ и $M_п$

Зависимость моментов от угла поворота диска представлена на рис. 2-31. При повороте диска в сторону замыкания контактов пружина закручивается и ее момент $M_п$ нарастает; в то же время электромагнитный момент $M_э$ не зависит от угла поворота диска.



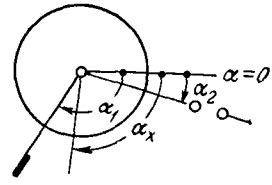


Рис. 2-31. Моменты, действующие на диск индукционного реле при срабатывании и возврате ($I_{тр}$ — ток начала вращения диска).

Это различие характеристик $M_э$ и $M_п$ является недостатком индукционных конструкций, вызывающим: 1) ухудшение коэффициента возврата реле; 2) ослабленный нажим подвижных контактов реле на неподвижные при срабатывании реле; 3) зависимость начального положения подвижной системы реле от величины проходящего в нем тока в нормальном режиме, что приводит к произвольному изменению выдержки времени реле.

Поэтому во всех конструкциях индукционных реле с выдержкой времени (имеющих большой угол поворота α) предусматриваются специальные меры для устранения перечисленных выше дефектов.

У реле мгновенного действия угол α мал и в результате этого отмеченные дефекты не проявляются.

г) Инерционный выбег

Вращающийся диск индукционного реле после прекращения действия электромагнитной силы продолжает свое движение по инерции за счет накопленной кинетической энергии. Инерционный

выбег диска может привести к замыканию по инерции контактов реле после отключения к. з. в сети. Для уменьшения выбега диска используется постоянный магнит M (рис. 2-30, *а*). Эта мера снижает, но не исключает полностью инерционный выбег реле. Поэтому во избежание ложного действия защиты с такими реле ступень селективности при выборе выдержки времени увеличивается на величину инерционной ошибки (см. § 4-6, а).

2-11. ТОКОВОЕ ИНДУКЦИОННОЕ РЕЛЕ СЕРИИ РТ-80 И РТ-90

Отечественная промышленность выпускает токовые реле серии РТ-80 и РТ-90 (рис. 2-32). Реле состоит из двух элементов: индукционного с ограниченно зависимой характеристикой времени

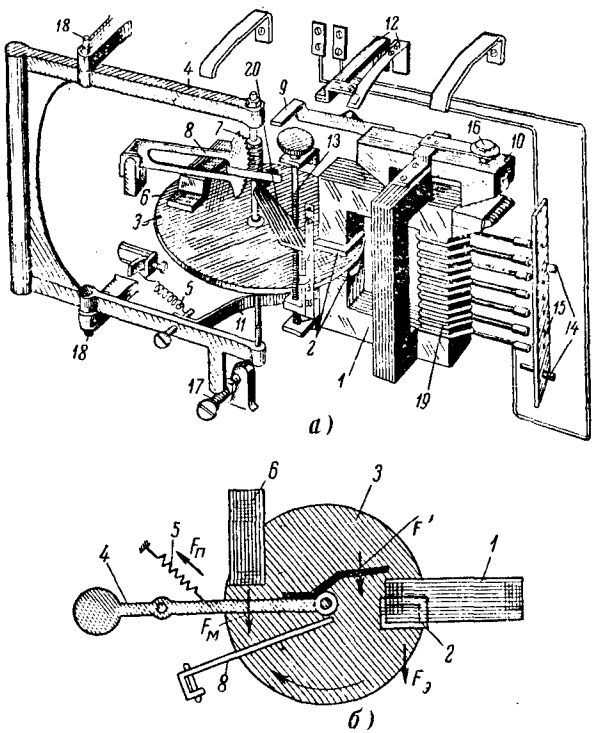


Рис. 2-32. Токовое реле типа РТ-80.

а — конструкция реле; *б* — силы, действующие на диск подвижной рамки.

действия и электромагнитного — действующего мгновенно и называемого поэтому отсечкой.

Совместная работа обоих элементов позволяет получить характеристику выдержки времени, показанную на рис. 2-33, весьма удобную в эксплуатации. При токах больше тока срабатывания

электромагнитного элемента $I_{э.с.р}$ реле работает без выдержки времени. При токах, меньших $I_{э.с.р}$, работает индукционный элемент реле с ограниченной зависимой выдержкой времени.

Индукционный элемент реле. Индукционный элемент имеет электромагнит *1* с короткозамкнутыми витками *2*. При появлении тока в обмотке *19* возникает электромагнитная сила $F_э$, действующая на диск *3*, который вращается на оси в подшипниках, установленных на подвижной рамке *4*. Рамка *4* имеет свою ось вращения *18*, укрепленную на корпусе реле. Пружина *5* притягивает рамку к упору *17*. На оси диска насажен червяк *7*, вращающийся вместе с осью и диском. Червяк *7* и зубчатый сегмент *8*, управляющий работой контактов реле *12*, нормально расцеплены. Для действия реле необходимо, чтобы червяк сцепился с зубчатым сегментом и поднял его до замыкания контактов реле. Электромагнитной силе $F_э$ (рис. 2-32, *б*) противодействует сила $F_п$ пружины *5*. При токе в реле, равном 20—30% тока срабатывания индукционного элемента $I_{и.с.р}$, под влиянием силы $F_э$ диск начинает вращаться. При этом в диске наводятся токи «резания», которые во взаимодействии с магнитным потоком постоянного магнита *6* создают силу $F_м$, препятствующую вращению диска. При токе в реле $I_р > I_{и.с.р}$ сумма электромагнитных моментов $M_э$ и $M_м$, создаваемых соответственно $F_э$ и $F_м$, преодолевает момент пружины, и рамка перемещается, сцепляя червяк *7* с зубчатым сегментом *8*. Увеличение момента пружины *5* компенсируется нарастанием дополнительной силы F', притягивающей специальную стальную скобу *11* к электромагниту *1*. Сила F', притягивающая скобу *11*, обеспечивает также избыточное усилие, надежно сцепляющее червяк с сегментом.

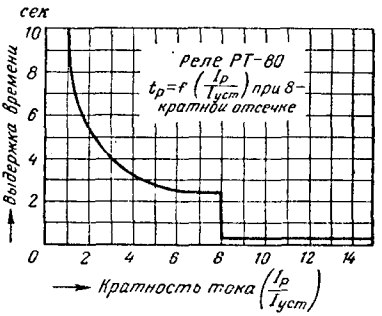


Рис. 2-33. Характеристика реле типа РТ-81.

После сцепления червяка с сегментом движение рамки прекращается, но диск продолжает вращаться и посредством червяка *7* поднимает сегмент *8*. Рычаг сегмента *8* поднимает коромысло *9*, замыкая при этом контакты реле *12*. Вследствие уменьшения зазора якорь *10* притягивается к электромагниту *1*, обеспечивая плотное замыкание контактов *12*. При токе в реле, меньшем тока возврата, момент пружины *5* преодолевает электромагнитный момент, и рамка возвращается в начальное положение, расцепляя червяк с сегментом. Сегмент падает на упор *20*, размыкая контакты реле.

Ток срабатывания регулируется изменением числа витков обмотки реле *19* при помощи штепселя *14*, переставляемого в гнездах планки *15*. Время действия регулируется изменением начального положения сегмента *8* винтом *13*. Особенностью реле является описанное сцепление червяка с сегментом, дающее следующие положительные качества:

а) Устраняются недостатки, обусловливаемые различием характеристик моментов $M_э$ и $M_р$.

б) Уменьшается инерционный выбег реле, так как после исчезновения тока червяк быстро расцепляется с сегментом и вращение диска по инерции не может привести к замыканию контактов реле.

в) Контакты реле замыкаются весьма надежно под влиянием силы, притягивающей якорь *10* электромагнитного элемента.

Электромагнитный элемент (отсечка). На якорь электромагнитного элемента действуют потоки рассеяния электромагнита *1*. При токах, превышающих ток срабатывания индукционного элемента в 4—8 раз, коромысло притягивается и мгновенно замыкает контакты реле *12*. Ток срабатывания электромагнитного элемента регулируется винтом *16*, меняющим воздушный зазор между якорем и электромагнитом.

2-12. ИНДУКЦИОННЫЕ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

а) Назначение и требования к реле

Реле направления мощности реагируют на величину и знак мощности, подведенной к их зажимам. Они используются в схемах защит как орган, определяющий по направлению (знаку) мощности (протекающей по защищаемой линии), где произошло повреждение — на защищаемой линии или на других присоединениях, отходящих от шин подстанции (рис. 2-34, *а*). В первом случае мощность к. з. $S_{к1}$ направлена от шин в линию и реле направления мощности должно замыкать свои контакты, во втором — мощность к. з. $S_{к2}$ направлена к шинам, в этом случае реле не должно замыкать контакты.

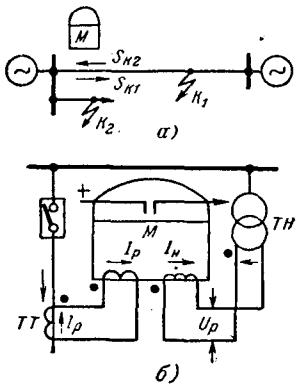


Рис. 2-34. Реле направления мощности.

а — принцип действия; *б* — схема включения.

Реле мощности имеет две обмотки: одна питается напряжением $U_р$, а другая — током сети $I_р$ (рис. 2-34, *б*). Взаимодействие токов, проходящих по обмоткам, создает электромагнитный момент, величина и знак которого зависят от напряжения $U_р$, тока $I_р$ и угла сдвига $\varphi_р$ между ними.

Реле направления мощности применяются в направленных защитах (см. гл. 7). Они должны обладать высокой чувствительностью, так как при к. з. вблизи места установки защиты напряжение $U_р$ резко снижается, достигая в пределе нуля; при этом мощность, подводимая к реле, оказывается очень малой и при недостаточной чувствительности реле может не сработать, т. е. может иметь «мертвую» зону.

Чувствительность реле оценивается минимальной мощностью, при которой реле замыкает свои контакты. Эта мощность называется мощностью срабатывания и обозначается $S_{с.р}$.

Реле направления мощности выполняются мгновенными, поскольку они могут применяться в защитах, работающих без выдержки времени. Собственное время реле направления мощности должно быть минимальным, что особенно важно для реле, применяемых в схемах быстродействующих защит.

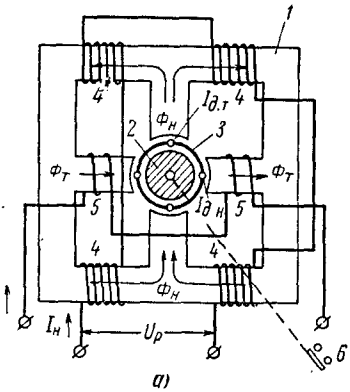
б) Конструкция и принципы действия индукционных реле мощности

Современные конструкции индукционных реле мощности выполняются с подвижной системой в виде цилиндрического ротора (рис. 2-35, *а*) [Л. 12, 9].

Реле имеет замкнутый магнитопровод *1* с выступающими внутрь люсами. Между полюсами установлен стальной цилиндр *2*, повышающий магнитную проницаемость междуполюсного пространства. юминиевый цилиндр (ротор) *3* может вращаться в зазоре между льным сердечником и полюсами. При вращении ротора *3* проходит замыкание контактов реле *6*.

Для возврата ротора и контактов в исходное положение предусматривается спиральная противодействующая пружина *7* ис. 2-35, *б*).

Обмотка *4* питается напряжением $U_р = U_с/n_н$, а обмотка *5* — током $I_р = I_с/n_т$, где $U_с$ и $I_с$ — напряжение и ток сети (защищаемого элемента). Ток $I_н = U_р/z_н$ в обмотке *4* создает магнитный поток $Ф_н$.



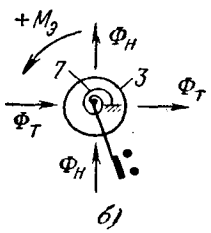


Рис. 2-35. Реле мощности.

а — с цилиндрическим ротором; *б* — ротор реле и направление положительного момента $M_э$.

Ток $I_р$, проходящий по обмотке *5*, в свою очередь создает магнитный поток $Ф_т$ *.

На рис. 2-36 изображена векторная диаграмма магнитных потоков $Ф_н$ и $Ф_т$. За исходный для ее построения принимается вектор напряжения $U_р$. Ток $I_н$ сдвинут по фазе относительно напряжения на угол α, а ток $I_р$ — на угол $\varphi_р$.

Угол α определяется индуктивным и активным сопротивлением обмотки *4*, питаемой напряжением, и называется у г л о м в н у т р е н н е г о с д в и г а реле. Угол $\varphi_р$ зависит от внешних параметров сети и схемы присоединения реле.

Магнитные потоки $Ф_н$ и $Ф_т$ изображены на диаграмме совпадающими с создающими их токами $I_н$ и $I_р$.

Из векторной диаграммы следует, что поток $\dot{Ф}_н$ и $\dot{Ф}_т$, а также токи $\dot{I}_н$ и $\dot{I}_р$ сдвинуты по фазе на угол $\psi = \alpha - \varphi_р$ и что угол ψ изменяется с изменением $\varphi_р$.

---

* По аналогии с поляризованным реле, у которого рабочий магнитный поток может менять знак, а поляризующий имеет неизменное направление, обмотка напряжения и магнитный поток $Ф_н$ в реле мощности называются поляризующими, токовая обмотка и магнитный поток $Ф_т$ — рабочими.

Магнитные потоки $\Phi_н$ и $\Phi_т$ пронизывают подвижную систему реле и наводят в ней вихревые токи $I_{д.н}$ и $I_{д.т}$ (рис. 2-35, *а*).

Взаимодействие вихревых токов с магнитными потоками создает электромагнитный момент $M_э$ согласно формуле (2-23)

$$M_э = k\Phi_н\Phi_т \sin\psi. \qquad (2\text{-}30)$$

Имея в виду, что $\Phi_н \equiv I_н \equiv U_н$, $\Phi_т \equiv I_р$, а $\psi = \alpha - \varphi_р$, получаем:

$$M_э = k_1 U_р I_р \sin(\alpha - \varphi_р) = k_1 S_р, \qquad (2\text{-}31)$$

где $S_р = U_р I_р \sin(\alpha - \varphi_р)$ — мощность, подведенная к реле.

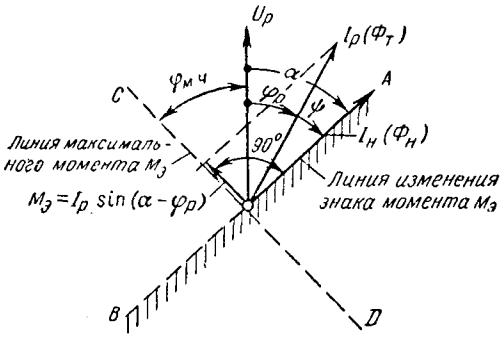


Рис. 2-36. Векторная диаграмма реле мощности.

Анализируя выражение (2-31), можно сделать следующие выводы:

1. Электромагнитный момент реле пропорционален мощности $S_р$ на зажимах реле.

2. Знак электромагнитного момента реле определяется знаком $\sin(\alpha - \varphi_р)$ и зависит от значения $\varphi_р$.

Синус, а следовательно, и $M_э$ положительны, когда угол $\psi \neq \alpha - \varphi_р$ находится в пределах от 0 до 180°, и отрицательны, если ψ меняется от 180 до 360°. Это иллюстрируется рис. 2-36, где зона отрицательных моментов заштрихована.

За положительное направление момента $M_э$ на рис. 2-35, *б* принято действие $M_э$ против часовой стрелки — на замыкание контактов.

Незаштрихованная часть диаграммы на рис. 2-36 соответствует области положительных моментов, где $\Phi_т$ опережает $\Phi_н$, а ψ и его синус имеют положительный знак.

Линия *AB*, проходящая через углы $\alpha - \varphi_р = 0$ и 180°, называется линией изменения знаков момента. Она всегда расположена под углом α к вектору $U_р$, т. е. совпадает с направлением вектора $I_н$.

Из сказанного следует, что при $\Phi_т$, опережающем поток $\Phi_н$, момент $M_э$ положителен, а при отстающем — отрицателен.

Линия *CD* (перпендикулярная *AB*) называется линией максимальных моментов $M_э$. Проекция $I_р$ на *CD* (рис. 2-37) равна $I_р \sin(\alpha - \varphi_р)$ и при $I_р$ и $U_р$ = пост. характеризует зависимость величины и знака момента $M_э$ от угла $\varphi_р$. Момент $M_э$ достигает максимума при $\alpha - \varphi_р = 90°$, т. е. когда $I_р$ опережает $I_н$ на 90°. Угол $\varphi_р$, при котором $M_э$ достигает максимального значения, называется углом максимальной чувствительно-

с т и $\varphi_{м.ч}$. Учитывая, что углы α и $\varphi_{м.ч}$ откладываются от вектора $U_р$ в противоположные стороны, их сумма, как это следует из рис. 2-37, $-\varphi_{м.ч} + \alpha = 90°$, откуда $\varphi_{м.ч} = \alpha - 90°$.

3. Реле не действует, если отсутствует напряжение или ток в реле или если

$$\sin(\alpha - \varphi_р) = 0.$$

Последнее условие имеет место при $\varphi_р = \alpha$ и $\varphi_р = \alpha + 180°$. Таким образом, выражение (2-31) показывает, что рассмотренная конструкция есть реле, реагирующее на величину и знак мощности.

в) Три типа реле мощности

Изменяя величину угла внутреннего сдвига реле α, можно получить три типа реле мощности, различающихся характером зависимости $M_э$ от $\Phi_р$ (рис. 2-37):

1. При $\alpha = 0$

$$M_э = k_1 U_р I_р \sin \varphi_р, \qquad (2\text{-}32)$$

т. е. $M_э$ реле пропорционален реактивной мощности, измеренной на зажимах реле. Такие реле называются с и н у с н ы м и, и л и

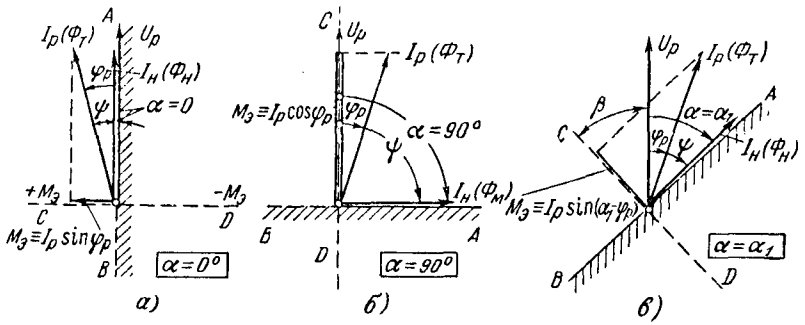


Рис. 2-37. Векторные диаграммы реле мощности разных типов.
а — синусного; *б* — косинусного; *в* — смешанного.

р е л е р е а к т и в н о й м о щ н о с т и. Реле имеет максимальный вращающий момент при $\varphi_р = 90°$; при $\varphi_р = 0$ момент $M_э$ равен нулю. Зоны положительных и отрицательных вращающих моментов и линия изменения знака моментов реле (AB) изображены на рис. 2-37, *а*.

2. При $\alpha = 90°$

$$M_э = kU_р I_р \sin(90° - \varphi_р) = kU_р I_р \cos\varphi_р, \qquad (2\text{-}33)$$

т. е. момент реле пропорционален активной мощности, подводимой к реле. Поэтому такие реле называются р е л е а к т и в н о й

мощности, или косинусными. Диаграмма знаков момента данного типа реле изображена на рис. 2-37, *б*.

3. При промежуточном значении угла $\alpha = \alpha_1$, где α_1 отличается от 0, но меньше 90°,

$$M_э = kU_р I_р \sin(\alpha_1 - \varphi_р). \qquad (2\text{-}34)$$

Такое реле, реагирующее на некоторую долю активной и реактивной составляющих мощности, называется реле мощности смешанного типа. Если выразить α через дополняющий его угол β, т. е. представить его как $\alpha = 90° - \beta$, то выражение момента примет вид:

$$M_э = kU_р I_р \sin(90° - \beta - \varphi_р) = kU_р I_р \cos(\varphi_р + \beta). \qquad (2\text{-}35)$$

Этим выражением часто пользуются на практике. Зона отрицательных и положительных моментов для реле смешанного типа показана на рис. 2-37, *в*. Каждый из трех рассмотренных типов реле мощности находит применение в схемах релейной защиты.

г) Основные характеристики реле мощности

Мощность срабатывания. Срабатывание реле происходит при условии, что электромагнитный момент $M_э$ преодолеет сопротивление пружины $M_п$ и трения $M_т$. *Наименьшая мощность на зажимах реле, при которой оно срабатывает, называется мощностью срабатывания* $S_{с.р}$.

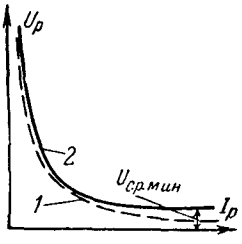


Рис. 2-38. Характеристика чувствительности реле мощности.

1 — теоретическая; *2* — действительная.

У современных индукционных реле направления мощности мощность срабатывания при угле максимальной чувствительности колеблется от 0,2 до 4 *ва*.

Зависимость мощности срабатывания от тока $I_р$ и угла $\varphi_р$ принято оценивать характеристикой чувствительности и угловой характеристикой.

Характеристика чувствительности представляет собой зависимость $U_{с.р} = f(I_р)$ при неизменном $\varphi_р$ (рис. 2-38), где $U_{с.р}$ — наименьшее напряжение, необходимое для действия реле (при данных значениях $I_р$ и $\varphi_р$). Обычно характеристика снимается при $\varphi_р$, равном углу максимальной чувствительности, т. е. для случая, когда $\sin(\alpha - \varphi_р) = 1$. Теоретическая характеристика чувствительности [см. формулу (2-31)] изображается гиперболой (кривая *1*). В действительности же за счет насыщения стали магнитопровода при больших токах $I_р$ напряжение $U_{с.р}$ остается неизменным и кривая чувствительности идет параллельно оси токов (кривая *2*).

Угловая характеристика представляет собой зависимость $U_{с.р} = f(\varphi_р)$ при неизменном значении $I_р$. Эта зависимость может быть

получена из выражения (2-31), если в него поставить надлежащие значения $I_р$ и α.

На рис. 2-39 показана характеристика для реле смешанного типа с $\alpha = +45°$. Угловая характеристика позволяет определить:

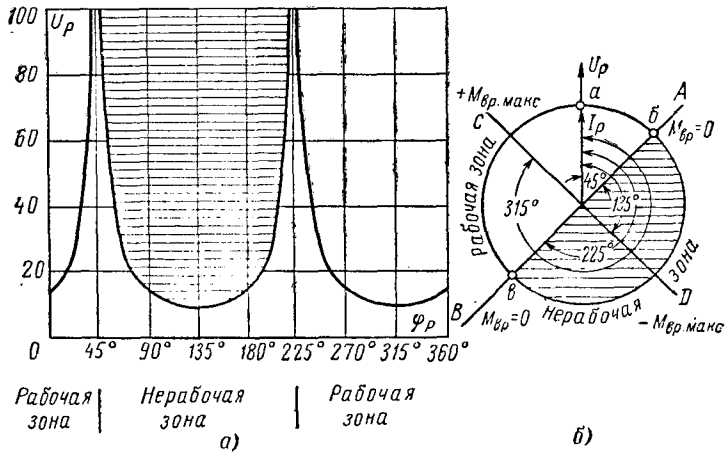


Рис. 2-39. Угловые характеристики реле мощности смешанного типа при $\alpha = 45°$.

а) изменение чувствительности реле (характеризуемое величиной $U_{с.р}$) при разных значениях угла $\varphi_р$;

б) минимальную величину $U_{с.р.мин}$ и наиболее выгодную зону углов $\varphi_р$, в пределах которой $U_{с.р}$ близко к $U_{с.р.мин}$;

в) при каких углах $\varphi_р$ меняется знак электромагнитного момента и пределы углов $\varphi_р$, которым соответствуют положительные и отрицательные моменты.

Время действия реле мощности зависит от величины мощности на зажимах реле, характеризуемой отношением $S_р/S_{с.р}$. Характер этой зависимости приведен на рис. 2-40. При мощностях $S_р$, близких к $S_{с.р}$, выдержки времени достаточно велики, и только при $S_р/S_{с.р} \geqslant 3 \div 4$ реле работает с минимальным временем.

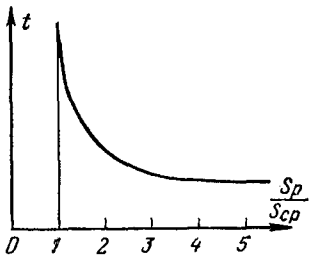


Рис. 2-40. Характеристика времени действия реле мощности $t = f\left(\frac{S_р}{S_{с.р}}\right)$.

д) Полярность обмоток

Знак электромагнитного момента реле зависит от относительного направления токов $I_н$ и $I_т$ в его обмотках (или их магнитных потоков). Условились изготовлять реле направления мощности так, что при

одинаковом направлении токов в обмотках напряжения и тока реле замыкает свои контакты (рис. 2-34). Одинаковым называется направление тока в обеих обмотках от начала к концу обмотки или наоборот. Заводы, изготовляющие реле, указывают однополярные зажимы обмоток, отмечая их условным знаком. На рис. 2-34 начало обмоток отмечено точками.

Реле подключается к измерительным трансформаторам с учетом полярности обмоток так, чтобы при к. з. в зоне защиты реле замыкало свои контакты.

е) Явление самохода

Самоходом называют срабатывание реле мощности при прохождении тока только в одной его обмотке — токовой или напряжения.

Реле, имеющее самоход от тока, может неправильно сработать при обратном направлении мощности, когда повреждение возникает в непосредственной близости от реле, в результате чего напряжение на его зажимах будет равно нулю. В этом случае ток проходит только по токовой обмотке реле.

Причиной самохода обычно является несимметрия магнитных систем реле относительно цилиндрического ротора. В реле с цилиндрическим ротором для устранения самохода на стальном сердечнике *2* (рис. 2-35, *а*) предусмотрен срез; изменяя положения сердечника, можно компенсировать неравномерность потоков в воздушном зазоре.

ж) Индукционные реле мощности типа РБМ

Отечественной электропромышленностью выпускаются быстродействующие реле направления мощности РБМ, конструктивное выполнение которых соответствует показанному на рис. 2-35, *а*. Момент реле выражается уравнением

$$M_э = kU_р I_р \sin(\alpha - \varphi_р) = kU_р I_р \cos(\varphi_р + \beta).$$

Имеются два основных варианта исполнения реле:

1) реле РБМ-171 и РБМ-271, используемые обычно для включения на фазный ток и междуфазное напряжение. Угол максимальной чувствительности у этих реле может изменяться и имеет два значения $\varphi_{м.ч} = -45°$ и $\varphi_{м.ч} = -30°$;

2) реле РБМ-178, РБМ-278 и РБМ-177, РБМ-277 включаются на ток и напряжение нулевой последовательности; их угол максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч} = +70°$. У реле РБМ-178, РБМ-278 $S_{с.р} = 0{,}2 \div 4$ *ва*, у реле РБМ-177, РБМ-277 $S_{с.р.} = 0{,}6$—3 *ва*.

Реле РБМ-171, РБМ-177, РБМ-178 имеют по одному замыкающемуся контакту, а реле РБМ-271, РБМ-277, РБМ-278 по два замыкающихся контакта двустороннего действия.

2-13. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

Магнитоэлектрическое реле (рис. 2-41) состоит из постоянного магнита *1*, подвижной рамки *2*, на которой намотана обмотка *3*, питающаяся током $I_р$, и контактов *4*. Принцип работы магнитоэлектрических реле основан на взаимодействии тока $I_р$ в обмотке рамки с магнитным потоком постоянного магнита Ф.

Сила, действующая на обмотку рамки, определяется по закону Био и Савара и равна:

$$F_э = kB_м I_р l w_р, \qquad (2\text{-}36)$$

где $B_м$ — индукция магнитного поля постоянного магнита;
$I_р$ — ток в обмотке рамки;
l — активная длина витка обмотки;
$w_р$ — число витков обмотки рамки.

Вращающийся момент, образованный силами $F_э$, равен:

$$M_э = F_э d = k' B_м I_р, \qquad (2\text{-}36а)$$

где d — плечо пары сил $F_э$; $k' = klw_р d$.

Угол поворота рамки принимается небольшим (5—10°), а форма полюсов магнита подбирается таким образом, чтобы магнитное поле было равномерным. В этом случае магнитная индукция $B_м$ является постоянной и, следовательно, момент $M_э$ можно считать пропорциональным току $I_р$ в обмотке реле, т. е.

$$M_э = k'' I_р. \qquad (2\text{-}37)$$

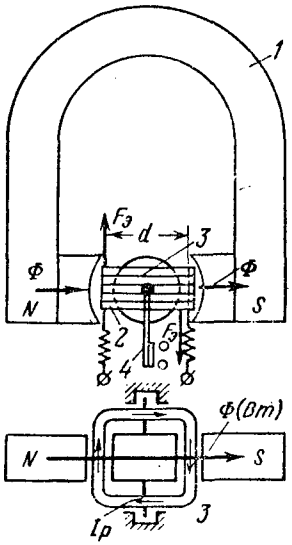


Рис. 2-41. Магнитоэлектрическое реле.

Знак момента $M_э$ и силы $F_э$ зависит от направления тока $I_р$ в подвижной рамке реле. При показанном на рис. 2-41 направлении $I_р$ направление силы $F_э$ определено с помощью правила «левой руки». При изменении направления $I_р$ изменится и направление $F_э$.

Таким образом, магнитоэлектрические реле реагируют на направление тока и поэтому, так же как и поляризованные реле, не могут работать на переменном токе.

Магнитоэлектрические реле имеют высокую чувствительность и малое потребление. Мощность срабатывания достигает 10^{-8}—10^{-10} *вт* и превосходит чувствительность поляризованных реле, что объясняется наличием сильного поля постоянного магнита *1*.

Обладая малым потреблением, магнитоэлектрические реле имеют слабую контактную систему с малой отключающей способностью. Зазор между контактами очень мал — около 0,5—0,3 *мм*. Для повышения чувствительности противодействующая пружина в магнитоэлектрических реле имеет небольшой момент, поэтому магнитоэлектрические реле отличаются плохим возвратом. Надежный возврат этих реле часто обеспечивается подачей в обмотку реле тормозного тока, действующего на размыкания контактов. Время действия реле равно 0,1—0,2 *сек*.

Указнные недостатки необходимо учитывать при использовании магнитоэлектрических реле в схемах защиты. Магнитоэлектрические реле широко применяются в качестве нуль-индикаторов в схемах на выпрямленном токе.

2-14. РЕЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Применение полупроводниковых приборов (диодов и триодов) [Л. 14, 15] позволяет уменьшить размеры реле, снизить потребление мощности от измерительных трансформаторов, повысить чувствительность, улучшить характеристики и выполнить реле без контактов и движущихся частей.

Полупроводниковые приборы имеют большие разбросы характеристик, зависимость параметров от температуры и нелинейность сопротивлений. Однако при учете этих недостатков в процессе конструирования их нежелательное влияние на параметры реле можно ограничить до допустимых пределов.

С использованием полупроводников могут выполняться как основные реле (т. е. реле тока, напряжения, мощности и сопротивления), так и элементы логической части схем защит.

Простые реле, реагирующие на одну электрическую величину — ток или напряжение, выполняются, как правило, на выпрямленном токе с помощью диодов. В качестве реагирующего (исполнительного) органа при этом используется высокочувствительные электромагнитные, поляризованные или магнитоэлектрические реле.

Более сложные реле, такие как реле мощности и сопротивления, реагирующие на две электрические величины — ток и напряжение, могут выполняться с использованием полупроводников на одном из следующих принципов [Л. 18, 17, 45, 87]:

1) на сравнении абсолютных значений двух электрических величин $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$. Такие реле выполняются на выпрямленном токе: в них сравниваемые напряжения переменного тока $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$ выпрямляются, а затем сопоставляются по величине с помощью специальных схем сравнения (фазочувствительных схем);

2) на сравнении фаз мгновенных значений двух электрических величин $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$. Реле такого типа выполняются с помощью фазосравнивающих схем, позволяющих определить сдвиг фаз между $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$.

В обоих случаях сравниваемые величины U_{I} и U_{II} являются линейными функциями тока $I_{\text{р}}$ и напряжения $U_{\text{р}}$, подводимых к реле, а именно:

$$\dot{U}_{\text{I}} = k_1\dot{U}_{\text{р}} + k_2\dot{I}_{\text{р}} \text{ и } \dot{U}_{\text{II}} = k_3\dot{U}_{\text{р}} + k_4\dot{I}_{\text{р}}, \qquad (2\text{-}38)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — постоянные коэффициенты, не зависящие от $\dot{U}_{\text{р}}$ и $\dot{I}_{\text{р}}$.

Изменяя коэффициенты $k_1 - k_4$, можно получить реле разных типов и с различными характеристиками. К ним в первую

очередь относятся реле направления мощности и реле сопротивления.

Полупроводниковые реле на сравнении абсолютных значений двух электрических величин, или, как их часто называют, реле на выпрямленном токе, разработаны в различных вариантах и получили широкое распространение.

Полупроводниковые реле на сравнении фаз разработаны в меньшей степени, но имеют определенную перспективу применения.

Ведутся также разработки реле на сравнении абсолютных значений и сравнении фаз с использованием эффекта Холла [Л. 13, 87, 17].

2-15. РЕЛЕ НА ВЫПРЯМЛЕННОМ ТОКЕ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ОДНУ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ВЕЛИЧИНУ

К реле, реагирующим на одну электрическую величину, относятся реле тока и напряжения. Наибольшее распространение получили реле, включаемые на ток или напряжение сети через выпрямители, выполняемые с помощью полупроводниковых диодов.

Устройство и принцип действия токового реле на выпрямленном токе показаны на рис. 2-42. Реле постоянного тока P электромагнитное, поляризованное или магнитоэлектрическое включается на ток сети через выпрямитель B на полупроводниковых диодах. Наилучшей схемой выпрямителя, широко применяемой в релейной технике, является двухполупериодная мостовая схема, приведенная на рис. 2-42, *а*.

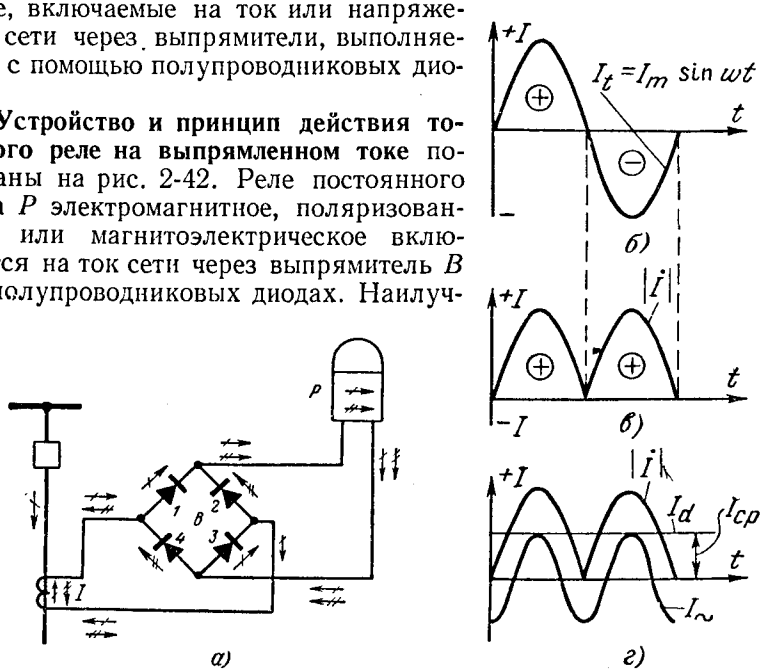


Рис. 2-42. Токовое реле на выпрямленном токе.

а — принципиальная схема; *б* — ток на входе выпрямителя; *в* — выпрямленный ток $\dot{I}$; *г* — переменная $I_\sim$ и постоянная I_d составляющие.

Как следует из рис. 2-42, *а*, в положительный полупериод переменный ток $I_t = I_m \sin \omega t$, показанный стрелкой с одним штрихом, проходит через реле по двум открытым для положительного тока вентилям *1* и *3*, при этом вентили *2* и *4* закрыты. В отрицательный полупериод ток I_t (стрелка с двумя штрихами) проходит в реле через вентили *2* и *4*, которые в этом случае открываются, а вентили *1* и *3* закрываются.

Из показанного на рис. 2-42, *а* токораспределения видно, что ток после выпрямителя идет через реле все время в одном (положительном) направлении как в положительный, так и в отрицательный полупериод переменного тока.

Мгновенные значения выпрямленного тока пропорциональны соответствующим мгновенным значениям переменного тока, поэтому кривая выпрямленного тока $|I|$ имеет пульсирующий характер (рис. 2-42, *в*), изменяясь от нуля до максимума, но в отличие от кривой переменного тока она сохраняет постоянный знак.

Выпрямленный ток можно представить как сумму постоянной составляющей I_d, равной среднему значению выпрямленного тока, и переменной составляющей $I_\sim$ являющейся синусоидальной функцией с частотой 100 *гц* (рис. 2-42, *г*).

Постоянная составляющая выпрямленного тока

$$I_d = \frac{2}{\pi} I_m = 0{,}63 I_m = I_{ср}, \qquad (2\text{-}39)$$

где I_m — амплитуда выпрямленного тока, $|I|$; $I_{ср}$ — среднее значение выпрямленного тока.

Переменная составляющая

$$I_\sim = I_2 \cos 2\omega t = 0{,}425 I_m \cos 2\omega t. \qquad (2\text{-}39а)$$

Из (2-39) следует, что постоянная слагающая I_d пропорциональна максимальному значению выпрямляемого тока I и может, поэтому, рассматриваться как модуль (абсолютная величина) его вектора, т. е. $I_d = k\,|\dot{I}|$.

Разложение выпрямленного тока на составляющие осуществляется с помощью ряда Фурье [Л. 29 и 95], согласно которому выпрямленный ток $|\dot{I}|$ состоит из постоянной слагающей и гармонических составляющих с нарастающей частотой и убывающими гармониками.

При двухполупериодном выпрямлении (см. [Л. 29 и 95]) переменные слагающие состоят только из четных косинусоидальных гармоник. В этом случае выпрямленный ток

$$|\dot{I}| = I_d + I_2 \cos 2\omega t - I_4 \cos 4\omega t + I_6 \cos 6\omega t + \ldots, \qquad (2\text{-}40)$$

где I_2, I_4, I_6 — амплитуды 2, 4, 6-й гармоник; ω — угловая частота выпрямляемого тока I, $\omega = 2\pi f$, $f = 50$ *гц*.

Из (2-40) следует, что среднее значение выпрямленного тока $|I|$ равно сумме средних значений его составляющих, и так как среднее значение каждой гармонической составляющей за период равно нулю, то $I_{ср} = I_d$.

Составляющие 4-й гармоники и выше очень малы, и поэтому ими пренебрегают, считая, что переменная слагающая выпрямленного тока состоит в основном из 2-й гармоники I_2, имеющей частоту 100 *гц*, как это было принято выше.

Пульсация выпрямленного тока вызывает вибрацию контактов исполнительного элемента органа, поэтому ее необходимо устранять.[1]. Для этой цели применяются специальные устройства, сглаживающие кривую выпрямленного тока.

Устройство для сглаживания тока ограничивает попадание переменных составляющих тока в реле. Подобные устройства показаны на рис. 2-43. В схеме на рис. 2-43, *а* последовательно с обмоткой реле *Р* включен дроссель *L*, индуктивное сопротивление которого $x_L = \omega L = 2\pi f L$ имеет значительную величину для переменной составляющей с $f = 100$ *гц* и равно нулю для постоянного тока. В результате постоянная составляющая выпрямленного тока свободно проходит в реле, а величина переменной ограничивается.

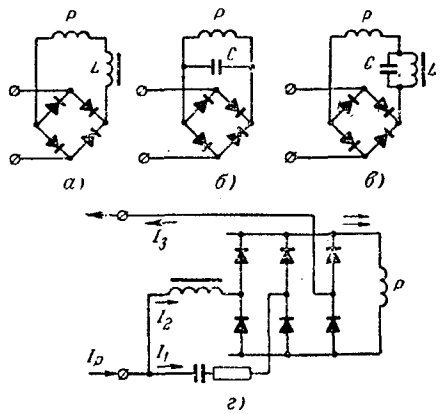


Рис. 2-43. Схемы для сглаживания выпрямленного тока.

а — с последовательным индуктивным сопротивлением; *б* — с шунтирующим конденсатором; *в* — с резонансным фильтром, не пропускающим тока с $f = 100$ *гц*; *г* — с расщеплением выпрямленного тока на три составляющие I_1, I_2, I_3.

В схеме на рис. 2-43, *б* обмотка реле *Р* зашунтирована конденсатором *С* с сопротивлением $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$, которое обратно пропорционально *f*. Поэтому большая часть переменной составляющей выпрямленного тока, для которой x_C мало, замыкается через конденсатор *С*, минуя реле. Для постоянной составляющей конденсатор является бесконечно большим сопротивлением, и поэтому она полностью замыкается через реле. В схеме на рис. 2-43, *в* применен контур *LC*, настроенный в резонанс на частоту 2-й гармоники 100 *гц*, преобладающей в выпрямленном токе. Такой фильтр свободно пропускает постоянную составляющую через индуктивность *L* и представляет большое сопротивление для переменной слагающей. Схемы на рис. 2-43, *а*, *б* дают наилучший результат для источников переменного тока с малым сопротивлением по отношению к нагрузкам (реле *Р*); схема на рис. 2-43, *в* более эффективна для источников с большим по отношению к нагрузке сопротивлением.

Все приведенные схемы содержат индуктивность и емкость, замедляющие нарастание постоянной составляющей тока в обмотке реле, что вызывает замедление их действия. Особенно большое замедление создают схемы на рис. 2-43, *а* и *б*.

[1] В рассматриваемых ниже схемах сравнения абсолютных значений двух электрических величин пульсация выпрямленного тока вызывает нежелательную зависимость срабатывания реле от угла сдвига между сравниваемыми величинами.

В тех случаях, когда увеличение времени действия недопустимо, применяется более сложная схема (рис. 2-43, *г*). В этой схеме подлежащий выпрямлению ток I расщепляется на три составляющие I_1, I_2 и I_3, взаимно сдвинутые по фазе на 120° с помощью индуктивных и емкостных сопротивлений. Каждый из этих токов самостоятельно выпрямляется, затем они суммируются и подаются в обмотку реле. Результирующий ток весьма близок к постоянному. Эта схема не влияет на быстродействие реле.

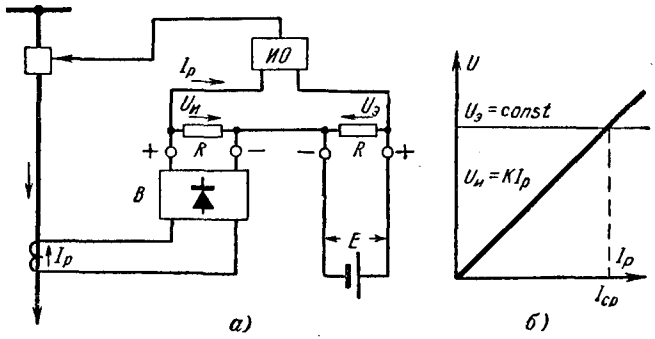


Рис. 2-44. Схема реле на сравнении измеряемой величины (тока $I_р$) с эталоном $I_э$ (*а*) и характеристики срабатывания реле (*б*).

Имеется второй вариант выполнения реле тока и напряжения: на выпрямленном токе. По этому варианту (рис. 2-44, *а*) измеряемая величина $U_и$ сравнивается с эталонной величиной $U_э$, изменяющейся по другому закону или имеющей постоянное значение (как показано на рис. 2-44, *б*). Реле работает, если $U_и \geqslant U_э$. Реле на выпрямленном токе отличаются малым потреблением и небольшими размерами.

2-16. РЕЛЕ НА СРАВНЕНИИ АБСОЛЮТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДВУХ НАПРЯЖЕНИЙ U_I И U_{II}

а) Принципы выполнения и работы

Общие принципы выполнения и структурные схемы всех видов реле на сравнении абсолютных значений двух напряжений U_I и U_{II} одинаковые и показаны в виде блок-схемы на рис. 2-45. Реле состоят: из суммирующего устройства *1*, выпрямителей *B1* и *B2*, схемы сравнения абсолютных значений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ — *3* и исполнительного органа *4*.

Напряжение и ток сети $\dot{U}_р$ и $\dot{I}_р$ подводятся к суммирующему устройству, на выходе которого с помощью вспомогательных трансформаторов образуются два напряжения $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, по выражениям (2-38). Каждое из этих напряжений выпрямляется выпрямителями

B1, *B2* и на их выходе получаются выпрямленные напряжения $|\dot{U}_{\text{I}}|$ и $|\dot{U}_{\text{II}}|$, пропорциональные модулям (абсолютным значениям) векторов $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$.

Выпрямленные напряжения подводятся к схеме сравнения *3*, где они вычитаются друг из друга, образуя на выходе схемы напряжение

$$U_{\text{вых}} = |\dot{U}| - |\dot{U}_{\text{II}}|. \quad (2\text{-}41)$$

На это напряжение к выходным зажимам схемы сравнения включается исполнительный орган *4*.

Реле должно действовать при условии, что

$$|\dot{U}_{\text{I}}| > |\dot{U}_{\text{II}}| \text{ или } U_{\text{вых}} > 0, \quad (2\text{-}42)$$

и не должно работать, если $|\dot{U}_{\text{I}}| \leqslant |\dot{U}_{\text{II}}|$.

В соответствии с этим исполнительный орган *4* должен действовать только при положительных значениях $U_{\text{вых}}$; это означает, что исполнительный орган должен быть направленным, т. е. реагировать на полярность подводимого к нему напряжения.

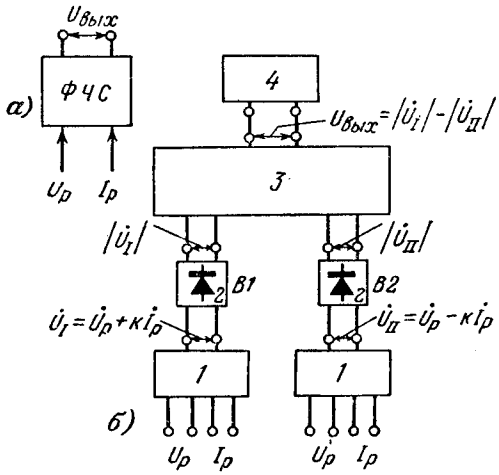


Рис. 2-45. Блок-схема реле направления мощности, основанного на фазочувствительной схеме.

а — принцип действия фазочувствительной схемы; *б* — блок-схема реле.

Напряжение U_{I}, вызывающее работу реле, называется р а б о ч и м, а U_{II} — т о р м о з н ы м; соответственно именуются элементы схемы, связанные с U_{I} и U_{II}.

Изменяя с помощью суммирующего устройства характер зависимости сравниваемых напряжений U_{I} и U_{II} от $U_{\text{р}}$ и $I_{\text{р}}$, можно получить как реле мощности, так и различные виды реле сопротивлений.

Из рассмотренного видно, что реле на сравнении абсолютных значений двух величин работают на выпрямленном токе. По этому признаку их часто называют реле на выпрямленном токе.

б) Выполнение основных элементов реле

Суммирующее устройство служит для образования (ф о р м и р о в а н и я) напряжений $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$ из тока $I_{\text{р}}$ и напряжения $U_{\text{р}}$ защищаемого элемента по выражению (2-38). Устройство состоит из двух трансформаторов T_1 и T_2 (рис. 2-46), каждый из которых имеет по одной первичной обмотке и две одинаковые вторичные обмотки. Трансформатор T_1 питается напряжением сети $U_{\text{р}}$, которое наводит во вторичных обмотках э. д. с. $E_1 = k_1 U_{\text{р}}$. Трансформатор

T_2 питается током сети $I_р$, который создает во вторичных обмотках э. д. с. $E_2 = k_2 I_р$, пропорциональную $I_р$. Соединив вторичные обмотки T_1 и T_2 попарно, A_1 и B_1 последовательно-согласно и A_2 и B_2 последовательно-встречно, получим на выходе первой группы обмоток э. д. с. $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_р + k_2 \dot{I}_р$, а на второй э. д. с. $\dot{U}_{II} = k_1 \dot{U}_р - k_2 \dot{I}_р$.

Схема суммирования, показанная на рис. 2-46, служит для получения реле мощности. Если исключить из схемы соединения вторичных цепей T_1 и T_2 обмотки A_2 и B_1, то $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_р$, а $\dot{U}_{II} = k_2 \dot{I}_р$, при таком суммирующем устройстве реле превратится в ненаправленное реле сопротивления (см. § 11-10, б). Исключая из схемы обмотку B_1, получим направленное реле сопротивления (см. § 11-10, в).

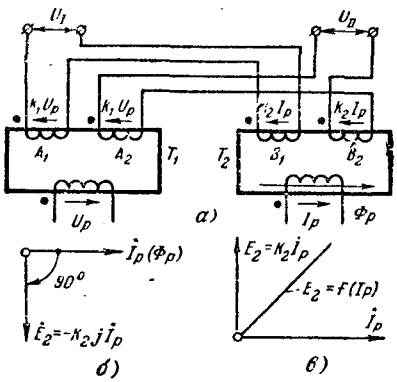


Рис. 2-46. Суммирующее устройство для получения $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

а — схема; *б* — векторная диаграмма трансреактора T_2; *в* — зависимость E_2 трансреактора от $I_р$.

Трансформатор T_2 служит для получения э. д. с. $\dot{E}_2 = jk\dot{I}_р$ и должен удовлетворять двум условиям: 1) он должен работать на цепь с большим сопротивлением, т. е. по существу в разомкнутом режиме, и 2) его вторичная э. д. с. $\dot{E}_2$ должна быть пропорциональна первичному току $I_р$ (рис. 2-46, *в*).

Обычный трансформатор тока не может работать в таких условиях из-за насыщения при больших токах $I_р$, опасного повышения вторичного напряжения и недопустимого нагрева магнитопровода, вызванного отсутствием размагничивающего действия н. с. вторичной обмотки. Для обеспечения поставленных условий магнитопровод трансформатора T_2 выполняется с воздушным зазором. Это ограничивает магнитный поток, в результате чего устраняется возможность насыщения магнитопровода, его недопустимый нагрев вихревыми токами и повышенное напряжение во вторичной цепи.

Трансформаторы тока с воздушным зазором, рассчитанные на работу с разомкнутой вторичной цепью и создающие э. д. с., пропорциональную первичному току, называются трансреакторами.

Трансреакторы весьма широко используются в современных устройствах релейной защиты.

Выпрямители. Выпрямление напряжений U_I и U_{II} осуществляется по двухполупериодной схеме выпрямительными мостами из полупроводниковых диодов. Сглаживание выпрямленных напряжений производится с помощью схем на рис. 2-43.

Схемы сравнения [Л. 87]. Сравнение величины двух выпрямленных напряжений $|U_I|$ и $|U_{II}|$ можно осуществить электрическим путем, сравнивая напряжения или пропорциональные им токи, или магнитным путем, сравнивая магнитные потоки, пропорциональные напряжениям U_I и U_{II}. В соответствии с этим применяются три схемы сравнения: на балансе напряжений, на балансе токов и на балансе магнитных потоков (рис. 2-47).

В схеме сравнения на балансе напряжений (рис. 2-47, *а*) выпрямители B_1 и B_2 соединяются между собой одноименными полюсами. В рассечку провода к зажимам m — n включается реле (исполнительный орган) *ИО*. В контуре *ИО* напряжения U_I и U_{II} направлены встречно. Под влиянием разности $U_I - U_{II}$ в исполнительном органе появляется ток $I_р$, направление которого зависит от того, какое из напряжений больше. При положительном направлении тока *ИО* работает, а при отрицательном — не действует.

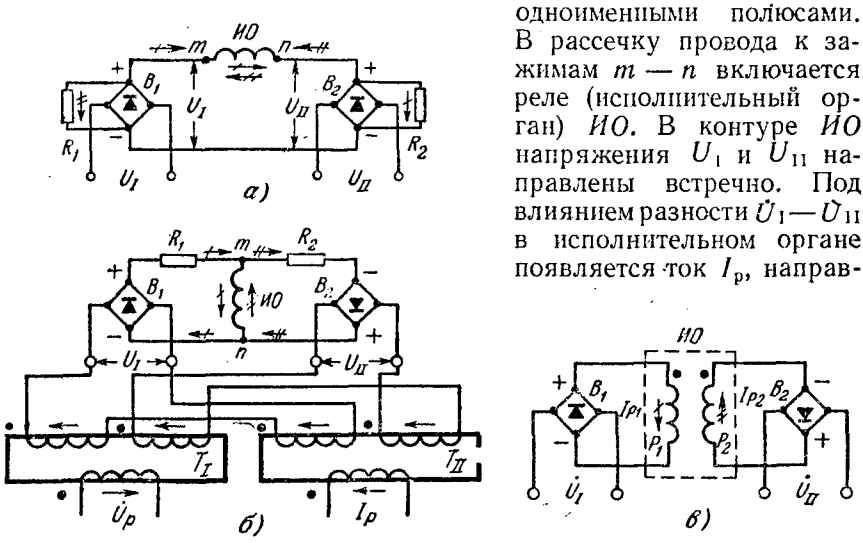


Рис. 2-47. Схема сравнения.

а — на равновесии напряжений; *б* — на циркуляции токов (балансе токов); *в* — на балансе магнитных потоков.

Сопротивления R_1 и R_2 шунтируют выпрямители и образуют контур с малым сопротивлением, по которому проходит ток $I_р$ помимо выпрямителей, представляющих большое сопротивление для токов обратного направления.

В схеме сравнения на балансе токов (рис. 2-47, *б*) выпрямители B_1 и B_2 соединяются последовательно разнополярными зажимами. Исполнительный орган *ИО* включается к зажимам m — n параллельно обоим выпрямителям. Сравниваемые напряжения U_I и U_{II} создают пропорциональные им токи I_I и I_{II}, замыкающиеся через *ИО* навстречу друг другу. В реле *ИО* проходит ток $I_р = I_I - I_{II}$. Направление этого тока зависит от того, какое из напряжений U_I или U_{II} больше. При равенстве U_I и U_{II} ток $I_р = 0$. Таким образом, в данной схеме сравне-

ние U_{I} и U_{II} производится путем вычитания создаваемых ими токов в обмотке реле. Балластные сопротивления R_1 и R_2 устанавливаются для того, чтобы исполнительный орган не оказался зашунтированным сопротивлением работающего выпрямителя приемной стороны (так называется выпрямитель, имеющий меньшее напряжение). Необходимость балластных сопротивлений зависит от соотношения сопротивлений реле и выпрямителей.

Рассмотренная схема иногда называется схемой с циркулирующими токами, поскольку в проводах, соединяющих выпрямители B_1 и B_2, всегда проходит ток.

В схеме с магнитным сравнением (рис. 2-47, *в*) исполнительный орган выполняется с двумя обмотками P_1 и P_2.

Каждая из обмоток подключается к своему выпрямителю так, чтобы токи в них имели встречное направление.

При этом условии токи $I_{\text{р1}}$ и $I_{\text{р2}}$ создают встречно направленные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2, которые и сравниваются между собой в магнитопроводе реле.

Поведение реле зависит от знака результирующего потока $\Phi_{\text{р}} = \Phi_1 - \Phi_2$.

При равенстве $|\dot{U}_{\text{I}}|$ и $|\dot{U}_{\text{II}}|$ ток $I_{\text{р1}} = I_{\text{р2}}$, поток $\Phi_{\text{р}} = 0$, реле бездействует.

Если $U_{\text{I}} \neq U_{\text{II}}$, то $\Phi_{\text{р}} \neq 0$. Знак $\Phi_{\text{р}}$ зависит от того, какое из сравниваемых напряжений больше. При $\Phi_{\text{р}} > 0$ реле работает, а при $\Phi_{\text{р}} < 0$ — не действует.

На рис. 2-47, *б* показана полная схема реле направления мощности на фазочувствительной схеме при сравнении напряжений U_{I} и U_{II} на принципе баланса токов. Для упрощения в схеме не показаны сглаживающие устройства.

Исполнительный орган. Как уже отмечалось, исполнительный орган включается на выходное напряжение схемы сравнения и должен действовать только при положительных значениях этого напряжения. Поэтому исполнительный орган должен выполняться с помощью направленных реле постоянного тока.

Устройство подобного типа часто называют нуль-индикатором, поскольку оно реагирует на отклонение от нуля входного напряжения. К рассматриваемому реагирующему органу (нуль-индикатору) предъявляются четыре основных требования: высокая чувствительность, малое потребление мощности, быстрота действия и надежность работы.

В качестве исполнительных органов (нуль-индикаторов), отвечающих предъявленным требованиям, могут использоваться:

1) высокочувствительные электромеханические реле — поляризованные или магнитоэлектрические;

2) электромеханические реле, включаемые через полупроводниковый усилитель;

3) бесконтактные реле на полупроводниковых приборах.

Наиболее простым и довольно часто применяемым вариантом является использование поляризованных или магнитоэлектрических реле.

В тех случаях, когда требуется повышенная чувствительность, применяется включение электромеханических реле через усилитель постоянного тока. Потребление мощности при срабатывании таких усилителей составляет около $3 \cdot 10^{-5}$ *вт*.

Усилитель постоянного тока реагирует на знак входного сигнала, поэтому исполнительное реле, включаемое на его выходе, может быть ненаправленным, так как усилитель будет подавать в него ток только при положительных значениях $U_{вых}$ схемы сравнения. Поэтому имеется возможность применения обычного более грубого электромагнитного реле с более надежной контактной системой.

Еще большее повышение чувствительности при полном исключении электромеханических конструкций можно получить при применении усилителя, работающего в релейном режиме. Мощность, необходимая для срабатывания такого реле, равна примерно 10^{-5}—10^{-6} *вт*.

В качестве примера на рис. 2-49 приведена одна из наиболее простых схем усилителя, применяемая в отечественных конструкциях, разработанная лабораторией Энергосетьпроекта.

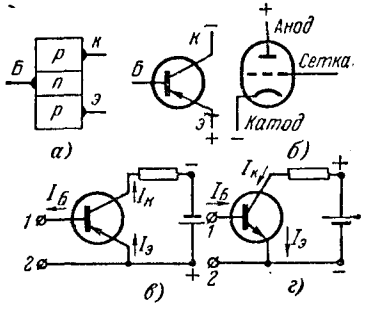


Рис. 2-48. Полупроводниковый триод (транзистор).

а — схема устройства полупроводникового триода *р-п-р*; *б* — условное изображение триода; *в* — включение полупроводникового триода типа *р-п-р* по схеме с общим эмиттером; *г* — включение триода типа *п-р-п*.

Поскольку основным элементом усилителя являются полупроводниковые триоды (транзисторы), напомним некоторые особенности их работы [Л. 15, 16].

Плоскостной полупроводниковый триод (рис. 2-48, *а*) представляет м о н о к р и с т а л л (германия или кремния), состоящий из трех слоев с чередующейся проводимостью: *р-п-р* или *п-р-п*. В области полупроводника с проводимостью *п* основными (преобладающими) носителями заряда являются отрицательные электроны, а в области с проводимостью *р* — положительные дырки. В дальнейшем будем рассматривать транзистор типа *р-п-р*. Нижняя область транзистора (рис. 2-48, *а*) называется э м и т т е р о м (*Э*), средняя — б а з о й (*Б*) и верхняя — к о л л е к т о р о м (*К*). База по сравнению с эмиттером и коллектором имеет очень маленькую ширину слоя и значительно меньшую концентрацию носителей заряда.

Эмиттер, база и коллектор выполняют функции, аналогичные катоду, сетке и аноду электронной лампы (рис. 2-48, *а* и *б*), при этом роль управляющей сетки лампы выполняет база транзистора.

Полупроводниковый триод состоит из двух переходов *р-п* и *п-р*. Один — между эмиттером и базой, называемый эмиттерным, и второй — между базой и коллектором, называемый коллекторным.

Переход *р-п* работает как выпрямитель, пропускающий ток только в одном направлении при подаче на него внешнего напряжения прямой полярности, т. е. при подводе плюса к области *р* и минуса к области *п*. При отсутствии внешнего напряжения переход заперт вследствие образующихся на его границе объемных

зарядов противоположных знаков, которые создают электрическое поле, препятствующее переходу дырок из области p в область n и электронов из области n в область p. При подаче обратного внешнего напряжения (плюса на n и минуса на p) поле объемных зарядов усиливается внешним полем и переход запирается еще больше.

Это свойство переходов p-n играет решающую роль в работе триодов.

Для усиления мощности поступающего сигнала очень распространена схема с общим эмиттером (рис. 2-48, *в*), при которой от источника внешнего напряжения плюс подается к эмиттеру, а минус — к коллектору. Управляющий сигнал подключается между базой и эмиттером.

При отсутствии входного сигнала оба перехода — эмиттерный и коллекторный — заперты и триод не работает — закрыт. Если на базу подан положительный потенциал относительно эмиттера, то эмиттерный переход остается закрытым, так как такая полярность напряжения является для него обратной.

При подаче на базу транзистора p-n-p отрицательного по отношению к эмиттеру потенциала переход база — эмиттер открывается, поскольку поданное напряжение является прямым для перехода p-n.

В этом случае дырки, являющиеся носителями положительных зарядов, двигаются под действием электрического поля, созданного приложенным напряжением от эмиттера к базе (т. е. как бы вспрыскиваются эмиттером в базу). Часть дырок, попадая в базу, рекомбинируется, вызывая ток $I_б$, замыкающийся через источник управляющего сигнала. Остальная, большая часть дырок (90—99%) вследствие малой толщины слоя базы достигает границы коллекторного перехода. Коллекторный переход закрыт для основных носителей базы — электронов, но дырки обладают положительным зарядом и поэтому, попадая в сильное электрическое поле, создаваемое отрицательным потенциалом коллектора, ускоряются и втягиваются — «захватываются» коллектором. Там они рекомбинируются с электронами, поступающими из внешней сети.

Таким образом, в триоде p-n-p появляется ток, обусловленный движением положительно заряженных дырок.

На основе сказанного можно сделать краткий вывод: триод типа p-n-p открывается при подаче на базу отрицательного сигнала, открывающего эмиттерный переход; после открытия эмиттерного перехода происходит вспрыскивание дырок из эмиттера в базу, «дрейф» их в базе в направлении коллекторного перехода и захват дырок коллектором.

Транзистор типа n-p-n включается по схеме на рис. 2-48, *г*. Для его открытия на базу триода необходимо подать положительный по отношению к эмиттеру потенциал.

Слабый сигнал, поданный на базу ($I_б = 0{,}05\ I_э$), открывает транзистор, и под влиянием внешнего источника в нагрузке появляется ток $I_к = I_э - I_б$. Если принять $I_э = 1$, то ток $I_к$ приблизительно равен $(1—0{,}05)\ I_э$. Отношение $\Delta I_к / \Delta I_э = \alpha$ называется коэффициентом усиления по току, он достигает величины 0,9—0,95.

Транзисторы используются как усилители напряжения и мощности, позволяющие при слабом сигнале на входе получить усиленный сигнал на выходе. При этом напряжение на нагрузке, создаваемое внешним источником, также во много раз превосходит напряжение сигнала на входе усилителя (зажимы *1*—*2*). Так, за счет мощности постороннего источника происходит усиление сигнала с помощью полупроводникового триода.

Усилитель (нуль-индикатор на полупроводниках), показанный на рис. 2-49), выполнен двухкаскадным с двумя транзисторами *Т1* и *Т2* [Л. 17]. От внешнего источника напряжения на коллекторы триодов *Т1* и *Т2* подан минус, а на эмиттеры — плюс. Управляющий сигнал, получаемый с выхода фазочувствительной схемы, подается на входные зажимы усилителя *1* и *2*, к которым подключены база и эмиттер.

В качестве исполнительного реле применено поляризованное реле типа РП-7. Его обмотка включена в цепь коллектора триода *Т2*. Сопротивление r_1 служит для подачи отрицательного смещения на базу триода *Т1*.

Сопротивление r_2 вместе с сопротивлением триода *Т1* (между коллектором и эмиттером) образует делитель напряжения, к точке *3* которого подключена база триода *Т2*. При отсутствии входного сигнала на зажимах *1—2* триод *Т1* получает отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал, поэтому *Т1* открыт.

Сопротивление открытого триода *Т1* близко к нулю, поэтому потенциал точки *3* имеет положительный знак. При положительном знаке на базе триод *Т2* закрыт и ток в реле отсутствует (или, точнее, он очень мал и равен обратному току коллекторного перехода *Т2*).

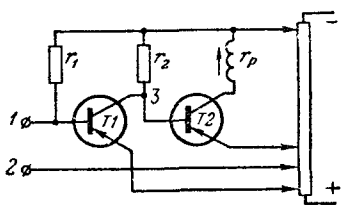


Рис. 2-49. Упрощенная схема двухкаскадного усилителя на полупроводниковых триодах.

При появлении на входе *1-2* отрицательного сигнала триод *Т1* остается открытым, а *Т2* закрытым. Если на вход *1-2*, а следовательно, и на базу *Т1* поступает положительный сигнал, то триод *Т1* закрывается, его сопротивление резко возрастает и в результате этого на базе *Т2* появляется отрицательный потенциал через сопротивление r_2. Триод *Т2* открывается, в реле РП-7 появляется ток, и если он превышает $I_{с.р}$ реле, то оно действует. Для упрощения в схеме не показаны диоды, ограничивающие напряжения на триодах, и некоторые другие детали, не имеющие прямого отношения к принципу работы усилителя.

Рассмотренный усилитель потребляет при срабатывании выходного реле около $6 \cdot 10^{-5}$ *вт*.

На базе описанной схемы выполняются полупроводниковые бесконтактные реле. В этом случае схема усилителя дополняется обратной связью и он работает как триггер [Л. 17]. Широкое применение находят также трехкаскадные усилители, позволяющие получить на выходе большую мощность, чем двухкаскадные.

в) Реле направления мощности

Схема и принцип действия. Схема реле направления мощности на сравнении величин двух напряжений U_I и U_{II}, построенная по блок-схеме (рис. 2-45), приведена на рис. 2-50. Для упрощения на схеме не показано суммирующее устройство, которое выполняется согласно рис. 2-46. В качестве схемы сравнения принята довольно распространенная схема на балансе напряжений, а в качестве нуль-индикатора *НИ* показано магнитоэлектрическое (или поляризованное) реле. Применяются и другие варианты исполнения обоих элементов.

Сравниваемые напряжения, получаемые с помощью сумматора и подводимые к зажимам выпрямителей B_1 и B_2, выражаются уравнениями:

$$\dot{U}_{\text{I}} = \dot{U}_{\text{р}} + k\dot{I}_{\text{р}} \quad \text{и} \quad \dot{U}_{\text{II}} = \dot{U}_{\text{р}} - k\dot{I}_{\text{р}}. \tag{2-43}$$

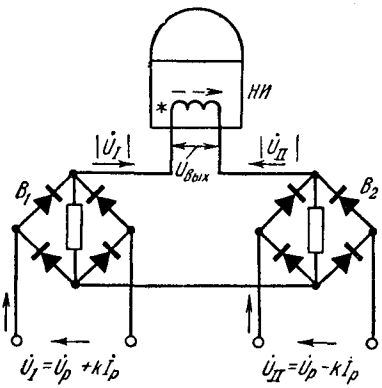


Рис. 2-50. Схема реле направления мощности на сравнении абсолютных величин $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$.

Это соответствует выражениям (2-38), если принять в них

$$k_1 = k_3 = 1, \text{ а } k_2 = k_4 = k.$$

После выпрямления на схему сравнения подаются напряжения

$$|\dot{U}_{\text{I}}| = |\dot{U}_{\text{р}} + k\dot{I}_{\text{р}}|$$

$$\text{и } |\dot{U}_{\text{II}}| = |\dot{U}_{\text{р}} - k\dot{I}_{\text{р}}|.$$

Эти напряжения в контуре схемы сравнения направлены встречно, в результате чего

$$\dot{U}_{\text{вых}} = |\dot{U}_{\text{р}} + k\dot{I}_{\text{р}}| - |\dot{U}_{\text{р}} - k\dot{I}_{\text{р}}|.$$

Реле будет действовать при $|\dot{U}_{\text{р}} + k\dot{I}_{\text{р}}| > |\dot{U}_{\text{р}} - k\dot{I}_{\text{р}}|$.

Работа реле. Покажем, что рассмотренная схема ведет себя как реле направления мощности. На рис. 2-51 приведены векторные диаграммы $\dot{U}_{\text{р}}$ и $\dot{I}_{\text{р}}$, $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$ при к. з. на защищаемой линии в точке

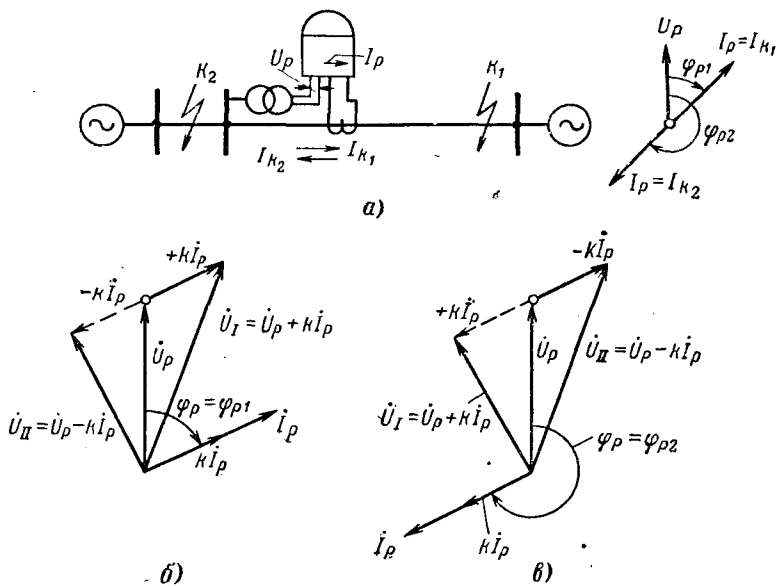


Рис. 2-51. Векторная диаграмма реле.

а — схема сети; *б* — диаграмма при к. з. в зоне; *в* — диаграмма при к. з. вне зоны.

K_1 и на соседней линии в точке K_2, построенные в предположении, что вектор напряжения $k\dot{I}_р$ совпадает по фазе с током $\dot{I}_р$.

Из этих диаграмм следует, что при к. з. на защищаемой линии (в точке K_1), когда мощность направлена от шин в линию и имеет положительный знак, модуль вектора $|\dot{U}_р + k\dot{I}_р| > |\dot{U}_р - k\dot{I}_р|$, поэтому $U_{вых}$ имеет положительный знак и реле действует. При к. з. на соседней линии (в точке K_2) мощность направлена к шинам подстанции и имеет отрицательный знак.

В этом случае вектор тока $\dot{I}_р$ и соответственно вектор $k\dot{I}_р$ изображаются на диаграмме повернутыми на 180° (рис. 2-51, *в*). В результате этого $|\dot{U}_р + k\dot{I}_р| \leqslant |\dot{U}_р - k\dot{I}_р|$, напряжение $U_{вых}$ становится отрицательным, и реле не действует. Из этого следует, что реле ведет себя при к. з. как реле направления мощности.

Пользуясь диаграммой на рис. 2-52, выясним характер изменения знака и величины $U_{вых}$, т. е. найдем зависимость $U_{вых} = f(\varphi_р)$. Для этой цели примем, что величины $U_р$ и $I_р$ не меняются, и будем поворачивать вектор $\dot{I}_р$ по часовой стрелке, изменяя, таким образом, $\varphi_р$, когда вектор $k\dot{I}_р$ будет описывать окружность с центром в точке 0, соответствующей концу вектора $\dot{U}_р$. Определяя $U_{вых} = |\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}|$ при разных $\varphi_р$, устанавливаем:

1) при изменении $\varphi_р$ от 90 до 180° и от 180 до 270° (заштрихованная часть диаграммы на рис. 2-52, *а*) $|\dot{U}_I| < |\dot{U}_{II}|$, следовательно, $U_{вых} = |\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}|$ имеет отрицательный знак и реле не действует;

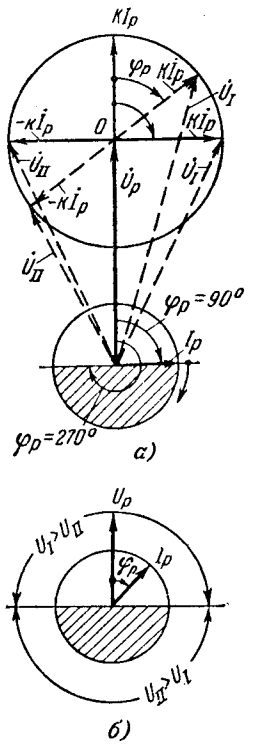


Рис. 2-52. Векторные диаграммы реле, показывающие поведение реле при различных $\varphi_р$.

2) при изменении $\varphi_р$ от 270 до 360° и от 0 до 90° (незаштрихованная часть диаграммы) $|\dot{U}_I| > |\dot{U}_{II}|$, поэтому $U_{вых}$ положительно и реле работает;

3) величина $U_{вых}$ равна нулю при $\varphi_р = 90$ и 270°, так как при этом $|\dot{U}_I| = |\dot{U}_{II}|$. При $\varphi_р = 0$ и 180° $U_{вых}$ достигает максимального значения, в этих случаях $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ совпадают по фазе и их разность равна диаметру окружности, т. е. $2kI_р$; при промежуточных значениях $\varphi_р$ $U_{вых}$ меняется от 0° до $2kI_р$. Следовательно, реле работает в наилучших условиях при $\varphi_р = 0$ и 180°, не действует из-за отсутствия напряжения при 90 и 270°.

Напряжение $U_{вых}$ рассмотренной фазочувствительной схемы изменяет свой знак при изменении $\varphi_р$, так же как косинусное реле (рис. 2-52, *б*).

Осуществляя поворот напряжений $\dot{U}_р$ или $k\dot{I}_р$ на угол α с помощью специальных фазосдвигающих схем, можно сместить угловую характеристику реле на угол α и получить реле, аналогичное реле мощности смешанного или синусного типа.

Таким образом, реле, построенное на сравнении абсолютных величин $|\dot{U}_р + k\dot{I}_р|$ *и* $|\dot{U}_р - k\dot{I}_р|$, реагирует (косвенно) на угол сдвига фаз между $U_р$ и $I_р$, и *работает как реле направления мощности.*

2-17. РЕЛЕ НА НЕПОСРЕДСТВЕННОМ СРАВНЕНИИ ФАЗ ДВУХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН U_I И U_{II}

а) Общие принципы выполнения реле

На сравнении фаз двух электрических величин можно выполнять реле направления мощности и различные типы реле сопротивлений. В качестве сравниваемых величин используются два напряжения U_I и U_{II}, которые являются линейными функциями напряжения и тока сети $U_р$ и $I_р$, по выражениям (2-38).

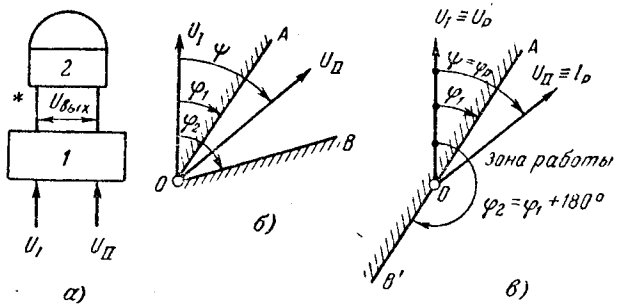


Рис. 2-53. Реле на сравнении фаз $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ (*а*); угловая характеристика работы реле (*б*) и угловая характеристика реле направления мощности (*в*).

Реле на сравнении фаз (рис. 2-53, *а*) состоят из устройства сравнения фаз (фазосравнивающей схемы) *1* и исполнительного органа *2*, реагирующего на знак выходного напряжения $U_{вых}$.

Реле реагирует на угол ψ сдвига фаз между сравниваемыми напряжениями $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ и приходит в действие при значении ψ, удовлетворяющем условию

$$\varphi_1 < \psi < \varphi_2, \tag{2-44}$$

где φ_1 и φ_2 — углы, ограничивающие зону действия реле (рис. 2-53,*б*).

Знак и величина выходного напряжения $U_{вых}$ фазосравнивающей схемы зависят от величины сдвига фаз ψ между $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, т. е. $U_{вых} = f(\psi)$. При выполнении условия (2-44) $U_{вых}$ положительно и исполнительный орган действует. Если ψ меньше φ_1 или больше φ_2, то $U_{вых}$ отрицательно и исполнительный орган не работает.

Изменяя коэффициенты k в (2-38), т. е. меняя зависимость U_{I} и U_{II} от напряжения и тока сети, можно получать различные виды реле.

В частности, для получения реле направления мощности необходимо принять $k_2 = k_3 = 0$. Тогда $U_{\text{I}} = k_1 U_{\text{р}}$, $U_{\text{II}} = k_4 I_{\text{р}}$, а угол ψ, на который реагирует реле, равен углу сдвига фаз между $\dot{U}_{\text{р}}$ и $\dot{I}_{\text{р}}$. Если в (2-44) взять $\varphi_2 = \varphi_1 + 180°$, то характеристика срабатывания реле изобразится прямой AOB' (рис. 2-53, *в*). Подобное реле ведет себя как орган направления мощности (см. § 2-12).

Реле сравнения фаз по способу сравнения фаз U_{I} и U_{II}, или, иначе говоря, по типу фазосравнивающей схемы подразделяются на реле, основанные на импульсной схеме, на схеме, сопоставляющей продолжительность времени совпадения фаз с заданным, и на кольцевой фазосравнивающей схеме.

б) Реле сравнения фаз, работающие на импульсном принципе

Принцип действия. Сравнение фаз в этой конструкции осуществляется сопоставлением знаков мгновенных значений, подведенных к реле напряжений (U_{I} и U_{II}), в определенный момент времени, например в момент положительного максимума напряжения U_{I} (рис. 2-54).

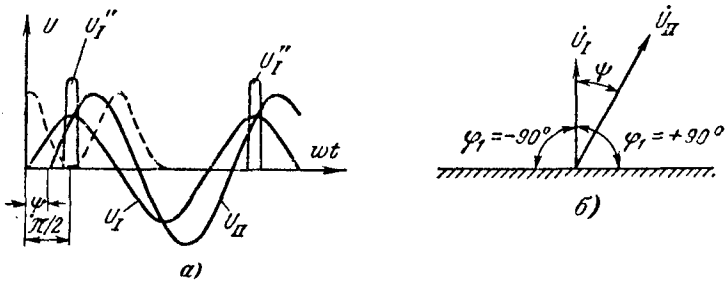


Рис. 2-54. Принцип действия импульсного реле.

Для этой цели при прохождении напряжения U_{I} через положительный максимум формируется короткий импульс напряжения U'_{I} (рис. 2-54, *а*). Если положительный импульс U'_{I} совпал с положительным мгновенным значением второго напряжения U_{II}, то на выходе схемы (рис. 2-53, *а*) появляется сигнал (напряжение $U_{\text{вых}}$) и исполнительный орган реле срабатывает. Если знаки импульса U'_{I} и напряжения U_{II} различны — реле не действует.

Как видно из рис. 2-54, *а*, при выбранном моменте сравнения (во время прохождения U_{I} через максимум) совпадение положительных значений U_{I} и U_{II} возможно при условии, что угол сдвига фаз ψ между U_{I} и U_{II} будет находиться в пределах от —90° до +90°. Следовательно, условие работы реле имеет вид:

$$-90° \leqslant \psi \leqslant +90°. \qquad (2\text{-}45)$$

Выражение (2-45) показывает, что диапазон изменения угла ψ, в пределах которого реле срабатывает, равен 180°. Угловая характеристика работы импульсного реле приведена на рис. 2-54, *б*.

Таким образом, совпадение импульса U_I'', появляющегося в момент положительного максимума U_I, с положительным значением U_{II} является признаком, что угол ψ между U_I и U_{II} лежит в диапазоне $+90° \div -90°$. На этом базируется устройство импульсных реле.

Структурная схема и диаграмма работы импульсного реле приведены на рис. 2-55. Основным элементом схемы является устройство

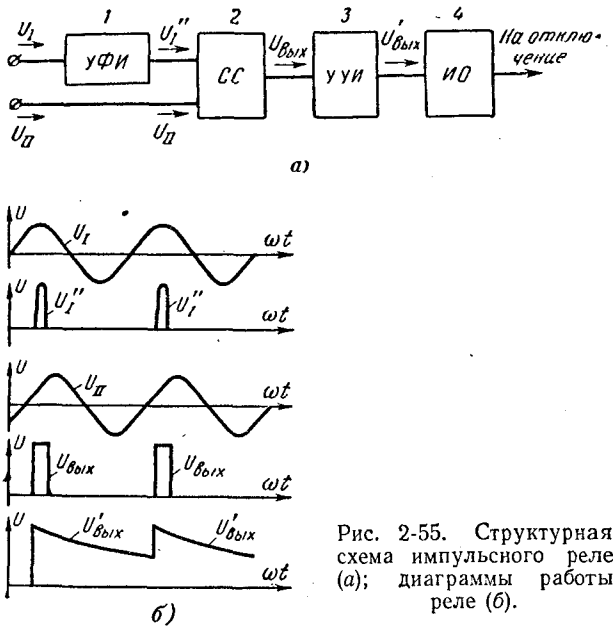


Рис. 2-55. Структурная схема импульсного реле (*а*); диаграммы работы реле (*б*).

1 для формирования импульса напряжения U_I'' в момент прохождения U_I через положительный максимум.

Импульс U_I'' и напряжение U_{II} подаются на схему совпадения *2*. Последняя выполнена так, что напряжение на ее выходе $U_{вых}$ появляется только, когда оба входных напряжения U_I'' и U_{II} положительны. Выходное напряжение имеет характер кратковременного импульса, продолжительность которого равна длительности U_I'' и составляет доли периода. Чтобы обеспечить продолжительность действия выходного реле *4*, достаточную для отключения выключателей, предусматривается устройство *3*, удлиняющее импульс $U_{вых}$ до необходимой величины. Удлиненный импульс $U_{вых}$ воздействует на исполнительный орган *4*, который дает команду на отключение.

Диаграмма работы импульсного реле показана на рис. 2-55, *б*.

В качестве примера на рис. 2-56, *а* приведено устройство для получения импульса U_I''. Напряжение U_I подается на промежуточный трансформатор *ПТН*, питающий мостовую фазоповоротную схему.

Напряжение U_I' между вершиной моста *B* и средней точкой *A* вторичной обмотки *ПТН* подается на базу триода T_1. Сопротивление *R* принимается равным x_C, при этом условии U_I' опережает U_I на угол 90° (рис. 2-56, *б*). В цепи коллектора T_1 включен пик-трансформатор *ПТ*.

Триод T_1 заперт в течение положительной полуволны U_I' и открыт в течение отрицательной. Открываясь, триод T_1 замыкает цепь первичной обмотки *ПТ*, в которой под действием э. д. с. *E* возникает постоянный ток I_1 (рис. 2-56, *а*).

Открытие и закрытие триода происходит в момент перехода U_I' через нуль. В этот момент в первичной обмотке *ПТ* появляется и исчезает ток I_1 и возникает

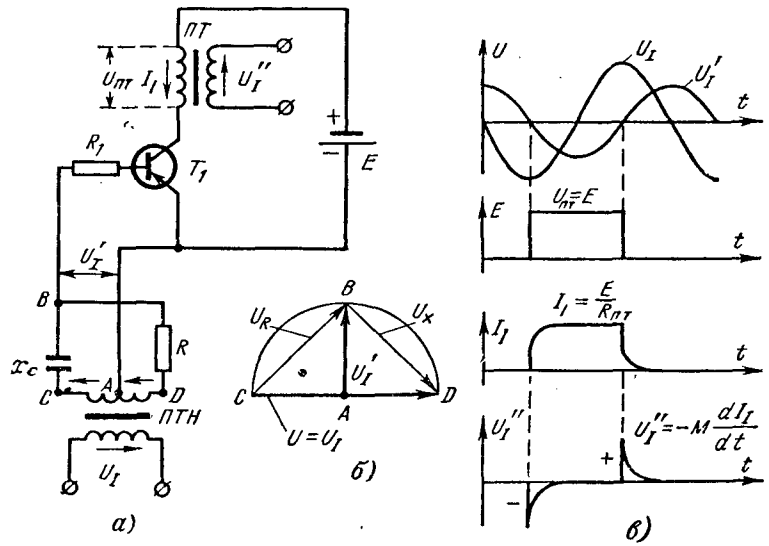


Рис. 2-56. Устройство для получения импульса U_I'' (*а*); схема устройства (*б*); диаграмма фазоповоротной схемы (*в*).

переходный процесс, сопровождающийся появлением во вторичной цепи *ПТ* пикообразного напряжения $U_I'' = -M\frac{dI_1}{dt}$ обратной полярности. Кривые токов и напряжений в пик-трансформаторе даны на рис. 2-56, *б*.

Таким образом, импульс напряжения U_I'' получается с помощью пик-трансформатора. Его возникновение в момент прохождения через максимум U_I обеспечивается тем, что напряжение U_I', управляющее пик-трансформатором, смещено посредством фазосмещающей схемы на 90° по отношению к U_I.

Реле направления мощности. Если принять $\dot{U}_I = k_1\dot{U}_p$, а $\dot{U}_{II} = k_4\dot{U}_p$, то реле по схеме на рис. 2-55 будет работать как реле направления мощности синусного типа. Сместив на угол α напряжение U_p, можно получить реле промежуточного и косинусного типа. Если $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ сформированы по выражениям (2-38), то реле будет работать как реле сопротивления.

в) Реле сравнения фаз, основанные на измерении времени совпадения знаков мгновенных значений сравниваемых напряжений U_I и U_{II}

Принцип действия. В общем случае к реле подводятся напряжения $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, сдвинутые по фазе на угол ψ, как это показано на рис. 2-57, *а*.

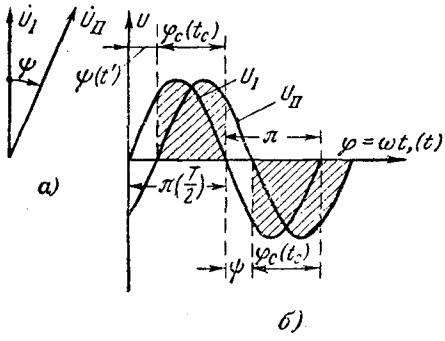


Рис. 2-57. Векторная диаграмма $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ (*а*), совпадение знаков мгновенных значений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ (*б*).

В течение определенной части положительного полупериода U_I (отмеченной штриховкой на рис. 2-57, *б*) знаки мгновенных значений U_I и U_{II} одинаковы, а в другой (не заштрихованной) — различны. В отрицательном полупериоде U_I картина совпадения и различия знаков обоих напряжений повторяется.

Угол φ_c, в пределах которого знаки U_I и U_{II} совпадают, и соответствующее ему время совпадения знаков t_c зависят от угла сдвига фаз ψ.

Как видно из рис. 2-57, угол совпадения

$$\varphi_c = \pi - \psi; \qquad (2\text{-}46)$$

с учетом, что $\varphi_c = \omega t_c$, $\psi = \omega t'$ и $\pi = \omega T/2$, из (2-46) находим зависимость времени совпадения от ψ:

$$t_c = \frac{T}{2} - t' = \frac{T}{2} - \frac{\psi}{\omega}. \qquad (2\text{-}47)$$

На основании (2-47) полученную зависимость $t_c = f(\psi)$ можно представить графически, как это показано на рис. 2-58.

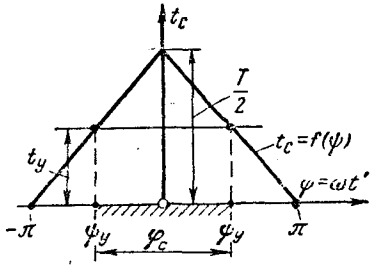


Рис. 2-58. Зависимость времени совпадения от ψ.

При совпадении фаз ($\psi = 0$) знаки мгновенных величин U_I и U_{II} будут совпадать в течение всего полупериода, при этом $\varphi_c = \pi$, а $t_c = T/2$.

С увеличением ψ φ_c и t_c будут уменьшаться, становясь меньше π и $T/2$. Когда фазы U_I и U_{II} разойдутся на 180° ($\psi = \pi$), знаки U_I и U_{II} будут различны в течение всего полупериода и поэтому φ_c и $t_c = 0$.

Поскольку время совпадения фаз t_c определяется ψ, то оно в свою очередь характеризует величину сдвига фаз ψ. Эта взаимосвязь и положена в основу конструкции реле на рассматриваемом принципе.

Для получения реле подобного типа применяется схема, измеряющая время t_c совпадения знаков напряжений U_I и U_{II}. Это время сопоставляется (сравнивается) с некоторым заданным (установленным) временем t_y, которому из (2-47) соответствует определенное значение $\psi = \psi_y$. Реле действует, если

$$\left.\begin{array}{l} t_c \geqslant t_y, \\ t_c < t_y. \end{array}\right\} \quad \text{(2-48)}$$

и не работает если

Имея в виду, что каждому значению t_c и t_y соответствует определенное ψ, полученное из (2-47) или диаграммы на рис. 2-58, можно считать, что реле работает при $\psi \geqslant \psi_y$, где по (2-47)

$$\psi_y = \left(\frac{T}{2} - t_y\right)\omega.$$

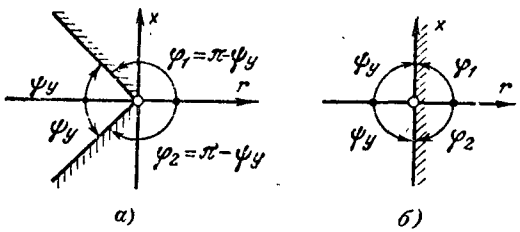
Из диаграммы на рис. 2-58 видно, что зона действия реле, удовлетворяющая (2-48), ограничена двумя углами:

$$\varphi_1 = -(\pi - \psi_y) \text{ и } \varphi_2 = +(\pi - \psi_y).$$

Область работы такого реле характеризуется неравенством

$$-(\pi - \psi_y) < \psi < (\pi - \psi_y) \quad \text{(2-49)}$$

и показана на рис. 2-59, *а*.



а) *б)*

Рис. 2-59. Зоны действия реле.

Если принять $\psi_y = \pi/2$, то область действия реле будет ограничена прямой линией, совпадающей с осью x (рис. 2-59, *б*), и будет соответствовать характеристике реле направления мощности.

Структурная схема. На рис. 2-60, *а* и *б* показаны структурная схема и диаграмма работы реле, действующего на принципе измерения времени совпадения знаков напряжений U_I и U_{II}, подведенных к реле. Напряжения U_I и U_{II} подаются на схему совпадения *1*, определяющую время t_c совпадения положительных мгновенных значений U_I и U_{II} за положительный полупериод U_I. На выходе схемы *1* получаются прямоугольные импульсы напряжения $U_{сов}$ (рис. 2-60,*б*), длительность каждого импульса равна t_c.

Непосредственное сопоставление времени t_c и t_y согласно (2-48) оказывается сложным, поэтому вместо t_c и t_y сравниваются пропорциональные им напряжения U_c и $U_э$. Напряжение $U_c \equiv t_c$ получа-

ется с помощью интегрирующей схемы 2 (представляющей собой контур RC), на выходе которой возникает напряжение $U_с$ треугольной формы, пропорциональное $t_с$.

Напряжение $U_с$ сравнивается с эталонным напряжением $U_э \equiv t_у$ в устройстве 3, на выходе которого появляется результирующее напряжение $U_{вых}$, подаваемое на исполнительный орган 4. Величина и знак $U_{вых}$ зависят от разности $U_с - U_э$. При $U_с > U_э$, чему со-

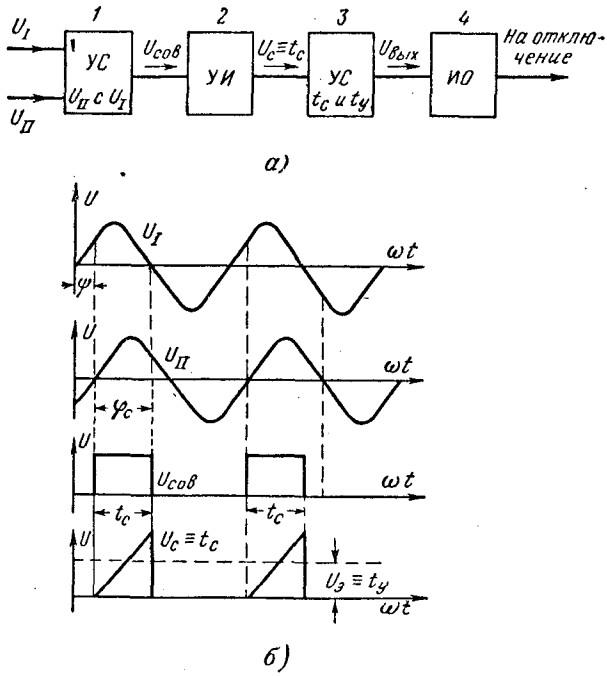


Рис. 2-60. Структурная схема реле на совпадение знаков мгновенных значений U_I и U_{II} (*а*); диаграмма работы реле (*б*).

ответствует условие $t_с > t_у$, исполнительный орган срабатывает. При $U_с < U_э$ (т. е. при $t_с < t_у$) реле не действует.

Схема реле направления мощности. В качестве примера на рис. 2-61 приведена схема реле направления мощности, работающего на рассмотренном принципе по структурной схеме рис. 2-60, *а*.

Устройство реле. Чтобы получить реле направления мощности, сравниваются напряжения $\dot{U}_I = k_1\dot{U}_р$ с $\dot{U}_{II} = k_4\dot{I}_р$, где $\dot{U}_р$ и $\dot{I}_р$ напряжение и ток сети. Напряжение $\dot{U}_р$ подводится к промежуточному трансформатору $Тр_1$, а ток $\dot{I}_р$ к трансреактору $Тр_2$. Трансформатор $Тр_1$ и трансреактор $Тр_2$ служат для получения напряжений $\dot{U}_I = k_1\dot{U}_р$ и $\dot{U}_{II} = k_2\dot{I}_р$. Положительные полуволны напряжений U_I и U_{II} через выпрямители $Д_1$, $Д_2$, $Д_3$ и $Д_4$ подаются на базы транзисторов $Т_1$ и $Т_2$ и управляют их работой.

Транзисторы $Т_1$ и $Т_2$ образуют схему совпадения. Их эмиттеры и коллекторы включены параллельно. При отсутствии положительных напряжений на базе

каждый триод T_1 и T_2 открыт, и поэтому напряжение на выходных зажимах a и b схемы совпадения равно нулю. Появление положительной полуволны напряжений U_I или U_{II} на одном из триодов закрывает его, но поскольку второй триод открыт, выходное напряжение остается равным нулю, и только одновременное поступление положительных полуволн U_I и U_{II} на оба триода приводит к одновременному закрытию их и появлению напряжения $U_{сов}$ на выходных зажимах a и b схемы совпадения. Напряжение $U_{сов}$ имеет форму прямоугольных импульсов неизменной амплитуды. Продолжительность импульса равна t_c.

Конденсатор C_1 и сопротивление $R = R_6 + R_7$ образуют интегрирующий элемент. Емкость C_1 нормально зашунтирована триодами T_1 и T_2 и начинает заряжаться только в период времени t_c совпадения положительных значений. В течение этого времени напряжение на конденсаторе нарастает от 0 до $U_C \equiv t_c$, как показано на рис. 2-60, *б*.

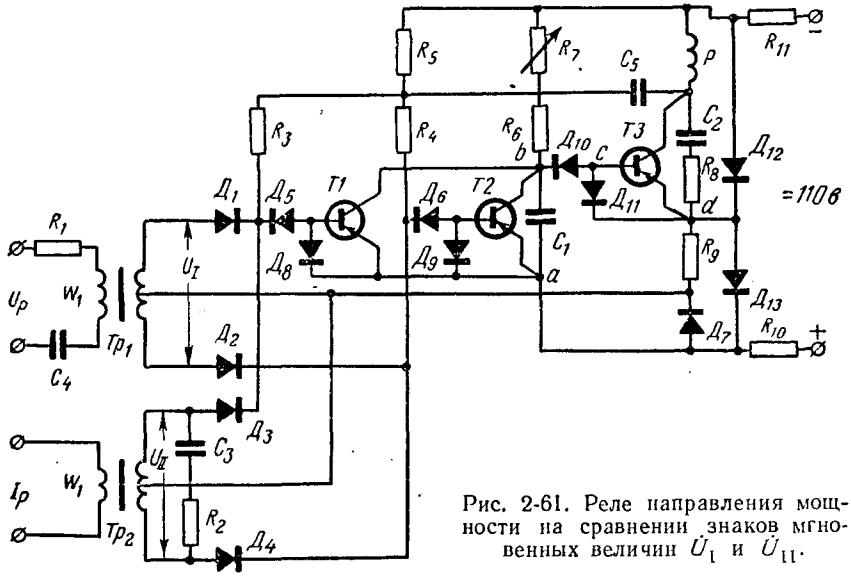


Рис. 2-61. Реле направления мощности на сравнении знаков мгновенных величин U_I и U_{II}.

Исполнительный орган реле выполнен в виде однокаскадного усилителя на нормально закрытом триоде T_3, в коллекторной цепи которого включено электромеханическое реле P.

Зажимы эмиттера и коллектора зашунтированы конденсатором C_2, который обеспечивает работу реле P после кратковременного открытия триода T_3. При открытии T_3 конденсатор C_2 шунтируется и мгновенно разряжается. Когда T_3 закроется, зарядный ток конденсатора C_2, проходя через реле P, удерживает его в сработанном состоянии до поступления нового импульса, открывающего триод T_3.

Управление транзистором T_3 происходит под влиянием разности потенциалов между точками c и d. Потенциал точки d задан. Он определяется опорным напряжением $U_э \equiv t_y$. Это напряжение поддерживается постоянным с помощью стабилизатора $Д_{13}$. Потенциал точки c равен напряжению U_c на емкости C_1. Величина последнего нарастает с течением времени по мере заряда емкости C_1 и поэтому $U_C \equiv t_c$.

Работа реле. При совпадении положительных значений U_I и U_{II} триоды T_1 и T_2 закрываются одновременно на время t_c, в течение которого оба напряжения имеют положительный знак. В этот интервал времени t_c происходит заряд емкости C_1. Если $t_c \geqslant t_y$, то потенциал точки c (U_C) станет больше потен-

циала точки d ($U_э$). Транзистор T_3 откроется, и выходное реле P сработает. Принимая $t_у = T/4$ из (2-44), получим, что условием действия рассмотренного реле является неравенство $-90 \leqslant \varphi_р \leqslant +90°$; здесь учтено, что $\psi = \varphi_р$. Характеристика такого реле показана на рис. 2-59, *б*.

Реле с такой характеристикой является органом направления мощности синусного типа: Для получения косинусного или промежуточного реле необходимо соответствующим образом сместить по фазе U_I.

г) Реле сравнения фаз на кольцевой фазочувствительной схеме

Устройство и принцип действия реле (рис. 2-62, *а*). Основным элементом фазосравнивающей схемы являются четыре выпрямителя *1*, *2*, *3*, *4*, соединенные последовательно по замкнутой кольцевой схеме.

Сравниваемые напряжения U_I и U_{II} подаются на кольцевую схему к точкам A C и B D соответственно.

Исполнительный орган P подключен к средним точкам m и n делителей напряжения R_I и R_{II}. В качестве исполнительного органа P используется любое чувствительное реле, реагирующее на полярность постоянного тока, в том числе и магнитоэлектрическое реле.

Выпрямители в данной схеме выполняют роль коммутационных устройств (переключателей), открывающих путь току в реле P. Работа выпрямителей (т. е. их открытие и закрытие) в каждый момент времени определяется большим из двух подведенных к ним напряжений U_I и U_{II}. Поэтому большее напряжение является управляющим. Меньшее напряжение, называемое управляемым или измеряемым, питает током исполнительный орган реле P через выпрямители, открываемые управляющим напряжением. При такой схеме среднее значение тока в исполнительном органе P $I_р = I_с$ зависит от угла сдвига фаз ψ между U_I и U_{II}, т. е. $I_р = I_C = f(\psi)$.

Сказанное подтверждается приводимым ниже анализом работы реле.

Работа реле (рис. 2-62). Примем, что напряжение U_{II} опережает по фазе U_I на угол ψ и что $U_I \gg U_{II}$. Последнее позволяет с некоторым приближением считать $U_I > U_{II}$ в любой момент времени.

Для уяснения работы реле необходимо определить токораспределение в схеме, обусловленное напряжениями $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, и установить зависимость тока $I_р$ в исполнительном органе реле от ψ.

Воспользуемся для определения токов методом наложения, который позволяет находить токи, рассматривая действие каждой э. д. с. U_I и U_{II} независимо от другой [1]. Полные токи находятся наложением токов от U_I и от U_{II}.

Сначала рассмотрим токи от U_I. В положительный полупериод U_I (рис. 2-62, *б*) выпрямители *1* и *2* открываются, а *3* и *4* закрыва-

[1] Метод наложения применим только для линейных цепей, и поэтому полупроводниковые диоды в схеме реле должны условно рассматриваться как линейные сопротивления.

ются, так как управляющее напряжение U_1 приложено к первым — в прямом, а ко вторым — в обратном направлениях, что видно из рис. 2-62, *а*, где стрелкой показано положительное направление U_1. Под действием U_1 возникают два тока I_1' и I_1'' (рис. 2-62, *б*). Ток I_1' замыкается по контуру *mABnPm*, а ток I_1'' — по контуру *mPnBCm*. Оба тока равны, так как напряжение и сопротивления контуров одинаковы. В реле *P* эти токи направлены встречно и взаимно компенсируются. *Поэтому любое управляющее напряжение, в том числе и* U_1, *тока в реле P не создает.* Токи, обусловленные напряжением U_1, замыкаются по открытым выпрямителям *1* и *2*.

Теперь рассмотрим токораспределение от меньшего напряжения U_{II} (рис. 2-62, *в*). Под влиянием U_{II} возникает ток I_{II}. Положительный ток I_{II} изображен на рисунке сплошными стрелками. Он проходит по выпрямителям *1* и *2*, открытым управляющим напряжением U_1, по обеим половинкам делителя R_1 и по обмотке реле *P*, как показано на рис. 2-62, *в*.

Ток I_{II} отрицательного знака, появляющийся в отрицательный полупериод U_{II}, показан пунктирными стрелками. Он проходит по тому же пути, что и положительный ток I_{II}, но противоположен ему по направлению. С учетом, что U_1 тока в реле не дает, полученный от U_{II} ток является током, п и т а ю щ и м исполнительный орган *P*.

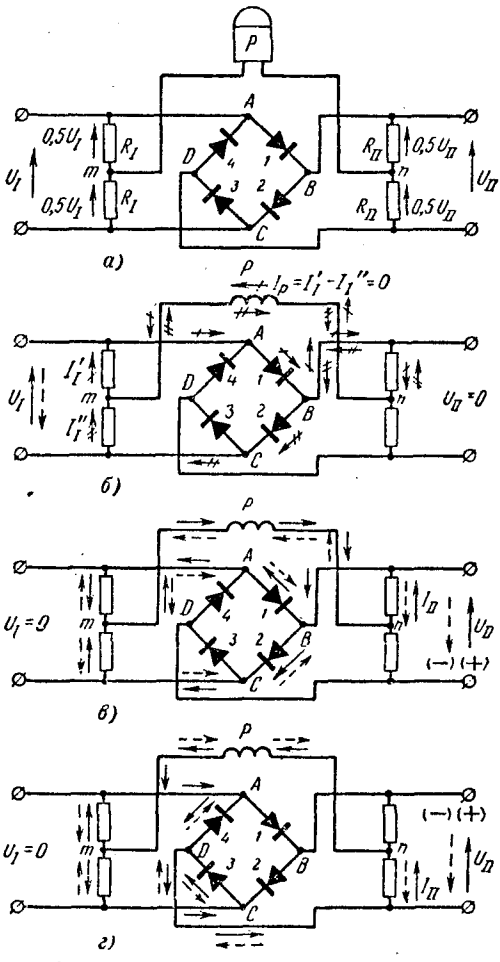


Рис. 2-62. Реле сравнения фаз с помощью кольцевой фазочувствительной схемы.

а — принципиальная схема; *б* — токораспределение под действием напряжения U_1; *в* — токораспределение под действием напряжения U_{II} при открытых диодах *1* и *2*; *г* — то же при открытых диодах *3* и *4*.

Кривая тока в реле за положительный полупериод U_1 показана на рис. 2-63, *б*; при этом учтено, что U_1 отстает от U_{II} на угол φ,

и принято, что ток I_{II} совпадает по фазе с U_{II}, так как в контуре, по которому циркулирует I_{II}, преобладает активное сопротивление.

Следует заметить, что в токораспределении на рис. 2-62, *в* положительный ток I_{II} проходит по выпрямителю *1* и отрицательный ток I_{II} — по выпрямителю *2* в обратном направлении.

Можно условно считать, что сопротивление открытого диода равно нулю, как для прямого, так и для обратного тока.

Физически ток через выпрямитель может проходить только в прямом направлении. В действительности, в контуре тока I_{II} на рис. 2-62, *в* (контур *nBAmPn*) действуют не одно (как условно рассматривалось по методу наложения), а одновременно два встречно направленных напряжения: 0,5 U_I и 0,5 U_{II}. Создаваемый ими действительно идущий через выпрямитель *1* ток

$$I = \frac{0{,}5U_I - 0{,}5U_{II}}{R_к}, \qquad (2\text{-}50)$$

где $R_к$ — сопротивление контура, в котором открытый выпрямитель *1* учтен сопротивлением прямого направления.

Ток *I* проходит по выпрямителю *1* в прямом направлении, поскольку $U_I > U_{II}$ и, следовательно, разность 0,5 ($U_I - U_{II}$) положительна.

Из (2-50) видно, что ток *I* можно рассматривать состоящим из двух составляющих:

$$I_I = \frac{0{,}5U_I}{R_к} \text{ и } I_{II} = \frac{0{,}5U_{II}}{R_к}.$$

Эти составляющие получаются при применении метода наложения, как это имеет место в приведенном выше рассмотрении. Ток I_I положителен, а ток I_{II} отрицателен. Это означает, что I_I проходит через выпрямитель *1* в прямом направлении, а I_{II} в обратном. Такое представление и принято в приведенном рассмотрении, оно является условным (математическим) и вытекает из метода наложения. Наложение фиктивных токов $+I_{II}$ и $-I_{II}$ дает действительный ток *I*. Аналогичным образом объясняется прохождение в обратном направлении тока I_{II} по выпрямителю *2*.

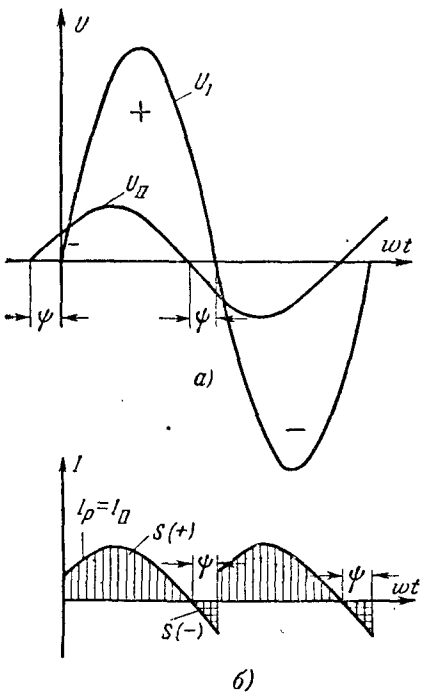


Рис. 2-63. Кривые напряжений U_I и U_{II} и соответствующего им тока в исполнительном органе *P*.

Во втором отрицательном полупериоде U_I (рис. 2-62, *г*) выпрямители *1* и *2* закрываются, а выпрямители *3* и *4* открываются. Под действием U_{II} через открывшиеся выпрямители *3* и *4* пойдет ток I_{II}, так же как и в предыдущем случае, замыкаясь через обмотку исполнительного органа — реле *P*.

Из токораспределений на рис. 2-62, *в* и *г* видно, что положительный ток I_{II} в течение положительного полупериода U_I и отрицательный ток I_{II} во время отрицательного полупериода U_I идут в реле P в одном (положительном) направлении. С учетом этого на рис. 2-63, *б* построена кривая тока I_{II} в реле P для отрицательного полупериода U_I.

Исполнительный орган P реагирует на знак среднего значения тока I_{II}:

$$I_{IIср} = \frac{S_{(+)} - S_{(-)}}{T/2}, \qquad (2\text{-}51)$$

где $S_{(+)} - S_{(-)}$ — разность площадей положительного и отрицательного знака, ограниченных кривой тока I_{II} (рис. 2-63) за полупериод U_I.

Если за полупериод преобладает положительный ток I_{II} (т. е. $S_{(+)} > S_{(-)}$), то реле работает; при преобладании отрицательной составляющей ($S_{(-)} > S_{(+)}$) реле не действует.

Соотношение площадей $S_{(+)}$ и $S_{(-)}$ зависит от угла сдвига фаз ψ между U_I и U_{II}, это видно из рис. 2-63. Границей действия реле будет $\psi = \pm 90°$, при этом $S_{(+)} = S_{(-)}$, а ток в реле $I_{IIср} = 0$. Отсюда следует, что условие работы реле выражается неравенством

$$-90° < \psi < +90°. \qquad (2\text{-}52)$$

При $\psi = 0$ ток $I_{IIср}$ достигает максимального значения, и, следовательно, реле имеет наибольшую чувствительность. К таким же выводам можно прийти, выразив аналитический средний ток $I_{IIср}$:

$$I_{II\,ср} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_{IIt}\, dt;$$

с учетом, что $I_{IIt} = I_{IIm} \sin(\omega t - \psi)$,

$$I_{IIср} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_{II\,t} \sin(\omega t - \psi)\, dt.$$

После преобразований получим:

$$I_{II\,ср} = 0{,}9 I_{II} \cos\psi. \qquad (2\text{-}53)$$

Найденное выражение подтверждает, что $I_{IIср} = f(\psi)$ и что зона действия реле определяется (2-52).

При рассмотрении работы реле было принято, что $U_I \gg U_{II}$. В тех случаях, когда разница амплитуд U_I и U_{II} невелика, а $\psi \neq 0$, функции управляющего напряжения будут поочередно выполняться как U_I, так и U_{II}.

Это не меняет принципа работы реле, но затрудняет определения и расчет $I_{ср}$, поэтому в вышеприведенном анализе и было принято условие $U_I \gg U_{II}$.

Реле направления мощности. Если принять, что $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p$, а $\dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p$, то реле с кольцевой фазочувствительной схемой будет

работать как реле направления мощности, так как оно будет реагировать на угол сдвига $\varphi_р$ между током $I_р$ и напряжением $U_р$ сети. Как следует из (2-53), это будет реле косинусного типа (оно не действует при $\varphi_р = 90°$ и имеет наибольшую чувствительность при $\varphi_р = 0$). Сдвигая искусственным путем фазу U_I или U_{II}, можно получить реле промежуточного и синусного типа.

Отечественная промышленность выпускает реле направления мощности на кольцевой схеме.

д) Общая оценка реле на сравнении фаз

Из принципа действия рассмотренных реле следует, что они срабатывают в течение первого полупериода тока к.з. В результате этого реле, работающие на сравнении фаз, отличаются большим быстродействием. Это порождает и недостаток. Работа таких быстродействующих реле может искажаться влиянием апериодической слагающей тока к. з., возникающей в переходных режимах, и гармонических составляющих в напряжениях U_I и U_{II}. Отстройка от помех является важной проблемой при конструировании реле, работающих на сравнении фаз.

Глава третья

ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И СХЕМЫ ИХ СОЕДИНЕНИЙ

3-1. ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

Принцип устройства трансформатора тока [Л. 19, 20], схема его замещения и векторная диаграмма токов приведены на рис. 3-1. Работа трансформатора тока характеризуется уравнением намагничивающих сил (н. с.), согласно которому геометрическая сумма н. с. первичной и вторичной обмоток создает результирующую н. с. $\dot{I}_{нам}w_1$, образующую основной магнитный поток $\Phi_т$, т. е.

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_{нам} w_1. \tag{3-1}$$

При $I_{нам} = 0$

$$\dot{I}_2 = -\frac{\dot{I}_1}{n_т}, \tag{3-2}$$

где $n_т = w_2/w_1$ — витковый коэффициент трансформации трансформатора тока.

Таким образом, при отсутствии намагничивающего тока трансформатор тока работает «идеально», без погрешностей. Его вторичный ток в этом случае равен первичному току, поделенному на коэффициент трансформации $n_т$, и сдвинут относительно первичного тока по фазе на 180°.

Однако в действительности намагничивающий ток не может быть равен нулю. С учетом этого вторичный ток I_2, найденный из уравнения (3-1), получается равным:

$$\dot{I}_2 = (-\dot{I}_1 + \dot{I}_{\text{нам}})\frac{w_1}{w_2} = -\left(\frac{\dot{I}_1}{n_\text{т}} - \frac{\dot{I}_{\text{нам}}}{n_\text{т}}\right). \qquad (3\text{-}3)$$

Из выражения (3-3) следует, что *действительный вторичный ток отличается от расчетного значения,* определенного по формуле (3-2), *на величину* $\dot{I}_{\text{нам}}/n_\text{т}$, *которая и вносит искажение в величину*

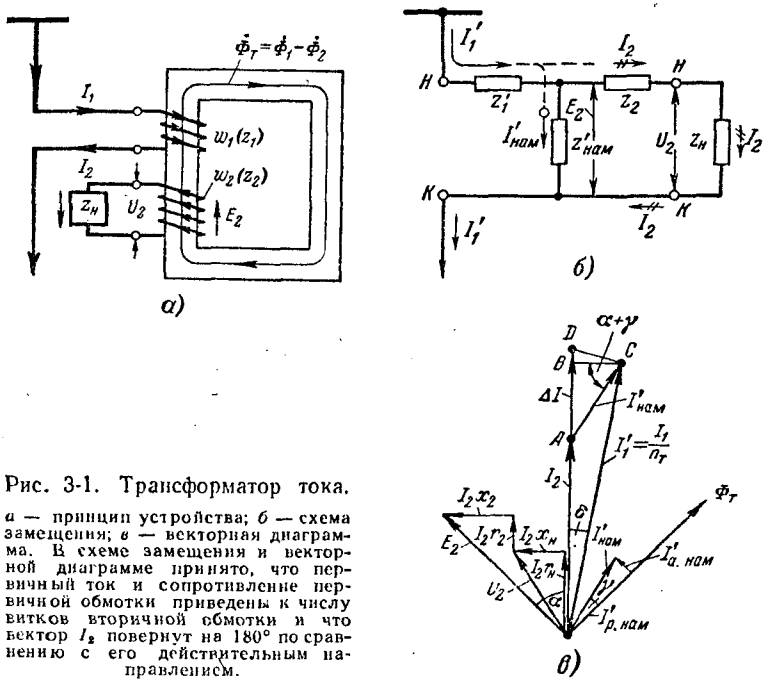


Рис. 3-1. Трансформатор тока.

а — принцип устройства; *б* — схема замещения; *в* — векторная диаграмма. В схеме замещения и векторной диаграмме принято, что первичный ток и сопротивление первичной обмотки приведены к числу витков вторичной обмотки и что вектор I_2 повернут на 180° по сравнению с его действительным направлением.

и фазу вторичного тока. Таким образом, вследствие наличия тока намагничивания во вторичную обмотку трансформируется не весь первичный ток, а только его часть, что и вызывает погрешность в работе трансформатора тока.

Искажающее влияние тока намагничивания показано на векторной диаграмме рис. 3-1, *в*, в основу которой положена схема замещения (рис. 3-1, *б*). В схеме замещения магнитная связь между первичной и вторичной обмотками трансформатора тока заменена электрической, а все величины первичной стороны приведены к виткам вторичной обмотки.

За исходный при построении диаграммы принят вторичный ток I_2.

Вторичное напряжение U_2 равно падению напряжения в сопротивлении нагрузки $z_\text{н} = r_\text{н} + jx_\text{н}$, т. е. $U_2 = I_2(r_\text{н} + jx_\text{н})$. Вектор

вторичной э. д. с. E_2 равен сумме напряжений U_2 и падения напряжения в сопротивлении вторичной обмотки $z_2 = r_2 + jx_2$, т. е.

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 (r_2 + jx),$$

или

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 (r_2 + r_н) + j\dot{I}_2 (x_2 + x_н) = \dot{I}_2 (z_2 + z_н) \qquad (3\text{-}4)$$

и опережает I_2 на угол α.

С учетом условно принятых положительных направлений токов и э. д. с. в схеме замещения результирующий магнитный поток трансформатора тока $\Phi_т$ показан отстающим от создаваемой им э. д. с. E_2 на 90°. Намагничивающий ток трансформатора тока $I_{нам}$, создающий поток $\Phi_т$, опережает последний на угол γ, обусловленный потерями в стали сердечника трансформатора тока. Приведенный первичный ток I_1' (на основе схемы замещения) находится как сумма вторичного тока I_2' и тока намагничивания $I_{нам}'$.

Диаграмма показывает, что за счет тока $I_{нам}'$ вторичный ток получается меньше приведенного первичного тока $I_1' = I_1/n_т$ на величину ΔI и смещается относительно него по фазе на угол δ. Угол δ очень мал и поэтому с некоторым приближением можно считать, что $\Delta I = AB = I_{нам}' \sin(\alpha + \gamma)$, а дуга CD, измеряющая в радианах угол δ, равна отрезку BC, т. е. что $CD = \delta_{рад} = I_{нам}' \cos(\alpha + \gamma)$.

Из выражений следует, что с увеличением α, зависящего от угла $\varphi_н$ нагрузки вторичной обмотки, ΔI растет, а угол δ уменьшается. При $\alpha + \gamma = 90°$ $\Delta I = I_{нам}$ и имеет максимальное значение, угловая же погрешность $\delta = 0$.

Погрешность в величине тока оценивается в процентах расчетного значения вторичного тока $I_2 = I_1/n_т = I_1'$:

$$f_i\% = \frac{\Delta I}{I_1'} \cdot 100\% = \frac{I_1' - I_2}{I_1'} \cdot 100\%. \qquad (3\text{-}5)$$

Погрешность по углу δ выражается в градусах и минутах.

Чем больше намагничивающий ток трансформатора тока, тем больше его погрешности. Чрезмерно большие погрешности могут вызвать неправильные действия устройств релейной защиты. Поэтому уменьшение погрешности трансформаторов тока является очень важной задачей, и она сводится к уменьшению тока намагничивания трансформаторов тока.

3-2. ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УМЕНЬШЕНИЕ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА

Ток намагничивания (рис. 3-1, *в*) состоит из составляющей $I_{а.нам}'$, обусловленной активными потерями на гистерезис и от вихревых токов в магнитопроводе трансформатора тока, и составляющей $I_{р.нам}'$, создающей магнитный поток $\Phi_т$, который индуктирует во вторичной обмотке э. д. с. E_2. Ток $I_{р.нам}' \gg I_{а.нам}'$.

Для уменьшения $I_{а.нам}'$ магнитопровод трансформатора тока выполняется из шихтованной стали, имеющей небольшие активные

потери. Для уменьшения второй составляющей $I_{\text{р.нам}}$ нужно уменьшать $\Phi_{\text{т}}$, связанный с $I_{\text{р.нам}}$ соотношением

$$I_{\text{р.нам}} = \frac{\Phi_{\text{т}} R_{\text{м}}}{w_1}. \qquad (3\text{-}6)$$

Графически эта зависимость представляется характеристикой намагничивания, изображенной на рис. 3-2.

В начальной части характеристики ток намагничивания почти пропорционален $\Phi_{\text{т}}$. При некотором значении потока $\Phi_{\text{т}} = \Phi'_{\text{т}}$ происходит насыщение магнитопровода, вследствие чего ток намагничивания возрастает значительно быстрее, чем поток $\Phi_{\text{т}}$, что вызывает резкое увеличение погрешностей. Следовательно, для ограничения погрешностей нужно ограничивать величину магнитного потока $\Phi_{\text{т}}$ или магнитной индукции $B_{\text{т}} = \Phi_{\text{т}}/S$, не допуская насыщения магнитопровода.

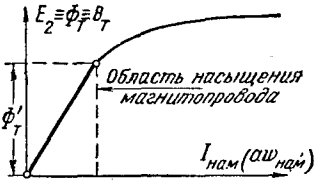


Рис. 3-2. Характеристика намагничивания трансформатора тока.

Из принципа работы трансформатора тока вытекает, что поток $\Phi_{\text{т}}$ должен иметь такую величину, при которой наведенная им вторичная э. д. с. E_2 была бы достаточной для компенсации падения напряжения в цепи вторичной обмотки. Как известно, поток $\Phi_{\text{т}}$ связан с наведенной им э. д. с. E_2 выражением

$$\Phi_{\text{т}} = \frac{E_2}{4{,}44 w_2 f \cdot 10^{-8}},$$

где согласно (3-4)

$$E_2 = I_2 (z_2 + z_{\text{п}}). \qquad (3\text{-}7)$$

Поскольку вторичный ток $I_2 = I_1/n_{\text{т}}$, то с увеличением I_1 и $z_{\text{н}}$ э. д. с. E_2 растет, а следовательно, растет магнитный поток $\Phi_{\text{т}}$ и намагничивающий ток $I_{\text{нам}}$.

Таким образом, для уменьшения $\Phi_{\text{т}}$ (а следовательно, и $I_{\text{нам}}$) нужно уменьшать E_2, стремясь к тому, чтобы при максимальных значениях тока к. з. возникающий в трансформаторе поток $\Phi_{\text{т}}$ не насыщал магнитопровода. Уменьшение E_2 достигается уменьшением $z_{\text{н}}$ и уменьшением вторичного тока I_2 путем повышения коэффициента трансформации трансформатора тока $n_{\text{т}}$.

Существенное влияние на величину намагничивающего тока оказывают конструктивные параметры.

Как вытекает из выражения (3-6), для уменьшения $I_{\text{р.нам}}$ необходимо уменьшать магнитное сопротивление $R_{\text{м}}$ и увеличивать число витков первичной обмотки w_1. Для уменьшения $R_{\text{м}} = l/\mu S$ нужно увеличивать сечение стали магнитопровода S, сокращать путь l, по которому замыкается поток $\Phi_{\text{т}}$, и применять сталь с высокой магнитной проницаемостью μ, добиваясь увеличения прямолинейной части характеристики намагничивания трансформатора тока и ее крутизны.

Таким образом, для уменьшения погрешностей трансформатор тока должен работать в прямолинейной части своей характеристики намагничивания. Это условие обеспечивается: а) конструктивными параметрами сердечника; б) правильным выбором нагрузки вторичной обмотки $z_н$ и в) снижением величины вторичного тока, что достигается выбором соответствующего коэффициента трансформации $n_т$.

Погрешности трансформаторов тока резко возрастают в первый момент к. з., когда в первичном токе имеется апериодическая составляющая (см. § 10-3), это необходимо учитывать при расчете быстродействующих защит.

3-3. ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И ИХ ВЫБОР

Трансформаторы тока подразделяются на классы точности. Каждый класс характеризуется допустимой величиной погрешности, установленной из условий точной работы измерительных приборов.

В СССР для промышленных установок изготовляются трансформаторы тока классов: 0,5; 1; 3 и Д. Пределы их погрешностей определяются ГОСТ 7746-68 и приведены в табл. 3-1.

Таблица 3-1

Класс	Погрешность по ГОСТ при номинальном токе	
	по току, %	по углу, *мин*
0,5	±0,5	± 40
1	±1	± 80
3	±3	Не нормируется
Д	Не нормируется	

Трансформаторы тока класса Д предназначаются для дифференциальных защит, и их погрешности при номинальном токе не нормируются. Работа трансформаторов тока с погрешностью, соответствующей его классу, обеспечивается лишь при токах, не превышающих 120% номинального, и вторичной нагрузке, не выходящей за пределы номинальной мощности.

Номинальной мощностью трансформатора тока называется максимальная нагрузка, выраженная в вольт-амперах, при которой его погрешность не превосходит величины, установленной для данного класса. Эта мощность равна: $S_{ном} = U_2 I_2$ или с учетом, что

$$U_2 = I_2 z_{ном}, \quad S_{ном} = I_2^2 z_{ном}. \tag{3-8}$$

Обычно номинальная мощность указывается при номинальном токе вторичной обмотки (5 или 1*а*) или характеризуется значением сопротивления вторичной нагрузки, которое согласно выражению (3-8) равно $z_{ном} = S_{ном}/I_{ном}^2$.

В отличие от измерительных приборов для устройств релейной защиты определенная точность работы трансформаторов тока необходима главным образом при токах повреждения. Поэтому погрешности, характеризующие класс точности, не могут слу-

жить основанием для выбора трансформаторов тока, питающих защиту.

Исходными для выбора трансформаторов тока, предназначаемых для питания защиты, являются максимальный первичный ток $I_{макс.расч}$, *при котором требуется их точная работа, и нагрузка его вторичной обмотки* $z_н$. Ток точной работы $I_{макс.расч}$ зависит от типа защиты. Для одних защит он равен их току срабатывания, для других — максимальному току к. з., проходящему через трансформатор тока. На основании опыта эксплуатации и теоретического анализа *для большинства защит допускается погрешность по величине тока не более 10% и по углу до 7°*.

Руководствуясь этим условием, производят выбор трансформаторов тока по кривым 10%-ной погрешности (рис. 3-3).

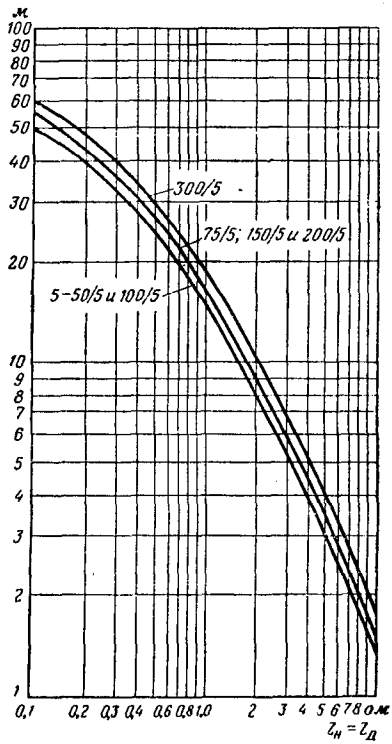


Рис. 3-3. Кривые 10%-ной погрешности трансформатора тока типа ТПФ на 6—10 *кв* для сердечника класса 1.

Кривые 10%-ной погрешности дают зависимость максимальной кратности m_{10} первичного тока от сопротивления нагрузки вторичной обмотки $z_н$, при которых погрешность трансформаторов тока равна 10%. Кратность $m_{10} = I_{1макс}/I_{1ном}$, где $I_{1макс}$ — максимальный первичный ток при указанных условиях, а $I_{1ном}$ — номинальный первичный ток трансформатора тока.

При погрешности 10% трансформатор тока работает у точки перегиба характеристики намагничивания (рис. 3-4), т. е. достигает начала насыщения. Соответствующий этой точке ток $I_{нас}$ и является указанным выше током $I_{1макс}$. Зависимость $m_{10} = f(z_н)$ дается для случая, когда угол $\alpha + \gamma = 90°$, в действительности этот угол меньше 90° и поэтому $\Delta I < 10\%$. Проверка трансформаторов тока по 10%-ным кривым [Л. 88, 89, 21] ведется следующим образом.

Выбирается тип трансформатора и его номинальный коэффициент трансформации. По условиям правильной работы рассматриваемой защиты находится величина расчетного тока к. з. $I_{расч.макс}$, при которой погрешность питающего ее трансформатора тока не должна превышать допустимой (10% и 7°).

При этом токе вычисляется расчетная кратность первичного тока по формуле [Л. 88]:

$$m_{\text{расч}} = \frac{k_{\text{а}}}{\alpha} \frac{I_{\text{макс. расч}}}{I_{1\,\text{ном}}}, \qquad (3\text{-}9)$$

где $k_{\text{а}}$ — коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей в переходных процессах при коротких замыканиях на работу трансформаторов тока. Принимается равным 1,2—2. Для защит, не подверженных влиянию переходных процессов (например, защит с БНТ) $k_{\text{а}} = 1$; $\alpha = 0{,}8$ — коэффициент, учитывающий допустимое ГОСТ 7746-55 отличие действительной кратности от указываемой заводом-изготовителем трансформаторов тока.

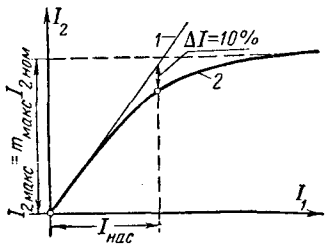


Рис. 3-4. Зависимость вторичного тока трансформатора от первичного.

1 — вторичный ток идеального трансформатора тока $I_2 = I_1/n_{\text{т}}$; *2* — действительный вторичный ток.

После этого, пользуясь кривыми 10%-ной погрешности, находим допустимую нагрузку $z_{\text{д}}$, соответствующую полученной кратности $m_{\text{расч}}$. Действительная нагрузка $z_{\text{н}}$ должна равняться или быть меньше допустимой $z_{\text{д}}$.

Кратность насыщения. Для трансформаторов тока классов 0,5; 1 и 3 вместо кривых 10%-ной погрешности обычно дается кратность их насыщения $m_{\text{нас}} = I_{\text{нас}}/I_{\text{ном}}$ при номинальной вторичной нагрузке $z_{\text{ном}}$ с коэффициентом мощности, равным 0,8. При $I_{\text{нас}}$, как показано на рис. 3-4, погрешность достигает 10%. В этом случае выбираемый трансформатор тока должен иметь $m_{\text{нас}} \geqslant m_{\text{расч}}$, а его нагрузка — удовлетворять условию

$$z_{\text{н}} < z_{\text{ном}}.$$

Максимальная кратность. В технических данных на трансформаторы тока указывается также величина максимальной кратности вторичного тока $m_{\text{макс}} = I_{2\,\text{макс}}/I_{2\,\text{ном}}$, которую можно получить от трансформатора тока при номинальной нагрузке $z_{\text{ном}}$. По коэффициенту максимальной кратности $m_{\text{макс}}$ можно определить наибольший вторичный ток, который способен дать данный трансформатор тока (рис. 3-4):

$$I_{2\,\text{макс}} = m_{\text{макс}} I_{2\,\text{ном}}.$$

При этом для определения максимальной кратности $m_{\text{макс}\,x}$ при нагрузке z_x, отличной от $z_{\text{ном}}$, пользуются формулой

$$m_{\text{макс}\,x} = m_{\text{макс}} \frac{z_2 + z_{\text{ном}}}{z_2 + z_x}. \qquad (3\text{-}10)$$

Эта величина используется для проверки надежности действия токовых защит, если питающие их трансформаторы тока при больших токах к. з. насыщаются.

Характеристика намагничивания [Л. 21]. При отсутствии сведений о погрешности трансформатора тока его пригодность для данной защиты и допустимая нагрузка вторичной цепи $z_н$ могут быть приближенно оценены по характеристике зависимости вторичного тока намагничивания $I_{2нам}$ от вторичного напряжения U_2. Характеристика снимается опытным путем по схеме, приведенной на рис. 3-5, *а*. Меняя напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки, измеряют соответствующий каждому значению U_2 ток во вторичной обмотке, который является током намагничивания $I_{2нам}$. На основании полученных данных строится зависимость $U_2 = f(I_{2нам})$ (рис. 3-5, *б*).

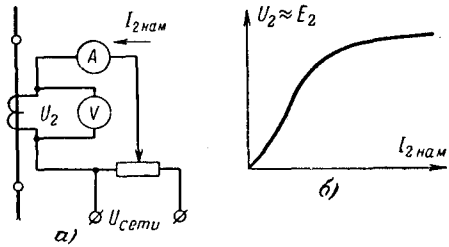


Рис. 3-5. Зависимость вторичного напряжения от тока намагничивания.

а — схема снятия характеристики; *б* — зависимость $U_2 = f(I_{нам})$.

Вследствие малой величины сопротивления вторичной обмотки z_2 принимается, что $U_2 \approx E_2$, и тогда полученная характеристика может рассматриваться как зависимость $E_2 = f(I_{2нам})$.

На основании этой характеристики можно определить значение E_2, при котором наступает насыщение, и, пользуясь формулой (3-7), вычислить допустимую нагрузку при заданном токе к. з.

Вторичный ток. Трансформаторы тока выполняются со вторичным номинальным током 5 *а* и 1 *а*. Мощность нагрузки $S_{нагр} = I_2^2 z_н$. Поэтому одноамперный трансформатор тока может нести нагрузку в 25 раз большую, чем пятиамперный, имеющий те же параметры.

3-4. ОБОЗНАЧЕНИЕ ВЫВОДОВ

При изготовлении трансформаторов тока выводы их первичной и вторичной обмоток условно обозначаются (маркируются) так, чтобы при помощи этих обозначений можно было определять направление вторичного тока по направлению первичного.

Выводы первичной обмотки могут обозначаться произвольно: один из них принимается за начало *Н*, а второй — за конец обмотки *К* (рис. 3-6, *а*). Маркировка же выводов вторичной обмотки выполняется по следующему правилу.

При прохождении тока в первичной обмотке от начала Н к концу К за начало вторичной обмотки и принимается тот ее вывод, из которого в этот момент ток вытекает в цепь нагрузки (рис. 3-6, *а*). Соответственно второй вывод вторичной обмотки принимается за конец обмотки *к*.

При обозначении выводов вторичной обмотки по указанному выше правилу ток в обмотке реле, включенного во вторичную цепь трансформатора тока, имеет такое же направление, как и в случае

включения реле непосредственно в первичную цепь (рис. 3-6, *а*).

В СССР принято обозначать начало и конец первичной обмотки трансформаторов $Л_1$ и $Л_2$, а начало и конец вторичной обмотки — $И_1$ и $И_2$ (рис. 3-6, *б*).

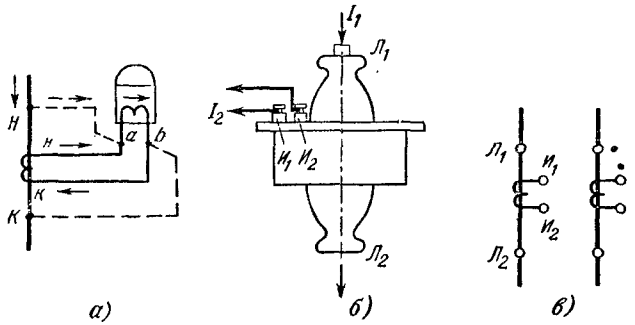


Рис. 3-6. Обозначение выводов обмоток трансформатора тока.

а — правило маркировки выводов; *б* — обозначения выводов на трансформаторе; *в* — обозначение на схемах.

Пользуясь указанными обозначениями выводов, производят включение обмоток реле направления мощности, ваттметров и некоторых других приборов и выполняют соединения вторичных обмоток трансформаторов тока в заданные схемы. Обозначение одноименных выводов на схемах показано на рис. 3-6, *в*.

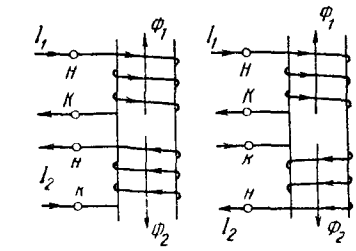


Рис. 3-7. Направление вторичного тока в зависимости от направления намотки витков вторичной обмотки.

На рис. 3-7 показаны направление вторичного тока и маркировка выводов при одинаковом и различном направлениях намотки витков первичной и вторичной обмоток при условии, что первичный ток в обоих случаях направлен от *Н* к *К*. Направления потока $Ф_1$ и вторичного тока определяются по правилу буравчика.

3-5. ИЗОБРАЖЕНИЕ ВЕКТОРОВ ВТОРИЧНЫХ ТОКОВ

Направление векторов вторичного тока I_2 на диаграмме зависит от положительного направления тока, принятого для вторичной обмотки. Если положительное направление вторичного и первичного токов принято совпадающим, например направленным от начала к концу (рис. 3-8, *а*), то при прохождении по первичной обмотке тока положительного направления вторичный ток будет иметь отрицательный знак и изобразится на векторной диаграмме вектором, противоположным вектору первичного тока. Если же принять

за положительное направление вторичного тока ток обратный первичному (рис. 3-8, *б*), проходящий от конца к началу вторичной обмотки, то знаки первичного тока и соответствующего ему вторичного тока будут одинаковы, а их векторы будут совпадать. Второй способ удобнее первого, так как он позволяет при построении векторных диаграмм вторичные и первичные токи считать совпадающими. Поэтому он принимается в дальнейшем изложении.

В рассмотренных построениях погрешность трансформаторов тока не учитывается.

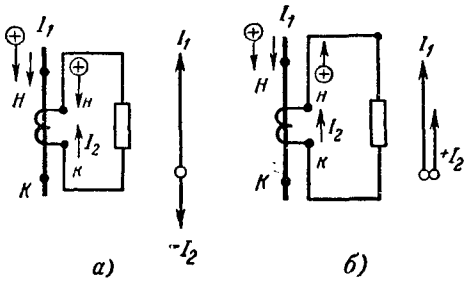


Рис. 3-8. Изображение векторов вторичного тока.

3-6. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

а) Типовые схемы и их анализ

Питание устройств релейной защиты током сети производится по рассмотренным ниже типовым схемам соединений трансформаторов тока и обмоток реле. Поведение и работа реле в каждой из этих схем зависят от характера распределения токов в ее вторичных цепях в нормальных и аварийных условиях. Для нахождения токораспределения в схеме сначала показываются положительные направления действующей величины первичных токов при рассматриваемом виде к. з.; затем наносятся стрелки вторичных токов в каждом трансформаторе тока, по которому проходит первичный ток, после чего показывается путь, по которому замыкается вторичный ток каждого трансформатора тока. Если в каком-либо элементе схемы (проводе или обмотке реле) вторичные токи разных фаз складываются или вычитаются, то результирующий ток в этом элементе находится путем геометрического сложения или вычитания соответствующих векторов фазных токов с учетом их сдвигов по фазе.

Для каждой схемы соединений можно определить отношение тока в реле $I_р$ к току в фазе $I_ф$. Это отношение называется коэффициентом схемы

$$k_{сх} = \frac{I_р}{I_ф}. \qquad (3\text{-}10а)$$

Коэффициент схемы учитывается при расчете уставок и оценке чувствительности защиты.

Ниже рассмотрены основные типовые схемы, анализируется токораспределение в них и определяется их область применения.

б) Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в полную звезду

Трансформаторы тока устанавливаются во всех фазах. Вторичные обмотки трансформаторов тока и обмотки реле соединяются в звезду и их нулевые точки связываются одним проводом, называемым нулевым (рис. 3-9). В нулевую точку объединяются одноименные зажимы обмоток трансформаторов тока.

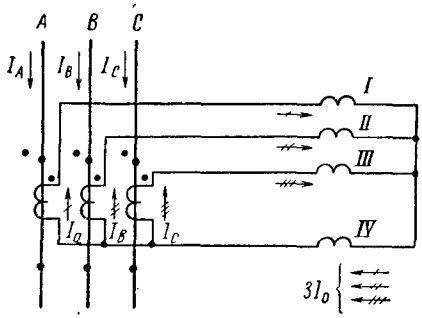


Рис. 3-9. Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в звезду.

При нормальном режиме и трехфазном к. з., как показано на рис. 3-9, в реле *I*, *II* и *III* проходят токи фаз

$$I_a = \frac{I_A}{n_т}, \quad I_b = \frac{I_B}{n_т}, \quad I_c = \frac{I_C}{n_т},$$

а в нулевом проводе — их геометрическая сумма

$$I_{н.п} = (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c), \quad (3\text{-}11)$$

которая при симметричных режимах (при наличии и отсутствии заземления в точках *H* и *K*) равна нулю (рис. 3-10, *а*).

При двухфазных к. з. ток к. з. проходит только в двух поврежденных фазах и соответственно в реле, подключенных к трансформаторам тока поврежденных фаз (рис. 3-10, *б*), ток в неповрежденной фазе отсутствует. Согласно закону Кирхгофа сумма токов в узле равна нулю, следовательно, $\dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, отсюда $\dot{I}_C = -\dot{I}_B$.

С учетом этого на векторной диаграмме токи I_B и I_C показаны сдвинутыми по фазе на 180° (рис. 3-10, *б*).

Ток в нулевом проводе схемы равен сумме токов двух поврежденных фаз (I_b и I_c), но так как последние равны и противоположны по фазе (рис. 3-10, *б*), то ток в нулевом проводе также отсутствует: $I_{н.п} = \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$.

Поэтому реле *IV*, включенное в нулевой провод, не будет реагировать на нагрузку и междуфазные к. з., в чем состоит важная особенность схемы звезды.

В действительности в результате неидентичности характеристик и погрешностей трансформаторов тока сумма вторичных токов в обоих случаях отличается от нуля. В нулевом проводе проходит некоторый остаточный ток, называемый током небаланса $I_{н.п} = I_{нб}$. При нормальном режиме ток небаланса имеет величину порядка 0,01—0,2 *а*. При к. з. в связи с увеличением токов намагничивания величина тока небаланса возрастает.

При однофазных к. з. первичный ток к. з. проходит только по одной поврежденной фазе (рис. 3-10, *в*). Соответствующий

ему вторичный ток проходит также только через одно реле и замыкается по нулевому проводу.

При двухфазных к. з. на землю (рис. 3-10, *г*) ток проходит в двух реле, включенных на поврежденные фазы (например, *B* и *C*). В нулевом проводе проходит геометрическая сумма этих токов, всегда отличная от нуля, что следует из их векторной диаграммы.

При двойном замыкании на землю в разных точках прохождение токов в сети показано на рис. 3-10, *д*.

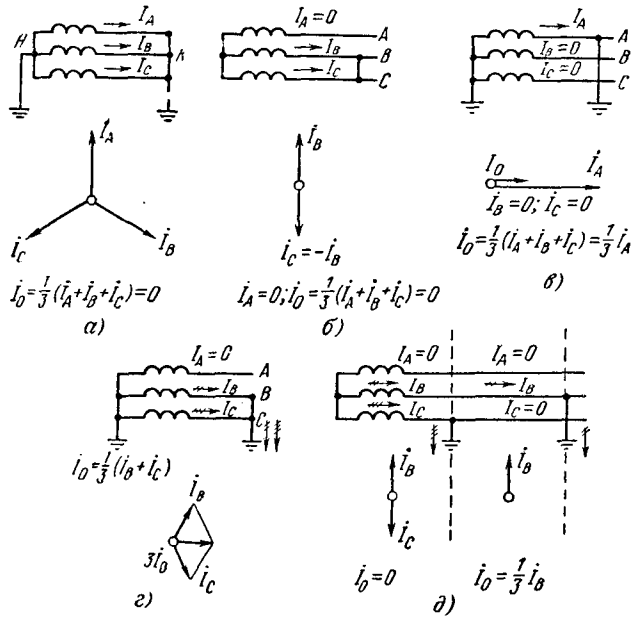


Рис. 3-10. Векторная диаграмма токов.

а — при трехфазном к. з.; *б* — при двухфазном к. з.; *в* — при однофазном коротком замыкании; *г* — при двухфазном к. з. на землю; *д* — при двойном замыкании на землю в разных точках.

На участке между местами замыкания на землю условия аналогичны однофазному к. з., а между источником питания и ближайшим к нему местом повреждения они соответствуют двухфазному к. з.

Нулевой провод схемы звезды является фильтром токов нулевой последовательности. Токи прямой и обратной последовательностей, как видно из рис. 3-11, *а*, в нулевом проводе не проходят, так как векторы каждой из этих систем дают в сумме нуль (рис. 3-11, *б* и *в*). Токи же нулевой последовательности (рис. 3-11, *г*) совпадают по фазе, и поэтому в нулевом проводе проходит утроенное значение этого тока $I_{н.п} = 3I_0$.

При нарушении (обрыве) вторичной цепи одного из трансформаторов тока в нулевом проводе возникает ток, равный току фазы,

что может привести к непредусмотренному действию реле, установленного в нулевом проводе.

В рассмотренной схеме реле, установленные в фазах, реагируют на все виды к. з., а реле в нулевом проводе — только на к. з. на землю.

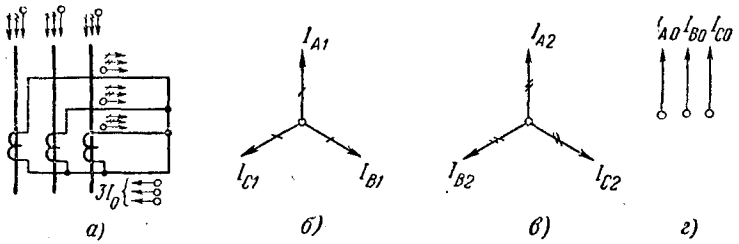


Рис. 3-11. Прохождение токов симметричных составляющих в схеме звезды.

а — токораспределение в схеме; *б — г* — векторы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Схема соединения в звезду применяется в защитах, действующих при всех видах к. з. Ток в реле равен току в фазе, поэтому коэффициент схемы, определяемый выражением (3-11), $k_{сх} = 1$.

в) Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в неполную звезду

Трансформаторы тока устанавливаются в двух фазах и соединяются так же, как и в схеме звезды (рис. 3-12). В реле *I* и *III* проходят токи соответствующих фаз

$$I_a = \frac{I_A}{n_т} \quad \text{и} \quad I_c = \frac{I_C}{n_т},$$

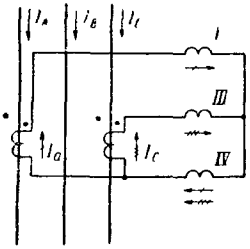


Рис. 3-12. Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в неполную звезду.

а в обратном проводе ток равен их геометрической сумме:

$$\dot{I}_{об} = -(\dot{I}_a + \dot{I}_c).$$

С учетом векторной диаграммы $-(\dot{I}_a + \dot{I}_c) = \dot{I}_b$, т. е. $I_{об}$ равен току фазы, отсутствующей во вторичной цепи. При трехфазном к. з. и нормальном режиме токи проходят по обоим реле *I* и *III* и в обратном проводе. В случае двухфазного к. з. токи появляются в одном или двух реле (*I* или *III*) в зависимости от того, какие фазы повреждены.

Ток в обратном проводе при двухфазных к. з. между фазами *A* и *C*, в которых установлены трансформаторы тока, согласно рис. 3-10, *б* с учетом, что $\dot{I}_a = -\dot{I}_c$, равен нулю, а при замыканиях между фазами *AB* и *BC* он соответственно равен $\dot{I}_{об} = \dot{I}_a$ и $\dot{I}_{об} = \dot{I}_c$.

В случае однофазного к. з. фаз (*A* или *C*), в которых установлены трансформаторы тока, во вторичной обмотке трансформатора тока и обратном проводе проходит ток к. з. При замыкании на землю фазы *B*, в которой трансформатор тока не установлен, токи в схеме защиты не появляются; следовательно, *схема неполной звезды реагирует не на все случаи однофазного к. з. и поэтому применяется только для защит, действующих при междуфазных повреждениях*. Коэффициент схемы $k_{сх} = 1$.

г) Схема соединения трансформаторов тока в треугольник, а обмоток реле в звезду

Вторичные обмотки трансформаторов тока, соединенные последовательно разноименными выводами (рис. 3-13), образуют треугольник.

Реле, соединенные в звезду, подключаются к вершинам этого треугольника. Из токораспределения на рис. 3-13 видно, что в каж-

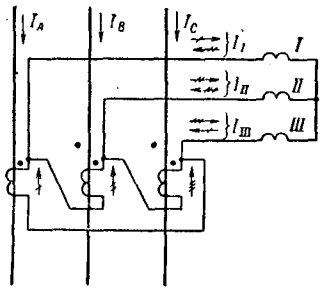


Рис. 3-13. Схема соединения трансформаторов тока в треугольник, а обмоток реле — в звезду.

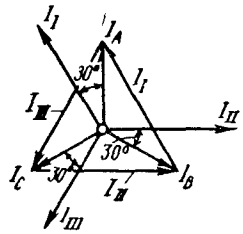


Рис. 3-14. Векторная диаграмма вторичных токов в схеме на рис. 3-13.

дом реле проходит ток, равный геометрической разности токов двух фаз:

$$\dot{I}_{I} = \frac{\dot{I}_A}{n_т} - \frac{\dot{I}_B}{n_т}; \quad \dot{I}_{II} = \frac{\dot{I}_B}{n_т} - \frac{\dot{I}_C}{n_т}; \quad \dot{I}_{III} = \frac{\dot{I}_C}{n_т} - \frac{\dot{I}_A}{n_т}.$$

На основании этих выражений и с учетом векторных диаграмм токов $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ (рис. 3-10) находятся токи, проходящие в реле при разных видах к. з.

При нагрузке и трехфазном к. з. в реле проходит линейный ток, в $\sqrt{3}$ раз больший тока фазы и сдвинутый относительно него по фазе на 30° (рис. 3-14).

В табл. 3-2 приведены значения токов при других видах к. з. в предположении, что коэффициент трансформации трансформаторов тока равен единице ($n_т = 1$).

Таблица 3-2

Вид короткого замыкания	Поврежденные фазы	Токи в фазах	Токи в реле		
			I $\dot{I}_A-\dot{I}_B$	II $\dot{I}_B-\dot{I}_C$	III $\dot{I}_C-\dot{I}_A$
Двухфазное	A, B	$I_B=-I_A$ $I_C=0$	$2I_A$	I_B	$-I_A$
	B, C	$I_C=-I_B$ $I_A=0$	$-I_B$	$2I_B$	I_C
	C, A	$I_A=-I_C$ $I_B=0$	I_A	$-I_C$	$2I_C$
Однофазное	A	$I_A=I_к$ I_B и $I_C=0$	I_A	0	$-I_A$
	B	$I_B=I_к$ I_A и $I_C=0$	$-I_B$	I_B	0
	C	$I_C=I_к$ I_A и $I_B=0$	0	$-I_C$	I_C

Таким образом, *схема соединения трансформаторов тока в треугольник обладает следующими особенностями*:

1. Токи в реле проходят при всех видах к. з. и, следовательно, защиты по такой схеме реагируют на все виды к. з.
2. Отношение тока в реле к фазному току зависит от вида к. з.
3. Токи нулевой последовательности не выходят за пределы треугольника трансформаторов тока, не имея пути для замыкания через обмотки реле.

Отсюда следует, что *при к. з. на землю в реле попадают только токи прямой и обратной последовательностей*, т. е. только часть тока к. з.

Описанная выше схема применяется в основном для дифференциальных и дистанционных защит.

Поскольку в рассматриваемой схеме ток в реле при трехфазных симметричных режимах в $\sqrt{3}$ раз больше тока в фазе, коэффициент схемы согласно (3-10) равен:

$$k_{сх}^{(3)}=\frac{I_р}{I_ф}=\frac{\sqrt{3}I_ф}{I_ф}=\sqrt{3}.$$

д) Схема соединений с двумя трансформаторами тока и одним реле, включенным на разность токов двух фаз

Трансформаторы тока устанавливаются в двух фазах (например, A и C на рис. 3-15); их вторичные обмотки соединяются разноимен-

ными зажимами, к которым (параллельно вторичным обмоткам) подключается обмотка реле.

Из токораспределения, показанного на рис. 3-15 для случая, когда по первичной цепи проходят положительные токи I_A, I_B, I_C, находим, что ток в реле $I_р$ равен геометрической разности токов двух фаз I_a и I_c, т. е.

$$I_р = I_a - I_c, \qquad (3\text{-}12)$$

где

$$I_a = \frac{I_A}{n_т}, \quad \text{а} \quad I_c = \frac{I_C}{n_т}.$$

Ток в реле для различных случаев к. з. и нагрузки находится с учетом прохождения первичных токов при рассматриваемом режиме по выражению (3-12) с помощью векторных диаграмм токов I_a и I_c.

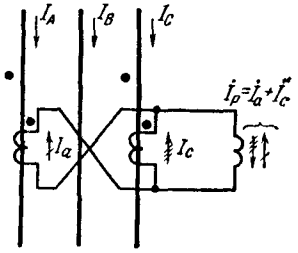


Рис. 3-15. Схема соединения трансформаторов тока на разность токов двух фаз.

При симметричной нагрузке и трехфазном к. з. распределение первичных и вторичных токов соответствует рис. 3-15. Пользуясь векторной диаграммой на рис. 3-10, *а*, находим по (3-12), что $I_a - I_c$ в $\sqrt{3}$ раз больше тока в фазе (I_a и I_c) и, следовательно,

$$I_р^{(3)} = \sqrt{3} I_ф. \qquad (3\text{-}12а)$$

При двухфазном к. з. на фазах A и C (рис. 3-10, *б*) в реле поступает два тока I_A и I_C с учетом векторной диаграммы $I_C = -I_A$; следовательно, и $I_c = -I_a$. Подставляя это значение I_c в (3-12), получаем:

$$I_р^{(2)} = 2I_a = 2I_ф, \qquad (3\text{-}12б)$$

где $I_ф = I_a$.

При двухфазном к. з. между A и B или B и C в реле поступает ток только одной фазы I_A или I_C, поскольку на фазе B нет трансформатора тока, отсюда по (3-12) получим:

$$I_р^{(2)} = I_ф, \qquad (3\text{-}12в)$$

где $I_ф = I_a$ или $I_ф = I_c$.

Из (3-12а) — (3-12в) видно, что *ток в реле, а следовательно, и чувствительность схемы, при разных видах к. з. будет различной.* Наименьший ток $I_р$, и поэтому наихудшая чувствительность, будет при к. з. между двумя фазами (AB и BC), из которых одна фаза (B) не имеет трансформатора тока.

По сравнению со схемой полной и двухфазной звезды данная схема имеет худшую чувствительность при к. з. между AB и BC. Действительно, при одной и той же нагрузке линии $I_ф = I_н$, в первых двух схемах в реле будет поступать ток $I_р = I_н$, а в рассматриваемой схеме согласно (3-12а) $I_р = \sqrt{3} I_н$.

В соответствии с этим ток срабатывания $I'_{ср}$ реле в рассматриваемой схеме будет в $\sqrt{3}$ раз больше, чем $I''_{ср}$ в первых двух: $I'_{ср} = \sqrt{3} \times I''_{ср}$. В то же время при двухфазном к. з. между фазами AB и BC в реле всех трех сравниваемых схем ток $I_р = I_ф = I_к^{(2)}$; следовательно, если для схем по рис. 3-9 и 3-12 $k_ч = I_к^{(2)}/I''_{ср}$, то для схемы по рис. 3-15

$$k_ч = \frac{I_к^{(2)}}{I'_{с.р}} = \frac{I_к^{(2)}}{\sqrt{3} \cdot I''_{с.р}}$$

и будет в $\sqrt{3}$ раз меньше. Указанный недостаток (пониженная чувствительность при двухфазных к. з. на линии между фазами AB и BC) нужно учитывать при применении схемы.

В случае двухфазного к. з. между фазами B и C за силовым трансформатором с соединением обмоток звезда — треугольник ток в реле $I_р = I_а - I_с$ оказывается равным нулю, так как токи $I_а$ и $I_с$ равны по величине и совпадают по фазе, что видно из токораспределения на рис. 3-17. Таким образом, при этом случае повреждения реле не будет действовать, что является существенным недостатком схемы. По этой причине *однорелейную схему нельзя применять для защит, которые должны действовать при к. з. за трансформаторами с соединением обмоток* $Y/\triangle$.

В случае однофазных к. з. на фазе, не имеющей трансформаторов тока (фаза B), ток в реле равен нулю, поэтому схема с включением на разность токов двух фаз не может использоваться в качестве защиты от однофазных к. з.

Рассматриваемая схема может применяться только для защиты от междуфазных к. з. в тех случаях, когда она обеспечивает необходимую чувствительность при двухфазных к. з. и когда не требуется ее действие при к. з. за трансформатором $Y/\triangle$.

Коэффициент схемы при симметричных режимах $k_{сх}^{(3)} = \frac{I_р}{I_ф} = \sqrt{3}$, с учетом что в этом режиме $I_р = \sqrt{3} I_ф$.

е) Схема соединения трансформаторов тока в фильтр токов нулевой последовательности

Трансформаторы тока устанавливаются на трех фазах, одноименные зажимы вторичных обмоток соединяются параллельно и к ним подключается обмотка реле (рис. 3-16).

Из показанного на схеме распределения токов следует, что *ток в реле равен геометрической сумме вторичных токов трех фаз*:

$$\dot{I}_р = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

Это значит, что $I_р = 3I_0$, и, следовательно, рассмотренная схема является фильтром токов нулевой последовательности. Ток в реле появляется только при однофазных и двухфазных к. з. на землю, так как только при этих повреждениях появляется I_0. Поэтому схема применяется для защит от замыканий на землю.

При нагрузках, трехфазных и двухфазных к. з. сумма первичных токов трех фаз равна нулю, соответственно ток $I_0 = 0$ и реле P не действует. Но из-за погрешности трансформаторов тока сумма вторичных токов не балансируется и в реле появляется ток небаланса $I_{нб}$, что необходимо учитывать при применении схемы.

Включение реле по схеме на рис. 3-16 равносильно его включению в нулевой провод звезды по рис. 3-9.

Рассмотренная схема часто называется трехтрансформаторным фильтром токов I_0.

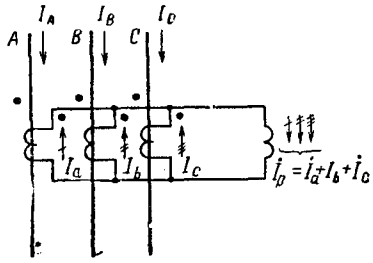


Рис. 3-16. Схема соединения трансформаторов тока в фильтр токов нулевой последовательности.

ж) Токораспределение при двухфазных коротких замыканиях за трансформаторами с соединением обмоток звезда — треугольник

Особым случаем по характеру токораспределения являются двухфазные к. з. за трансформаторами с соединением обмоток $\lambda/\triangle$ или $\triangle/\lambda$. На рис. 3-17 показан пример такого токораспределения для наиболее распространенной группы соединений $\lambda/\triangle$ — 11. Для простоты принимается, что коэффициент трансформации трансформатора $N_т = 1$. При этом отношение линейных токов обмоток, соединенных в λ и $\triangle$, равно 1, а токов в фазах

$$\frac{I_\lambda}{I_\triangle} = \frac{w_\triangle}{w_\lambda} = \sqrt{3}. \qquad (3\text{-}13)$$

При двухфазном к. з. на стороне треугольника, например между фазами b и c (рис. 3-17, a), ток в неповрежденной фазе $I_a = 0$, а токи в поврежденных фазах b и c равны току к. з., т. е.

$$I_c = -I_b = I_к.$$

Как видно из рис. 3-17, a, в треугольнике ток $I_к$ делится на две части: одна замыкается по обмотке фазы c и другая — по последовательно включенным обмоткам фаз b и a. Сопротивление второй цепи в 2 раза больше, чем первой. Поэтому ток в обмотке фазы c равен $\frac{2}{3} I_к$, а в обмотках a и b — $\frac{1}{3} I_к$.

Токи на стороне звезды соответствуют токам в обмотках одноименных фаз треугольника и превышают их с учетом (3-13) в $\sqrt{3}$ раз. Из рис. 3-17, a следует:

$$\left.\begin{aligned} I_A = I_{a\triangle}\sqrt{3} = \frac{I_к}{3}\sqrt{3} = \frac{I_к}{\sqrt{3}}; \\ I_B = I_{b\triangle}\sqrt{3}; \quad I_C = I_{c\triangle}\sqrt{3} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_к. \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}14)$$

При к. з. между фазами *ab* и *ca* картина распределения токов будет аналогичной.

Таким образом, при двухфазном к. з. на стороне треугольника трансформатора токи на стороне звезды появляются во всех трех фазах. В двух фазах они равны и одинаково направлены. В третьей фазе ток противоположен первым двум и равен их сумме, т. е. в 2 раза больше каждого из них.

Подобным же образом можно найти распределение токов при двухфазном к. з. на стороне звезды (рис. 3-17, *б*). При этом, как следует из рис. 3-17, *б*, распределение и соотношение токов на сто-

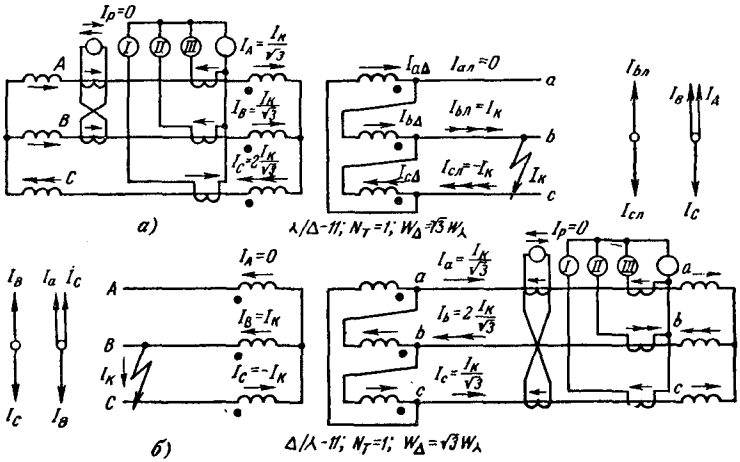


Рис. 3-17. Токораспределения и векторные диаграммы токов при двухфазных к. з. за трансформаторами с соединением обмоток.

а — Y/Δ; *б* — Δ/Y.

роне треугольника получается таким же, как и в предыдущем случае на стороне звезды. Анализируя условия работы защиты, выполненной по схемам полной звезды, неполной звезды и с включением на разность токов двух фаз в рассмотренных условиях (т. е. при к. з. за трансформатором), можно установить:

1) в схеме полной звезды (рис. 3-17) в одной фазе схемы появляется ток $2I_к/\sqrt{3}\cdot n_т$, где $n_т$ — коэффициент трансформации трансформаторов тока, а в двух других $I_к/\sqrt{3}\cdot n_т$; сумма токов в нулевом проводе равна нулю. Реле *I*, *II*, *III* действуют, но два из них имеют в 2 раза меньшую чувствительность, чем третье реле;

2) в схеме неполной звезды (рис. 3-12) токи проходят по обеим фазам и обратному проводу, в последнем он равен геометрической сумме токов указанных фаз или току отсутствующей в схеме фазы.

Если трансформаторы тока окажутся на фазах с меньшими первичными токами $I_к\sqrt{3}n_т$, то в таком случае условия чувствитель-

ности будут в 2 раза хуже, чем в схеме полной звезды. Для устранения этого недостатка следует использовать реле в обратном проводе, где проходит сумма токов фаз, равная току к. з. в третьей фазе (см. § 3-6, в):

$$I_{об}=\frac{I_к}{\sqrt{3}\,n_т}+\frac{I_к}{\sqrt{3}\,n_т}=\frac{2I_к}{\sqrt{3}n_т};$$

3) в схеме с включением одного реле на разность токов двух фаз ток в реле в случае, показанном на рис. 3-17, *а* и *б*, будет отсутствовать.

Вследствие одинакового направления токов по фазам, на которых установлены трансформаторы тока, их разность и ток в реле равны нулю. *Следовательно, эта схема не применима для защиты от к. з. за трансформаторами с соединением* λ/△ и △/λ.

3-7. НАГРУЗКА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Выше отмечалось, что погрешность трансформатора тока зависит от величины его нагрузки.

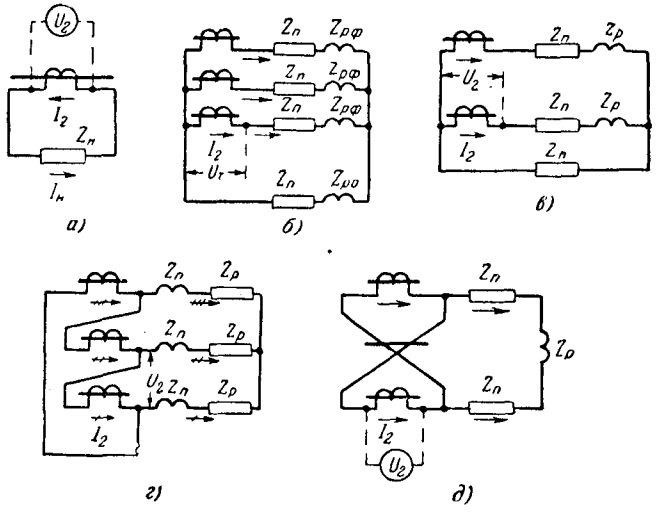


Рис. 3-18. Нагрузка вторичной обмотки трансформаторов тока при различных схемах соединения.

а — при одном трансформаторе тока; *б* — *д* — при соединении по схемам на рис. 3-9, 3-12, 3-13 и 3-15.

Сопротивление нагрузки трансформатора тока равно:

$$z_н=\frac{U_2}{I_2}, \qquad (3\text{-}15)$$

где U_2 и I_2 — напряжение и ток вторичной обмотки (рис. 3-18, *а*)

Чтобы определить $z_н$, нужно вычислить напряжение U_2, равное падению напряжения в сопротивлении нагрузки $z_н$ от проходящего в нем тока $I_н$ (рис. 3-18, *а*).

Сопротивление нагрузки состоит из сопротивления проводов $r_п$ и сопротивления реле $z_р$, которые для упрощения суммируются арифметически: $z_н = r_п + z_р$.

Величина $U_2 = I_2 z_н$ (рис. 3-18, *а*) при прочих равных условиях зависит от схемы соединений трансформаторов тока, величины нагрузки $z_н$, вида к. з. и сочетания поврежденных фаз.

Для схемы полной звезды (рис. 3-18, *б*) U_2 при трехфазных и двухфазных к. з. равно падению напряжения в нагрузке фазы, т. е.

$$U_2 = I_2 (r_п + z_р),$$

поэтому

$$z_н^{(3)} = z_н^{(2)} = \frac{U_2^{(2)}}{I_2} = \frac{I_2 (r_п + z_р)}{I_2} = (r_п + z_р).$$

При однофазном к. з. U_2 равно падению напряжения в сопротивлении петли «фаза» — «нуль» ($2r_п$) и в сопротивлении реле в фазе $z_{р.ф}$ и нулевом проводе $z_{р0}$; отсюда

$$z_н^{(1)} = \frac{I_2 (2r_п + z_{р.ф} + z_{р0})}{I_2} = 2r_п + z_{р.ф} + z_{р0}.$$

Таким образом, наибольшее $z_н$ получается при однофазном к. з.

В схеме неполной звезды (рис. 3-18, *в*) максимальная нагрузка на трансформаторах тока имеет место при двухфазных к. з. между фазой, имеющей трансформатор тока, и фазой, не имеющей его, и равна $z_н = 2r_п + z_р$.

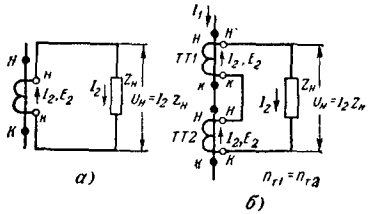


Рис. 3-19. Загрузка трансформаторов тока, замкнутых на сопротивление.

а — при одном трансформаторе тока; *б* — при двух трансформаторах с последовательным соединением обмоток.

В схеме включения реле на разность токов двух фаз (рис. 3-18, *д*) наибольшая нагрузка получается при двухфазных к. з. между фазами, имеющими трансформаторы тока. В этом случае ток в реле $I_р = 2I_2$, а

$$z_н = \frac{2I_2 r_п + 2I_2 z_р + 2I_2 r_п}{I_2} = 4r_п + 2r_р.$$

В схеме треугольника (рис. 3-18, *г*) трансформаторы имеют наибольшую нагрузку как при трехфазном, так и при двухфазном к. з. В обоих случаях

$$z_н = 3r_п + z_р.$$

Погрешность трансформаторов тока должна определяться при максимальном значении $z_н$ для данной схемы.

Для уменьшения нагрузки на трансформаторы тока при их недостаточной мощности можно применять последовательное включение двух трансформаторов тока, установленных на одной фазе (рис. 3-19) с одинаковым коэффициентом $n_т$. В этом случае падение напряжения в нагрузке делится поровну между вторичными обмотками трансформаторов. Токи в обоих трансформаторах тока одинаковы и равны $I_2 = I_1/n_т$. Поэтому нагрузка каждого трансформатора составляет половину общей нагрузки.

3-8. ФИЛЬТРЫ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ

а) Общие сведения

Наряду с защитами, реагирующими на полный ток фазы, применяются устройства релейной защиты, реагирующие на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Для осуществления таких устройств необходимы фильтры, выделяющие симметричные составляющие из токов трехфазной сети [Л. 23].

Фильтры токов симметричных составляющих представляют собой (рис. 3-20) специальные схемы, на выходе которых получается ток, пропорциональный соответствующей симметричной составляющей токов трехфазной сети, питающих фильтр. К выходным зажимам фильтра подключается реле, реагирующее на полученную составляющую.

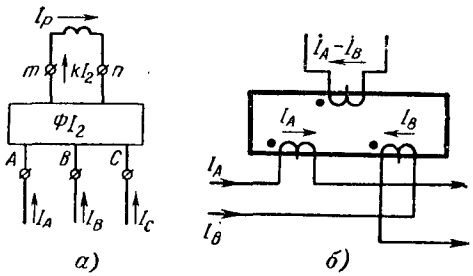


Рис. 3-20. Фильтр токов обратной последовательности (*а*); включение на разность токов двух фаз $I_A - I_B$ (*б*).

В зависимости от используемых элементов фильтры делятся на активно-индуктивные, активно-емкостные, трансформаторные.

Имеются фильтры п р о с т ы е, выделяющие только одну последовательность (прямую, обратную или нулевую), и к о м б и н и р о в а н н ы е, ток на выходе которых пропорционален двум или всем трем симметричным составляющим токов сети. В общем случае ток на выходе комбинированного фильтра

$$I_ф = k_1 \dot{I}_1 + k_2 \dot{I}_2 + k_3 \dot{I}_0, \qquad (3\text{-}16)$$

где k_1, k_2 и k_3 — постоянные коэффициенты фильтра.

В этом разделе рассматриваются фильтры токов обратной и прямой последовательностей. Комбинированные фильтры и фильтры нулевой последовательности разбираются при описании защит, в которых они используются.

б) Фильтры токов обратной последовательности

Ток в реле, включенном в выходную цепь фильтра обратной последовательности (рис. 3-20, *а*), $I_р = kI_2$.

Токи прямой и нулевой последовательностей через такой фильтр не проходят. Это означает, что при подводе токов I_1 и I_0 к фильтру I_2 его выходной ток равен нулю.

Питание фильтра тока обратной последовательности может производиться фазными токами $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ (рис. 3-20, *а*) или разностью

фазных токов $\dot{I}_A - \dot{I}_B$, $\dot{I}_B - \dot{I}_C$, $\dot{I}_C - \dot{I}_A$ (рис. 3-20, *б*). Разность токов двух фаз не содержит составляющей нулевой последовательности I_0, так как при вычитании одного фазного тока из другого, например $\dot{I}_A - \dot{I}_B$, нулевые составляющие взаимно компенсируются. Поэтому при питании фильтра I_2 разностью фазных токов фильтр должен запирать только токи прямой последовательности, что несколько упрощает его выполнение.

Рассмотрим в качестве примера трансформаторный фильтр тока обратной последовательности, показанный на рис. 3-21, *а*. По этой схеме Чебоксарским электроаппаратным заводом выполняется фильтр типа РТ-2. Фильтр состоит из трехобмоточного трансреактора *Тр* (трансформатора с воздушным зазором,

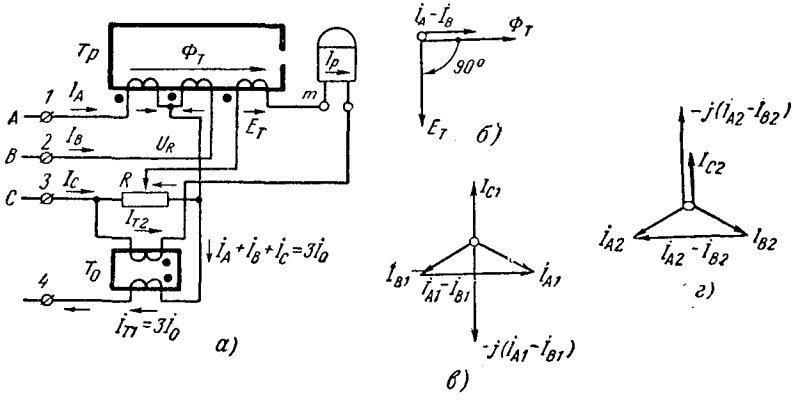


Рис. 3-21. Активно-индуктивный (трансформаторный) фильтр тока I_2 типа РТ-2.

см. § 2-16), активного сопротивления R и двухобмоточного вспомогательного трансформатора T_0.

Трансреактор *Тр* имеет две первичные и одну вторичную обмотки. Первичные обмотки включены на ток сети фаз *А* и *В* разноименной полярностью. Поэтому создаваемый ими магнитный поток пропорционален разности токов $\dot{I}_A - \dot{I}_B$.

Этот поток индуктирует во вторичной обмотке *Тр* э. д. с., отстающую от индуктирующих ее потока $\Phi_т$ и тока $\dot{I}_A - \dot{I}_B$ на 90° (рис. 3-21, *б*). В комплексной форме $\dot{E}_т = -j\omega M\,(\dot{I}_A - \dot{I}_B)$, где ωM представляет собой реактивное сопротивление $x_т$, обусловленное взаимоиндукцией обмоток трансреактора. Отсюда

$$\dot{E}_т = -jx_т\,(\dot{I}_A - \dot{I}_B). \qquad (3\text{-}17)$$

Наличие воздушного зазора в магнитопроводе *Тр* обеспечивает линейную зависимость величины э. д. с. от тока $\dot{I}_A - \dot{I}_B$. Величина $x_т$ подбирается равной $R/\sqrt{3}$. Из дальнейшего будет видно, что последнее является необходимым условием для исключения влияния токов прямой последовательности на выходное напряжение фильтра.

По активному сопротивлению R проходит ток I_C. В результате этого на зажимах сопротивления возникает напряжение

$$\dot{U}_R = \dot{I}_C R. \qquad (3\text{-}18)$$

Выходной контур фильтра mn образуется вторичной обмоткой трансреактора и сопротивлением R. Напряжение на разомкнутых зажимах mn равно сумме э. д. с., действующих в контуре, т. е. $\dot{U}_{mn} = \dot{U}_R + \dot{E}_т$. За положительное направление в выходном контуре принято направление, противоположное токам на входе фильтра. Выразив U_R и $E_т$ через токи с помощью выражений (3-17) и (3-18), получим:

$$\dot{U}_{mn} = \dot{I}_C R - j(\dot{I}_A - \dot{I}_B) x_т. \qquad (3\text{-}19)$$

Чтобы установить влияние каждой последовательности на величину U_{mn}, определим его значение, пользуясь выражением (3-19) при поочередном питании фильтра токами нулевой, прямой и обратной последовательностей.

Токи нулевой последовательности ($I_{0A} = I_{0B} = I_{0C}$). В фазах A и B I_{0A} и I_{0B} взаимно уничтожаются благодаря принятой схеме включения трансреактора на разность токов $I_A - I_B$. Ток I_{0C}, проходящий по R, компенсируется с помощью трансформатора T_0. Первичная обмотка T_0 включена в нулевой провод звезды на ток $3I_0$. Коэффициент трансформации T_0 принят равным 1/3, поэтому вторичный ток $I_{т2} = \frac{1}{3} I_{т1} = I_0$. Как видно из рис. 3-21; *а*, ток $I_{т2}$ направлен навстречу току I_C, в результате чего I_{0C} компенсируется током $I_{т2}$.

Следовательно, токи нулевой последовательности при принятой схеме фильтра взаимно компенсируются и не создают напряжения на выходе фильтра.

Токи прямой последовательности I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}, проходя по фильтру, создают напряжения $E_т$ и U_R, образующие U_{mn} на выходе фильтра по выражению (3-19). Найдем с помощью векторной диаграммы на рис. 3-21, *в* величину и фазу вектора $-j(I_{A1} - I_{B1})$, входящего в (3-19). Для этого построим вектор $I_{A1} - I_{B1}$ и, умножив его на $-j$ (означающее поворот умножаемого вектора на 90° по часовой стрелке), получим, что $-j(I_{A1} - I_{B1}) = -\sqrt{3} I_{C1}$.

Подставив полученное значение в (3-19), найдем:

$$U_{mn(1)} = \dot{I}_C R - \sqrt{3} \dot{I}_C \frac{R}{\sqrt{3}} = 0.$$

Это означает, что токи прямой последовательности не создают напряжения на выходе фильтра, т. е. они не проходят через фильтр. Такой результат достигнут поворотом ($I_A - I_B$) на 90° и выполнением условия $x_т = R/\sqrt{3}$, что позволило получить $\dot{E}_т = -\dot{U}_R$.

Токи обратной последовательности (I_{A2}, I_{B2}, I_{C2}), как видно из векторной диаграммы на рис. 3-21, *г*, создают

вектор $-j(\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{B2})$, который в отличие от предыдущего случая совпадает по направлению с $\dot{I}_{C2}$. Поэтому $-j(\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{B2}) = \sqrt{3}\dot{I}_{C2}$. Подставляя полученное значение в (3-19), находим:

$$\dot{U}_{mn(2)} = \dot{I}_{C2}R + \sqrt{3}\dot{I}_{C2}\frac{R}{\sqrt{3}} = 2\dot{I}_{C2}R.$$

Поскольку токи прямой и нулевой последовательностей не создают напряжения на выходе фильтра, результирующее напряжение

$$\dot{U}_{mn} = U_{mn(2)} = 2\dot{I}_{C2}R, \qquad (3\text{-}20)$$

где $\dot{I}_{C2}$ — составляющая обратной последовательности тока, питающего фильтр.

Таким образом, рассмотренная схема является фильтром токов обратной последовательности.

Аналогичным образом выполняются все разновидности фильтров I_2.

Если к выходным зажимам фильтра *mn* подключить реле, то в его обмотке будет проходить ток [Л. 23]

$$I_{\text{р}} = \frac{U_{mn}}{z_{\text{ф}} + z_{\text{р}}}.$$

Для рассмотренного фильтра с учетом (3-20)

$$I_{\text{р}} = \frac{2I_{C2}R}{z_{\text{ф}} + z_{\text{р}}} \equiv I_{C2}, \qquad (3\text{-}21)$$

где $z_{\text{ф}}$ — сопротивление фильтра, измеренное со стороны выходных зажимов *mn* при разомкнутой цепи на входе фильтра; $z_{\text{р}}$ — сопротивление реле.

Реле, питающиеся через фильтр обратной последовательности (фильтр-реле), действуют только при несимметричных к. з., когда токи к. з. содержат составляющую обратной последовательности и не реагируют на симметричную нагрузку и трехфазные к. з., поскольку в этих случаях $I_2 = 0$.

Ток небаланса. За счет неточного подбора сопротивлений фильтра может появиться ток небаланса $I_{\text{нб}}$ при отсутствии тока I_2, который ограничивает чувствительность фильтр-реле. Поэтому $I_{\text{нб}}$ должен сводиться к минимальному значению регулировкой сопротивлений. *Баланс сопротивлений может нарушиться при изменении частоты в сети,* питающей фильтр, из-за того, что реактивные сопротивления x_L, x_C зависят от частоты. Это свойство фильтров является их недостатком.

Чувствительность фильтр-реле зависит от чувствительности реле и мощности, отдаваемой фильтром. Каждый источник питания отдает наибольшую мощность приемнику в случае равенства по величине их полных сопротивлений, т. е. $z_{\text{р}} = z_{\text{ф}}$. При этом абсолютный максимум отдаваемой мощности имеет место, когда при равенстве полных сопротивлений реактивные сопротивления источника и приемника также равны, но имеют противоположные знаки [Л. 23]. Следовательно, для обеспечения максимальной отдачи мощности фильтром необходимо выполнить условие $r_{\text{р}} = r_{\text{ф}}$ и $x_{\text{р}} = -x_{\text{ф}}$.

В качестве реле, питающихся от фильтра, обычно применяются чувствительные электромагнитные токовые реле или поляризованные реле постоянного тока, которые подключаются к фильтру через выпрямитель.

в) Фильтры токов прямой последовательности

Учитывая, что токи прямой последовательности отличаются от обратной только чередованием фаз, любой фильтр обратной последовательности можно превратить в фильтр прямой последовательности, изменив на его зажимах последовательность подводимых фаз.

Например, если на фильтре, изображенном на рис. 3-21, *а*, поменять местами фазы *B* и *C*, т. е. подключить фазу *C* к зажиму *2*, а фазу *B* — к зажиму *3*, то на выходных зажимах фильтра появится напряжение U_{mn}, пропорциональное токам прямой последовательности, а токи обратной последовательности не будут давать напряжения на выходе фильтра.

Фильтры токов прямой последовательности в чистом виде используются редко и применяются, как правило, в комбинации с другими составляющими ($\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$, $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$).

Глава четвертая

МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

4-1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ

Одним из признаков возникновения к. з. является увеличение тока в линии. Этот признак используется для выполнения защит, называемых токовыми. Токовые защиты приходят в действие при увеличении тока в фазах линии сверх определенного значения. В качестве реле, реагирующих на возрастание тока, служат максимальные токовые реле (см. гл. 2).

Токовые защиты подразделяются на максимальные токовые защиты и токовые отсечки. Главное различие между этими защитами заключается в способе обеспечения селективности.

Селективность действия максимальных защит достигается с помощью выдержки времени. Селективность действия токовых отсечек обеспечивается соответствующим выбором тока срабатывания.

4-2. ЗАЩИТА ЛИНИЙ С ПОМОЩЬЮ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

Максимальные токовые защиты являются основным видом защит для сетей с односторонним питанием. В сетях более сложной конфигурации максимальная защита применяется как вспомогательная в отдельных случаях.

В сетях с односторонним питанием максимальная защита должна устанавливаться в начале каждой линии со стороны источника питания (рис. 4-1, *а*). При таком расположении защит каждая линия имеет самостоятельную защиту, отключающую линию в случае повреждения на ней самой или на шинах питающейся от нее подстанции.

При к. з. в какой-либо точке сети, например в точке K_1 (рис. 4-1, *а*), ток к. з. проходит по всем участкам сети, расположенным между источником питания и местом повреждения, в результате чего приходят в действие все защиты (*1*, *2*, *3*, *4*). Однако по условию селективности сработать на отключение должна только защита *4*, установленная на поврежденной линии.

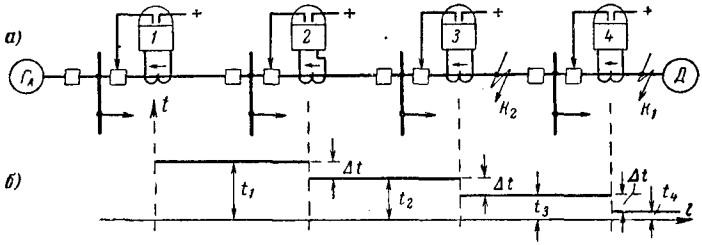


Рис. 4-1. Максимальные токовые защиты в радиальной сети с односторонним питанием.

а — размещение защит; *б* — выдержки времени защит, выбранные по ступенчатому принципу.

Для обеспечения указанной селективности максимальные защиты выполняются с выдержками времени, нарастающими от потребителей к источнику питания, как это показано на рис. 4-1, *б*. При соблюдении этого принципа в случае к. з. в точке K_1 раньше других сработает защита *4* и произведет отключение поврежденной линии. Защиты *1*, *2* и *3* вернутся в начальное положение, не успев подействовать на отключение. Соответственно при к. з. в точке K_2 быстрее всех сработает защита *3*, а защиты *1* и *2*, имеющие большее время, не подействуют.

Рассмотренный принцип подбора выдержек времени называется ступенчатым.

В сетях с двусторонним питанием достигнуть селективного действия максимальной защиты только путем подбора выдержек времени, как правило, не удается; в этих сетях вместо максимальной токовой защиты применяют более сложные направленные защиты.

4-3. СХЕМЫ ЗАЩИТЫ

а) Разновидности схем максимальной защиты

Максимальные защиты выполняются трехфазными и двухфазными (§ 3-6, б, в, д), прямого и косвенного действия (§ 1-8).

По способу питания оперативных цепей максимальные защиты косвенного действия делятся на защиты с постоянным и переменным оперативным током.

По характеру зависимости времени действия реле от тока максимальные защиты подразделяются на защиты с независимой и зависимой характеристиками.

Максимальные защиты прямого действия и на переменном оперативном токе имеют существенные отличия в выполнении оперативных цепей, применяемой аппаратуре и в расчете параметров, поэтому они рассматриваются отдельно (см. § 4-8).

б) Схемы трехфазной защиты на постоянном оперативном токе

Защита с независимой выдержкой времени (рис. 4-2). В трехфазных защитах трансформаторы тока и обмотки токовых реле соединяются по схеме полной звезды, рассмотренной в § 3-6, б.

Основными элементами схемы максимальной защиты (рис. 4-2) являются: токовые реле *1*, срабатывающие при появлении тока к. з. и выполняющие функции пускового органа защиты, и реле времени *2*, создающее выдержку времени и выполняющее функции органа времени. Кроме основных, в схеме имеются и вспомогательные реле; к ним относятся промежуточное реле *3* и указательное реле *4*.

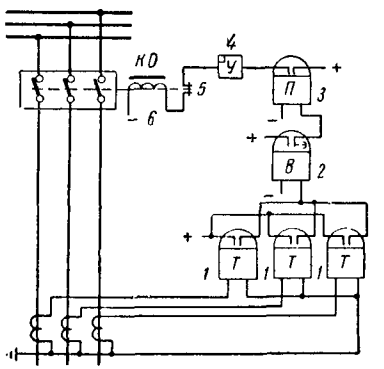


Рис. 4-2. Трехлинейная схема трехфазной максимальной токовой защиты с независимой выдержкой времени.

При возникновении к. з. срабатывают токовые реле тех фаз, по которым проходит ток к. з. Контакты всех токовых реле соединены параллельно, поэтому при срабатывании любого токового реле замыкается цепь обмотки реле времени *2*. Через заданный интервал времени контакты реле времени замыкаются, и приводят в действие промежуточное реле *3*. Последнее срабатывает мгновенно и подает ток в катушку отключения выключателя *6* через блокировочный контакт *5* (см. § 1-8).

Промежуточное реле *3* устанавливается в тех случаях, когда реле времени не может замыкать цепь катушки отключения из-за недостаточной мощности своих контактов.

Указательное реле *4* включается последовательно с катушкой отключения. При появлении тока в этой цепи указательное реле срабатывает, его флажок выпадает, фиксируя, таким образом, действие максимальной защиты и появление тока в катушке отключения.

Блокировочный контакт привода выключателя *5* служит для разрыва тока катушки отключения, так как контакты промежуточных реле не рассчитываются на размыкание этой цепи. Блокировочный контакт должен размыкаться раньше, чем произойдет возврат промежуточного реле.

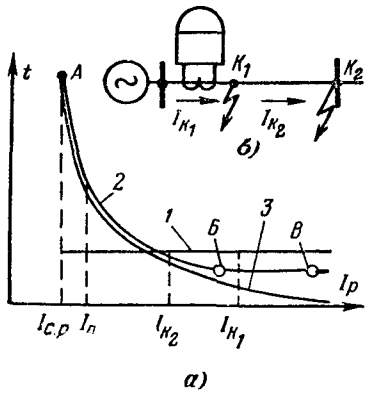


Рис. 4-3. Характеристики зависимости выдержки времени от тока в реле максимальных токовых защит (*а*) и схема сети, поясняющая работу защиты (*б*).

1 — независимая; *2* — зависимая; *3* — ограниченно зависимая; *АБ* — зависимая и *ББ* — независимая части характеристики.

Время действия рассмотренной защиты определяется выдержкой времени, установленной на реле времени, и не зависит от величины тока к. з., поэтому такая защита называется защитой с независимой выдержкой времени и имеет характеристику в виде прямой *1* на рис. 4-3.

Защита с зависимой характеристикой. Наряду с независимой защитой применяется максимальная защита с зависимой и ограниченно зависимой характеристиками $t = f(I)$ (кривые *2* и *3* на рис. 4-3). Оба вида зависимых защит выполняются при помощи токовых реле, работающих не мгновенно, а с выдержкой времени, зависящей от величины тока. Примером такого реле является реле типа РТ-80 (см. § 2-8). Схема зависимой защиты с реле типа РТ-80 изображена на рис. 4-4. В этой схеме отсутствует реле времени, а также промежуточное и указательное реле, так как реле типа РТ-80 имеет контакты достаточной мощности и сигнальный флажок, выпадающий при срабатывании реле.

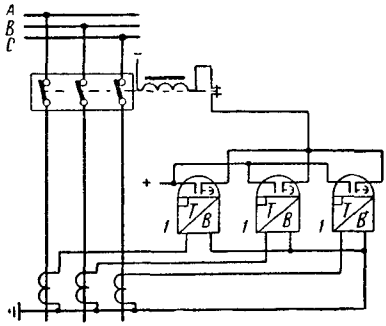


Рис. 4-4. Трехлинейная схема трехфазной максимальной токовой защиты с зависимой от тока выдержкой времени.

В отличие от защиты с независимой характеристикой (прямая *1* на рис. 4-3, *а*) защита с зависимой характеристикой (кривые *2* и *3*) действует при токах $I_р = (1 \div 2)\, I_{с.з}$ со значительно большей выдержкой времени, чем при к. з., что улучшает отстройку защиты от кратковременных перегрузок ($I_п$). Кроме того, защиты с зависимой характеристикой позволяют ускорить отключение при повреждении в начале линии (точка K_1 на рис. 4-3, *б*), если ток при к. з. в K_1 значительно больше, чем при к. з. в конце линии в точке K_2. Однако согласование выдержек

времени независимых защит значительно проще (см. § 4-5) поэтому зависимые защиты следует применять только в случаях явного преимущества.

Трехфазные схемы максимальной защиты, приведенные на рис. 4-2 и 4-4, реагируют на все виды к. з., включая и однофазные, и поэтому их применяют в сети с глухо заземленной нейтралью, где возможны как междуфазные, так и однофазные к. з.

В сети с изолированной нейтралью трехфазные схемы не рекомендуются к применению по следующим причинам:

1. Трехфазные схемы дороже двухфазных (§ 4-3, *в*), так как для их выполнения требуется больше оборудования и соединительных проводов.

2. Трехфазные защиты в большем числе случаев, чем двухфазные, работают неселективно при двойных замыканиях на землю, как это показано в § 4-4.

в) Схемы двухфазной защиты на постоянном оперативном токе

В тех случаях, когда максимальная защита должна действовать только при междуфазных к. з., применяются двухфазные схемы с двумя или одним реле.

Двухрелейная схема с независимой характеристикой (рис. 4-5, *а*). Токовые цепи защиты выполняются по схеме неполной звезды (см.

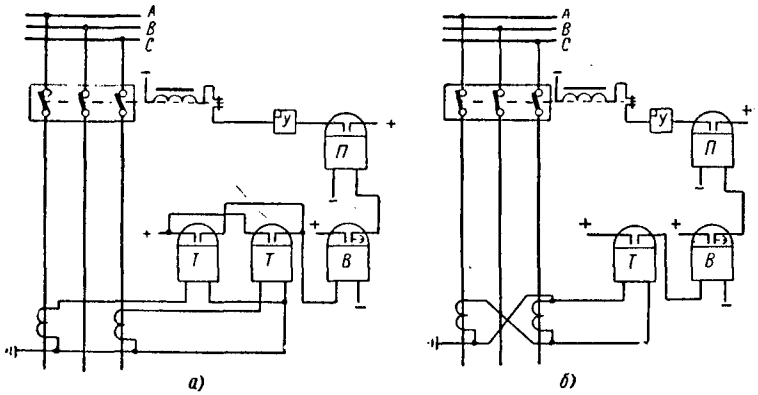


Рис. 4-5. Двухфазные схемы максимальной токовой защиты.

а — двухрелейная; *б* — однорелейная.

§ 3-6, в). Элементы схемы и их назначение такие же, как в трехфазной схеме на рис. 4-2.

Достоинством двухрелейной схемы является то, что она:

1) реагирует (так же как и трехфазная) на все междуфазные к. з. на линиях;

2) при замыканиях на землю в двух разных точках сети с изолированной нейтралью работает селективно в большем числе случаев, чем трехфазная схема (см. § 4-4);

3) экономичнее трехфазной схемы, так как для ее выполнения требуется меньше оборудования и проводов.

К недостаткам двухфазной схемы нужно отнести ее меньшую чувствительность (по сравнению с трехфазной схемой) при двухфазных к. з. за трансформатором с соединением обмоток $\lambda/\triangle$. Как видно из рис. 3-17, *а*, при двухфазном к. з. на стороне $\triangle$ ток в одной фазе звезды равен $\frac{2}{\sqrt{3}} I_к$, а в двух других — $\frac{1}{\sqrt{3}} I_к$, т. е. в 2 раза меньше.

То же самое получается и при соединении обмоток трансформатора Δ/λ в случае двухфазного к. з. на стороне звезды.

При трехфазной схеме одно из реле защиты питается большим током к. з. $\frac{2}{\sqrt{3}} I_к$, в то время как при двухфазной схеме в одном из трех возможных случаев двухфазного к. з. (*AB*, *BC*, *CA*) трансформаторы тока защиты оказываются на фазах с меньшими токами к. з. $\left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_к\right)$. Поэтому двухфазная защита при двухфазных к. з. за трансформаторами $\lambda/\triangle$ и $\triangle/\lambda$ имеет в 2 раза меньшую чувствительность, чем трехфазная защита.

При необходимости чувствительность двухфазной схемы можно повысить, установив третье токовое реле в общем проводе токовых цепей. В этом проводе (см. § 3-6, *в*) протекает геометрическая сумма токов двух фаз, питающих схему (*A* и *C* на рис. 4-5, *а*), равная току третьей (отсутствующей в схеме) фазы *B*, т. е. $\dot{I}_{о.п} = -(\dot{I}_a + \dot{I}_c) = \dot{I}_b$.

Таким образом, с дополнительным реле двухфазная схема становится равноценной по чувствительности с трехфазной.

Вследствие отмеченных выше положительных свойств двухфазные схемы широко применяются в сетях с изолированной нейтралью, где возможны только междуфазные к. з. Двухфазные схемы применяются в качестве защиты от междуфазных к. з. и в сетях с глухозаземленной нейтралью, при этом для отключения однофазных к. з. устанавливается дополнительная защита, реагирующая на ток нулевой последовательности.

Однорелейная схема (рис. 4-5, *б*). Защита состоит из тех же элементов, что и предыдущая схема. Токовое пусковое реле *Т* одно, оно включается на разность токов двух фаз $\dot{I}_р = \dot{I}_A - \dot{I}_B$ и реагирует на все случаи междуфазных к. з. (полной и неполной звезды), как было показано в § 3-6.

Преимуществом схемы является наименьшее число токовых реле и соединительных проводов, необходимых для ее выполнения (одно реле и два токовых провода).

К недостаткам, ограничивающим применение схемы, нужно отнести:

1) меньшую чувствительность по сравнению с двухрелейной схемой при к. з. между фазами *AB* и *BC* (§ 3-6, д). Этот недостаток

имеет значение при малой кратности токов к. з., когда $I_к$ близко к току нагрузки;

2) недействие защиты при одном из трех возможных случаев к. з. за трансформатором с соединением обмоток $Y/\triangle$ (см. §3-6, ж), когда $I_р = I_a - I_c = 0$;

3) при неисправности единственного токового реле или проводов, связывающих его с трансформаторами тока, защита откажет в действии при к. з. Двухрелейная схема (рис. 4-5, *а*) не имеет такого недостатка, так как при трехфазных к. з. и двухфазных между *А* и *С* в этой схеме работают два реле и поэтому обрыв одного провода не приведет к отказу защиты.

Первый недостаток не позволяет применять однорелейные схемы в сети с малой кратностью токов к. з. Второй исключает применение схемы в сетях, где имеются трансформаторы с соединением обмоток Y/Δ. Третий ограничивает применение однорелейной защиты в сетях, где отказ защиты может отразиться на электроснабжении большого участка сети.

Однорелейная схема находит применение в распределительных сетях 6—10 *кв* и для защиты электродвигателей. В сетях 35 *кв* и выше из-за указанных недостатков однорелейная схема почти не применяется.

Двухфазная защита с зависимой характеристикой. Токовые цепи этой защиты выполняются так же, как и у защиты с независимой характеристикой. Токовое реле имеет зависимую характеристику, в качестве него используется реле типа РТ-80.

Схемы защит аналогичны схемам на рис. 4-5, *а* и *б*, за исключением того, что в них отсутствуют реле времени и указательное реле. Все сказанное о двухфазных схемах с независимой характеристикой относится и к схемам с зависимой характеристикой.

4-4. ПОВЕДЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ДВОЙНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

В сети с изолированной нейтралью возможны одновременные замыкания на землю разноименных фаз в двух разных точках сети (рис. 4-6). В этих случаях желательно отключать не обе поврежденные линии, а только одну из них *ЛI* или *ЛII*. При таком отключении к. з. ликвидируется с наименьшим ущербом для потребителей (селективно), а оставшееся однофазное замыкание (K_2 или K_1) отключается вручную после перевода питания потребителей поврежденной линии на другой источник питания.

Обеспечение селективной ликвидации двойных замыканий на землю с помощью релейной защиты является сложной задачей.

С помощью токовой защиты ее можно решить, хотя и не полностью, применяя двухфазную схему максимальной защиты при условии, что *трансформаторы тока на всех элементах сети данного напряжения устанавливаются на одноименных фазах.*

При случайном расположении трансформаторов тока (на разных участках, на разноименных фазах) защита может работать неправильно, если оба замыкания на землю возникнут на тех фазах, где трансформаторов тока нет, как это показано на рис. 4-6.

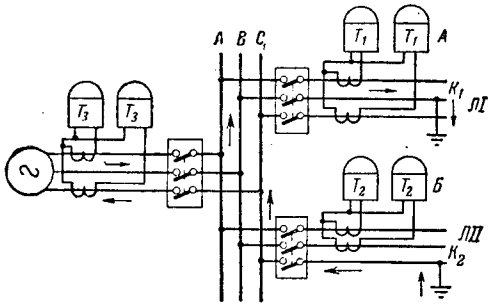


Рис. 4-6. Неправильная расстановка трансформаторов тока двухфазных максимальных защит в сети с изолированной нейтралью.

В этом случае защиты обеих поврежденных линий не подействуют, что повлечет неселективное отключение источника питания сети.

Если же трансформаторы тока защиты установлены везде на одноименных фазах (например, *A* и *C*), то возможность такого неселективного отключения исключается.

Из рассмотрения рис. 4-7 нетрудно установить, что при размещении трансформаторов тока на одноименных фазах *A* и *C* повреждения будут отключаться селективно (т. е. в одной точке сети), за исключением следующих двух случаев:

а) если более удаленное от источника питания замыкание на землю (в точке K_2) окажется на фазе *B*, не имеющей трансформатора тока (рис. 4-7, *а*). В этом случае подействует защита *1* и отключит ближнюю к источнику питания линию *ЛI*, так как защита *2* работать не может. Трехфазная защита в этих условиях обеспечивает селективное отключение линии *ЛII*;

б) если оба замыкания на землю возникнут на линиях, имеющих защиты с одинаковыми выдержками времени, и на тех фазах (*A* и *C*), кото-

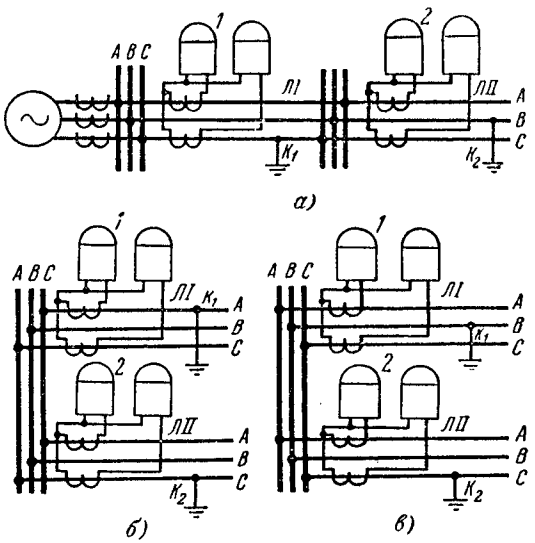


Рис. 4-7. Различные случаи работы двухфазной максимальной токовой защиты при замыканиях на землю в двух точках при правильной установке трансформаторов тока (на одноименных фазах).

а — неселективное отключение головного участка; *б* — неселективное отключение одновременно двух линий; *в* — селективное отключение только одной линии.

рые оборудованы трансформаторами тока (рис. 4-7, *б*). При этом двухфазные защиты обеих линий отключают обе точки повреждения одновременно, т. е. обе защиты работают неселективно. Совершенно так же в этом случае действует защита и в трехфазном исполнении.

Однако двухфазная защита имеет существенное преимущество перед трехфазной, если одно повреждение (K_1) возникает на фазе, не имеющей трансформатора тока, а второе (K_2) — на фазе, имеющей его (рис. 4-7, *в*). Двухфазная защита в этом случае работает только на одной из двух поврежденных линий, в результате чего одна из поврежденных линий остается в работе. Трехфазная защита в приведенном случае действует неселективно, отключая обе линии при любом сочетании поврежденных фаз.

Таким образом, в первом из трех приведенных случаев (рис. 4-7, *а*) имеет преимущество трехфазная схема, а в третьем (рис. 4-7, *в*) — двухфазная, которая действует правильно в 2/3 случаев повреждений.

Сопоставляя преимущества и недостатки трехфазной и двухфазной схем, можно считать, что с точки зрения ликвидации двойных замыканий на землю двухфазная схема не уступает трехфазной.

4-5. ТОК СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ

Исходным для выбора тока срабатывания максимальной токовой защиты от к. з. является требование, чтобы она надежно работала при повреждениях, но в то же время не действовала при максимальных токах нагрузки и ее кратковременных толчках, вызываемых пуском и самозапуском двигателей, колебанием нагрузки потребителей и другими причинами.

Излишняя чувствительность защиты из-за недостаточной отстройки ее от токов нагрузки может приводить к неправильным отключениям при неопасных перегрузках, что наносит ущерб потребителям. *Слишком чувствительная защита сама становится источником аварий и перебоев в питании потребителей.*

Из этого следует, что *главная задача при выборе тока срабатывания состоит в надежной отстройке защиты от токов нагрузки.* Для этой цели необходимо выполнить два условия:

1) Токовые реле защиты не должны приходить в действие при максимальном рабочем токе нагрузки $I_{р.макс}$, для чего ток срабатывания защиты[1] $I_{с.з}$ должен быть больше максимального рабочего тока нагрузки:

$$I_{с.з} > I_{р.макс}. \qquad (4\text{-}1)$$

2) Токовые реле, сработавшие при внешнем к. з., должны надежно возвращаться в исходное положение после отключения к. з. и

[1] Здесь и в дальнейшем под током срабатывания защиты подразумевается наименьший первичный ток в фазе линии, необходимый для действия защиты.

снижения тока до максимального тока нагрузки. Так, например, при к. з. в точке *К* сети (рис. 4-8) срабатывают токовые реле защит *1* и *2*. После отключения повреждения защитой *2* прохождение тока к. з. прекращается и пришедшие в действие токовые реле защиты *1* должны возвратиться в начальное положение, так как иначе произойдет неправильное отключение неповрежденной линии. Поэтому ток возврата реле должен быть больше тока нагрузки линии, проходящего через защиту *1* после отключения к. з.

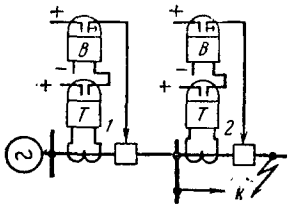


Рис. 4-8. К выбору тока срабатывания максимальной токовой защиты с учетом коэффициента возврата реле.

Этот ток в первый момент времени после отключения к. з. имеет повышенное значение из-за пусковых токов электродвигателей. Асинхронные электродвигатели, составляющие значительную часть нагрузки, во время к. з. тормозятся вследствие возникающего при к. з. понижения напряжения. После отключения к. з. напряжение восстанавливается и все оставшиеся в работе электродвигатели (часть неответственных электродвигателей отключается защитой от понижения напряжения) *самозапускаются*, потребляя повышенный пусковой ток (рис. 4-9). Этот ток $I_з$ постепенно затухает, и в линии устанавливается рабочий ток, который в худшем случае может иметь максимальное значение $I_{р.макс}$.

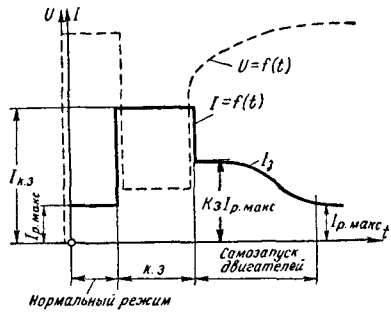


Рис. 4-9. Характер изменения тока и напряжения в линии при к. з. в сети и после его отключения.

—— ток *I*; — — — — напряжение *U*.

Увеличение $I_{р.макс}$, вызванное самозапуском двигателей, оценивается коэффициентом запуска $k_з$. *Учет самозапуска двигателей является обязательным*. Исходя из этого

$$I_{воз} > k_з I_{р.макс}. \qquad (4\text{-}2)$$

При выполнении условия (4-2) выполняется также условие (4-1), так как ток возврата максимальных реле всегда меньше тока срабатывания. Поэтому для отстройки защиты от нагрузки за исходное принимается условие (4-2). Руководствуясь им, ток возврата выбирают равным:

$$I_{воз} = k_{зап} k_з I_{р.макс}. \qquad (4\text{-}3)$$

Коэффициент запаса $k_{зап}$ учитывает возможную погрешность в величине тока возврата реле и принимается равным 1,1—1,2. Ток срабатывания защиты находится из соотношения, определяющего связь между токами возврата и срабатывания токовых реле: $I_{воз}/I_{с.з} = k_{воз}$. Подставляя в это выражение значение $I_{воз}$ из (4-3), находим

соответствующий ему ток срабатывания:

$$I_{с.з} = \frac{k_{зап}}{k_{воз}} k_з I_{р.макс}. \qquad (4\text{-}4)$$

Вторичный ток срабатывания реле $I_{ср}$ находится с учетом коэффициента трансформации трансформаторов тока и схемы включения реле, характеризуемой коэффициентом схемы $k_{сх}$:

$$I_{с.р} = k_{сх} \frac{I_{с.з}}{n_т}. \qquad (4\text{-}5)$$

Для схемы соединения в звезду (полную или неполную) $k_{сх} = 1$. Для схемы с включением реле на разность токов двух фаз $k_{сх} = \sqrt{3}$.

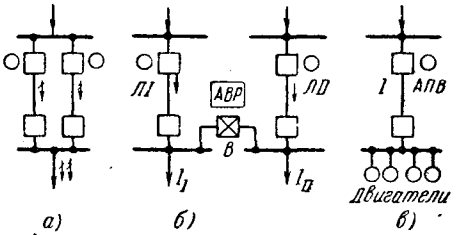


Рис. 4-10. Характерные схемы сети для определения максимального тока нагрузки при выборе тока срабатывания максимальной токовой защиты.

а — при отключении параллельной линии; *б* — при отключении одной линии и действии АВР; *в* — при самозапуске электродвигателей.

Как видно из выражения (4-4), значение $I_{с.з}$ зависит от $k_{воз}$ и $I_{р.макс}$. Ток срабатывания обратно пропорционален $k_{воз}$, поэтому в целях уменьшения $I_{с.з}$ стремятся применять токовые реле с высоким коэффициентом возврата: примерно 0,85 и выше.

Существенное значение для надежной отстройки защиты от нагрузки имеет правильная оценка величины $I_{р.макс}$.

Определяя максимальное значение тока нагрузки, нужно учитывать тяжелое, но в то же время реально возможное увеличение нагрузки, обычно возникающее в результате нарушения нормальной схемы сети. Например, при двух параллельных линиях (рис. 4-10, *а*) необходимо учитывать, что в случае автоматического отключения одной из них нагрузка на оставшейся линии удвоится. При наличии АВР, включающего выключатель *В* (рис. 4-10, *б*), необходимо предусматривать наброс мощности на линию *Л1* при отключении *Л11* и наоборот. При наличии АПВ (рис. 4-10, *в*) необходимо учитывать самозапуск электродвигателей после повторного включения линий от АПВ.

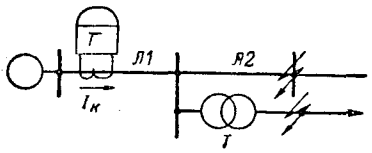


Рис. 4-11. Зона действия максимальной токовой защиты должна охватывать защищаемую линию *Л1* и следующий второй участок (линию *Л2* и трансформатор *Т*).

Чувствительность защиты. Ток срабатывания, выбранный по условию отстройки от нагрузки, проверяется по условию чувствительности защиты. Проверка ведется по минимальному значению тока $I_{к.з.мин}$ при повреждении в конце зоны защиты. Зона действия максимальной токовой защиты должна охватывать защи-

щаемую линию и следующий второй участок, т. е. линию *Л2* и трансформаторы, отходящие от шин приемной подстанции (рис. 4-11). Минимальный ток рассчитывается для реального минимального режима на электростанциях и в сетях, питающих линию. Чувствительность защиты оценивается коэффициентом чувствительности:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.з.мин}}}{I_{\text{с.з}}}. \qquad (4\text{-}6)$$

Коэффициент чувствительности для защищаемой линии считается допустимым, если $I_{\text{к.з.мин}}$ в 1,5 раза больше тока срабатывания защиты. Снижение $k_{\text{ч}}$ ниже 1,5 не рекомендуется, так как действительный ток в реле при к. з. может оказаться меньше расчетного $I_{\text{к.з.мин}}$ из-за неточности расчета токов к. з., влияния сопротивления в месте повреждения (не учитываемого при расчете) и погрешности трансформаторов тока, уменьшающей вторичный ток. При к. з. на резервируемом участке согласно ПУЭ допускаются $K_{\text{ч}} = 1{,}2$.

4-6. ВЫДЕРЖКА ВРЕМЕНИ ЗАЩИТЫ

а) Ступень времени

Для обеспечения селективности выдержки времени максимальных защит выбираются по ступенчатому принципу (рис. 4-12). *Разница между временем действия двух смежных защит (например, линий А и В на рис. 4-12) называется ступенью времени или ступенью селективности:*

$$\Delta t = t_A - t_B. \qquad (4\text{-}7)$$

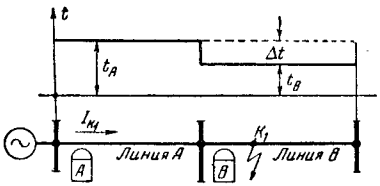


Рис. 4-12. Ступенчатый принцип выбора выдержек времени. Δt — ступень времени.

Величина ступени Δt должна быть такой, чтобы при коротком замыкании на каком-нибудь участке сети (например, на линии B) защита предыдущего участка (т. е. на линии A) не успевала сработать.

Выясним, от чего зависит величина Δt. При к. з. на линии B защита линии A работает в течение времени, пока проходит ток к. з. Это время равно:

$$t_{\text{з}} = t_{\text{з}(B)} + t_{\text{п}(B)} + t_{\text{в}(B)},$$

где $t_{\text{з}(B)}$ — выдержка времени защиты B; $t_{\text{п}(B)}$ — погрешность в сторону замедления реле времени защиты B; $t_{\text{в}(B)}$ — время отключения выключателя B с момента подачи импульса в катушку отключения до разрыва тока к. з. контактами выключателя.

Следовательно, чтобы защита линии A не сработала при к. з. на следующем участке, она должна иметь время

$$t_{\text{з}(A)} > t_{\text{з}(B)} + t_{\text{п}(B)} + t_{\text{в}(B)}.$$

Приняв некоторый запас $t_{зап}$ и учтя, что защита A может за счет погрешности реле времени снизить свою выдержку времени на величину $t_{п(A)}$, получим:

$$t_{з(A)} = t_{з(B)} + t_{п(B)} + t_{в(B)} + t_{п(A)} + t_{зап}. \quad (4\text{-}8)$$

Отсюда минимальная ступень времени

$$\Delta t = t_{з(A)} - t_{з(B)} = t_{п(B)} + t_{в(B)} + t_{п(A)} + t_{зап}. \quad (4\text{-}9)$$

Согласно выражению (4-9) выбирается ступень для защит с независимой характеристикой. Что касается защит с зависимой характеристикой, осуществляемых индукционным реле, то они могут продолжать работать по инерции после отключения тока к. з. Поэтому ступень времени у таких защит должна быть увеличена на время инерционной ошибки реле $t_и$:

$$\Delta t = t_{п(B)} + t_{п(A)} + t_{в(B)} + t_{зап} + t_{и(A)}. \quad (4\text{-}10)$$

Для применяемых в эксплуатации реле и выключателей ступень времени колеблется у защит с независимой выдержкой времени в пределах 0,35—0,6 *сек*, а у защит с зависимой или ограниченно зависимой характеристикой — 0,6—1 *сек*.

Так, например, у защит с реле времени типа ЭВ-122 погрешность по времени составляет $t_п = \pm 0{,}12$ *сек*; выключатели МКП-110 имеют время отключения $t_в = 0{,}15$ *сек*. Подставляя указанные значения в выражение (4-9) и принимая запас времени $t_{зап}$ равным 0,1 *сек*, получаем ступень времени

$$\Delta t = 0{,}12 + 0{,}15 + 0{,}12 + 0{,}1 \approx 0{,}5 \text{ сек}.$$

При согласовании с быстродействующей защитой погрешность реле не учитывается ($t_{п(B)} = 0$), и тогда [на основании (4-9) с учетом указанных значений $t_п$ и $t_в$] ступень времени $\Delta t = 0{,}35 \div 0{,}4$ *сек*.

б) Выбор времени действия защит

Выдержки времени защит с независимой характеристикой определяются исходя из заданной ступени времени по уравнению

$$t_{з(A)} = t_{з(B)} + \Delta t. \quad (4\text{-}11)$$

Выдержки времени защит с зависимой или ограниченно зависимой характеристикой также должны удовлетворять условию (4-11), но поскольку время действия этих реле зависит от тока, необходимо задавать пределы тока, при которых это условие должно выполняться. Положим, что линии, показанные на рис. 4-12, оборудованы защитой, имеющей ограниченно зависимую характеристику. Требуется выбрать характеристику защиты линии A и согласовать ее с характеристикой защиты линии B, которая известна.

Защита линии A должна иметь время на ступень больше защиты линий B при всех к. з. в пределах зоны совместного действия защиты A и B, т. е. на линии B. Если при к. з. в точке K_1 (начало зоны защиты B) ток к. з., проходящий через защиты A и B, равен I_{K_1}, то при всех к. з. за точкой K_1, т. е. в зоне работы защиты B, токи к. з. будут меньше. Следовательно, условие селективности

(4-11) должно выполняться при токе $I_{к1макс}$ и всех токах, меньших его. В случае к. з. на линии A время действия защиты A не должно согласовываться с защитой B и может быть сколь угодно малым; при этом ток к. з., проходящий через защиту A, будет больше $I_{к1макс}$. Из этих условий вытекает следующее правило подбора зависимых характеристик:

1. Строят исходную характеристику $t = f(I)$ защиты B, с которой проводится согласование защиты A, установленной на смежном участке (рис. 4-13).

2. Определяют максимальное значение токов к. з. $I_{к1\,макс}$, проходящих через защиты A и B при повреждении в начале участка, защищаемого защитой B (в точке K_1).

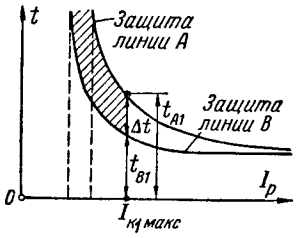


Рис. 4-13. Выбор характеристик зависимых максимальных токовых защит.

3. Пользуясь заданной характеристикой защиты B, находят ее выдержку времени t_{B1} при токе $I_{к1макс}$, т. е. при к. з. в начале защищаемой зоны, в точке K_1.

4. По условию селективности выдержка времени защиты A при токе $I_{к1макс}$ должна превышать время защиты Bt_{B1} на ступень Δt:

$$t_{A1} \geqslant t_{B1} + \Delta t. \qquad (4\text{-}12)$$

Это условие должно выполняться не только при токах $I_{к1макс}$, но и при всех меньших токах к. з.; характеристика защиты A, удовлетворяющая условию (4-12), подбирается при проектировании по типовым характеристикам реле, а в условиях эксплуатации — путем регулирования уставки времени реле.

5. Выбранная характеристика защиты A строится совместно с характеристикой защиты B для наглядной проверки выполнения условия (4-12) при токах к. з., равных и меньших $I_{к1макс}$ (рис. 4-13).

Совместное построение характеристик нескольких защит удобно вести относительно первичных фазных токов, но при этом нужно учитывать схему соединения токовых цепей защиты, от которой зависит соотношение между током в реле и током в фазе, т. е. $k_{сх}$.

Если согласуемые защиты находятся на разных сторонах силового трансформатора, то их характеристики нужно привести к токам одного напряжения.

4-7. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С ПУСКОМ (БЛОКИРОВКОЙ) ОТ РЕЛЕ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для повышения чувствительности максимальной токовой защиты при к. з. и улучшения отстройки ее от токов нагрузки применяется пуск или, как часто называют, блокировка при помощи реле минимального напряжения (рис. 4-14.)

Из схемы видно, что защита может действовать на отключение только при условии срабатывания реле напряжения 1. Уставки реле

напряжения *1* выбираются так, чтобы реле не работали при минимальном уровне рабочего напряжения, не давая возможности защите действовать на отключение, даже если токовые реле *3* замкнут свои контакты в результате перегрузки линии.

При к. з. напряжение сети понижается и реле минимального напряжения *1* срабатывают, разрешая защите действовать на отключение.

В случае обрыва цепи, питающей реле напряжения, последние замыкают свои контакты и защита лишается блокировки. Поэтому

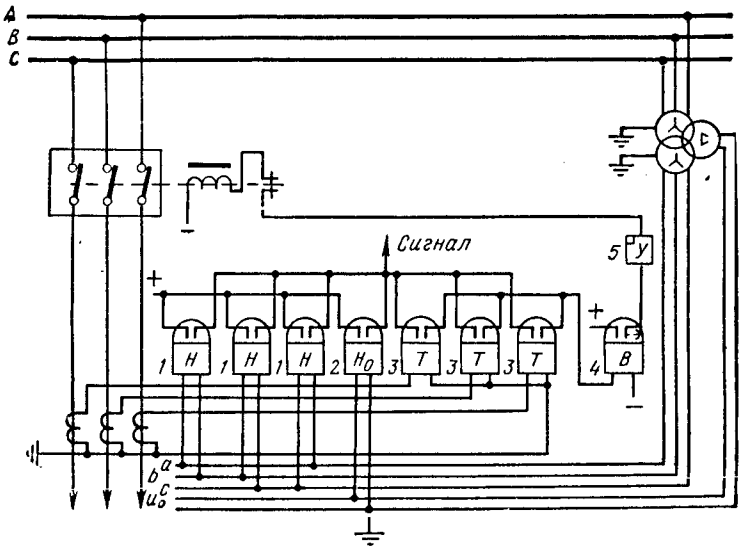


Рис. 4-14. Схема максимальной токовой защиты с блокировкой минимального напряжения.

в схеме предусмотрена сигнализация состояния контактов реле напряжения *1*, указывающая на неисправность блокировки.

Для обеспечения надежной работы блокировки при двухфазных к. з. устанавливаются три реле напряжения *1*, включаемые на линейные напряжения сети (независимо от числа токовых реле). Однако при включении на линейные напряжения реле *1* плохо реагируют на однофазные к. з. Поэтому в сети с заземленной нейтралью предусматривается дополнительно четвертое блокирующее реле *2*, реагирующее на напряжение U_0 нулевой последовательности, появляющееся при замыканиях на землю.

В сети с изолированной нейтралью токовая часть схемы выполняется двухфазной. В части реле напряжения схема должна выполняться трехфазной для обеспечения надежной работы при двухфазных к. з. Реле H_0 не устанавливается, поскольку защита должна действовать только при междуфазных к. з.

Ток срабатывания токовых реле *3* отстраивается не от максимальной нагрузки линии, а от длительной нормальной нагрузки $I_{раб.н}$, которая на практике может быть в 1,5—2 раза меньше максимальной:

$$I_{с.з} = \frac{k_{зап}}{k_{воз}} I_{раб.н}. \qquad (4\text{-}13)$$

В результате этого чувствительность защиты при к. з. повышается.

Напряжение срабатывания реле напряжения *1* $U_{с.р}$ выбирается из условия, чтобы они: а) не действовали при минимальном значении рабочего напряжения и б) подействовав при внешнем к. з., разомкнули свои контакты после отключения повреждения. При выполнении второго требования будет выполнено и первое. Поэтому $U_{с.р}$ выбирается по условию возврата реле. Для этого $U_в$ должно быть меньше минимального рабочего напряжения $U_{раб.мин}$:

$$U_в < \frac{U_{раб.мин}}{n_н}, \qquad (4\text{-}14)$$

где $n_н$ — коэффициент трансформации трансформатора напряжения, питающего защиту.

В соответствии с (4-14) принимается:

$$U_в = \frac{U_{раб.мин}}{n_н k_{зап}},$$

где $k_{зап} = 1{,}1 \div 1{,}2$.

Из выражения $k_{воз} = U_в/U_{с.р}$ находим:

$$U_{с.р} = \frac{U_в}{k_{воз}} = \frac{U_{раб.мин}}{k_{воз} k_{зап} n_н}. \qquad (4\text{-}15)$$

При $k_{зап} = 1{,}2$ и $k_{воз} = 1{,}15$

$$U_{с.р} = \frac{0{,}72 U_{раб.мин}}{n_н}.$$

Чувствительность реле напряжения проверяется по максимальному значению напряжения при к. з. в конце зоны защиты. Коэффициент чувствительности $k_ч = U_{с.з}/U_{к.макс}$ считается удовлетворительным, если он равен или превышает 1,5.

Практика показывает, что на длинных линиях, питаемых мощной системой, а также на линиях с реактором чувствительность реле напряжения оказывается недостаточной. Поэтому защита с блокировкой по напряжению применяется на линиях короткой и средней протяженности.

Реле повышения напряжения нулевой последовательности *2* действует при однофазных и двухфазных к. з. на землю, которые сопровождаются появлением напряжения нулевой последовательности U_0. В нормальном режиме $U_0 = 0$.

Однако за счет погрешности фильтра, питающего реле, на его зажимах имеется некоторое напряжение небаланса $U_{н.б}$, от которого

реле должно быть отстроено, т. е. $U_{с.р} > U_{нб}$. Исходя из этого условия $U_{с.р}$ обычно принимается равным или большим 15—20% максимального напряжения на зажимах фильтра при однофазных к. з. Величина небаланса легко определяется путем измерения напряжения на зажимах реле в условиях нормальной работы сети.

Максимальная защита с блокировкой минимального напряжения не действует при перегрузках, не сопровождающихся понижением напряжения, и имеет повышенную чувствительность к току к. з. по сравнению с простой максимальной защитой. Она применяется на линиях с большой аварийной нагрузкой, когда простая максимальная защита не обеспечивает достаточной чувствительности и надежной отстройки от перегрузки.

4-8. МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ НА ПЕРЕМЕННОМ ОПЕРАТИВНОМ ТОКЕ

а) Требования к трансформаторам тока, питающим оперативные цепи

Источником переменного оперативного тока в схемах максимальных защит по соображениям, изложенным в § 1-9, в, обычно служат трансформаторы тока.

Основным требованием, предъявляемым к трансформаторам тока, питающим оперативные цепи, является условие, чтобы мощность этих трансформаторов тока $S_т$ была достаточна для покрытия мощности, потребляемой оперативной цепью $S_{о.ц}$, т. е. катушкой отключения выключателя и вспомогательными реле оперативной схемы защиты.

$$S_т \geqslant S_{о.ц}. \tag{4-16}$$

Величина $S_{о.ц}$ в зависимости от типа привода выключателя колеблется от 30 до 500—1 000 *вт*.

Номинальная мощность трансформаторов тока, при которой обеспечивается работа с погрешностью, не превосходящей 10%, относительно мала и при номинальном вторичном токе составляет 15—75 *ва*. Из сопоставления приведенных цифр следует, что нагрузка оперативных цепей во многих случаях может оказаться больше номинальной мощности трансформаторов.

В связи с этим возникает необходимость загрузки трансформаторов тока мощностью, превышающей номинальную. Мощность, отдаваемая трансформатором тока, $S_т = I_2 U_2$. С учетом, что $U_2 = I_2 z_н$ и $I_2 = \frac{I_1}{n_т} - \Delta I$:

$$S_т = I_2^2 z_н = \left(\frac{I_1}{n_т} - \Delta I\right)^2 z_н, \tag{4-17}$$

где $\Delta I = I_{нам}$ (см. § 3-1).

Полученная зависимость $S_т$ от $z_н$ при $I_1 =$ пост. показана на рис. 4-15. Пока $z_н$ мало, трансформатор работает в прямолинейной

части характеристики намагничивания (рис. 3-2). Здесь ΔI незначительно и $S_т$ растет почти пропорционально росту $z_н$. При некотором $z'_н$ (оптимальном) $S_т$ достигает максимума. При дальнейшем увеличении $z_н$ трансформатор насыщается, $I_{нам}$ и ΔI растут очень быстро, величина $(I_1 - \Delta I)$ уменьшается и мощность $S_т$ начинает снижаться. *Таким образом, каждый трансформатор тока имеет предельную максимальную мощность* $S_{макс}$, *больше которой его нельзя загрузить.* У отечественных трансформаторов тока максимум отдаваемой мощности при номинальном токе достигает 300—1500 *ва*. С увеличением нагрузки сверх номинальной ток намагничивания трансформаторов тока и погрешность по току ΔI превосходят 10%. В условиях максимальных значений отдаваемой мощности погрешность ΔI повышается до 30—60%.

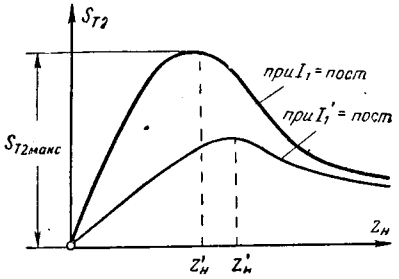


Рис. 4-15. Зависимость мощности $S_т$, отдаваемой трансформатором тока от нагрузки $z_н$ при различных первичных токах I_1 и I'_1.

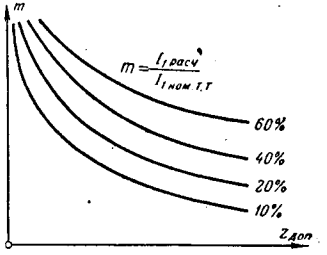


Рис. 4-16. Зависимость $z_{доп}$ от кратности тока m при различных погрешностях f трансформаторов тока.

Чтобы избежать больших погрешностей в цепях, питающих защиту, можно выделять питание оперативных цепей на отдельные трансформаторы тока. Однако такое разделение питания защиты и оперативных цепей для максимальной защиты обычно не требуется, так как правильную работу этой защиты можно обеспечить и при сильно нагруженных трансформаторах тока.

Если погрешность трансформаторов тока превышает 10%, то тогда подсчет вторичных токов срабатывания защиты и токов к. з., при которых задается время действия зависимых защит, нельзя вести по номинальному коэффициенту трансформации $n_т$. В этом случае значения вторичных токов находятся с учетом действительной погрешности по выражению

$$I_2 = \frac{I_1}{n_т} - \Delta I. \qquad (4\text{-}18)$$

Для подобных расчетов используются характеристики, аналогичные 10%-ным (рис. 3-3), но построенные для 20—60%-ной погрешности (рис. 4-16).

Уменьшение нагрузки на трансформаторы тока можно получить последовательным соединением двух трансформаторов тока или повышением коэффициента трансформации (см. гл. 3).

б) Приставки к приводам выключателей

Рассмотренные возможности работы трансформаторов тока в режиме максимальной отдачи мощности оказываются недостаточными для мощных выключателей 110—220 *кв*, приводы которых имеют особенно большое потребление. Поэтому для расширения области применения оперативного переменного тока необходимо создание приводов с малым потреблением мощности и несколькими отключающими катушками переменного тока.

В качестве одного из способов, позволяющего уменьшить потребление мощности приводов выключателей и приспособить имеющиеся приводы к работе на переменном оперативном токе, исполь-

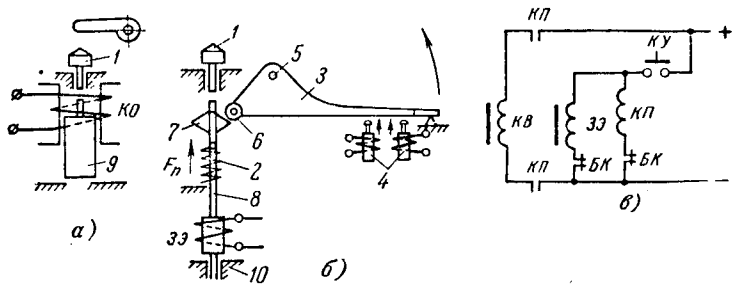


Рис. 4-17. Приставки к электромагнитному приводу выключателя. *а* — катушка отключения выключателя; *б* — приставка к приводу выключателя; *в* — схема управления приводом с приставкой.

зуются дополнительные устройства к приводам выключателей, получившие название приставок [Л. 25]. Принцип выполнения приставки и ее работы иллюстрируется на рис. 4-17.

В обычном приводе (рис. 4-17, *а*) боек *1*, освобождающий механизм отключения выключателя, приводится в действие сердечником *9* катушки отключения *КО*, которая должна для этого получать значительную энергию от источника питания. При наличии приставки (рис. 4-17, *б*) освобождение механизма отключения производится не катушкой отключения, а мощной отключающей пружиной *2*.

Нормально пружина *2* сжата и заперта в таком положении защелкой *3*. При подаче тока в один из электромагнитов *4* его сердечник втягивается и ударяет по защелке. Защелка повертывается вокруг оси *5*, ролик *6* скатывается с конуса *7*, освобождая пружину *2* и подвижную систему *8*. Последняя ударяет по бойку *1*, который освобождает механизм отключения.

Возврат подвижной системы *8* в начальное положение осуществляется специальным заводящим электромагнитом *ЭЭ*, обмотка которого получает ток при включении выключателя от ключа *КУ* (рис. 4-17, *в*) и, притягивая подвижную систему *8* к упору *10*, сжимает пружину *2* и запирает ее роликом *6* защелки *3*. Таким образом, электромагниты приставки *4* выполняют роль катушки отключения привода, но в отличие от последней потребляют 15—100 *вт*, т. е. значительно меньшую мощность, так как для приведения в действие защелки *3* требуются небольшие усилия по сравнению с усилиями для освобождения отключающегося механизма выключателя.

в) Схемы максимальных защит на переменном оперативном токе [Л. 24, 25, 26, 80]

Схемы максимальных защит с питанием оперативных цепей от переменного тока могут выполняться:

1) на принципе дешунтирования катушки отключения при срабатывании защиты;

2) с питанием оперативных цепей через промежуточный насыщающийся трансформатор тока типа ТКБ;

3) с питанием от блоков питания;

4) с питанием от предварительно заряженных конденсаторов.

Ниже рассматриваются первая, третья и четвертая схемы. Вторая схема не рассматривается, поскольку из-за наличия в ней существенных недостатков, отмеченных в § 1-4, она не рекомендуется к применению.

Соображения, изложенные в § 4-3 и 4-4 о свойствах трехфазных и двухфазных схем и области их применения, остаются в силе и для защит на переменном оперативном токе.

г) Схемы с дешунтированием катушки отключения выключателя

Подобные схемы выполняются как с зависимой характеристикой времени действия, так и с независимой.

Схемы защит с зависимой характеристикой в двухфазном исполнении с одним и двумя токовыми реле показаны на рис. 4-18. Схема на рис. 4-18, *а* предназначена для привода с двумя катушками отключения. Схема на рис. 4-18, *б* используется, если привод выключателя имеет только одну катушку. Обе схемы рассчитаны на применение реле РТ-85 или РТ-86, имеющих мощные переключающие контакты, которые могут дешунтировать цепь переменного тока с током до 150 *а*. Принцип выполнения контактов показан на рис. 4-19. В нормальном режиме, когда реле *Р* не работает, замкнут контакт *1*, через который проходит ток трансформатора тока I_2, питающий обмотку реле *Р*. Катушка отключения *КО* разомкнута контактами *2* и *3*. При срабатывании реле контакт *3* перемещается по стрелке и замыкает сначала контакт *2*, а затем размыкает контакт *1*, после чего весь ток I_2 направляется

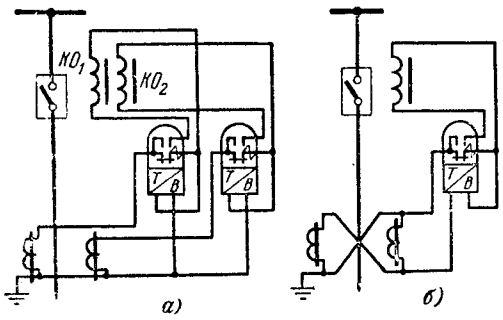


Рис. 4-18. Схема максимальной защиты с дешунтированием катушки отключения выключателя с реле типа РТ-80.

а — двухрелейная; *б* — однорелейная.

через катушку отключения. Таким образом, замыкание цепи *КО* происходит без разрыва тока, что облегчает работу контактов и трансформаторов тока.

Схемы с дешунтированием имеют две особенности. Первая состоит в том, что для их выполнения нужны реле, контакты которых обладают необходимой мощностью для переключения проходящего через них тока к. з. примерно 100—200 *а*.

Вторая особенность заключается в том, что трансформаторы тока до момента срабатывания защиты нагружены, как обычно, сопротивлением реле и соединительных проводов, благодаря чему обеспечиваются нормальные условия работы защиты и обычный способ выбора ее уставок.

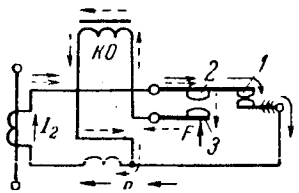


Рис. 4-19. Контактная система реле РТ-85 и РТ-86, предназначенная для дешунтирования катушки отключения без разрыва цепи тока.

— — → — путь тока после замыкания контактов *2* и *3*; → — путь тока до замыкания контактов *2* и *3*.

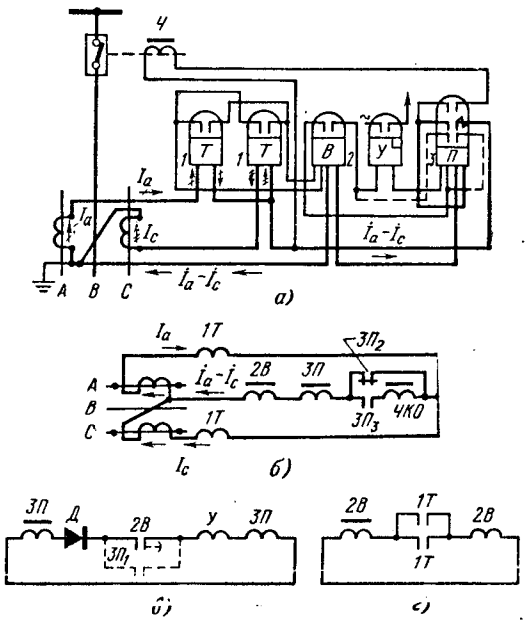


Рис. 4-20. Схема двухфазной защиты с независимой характеристикой на переменном оперативном токе.

а — полная схема; *б* — токовые цепи и цепь отключения; *в* — вторичная цепь промежуточного реле *П*; *г* — вторичная цепь реле времени *В*.

После срабатывания защиты нагрузка на трансформаторы тока резко возрастает за счет подключения катушки отключения, в результате чего увеличивается погрешность ΔI трансформаторов тока и ток I_2, проходящий по реле и катушке отключения, уменьшается.

Величина допустимой погрешности ΔI определяется из условия, чтобы ток I_2 был достаточен для удержания в сработанном состоянии реле и надежного действия катушки отключения выключателя.

Схема защиты с независимой характеристикой выдержки времени приведена на рис. 4-20. Пусковые токовые реле мгновенного действия *1* включены на токи фаз I_a и I_c. Токовое реле времени *2*, промежуточное реле *3* и катушка отключения *4* включены на раз-

ность токов двух фаз (I_a—I_c). Реле времени имеет маломощные контакты, и поэтому оно действует на промежуточное реле *3*, которое обладает мощными переключающими контактами.

Промежуточное реле производит подключение катушки отключения *4* к трансформаторам тока при действии защиты. Особенностью реле времени и промежуточного реле является то, что они действуют от тока вторичной обмотки трансформаторов тока и включаются в цепь этого тока последовательно. Рассмотрим их устройство.

Токовое реле времени. Основным элементом реле (рис. 4-21) является синхронный микродвигатель с втягивающимся ротором *1*, который питается током трансформаторов тока через вспомогательный насыщающийся трансформатор *2*.

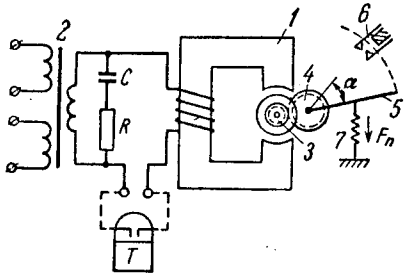


Рис. 4-21. Принцип действия токового реле времени.

Благодаря насыщению трансформатора *2* обеспечивается неизменное напряжение на вторичной обмотке, питающей двигатель *1*, при изменении тока в первичной обмотке до 150 *а* и ограничивается величина вторичного тока, что позволяет замыкать и размыкать ее цепь контактами обычных токовых реле.

Емкость *C* и сопротивление *R* отфильтровывают гармонические составляющие вторичного тока трансформатора *2*, ограничивая их поступление в синхронный двигатель.

Нормально вторичная обмотка трансформатора *2* разомкнута, такой режим допустим, поскольку магнитопровод трансформатора *2* насыщается при малых токах. При срабатывании пускового реле защиты (реле *1* на рис. 4-20) оно замыкает вторичную цепь трансформатора *2*. В двигателе *1* появляется ток, его ротор втягивается в статор, цилиндрическое зубчатое колесо *3* на оси ротора сцепляется с зубчатой передачей (редуктором) *4*, которая передает вращение ротора на рычаг *5*, управляющий контактами *6*.

Ротор вращается с определенной (постоянной) синхронной скоростью ω, соответствующей частоте *50 гц*. Через время $t_р$, необходимое для поворота подвижной системы (рычага) *5* на угол α, контакты реле замыкаются: $t_р = \alpha/\omega$. Возврат в исходное положение осуществляется пружиной *7*. Выдержка времени регулируется углом α путем перемещения контактов *6*. Некоторым недостатком реле является изменение скорости вращения ротора, а следовательно, и выдержки времени реле с изменением частоты. При отклонении частоты на 1 *гц* время действия меняется на 2%. Эта особенность реле должна учитываться при выборе ступени селективности. Подобные реле типа РВМ-12 на 4 *сек* и РВМ-13 на 9 *сек* выпускаются Чебоксарским электроаппаратным заводом. Их устройство показано на

рис. 4-22. Реле имеет два насыщающих трансформатора, что позволяет включать их на ток двух фаз. Реле срабатывает при токе 2,5—5 *а* в зависимости от соединения обмоток и имеет потребление мощности 10 *ва* при токе, равном двойному $I_{с.р}$. Разброс времени действия реле составляет у РВМ-12 0,12 *сек* и у РВМ-13 — 0,25 *сек*.

Токовое промежуточное реле РП-341 (рис. 4-23) состоит из электромагнитного реле клапанного типа *4*, питающегося выпрямленным током от выпрямителя *2*. Ток к выпрямителю подается от насыщающегося трансформатора *1*, первичные обмотки которого включаются последовательно во вторичную цепь трансформаторов тока. Трансформатор *1*, как и в предыдущей конструкции, ограничивает величину напряжения и тока, питающих реле *4*, что позволяет облегчить условия работы выпрямителя, а также контактов пусковых реле или реле времени, замыкающих цепь обмотки промежуточного реле. Помимо того, ограничение напряжения и тока, питающих реле *4*, уменьшает его потребление при больших кратностях тока к. з.

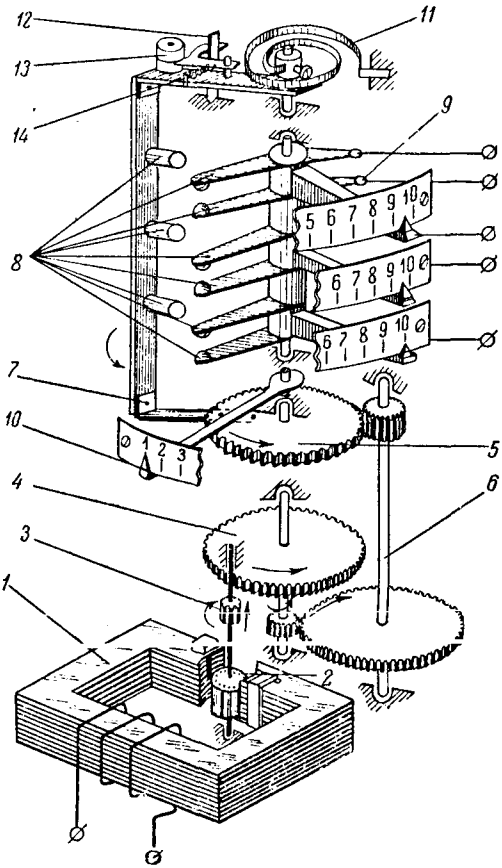


Рис. 4-22. Устройство токового реле времени типа РВМ-12, РВМ-13.

1, 2 — статор и ротор микродвигателя; *3, 4, 5* — зубчатые колеса; *6* — редуктор; *7* — рамка с контактными цилиндрами; *8* — контакты; *9* — поводок уставки выдержки времени; *10* — буксирная стрелка; *11* — возвратная пружина; *12* — упор; *13* — замок; *14* — пружина.

Конденсатор *3*, подключенный параллельно вторичной обмотке трансформатора, сглаживает кривую вторичного тока. Реле приходит в действие при замыкании обмотки *4* контактами реле времени (рис. 4-20) или непосредственно пусковыми реле защиты.

Ток срабатывания реле равен 2,5 или 5 *а* в зависимости от соединения первичных обмоток трансформатора.

Потребление реле зависит от тока в первичной обмотке реле. При двойном токе $I_{с.р}$ потребление равно 6 *вт*. Наибольшего значения

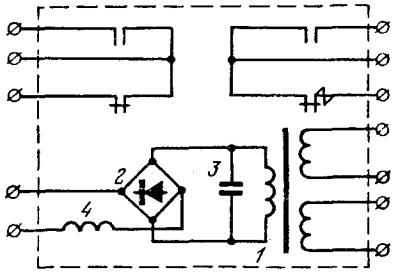


Рис. 4-23. Токовое промежуточное реле типа РП-341.

оно достигает при разомкнутой вторичной цепи трансформатора *1*.

Переключающие контакты могут переключать 150 *а* переменного тока и устроены, как показано на рис. 4-19.

Схемы защит с независимой характеристикой имеют несколько разновидностей.

В схеме на рис. 4-20 вспомогательные реле *2* и *3* и катушка отключения *4* включены на разность токов двух фаз. Такое включение упрощает оперативную цепь, так как позволяет применять по одному промежуточному реле и реле времени, и одну катушку отключения. Но схема с включением вспомогательных реле и катушки отключения на разность токов двух фаз не применима для защит, которые должны действовать при к. з. за трансформаторами с соединением обмоток $\lambda/\triangle$.

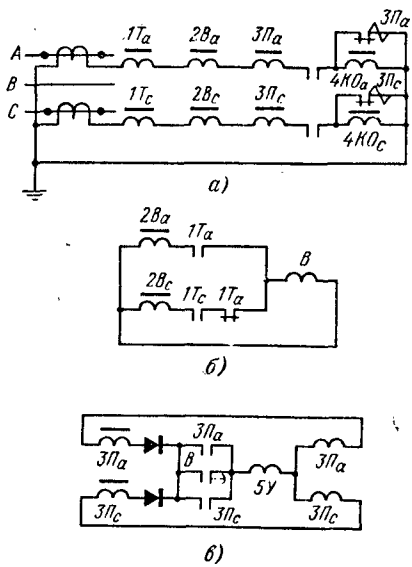


Рис. 4-24. Двухфазная схема защиты с независимой характеристикой для выключателей с двумя катушками отключения.

а — токовые цепи и цепи отключения; *б* — вторичная цепь реле времени; *в* — вторичная цепь промежуточного реле.

Защиты, предназначенные для действия за трансформаторами с соединением $\lambda/\triangle$, должны выполняться по двухфазной схеме с самостоятельным комплектом пусковых реле, вспомогательных реле и катушки отключения в каждой фазе (рис. 4-24, *а*). Реле времени типов РВМ-12 и РВМ-13 имеют две первичные обмотки, что позволяет использовать одно реле для двух фаз. Для этого реле *В* (РВМ) включается на сумму токов $\dot{I}_a + \dot{I}_c$. Но при этом оно не может действовать при двухфазных к. з. между фазами *А* и *С*, когда $\dot{I}_a + \dot{I}_c = 0$. Для устранения этого недостатка необходимо размыкать цепь одной из обмоток при одновременном действии обоих пусковых реле, как показано на рис. 4-24, *б*. Указанная операция выполняется с помощью нормально замкнутого контакта $1T_a$ реле T_a.

Расчет защиты по схеме с дешунтированием катушки отключения выполняется для определения тока срабатывания пусковых реле и проверки надежности действия остальных элементов, питающихся от трансформаторов тока.

Расчет состоит из четырех частей:

1) Выбирается первичный и вторичный токи срабатывания токовых пусковых реле ($I_{с.з}$ и $I_{с.р}$) по выражениям (4-4), (4-5) и (4-6). Проверка погрешности трансформаторов тока производится для защиты с независимой характеристикой при $I_{с.з}$, а для зависимых — при токе к. з., при котором задается время действия защиты. При этом сопротивление обмоток реле времени и промежуточных реле $z_р$ принимается наибольшим, т. е. при разомкнутой вторичной цепи трансформаторов этих реле.

2) Проверяется надежность работы вспомогательных реле и катушек отключения после их дешунтирования.

Для надежного действия катушки отключения после дешунтирования необходимо, чтобы вторичный ток трансформаторов тока I'_2 был не меньше величины

$$I'_2 = k_н I_{с.к.о}, \tag{4-19}$$

где $I_{с.к.о}$ — ток срабатывания катушки отключения; $k_н$ — коэффициент надежности, равный 1,2—1,4.

Аналогичным путем определяется условие надежной работы вспомогательных реле, но их чувствительность значительно выше чувствительности *КО*. Поэтому расчетным является уравнение (4-19).

Соответствующий току I'_2 первичный ток с учетом погрешности трансформаторов тока ($I_{нам}$) равен:

$$I'_1 = (I'_2 + I_{нам})\, n_т = (k_н I_{с.к.о} + I_{нам}). \tag{4-20}$$

Чтобы обеспечить надежное действие катушки отключения при срабатывании защиты, ток срабатывания защиты должен быть равен или больше полученного по формуле (4-20) тока I'_1:

$$I_{с.з} \geqslant I'_1 = (k_н I_{с.к.о} + I_{нам}). \tag{4-21}$$

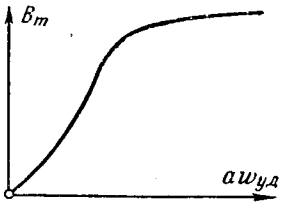


Рис. 4-25. Характеристика намагничивания трансформаторов тока $B_m = f(aw_{уд})$.

3) Проверяется отсутствие возврата реле *РТ* (*ИТ*) и РП-341 после дешунтирования катушек отключения (*КО*).

Уменьшение вторичного тока после дешунтирования *КО* не должно вызвать возврата реле (РТ-85 или ИТ-85 или РП-341), осуществляющего дешунтирование.

Для этого необходимо, чтобы вторичный ток I''_2, проходящий по реле после дешунтирования *КО*, удовлетворял условию

$$I''_2 \geqslant k_н I_{воз} = k_н k_{воз} I_{с.р},$$

где $I_{воз}$ и $I_{с.р}$ — ток возврата и ток срабатывания дешунтирующего реле; $k_н$ — коэффициент надежности, равный 1,2.

Как и в предыдущем случае, соответствующий первичный ток

$$I''_1 = (k_н I_{воз} + I_{нам})\, n_т. \tag{4-22}$$

Для исключения возврата дешунтирующего реле после расшунтирования *КО* необходимо, чтобы первичный ток возврата реле отвечал условию $I_{возл} \leqslant I''_1$.

Погрешность или ток намагничивания $I_{нам}$ может быть найден по экспериментальной характеристике $U_2 = f(I_2)$ (см. § 3-3), по кривым погрешностей трансформаторов тока (рис. 4-16) или по кривым намагничивания трансформатора тока (рис. 4-25).

В последнем случае подсчитывается величина вторичной э. д. с. трансформаторов тока $E_2 = k_н I_{с.к.о}\,(z_{2т} + z_н)$, затем определяется максимальная индукция $B_m = \dfrac{E_2 \cdot 10^8}{4{,}44 f w_2 S}$; по кривой намагничивания (рис. 4-25) определяется удельное

значение $I_{нам}w_{уд}$. Зная среднюю длину пути магнитного потока l, находим ток намагничивания:

$$I_{нам} = \frac{[(I_{нам}w_2)_{уд}]l}{w_2}.$$

4) Проверяется надежность действия контактов реле дешунтирующих *КО*. Зная, что контакты реле РТ-85 и РП-341 могут переключать ток до 150 *а* при условии, что сопротивление *КО* не превышает 4,5 *ом*, получаем условия надежной работы контактов:

$$I_{2макс} = \frac{I_{к.макс}}{n_т} \leqslant 150\ а, \qquad (4\text{-}23)$$

где $I_{к.макс}$ — максимальный ток к. з., проходящий по защищаемому участку.

Если условие (4-23) не выполняется, необходимо определить $I_{2макс}$ с учетом $I_{нам}$, т. е. насыщения.

Если и в этом случае условие (4-23) не обеспечивается, необходимо увеличить $n_т$ или применить другие схемы оперативного переменного тока.

В тех случаях, когда применяются приставки к приводам выключателей, имеющие незначительное потребление катушек отключения *КО*, погрешности трансформаторов тока после дешунтирования *КО* получаются меньше 10%. Тогда расчет ведется по приведенным выше формулам (4-21) и (4-22), но $I_{нам}$ принимается в них равным нулю.

д) Схемы с питанием оперативных цепей защиты от блоков питания

На рис. 4-26 приведена схема двухфазной максимальной защиты с питанием вспомогательных реле *2, 3, 4* и катушки отключения *КО* выпрямленным током от блока питания *БПТ*. Поскольку выпрямленное напряжение является постоянным, схемы на выпрямленном токе выполняются так же, как и схемы на постоянном токе. В качестве вспомогательных реле (времени, промежуточных, указательных) используются обычные реле постоянного тока.

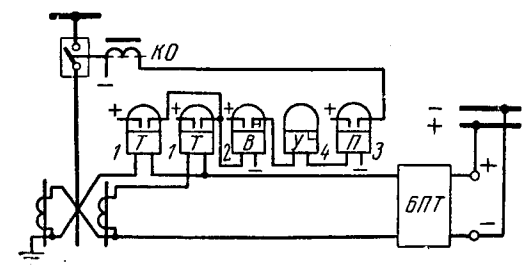


Рис. 4-26. Схема двухфазной защиты с питанием оперативных цепей от блока БПТ.

Главным вопросом при выполнении защит на выпрямленном токе являются способы (схемы) подключения блоков питания *БП* к трансформаторам тока и напряжения.

Основным источником питания для защит от к. з. служит токовый блок *БПТ*. Блок напряжения *БПН* является дополнительным и обеспечивает необходимую мощность и напряжение при малых значениях тока к. з. Блок напряжения может не применяться, если токовый блок обеспечивает надежное действие защиты. Схемы включения токовых блоков должны выбираться из условия, чтобы на выходе блока имелось достаточное напряжение при всех возможных видах повреждения на защищаемом элементе.

В сети с изолированной нейтралью для защит, не рассчитанных на действия при к. з. за трансформаторами с соединением обмоток Y/Δ, применяется включение блоков *БПТ* на разность двух токов $I_a—I_c$ по рис. 4-26.

При необходимости действия защиты при к. з. за трансформаторами с соединением обмоток Y/Δ устанавливается второй токовый блок, включаемый на ток I_b или разность токов $I_b—I_c$. Выходные цепи обоих блоков включаются параллельно (рис. 4-27, *а*).

При соединении трансформаторов тока в двухфазную звезду второй блок включается в общий провод, где проходит ток отсутствующей фазы I_b.

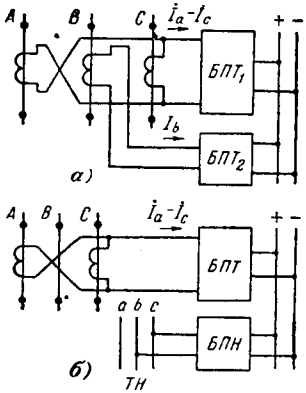


Рис. 4-27. Схемы включения блоков питания.

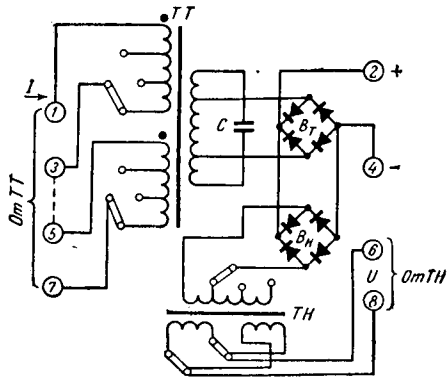


Рис. 4-28. Комбинированный блок питания тока и напряжения типа БП-10.

Аналогичные схемы из двух токовых блоков применяются в сети с глухозаземленной нейтралью.

Блок напряжения включается на линейное напряжение (рис. 4-27, *б*). Принципиальная схема комбинированного блока тока и напряжения БП-10 приведена на рис. 4-28.

Блоки питания могут устанавливаться на каждом присоединении для питания только его защит или использоваться как групповые с питанием защиты нескольких присоединений. Для надежного действия защиты уровень напряжения на выходных зажимах блоков питания должен быть достаточным для работы реле времени, промежуточных реле и катушки отключения. С учетом падения напряжения в соединительных проводах это напряжение должно быть не меньше 0,8—0,9 номинального значения 110 или 220 *в* при всех режимах и всех видах к. з.

Выполнение этого условия проверяется расчетами по характеристикам зависимости выходного напряжения от тока для токовых блоков и от напряжения для блоков напряжения.

В токовых блоках принимаются специальные меры для стабилизации выходного напряжения и повышения отдаваемой мощности [Л. 27]. С этой целью установлен конденсатор *С* (рис. 4-28), который

подбирается так, чтобы в сочетании с индуктивностью вторичной обмотки промежуточного трансформатора обеспечивались условия феррорезонанса (опрокидывания), наступающие при некотором токе $I'_{вх}$, когда $x_L = x_C$. Параметры блока подобраны таким образом, чтобы феррорезонанс наступал при входном токе $I'_{вх}$ около 5 *а*.

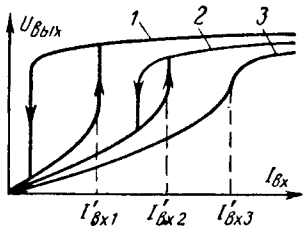


Рис. 4-29. Характеристики $U_{вых} = f(I_{вх})$ токового блока с феррорезонансным контуром для разных нагрузок блока (*1*, *2*, *3*).

При токах, превышающих $I'_{вх}$, т. е. за пределом точки феррорезонанса (опрокидывания), стабилизируется величина выходного напряжения $U_{вых}$ (рис. 4-29), улучшается форма кривой $U_{вых}$ за счет уменьшения в ней гармонических составляющих и уменьшается реактивная нагрузка промежуточного, а следовательно, и основных трансформаторов тока.

Отечественная промышленность выпускает комбинированные блоки БП-10 мощностью 40 *вт*, блоки тока БПТ-100 мощностью порядка 240 *вт* и БПТ-1002 кратковременной мощностью до 1500 *вт* и блоки напряжения БПН-100 и БПН-1002. Все блоки рассчитаны в среднем на 110 или 220 *в*. Тип блока выбирается в зависимости от величины нагрузки. В Горэнерго разработаны и применяются блоки питания с магнитным суммированием токов и напряжений, питающих блоки.

е) Схемы защиты с использованием энергии заряженного конденсатора для питания оперативных цепей

Принципы питания оперативных цепей защиты от предварительно заряженных конденсаторов были освещены в § 1-9, в.

На рис. 4-30 изображена схема максимальной токовой защиты, в которой отключение выключателя осуществляется за счет энергии, запасенной в конденсаторе *С*. Схема выполнена с помощью двух токовых реле и токового реле времени, соединенных по обычной схеме. Конденсатор *С* находится в заряженном состоянии. Заряд его производится зарядным устройством УЗ-400, которое питается от трансформатора напряжения или от трансформатора собственных нужд. При к. з. срабатывают пусковые реле, они замыкают цепь обмотки реле времени.

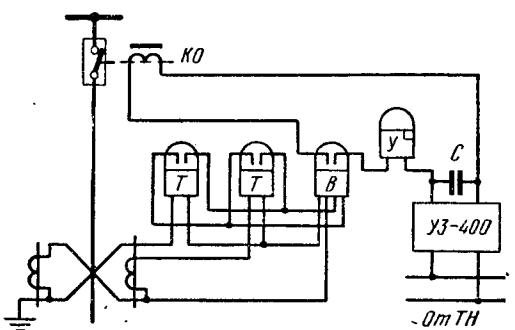


Рис. 4-30. Схема защиты с питанием оперативных цепей от заряженного конденсатора.

Последнее с выдержкой времени замыкает конденсатор *С* на катушку отключения *КО*. Конденсатор *С* разряжается, и ток разряда приводит в действие *КО*.

Зарядное устройство УЗ-400 (рис. 4-31) состоит из повышающего трансформатора *ТН*, выпрямителя *В* и двух вспомогательных реле: поляризованного *РП* и реле минимального напряжения *РН*.

Напряжение от трансформатора напряжения подается на зажимы *2—8;* оно повышается до 400 *в*, выпрямляется и подается через размыкающие контакты реле *РН* на выходные зажимы *5—7*. К этим зажимам подключается конденсатор *С*. Повышение напряжения до 400 *в* позволяет уменьшить емкость конденсатора *С*, так как энергия, запасенная конденсатором, пропорциональна квадрату напряжения: $W = U^2C/2$.

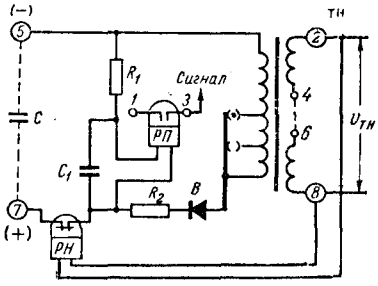


Рис. 4-31. Зарядное устройство УЗ-400.

Выпрямитель *В* необходим для заряда конденсатора, поскольку осуществить его заряд до стабильного уровня переменным током не представляется возможным. Реле *РП* служит для контроля наличия напряжения на выходных зажимах *5—7*. При исчезновении напряжения вследствие повреждения конденсатора или выпрямителя *В* или при исчезновении питающего напряжения ток в реле *РП* пропадает и оно срабатывает.

Конденсатор C_1 сглаживает пульсацию выпрямленного напряжения. Реле *РН* контролирует наличие напряжения на входе зарядного устройства и отключает конденсатор *С* от зарядного устройства при исчезновении напряжения. Этим предупреждается разряд конденсатора *С* через сопротивление источника питания. Устройство УЗ-400 рассчитано на заряд конденсатора емкостью до 500 *мкф*. Для действия привода ПС-10 необходим конденсатор 75 *мкф*.

4-9. МАКСИМАЛЬНАЯ ЗАЩИТА С РЕЛЕ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

В городских и сельских распределительных сетях 6—10 *кв*, а также на промышленных предприятиях в целях удешевления и упрощения защиты применяются реле прямого действия для выполнения токовых максимальных защит. Отечественная промышленность выпускает токовое реле прямого действия — мгновенные типа РТМ и с ограниченно зависимой характеристикой времени действия типа РТВ. Эти реле встраиваются в грузовые и пружинные приводы.

Схемы максимальной защиты прямого действия отличаются простотой и небольшой стоимостью. На рис. 4-32 показаны двухфазные схемы с реле типа РТВ.

Характеристика времени действия реле приведена на рис. 4-33.

Реле РТВ представляет собой электромагнитное реле со втягивающимся якорем (рис. 4-34). Нормально под действием пружины *3* якорь реле *2* находится в нижнем положении. При токе $I_р > I_{с.р}$

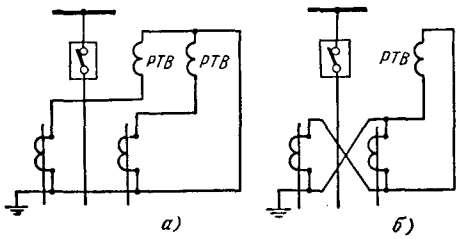


Рис. 4-32. Схемы защиты с реле прямого действия РТВ.

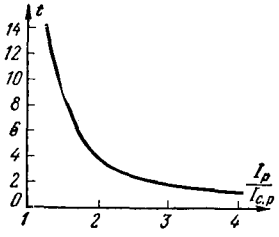


Рис. 4-33. Характеристика времени действия реле РТВ.

электромагнитная сила $F_э > F_п$ и якорь реле втягивается и сжимает пружину *3*, которая давит на стопорное кольцо *5* ударника *4*, стремясь поднять последний вверх. Однако движение ударника несвободно, оно тормозится часовым механизмом *6*. Чем больше ток $I_р$, тем больше сжимается пружина под действием силы $F_э$ и тем быстрее будет двигаться часовой механизм.

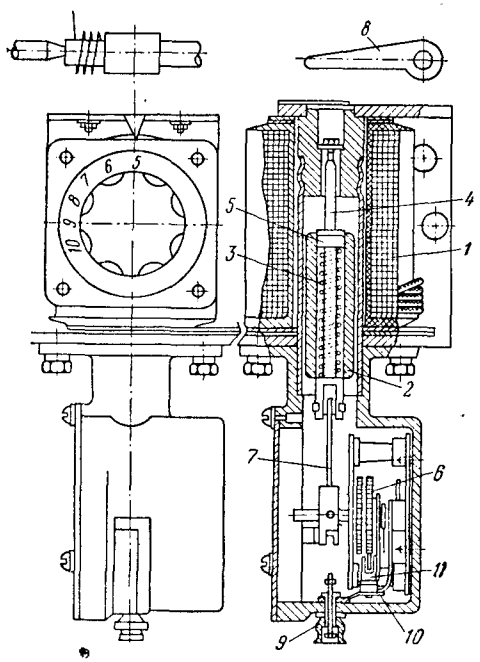


Рис. 4-34. Токовое реле прямого действия типа РТВ.

Следовательно, время, необходимое для перемещения ударника из начального положения до момента удара по отключающему рычагу *8* привода, зависит от величины тока $I_р$. При $I_р \approx 3I_{с.р}$ пружина сжимается до предела и дальнейшие увеличения тока не сопровождаются изменением скорости движения часового механизма. При этом токе наступает независимая часть характеристики реле (рис. 4-33). В конце хода ударник расцепляется с часовым механизмом. Благодаря этому его скорость и обусловленная ею кинетическая энергия ударника резко увеличиваются и он с возросшей силой ударяет по рычагу *8*, отключая

выключатель. Конструкция реле более подробно описывается в [Л. 26, 30].

Недостатки реле прямого действия отмечались в § 1-8. Погрешность по времени действия достигает ±0,3 *сек*. Поэтому при выборе выдержки времени на защите с РТВ ступень селективности Δt принимается равной 0,8 *сек*. Обмотка реле имеет значительное потребление около 50 *ва* при токе срабатывания. Поэтому трансформаторы тока, питающие реле прямого действия, достаточно сильно загружены. По мере втягивания якоря *2* и перемещения ударника *4* вверх потребление реле растет. Точность трансформаторов тока должна быть обеспечена при токе срабатывания реле.

4-10. ОБЩАЯ ОЦЕНКА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

Достоинствами максимальной токовой защиты являются ее простота, надежность и небольшая стоимость по сравнению с другими видами защиты. По своему принципу максимальная токовая защита обеспечивает селективность в радиальных сетях с односторонним питанием. Однако в некоторых случаях ее удается применять и в более сложных сетях, имеющих двустороннее питание.

К недостаткам максимальной защиты относятся:

а) большие выдержки времени, особенно вблизи источников питания, в то время как именно вблизи шин станции по условию устойчивости необходимо быстрое отключение к. з.;

б) недостаточная чувствительность при к. з. в разветвленных сетях с большим числом параллельных цепей и значительными токами нагрузки.

Максимальная токовая защита получила наиболее широкое распространение в радиальных сетях всех напряжений, в сетях 10 *кв* и ниже она является основной защитой.

Глава пятая

ТОКОВЫЕ ОТСЕЧКИ

5-1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТОКОВЫХ ОТСЕЧЕК

Отсечка является разновидностью токовой защиты, позволяющей обеспечить быстрое отключение к. з. Токовые отсечки подразделяются на отсечки мгновенного действия и отсечки с выдержкой времени (порядка 0,3—0,6 *сек*).

Селективность действия токовых отсечек достигается ограничением их зоны работы так, чтобы отсечка не действовала при к. з. на смежных участках сети, защита которых имеет выдержку времени, равную или больше, чем отсечка. Для этого ток срабатывания отсечки должен быть больше максимального тока к. з., прохо-

дящего через защиту при повреждении в конце выбранной зоны действия. Такой способ ограничения зоны действия основан на том, что ток к. з. $I_к$ зависит от величины сопротивления до места повреждения (рис. 5-1). Действительно, ток к. з. в какой-либо точке рассматриваемого участка линий

$$I_к = \frac{E_с}{x_с + x_{л.к}} = \frac{E_с}{x_с + x_у l_к}, \qquad (5\text{-}1)$$

где $E_с$ — эквивалентная э. д. с. генераторов системы; $x_с$ и $x_{л.к}$ — сопротивление системы и участка линии до точки к. з. (активная составляющая сопротивления, для упрощения, не учитывается); $x_у$ — удельное сопротивление линии, *ом/км*; $l_к$ — длина защищаемой линии от ее начала до точки к. з.

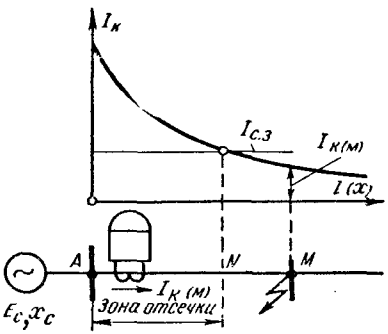


Рис. 5-1. Принцип действия токовой отсечки.

Из (5-1) следует, что при удалении точки к. з. от источника питания (или от места расположения защиты) сопротивление $x_{л.к}$ растет ($x_{л.к} \equiv l_к$), а ток к. з., соответственно уменьшается, как показано на рис. 5-1.

Если по условиям селективности отсечка не должна действовать при к. з. за точкой M (рис. 5-1), то для обеспечения этого условия необходимо выбрать

$$I_{с.з} > I_{к(м)}. \qquad (5\text{-}1а)$$

Тогда при к. з. за точкой M отсечка действовать не будет, а при повреждении в пределах участка AM — будет действовать на той части линии AN, где $I_к > I_{с.з}$. Таким образом, зона действия защиты с током срабатывания, выбранным по условию (5-1а), охватывает только часть линии (AN) и не выходит за пределы участка AM.

Токовые отсечки применяются как в радиальной сети с односторонним питанием, так и в сети, имеющей двустороннее питание.

Для обеспечения расчетной зоны действия отсечки трансформаторы тока, питающие ее цепи, должны работать при токе срабатывания отсечки (т. е. при $I_р = I_{с.з}$) с погрешностью $\Delta I \leqslant 10\%$.

5-2. СХЕМЫ ОТСЕЧЕК

Принципиальные схемы отсечек мгновенных (без выдержки времени) и с выдержкой времени на постоянном оперативном токе изображены на рис. 5-2, *а* и *б*.

В сети с глухозаземленной нейтралью от всех видов к. з. применяются трехфазные схемы. В качестве защиты от междуфазных к. з. используется двухфазная схема неполной звезды.

В сети с изолированной нейтралью или заземленной через большое сопротивление применяются двухфазные схемы, подобные схемам на рис. 4-5, *а* и *б*.

Трехлинейные схемы отсечек на постоянном оперативном токе аналогичны схемам, приведенным на рис. 4-2 и 4-5.

Все соображения о достоинствах и недостатках этих схем, изложенные в § 4-3, относятся и к схемам отсечек.

Так же как и максимальные защиты, отсечки выполняются на постоянном и переменном оперативном токе, а также с помощью реле прямого действия по схемам, приведенным на рис. 4-20, 4-26, 4-30, 4-32.

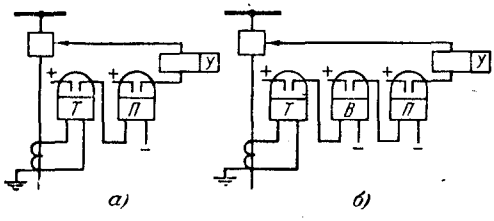


Рис. 5-2. Однолинейная схема токовой отсечки.

а — мгновенной с $t = 0$; *б* — с выдержкой времени.

Схемы отсечек с выдержкой времени полностью совпадают со схемами максимальных защит с независимой выдержкой времени.

Схемы отсечек без выдержки времени отличаются от указанных схем максимальной защиты отсутствием реле времени.

Ниже рассматриваются способы выбора уставок различных видов отсечек.

5-3. ОТСЕЧКИ МГНОВЕННОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЛИНИЯХ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

а) Ток срабатывания отсечки

По условию селективности с защитами остальной сети отсечка без выдержки времени (с $t_з = 0$) не должна работать за пределами защищаемой линии AB (рис. 5-3). Ток срабатывания мгновенной отсечки должен удовлетворять условию (5-2) при к. з. в конце защищаемой линии AB, т. е. в точке M (рис. 5-3). В соответствии с этим принимается, что

$$I_{с.з} = k_{зап} I_{к\,(M)\,макс}, \qquad (5\text{-}2)$$

где $I_{к\,(M)\,макс}$ — максимальный ток к. з. в фазе линии при к. з. на шинах подстанции B (точка M на рис. 5-3); $k_{зап}$ — коэффициент запаса, учитывающий погрешность в расчете тока к. з. $I_{к(M)\,макс}$ и погрешность в токе срабатывания реле.

Ток к. з. $I_{к\,(M)\,макс}$ рассчитывается для таких режимов работы системы и вида повреждения, при которых он оказывается наибольшим. Поскольку собственное время действия отсечки равно 0,02—0,01 *сек*, то ток $I_{к\,(M)\,макс}$ рассчитывается для начального момента времени ($t = 0$) и принимается равным действующему значению пе-

риодической составляющей. При расчете тока к. з. генераторы замещаются сверхпереходным сопротивлением x''_d.

В схемах отсечки, где токовые реле действуют непосредственно на отключение без промежуточного реле, время действия отсечки может достигать одного периода (т. е. 0,02 *сек*). В этом случае следует учитывать апериодическую составляющую тока к. з., умножая ток $I_{к(M)\,макс}$ на коэффициент $k_а = 1{,}6 \div 1{,}8$.

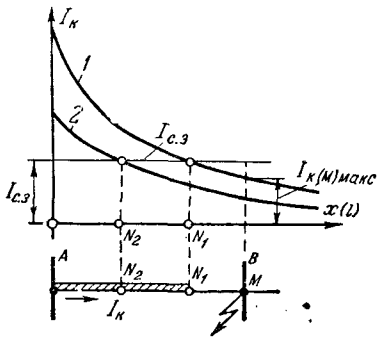


Рис. 5-3. Графический метод определения зоны действия мгновенной отсечки.

1 — максимальный ток $I_к$; *2* — минимальный ток $I_к$.

У отсечек для защиты линий с токовыми реле типа РТ коэффициент запаса $k_{зап} = 1{,}2 \div 1{,}3$. Для отсечки с реле типа РТ-80, которые имеют погрешность в токе срабатывания 20—25%, принимается повышенный $k_{зап} = 1{,}5$.

Зона действия отсечки определяется графически, как показано на рис. 5-3. Обычно строятся кривые тока к. з. в зависимости от расстояния l до точки к. з. $I_к = f(l)$ для максимального и минимального режимов (кривые *1* и *2* на рис. 5-3), и по точке пересечения их с прямой $I_{с.з}$ находится конец зоны отсечки в максимальном и минимальном режимах (AN_1 и AN_2).

Зона действия отсечки зависит от характера (крутизны кривой) спада тока по длине линии. Чем больше различаются токи $I_к$ при к. з. в начале и конце линии, тем больше получается зона, охватываемая отсечкой. Зону действия отсечки можно также определить по формуле

$$x_{отс}\% = \frac{100}{x_л}\left(\frac{E_с}{I_{с.з}} - x_с\right), \qquad (5\text{-}3)$$

где $x_{отс}$ — зона действия отсечки, выраженная в процентах от сопротивления защищаемой линии; $x_л$ — сопротивление защищаемой линии; $x_с$ — сопротивление системы [см. рис. 5-1], $I_{с.з}$ — ток срабатывания отсечки, выбранный согласно (5-2).

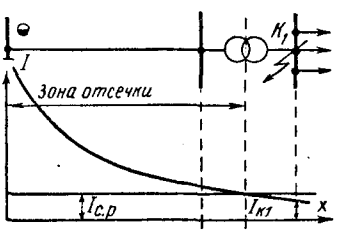


Рис. 5-4. Зона действия отсечки блока линия — трансформатор.

Правила устройства электроустановок рекомендуют применять отсечку, если ее зона действия охватывает не меньше 20% защищаемой линии. При схеме работы линии блоком с трансформатором (рис. 5-4) отсечку отстраивают от тока к. з. при к. з. за трансформатором в точке K_1. В этом случае отсечка защищает всю линию и оказывается весьма эффективной.

Вследствие простоты отсечки она применяется в качестве дополнительной защиты при зоне действия, меньшей 20%, если основная защита линии имеет мертвую зону.

б) Время действия отсечки

Время действия мгновенной отсечки складывается из времени срабатывания токовых и промежуточного реле (рис. 5-2, *а*). При быстродействующих промежуточных реле (0,02 *сек*) отсечка срабатывает в течение $t_з = 0{,}04 \div 0{,}06$ *сек*. Промежуточное реле облегчает работу контактов токовых реле и позволяет не учитывать апериодическую составляющую тока к. з., поскольку последняя затухает очень быстро (за 0,02—0,03 *сек*).

На линиях, защищенных от перенапряжений трубчатыми разрядниками, отсечка может срабатывать при их действии. Время работы разрядников составляет около 0,01—0,02 *сек*. При каскадном действии разрядников оно увеличивается до 0,04—0,06 *сек*. Применением промежуточного реле с временем действия $t = 0{,}06 \div 0{,}08$ *сек* удается отстроить отсечку от работы разрядников.

5-4. НЕСЕЛЕКТИВНЫЕ ОТСЕЧКИ

Неселективной отсечкой называется мгновенная отсечка, действующая за пределами своей линии. Такая отсечка применяется для быстрого отключения к. з. в пределах всей защищаемой линии в тех случаях, когда это необходимо для сохранения устойчивости. Неселективное действие отсечки при к. з. вне линии исправляется при помощи АПВ, включающего обратно-неселективно отключившуюся линию. Пример применения неселективной отсечки приведен на рис. 5-5.

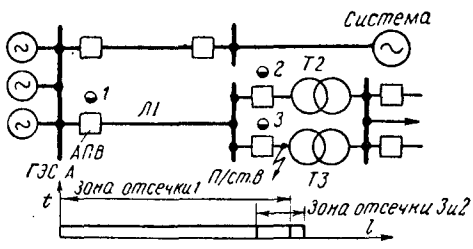


Рис. 5-5. Неселективная отсечка в сочетании с АПВ.

Для сохранения устойчивости работы генераторов ГЭС *А* на линии *Л1* установлена отсечка *1*, неселективная по отношению к защите трансформаторов. Ток срабатывания отсечки *1* отстраивается от конца зоны отсечек *2* и *3*, установленных на трансформаторах *Т2* и *Т3*, т. е. $I_{с.з1} = (1{,}1 \div 1{,}2) I_{с.з2}$ (или $I_{с.з3}$). При такой уставке отсечка *1* охватывает защищаемую линию *Л1*, но не выходит за пределы трансформаторов *Т2* и *Т3*.

При к. з. в каком-либо трансформаторе, например *Т3*, в пределах зоны действия отсечки *1* последняя срабатывает одновременно с отсечкой поврежденного трансформатора, поскольку их время действия одинаково ($t = 0$). В результате этого, кроме трансформа-

тора *ТЗ*, неселективно отключается линия *Л1*. При этом пускается *АПВ*, которое включает обратно-неселективно отключившуюся линию *Л1* и восстанавливает, таким образом, питание подстанции *В*.

5-5. ОТСЕЧКИ НА ЛИНИЯХ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

На линии с двусторонним питанием мгновенная отсечка не должна действовать при к. з. за пределами защищаемой линии (в точках K_A и K_B на рис. 5-6). Исходя из этого, ток срабатывания выбирают большим тока I_{K_A}, проходящего от генераторов *А* при к. з. на шинах *В*, и тока I_{K_B}, проходящего от генераторов *В* при к. з. на шинах *А* (рис. 5-6). Ток срабатывания вычисляется по выражению (5-2), где вместо $I_{к(М)макс}$ подставляется больший из токов I_{K_A} или I_{K_B}.

При наличии двустороннего питания линии по ней могут проходить токи, обусловленные качаниями генераторов *А* относительно генераторов *В*. Во избежание неправильной работы отсечки при качаниях ее ток срабатывания должен отстраиваться и от токов качания $I_{кач}$, для чего $I_{с.з}$ должно удовлетворять одновременно с (5-2) условию

$$I_{с.з} = k_{зап} I_{кач.макс}, \qquad (5\text{-}4)$$

где $k_{зап} = 1{,}2 \div 1{,}3$.

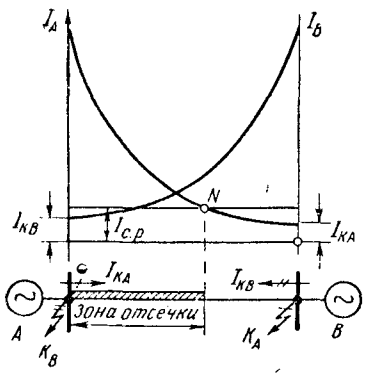


Рис. 5-6. Мгновенные отсечки на линии с двусторонним питанием.

Максимальное значение $I_{кач}$ определяется с некоторыми допущениями по формуле (13-3а):

$$I_{кач.макс} = \frac{2E}{x_{AB}},$$

где E — э. д. с. генераторов *А* и *В*, для упрощения E_A и E_B считаются равными: $E_A = E_B = E = 1{,}05\,U_{ген}$; x_{AB} — суммарное сопротивление от генераторов *А* до генераторов *В*, равное сумме $x_{гА} + x_C + x_{гВ}$, при этом $x_{гА}$ и $x_{гВ}$ — сверхпереходные сопротивления генераторов *А* и *В* (x''_d), x_c — сумма сопротивлений всех остальных элементов, включенных между шинами генераторов *А* и *В*.

Ток срабатывания выбирается большим из двух значений, полученных по условиям (5-2) и (5-4). На линиях с двусторонним питанием отсечки ставятся с обеих сторон линии. Очевидно, что ток срабатывания отсечек на обоих концах линии получается одинаковым. Зона действия каждой отсечки определяется по точке пересечения *N* прямой тока $I_{с.з}$ с соответствующей кривой тока к. з. Схема отсечки на линии с двусторонним питанием ничем не отличается от схемы на рис. 5-2, *а*.

5-6. ОТСЕЧКИ С ВЫДЕРЖКОЙ ВРЕМЕНИ

Мгновенная отсечка защищает только часть линии; чтобы выполнить защиту всей линии с минимальным временем действия, применяется отсечка с выдержкой времени (рис. 5-2, *б*). Зона и время действия такой отсечки *1* (рис. 5-7, *а*, *б*) согласуются с зоной и временем действия мгновенной отсечки *2* так, чтобы была обеспечена селективность.

Для выполнения этих условий время действия $t_{з1}$ отсечки *1* (рис. 5-7) выбирается на ступень Δt больше $t_{з2}$ отсечки *2*:

$$t_{з1} = t_{з2} + \Delta t. \qquad (5\text{-}5)$$

Практически в зависимости от точности реле времени отсечки *1* $t_з = 0{,}3 \div 0{,}6$ *сек*.

Зоны действия отсечек *1* и *2* согласуются между собой при условии, что зона действия отсечки *1* должна быть короче зоны работы отсечки *2* (рис. 5-7, *в*).

В сети с односторонним питанием ток, проходящий через защиты *1* и *2* при к. з. на линии *Л2* (точка *K*), одинаков. Поэтому согласование зон действия защит *1* и *2* можно обеспечить, выбрав $I_{с.з1} > I_{с.з2}$.

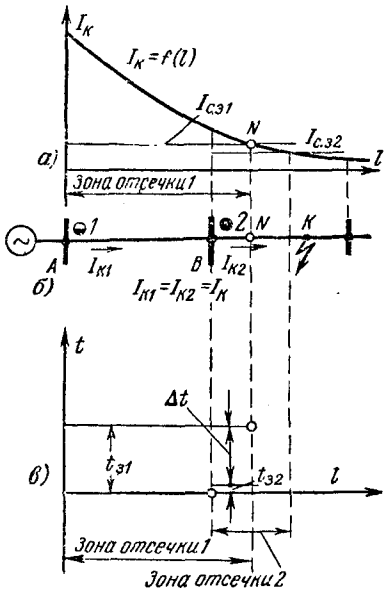


Рис. 5-7. Выбор $I_{с.з}$ отсечки с выдержкой времени на линии с односторонним питанием.

При таком соотношении токов срабатывания защит отсечка *1* не будет действовать, если ток к. з. недостаточен для действия отсечки *2*. Исходя из этого, принимаем:

$$I_{с.з1} = k_{зап} I_{с.з2}. \qquad (5\text{-}6)$$

Коэффициент запаса $k_{зап}$ берется равным 1,1—1,2.

Зона действия отсечки *1* (*AN* на рис. 5-7, *а*) находится, как и в предыдущих случаях, графически для максимального и минимального режима по точке пересечения *N*.

В сети с двусторонним питанием токи $I_{к1}$ и $I_{к2}$, проходящие через отсечки *1* и *2*, неодинаковы (рис. 5-8). Ток $I_{к2} > I_{к1}$, так как $I_{к2} = I_{к1} + I_{кз}$. С учетом этого согласование зон действия отсечек *1* и *2* обычно выполняется графическим способом. Для этой цели (рис. 5-8) строится зависимость $I_{к1}$ и $I_{к2}$ от расстояния l до точки к. з.: $I_к = f(l)$.

По пересечению прямой $I_{с.з2}$ с кривой $I_{к2}$ (точка *M*) определяется конец зоны действия отсечки *2*. От точки *M* необходимо отстроить

отсечку *1*. Для этого по кривой $I_{к1}$ находится ток $I_{к1(M)}$, проходящий в защите *1* при к. з. в конце зоны отсечки *2* (точка *M*). В соответствии с условием (5-2)

$$I_{с.з1} = k_{зап} I_{к1(M)}. \qquad (5\text{-}6а)$$

Расчет ведется при максимальном значении тока $I_{к1}$ и минимальном значении тока $I_{к2}$.

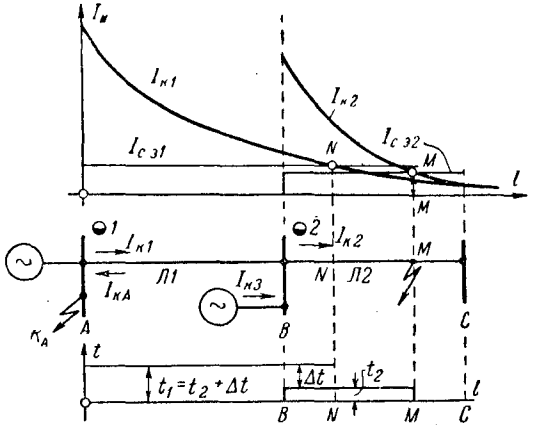


Рис. 5-8. Выбор $I_{с.з}$ отсечки с выдержкой времени на линии с двусторонним питанием.

Ток $I_{с.з}$ должен быть отстроен также и от тока $I_{кА}$ при к. з. на шинах подстанции *A*. Зона действия отсечки *1* определяется по точке пересечения $I_{с.з1}$ и $I_{к1}$, т. е. по точке *N*.

Схемы отсечки с выдержкой времени выполняются так же, как и схемы максимальных защит с независимой характеристикой (рис. 4-2). Токовая отсечка с выдержкой времени охватывает полностью защищаемую линию и частично следующий участок.

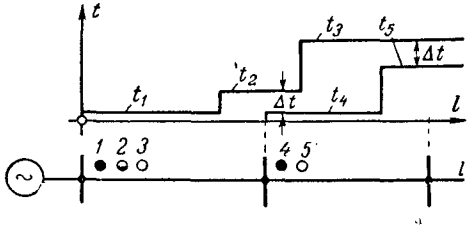


Рис. 5-9. Характеристика трехступенчатой токовой защиты.

5-7. ТОКОВАЯ ТРЕХСТУПЕНЧАТАЯ ЗАЩИТА

Сочетая максимальную защиту с мгновенной отсечкой и отсечкой с выдержкой времени, можно получить трехступенчатую защиту, обеспечивающую быстрое отключение повреждений на защищаемой линии *Л1* и резервирующую защиту *2* следующего участка. Характеристика времени действия трехступенчатой токовой защиты показана на рис. 5-9. Протяженность зон меняется в зависимости от режима работы системы.

5-8. ОЦЕНКА ТОКОВЫХ ОТСЕЧЕК

Токовые отсечки мгновенного действия являются самой простой защитой. Быстрота их действия в сочетании с простотой схемы и обслуживания составляет весьма важное преимущество этих защит.

Недостатками мгновенной отсечки являются: неполный охват зоной действия защищаемой линии и непостоянство зоны действия под влиянием сопротивлений в месте повреждения и изменений режима системы, однако последнее не оказывает существенного влияния в мощных энергосистемах.

Отсечка с выдержкой времени позволяет обеспечить достаточно быстрое ($t_з \approx 0{,}5$ *сек*) отключение повреждений на защищаемой линии. Сочетание отсечек и максимальной защиты позволяет получить трехступенчатую защиту, которая во многих случаях успешно заменяет более сложные защиты.

Глава шестая

ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И СХЕМЫ ИХ СОЕДИНЕНИЙ

6-1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Для питания защит используются однофазные и трехфазные трансформаторы напряжения, причем последние, как правило, с пятистержневым магнитопроводом. По стандарту, принятому в СССР, трансформаторы напряжения выполняются на вторичное

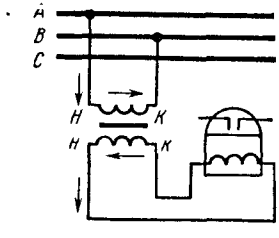


Рис. 6-1. Схема включения трансформатора напряжения.

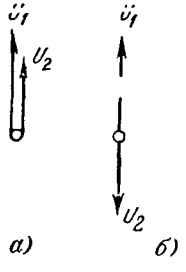


Рис. 6-2. Изображение векторов напряжения.

номинальное напряжение 100 *в* независимо от величины первичного напряжения.

Маркировка выводов обмоток трансформатора напряжения выполняется по тому же правилу, что и трансформаторов тока (см. § 3-4), а именно: если первичный ток направлен из сети к началу *H* первичной обмотки, то за начало *н* вторичной обмотки принимается тот конец ее, из которого вторичный ток выходит в нагрузку (рис. 6-1).

Согласно принятому в СССР стандарту начала и концы обмоток трансформаторов напряжения обозначаются так же, как и у силовых трансформаторов.

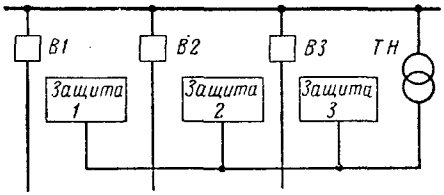


Рис. 6-3. Схема питания защиты от шинного трансформатора напряжения.

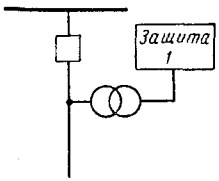


Рис. 6-4. Схема питания защиты от линейного трансформатора напряжения.

На основании соображений, изложенных в § 3-5, векторы первичного и вторичного напряжений могут изображаться либо совпадающими (рис. 6-2, *а*), либо сдвинутыми на 180° (рис. 6-2, *б*). В дальнейшем будем придерживаться первого способа.

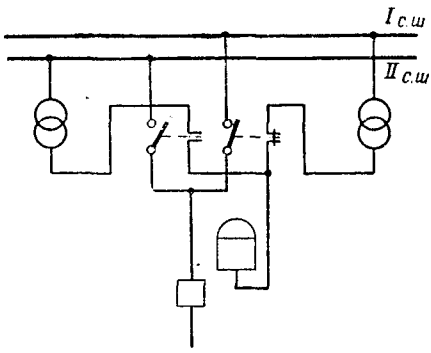


Рис. 6-5. Переключение цепей напряжения защиты с одного трансформатора напряжения на другой вспомогательными контактами шинных разъединителей.

Для питания защит трансформаторы напряжения могут устанавливаться на шинах электростанций или подстанции и питать защиты всех присоединений (рис. 6-3) или устанавливаться на каждом присоединении и питать защиту только этого присоединения (рис. 6-4).

Первый способ экономичнее второго, так как требует меньше трансформаторов напряжения. Недостаток первого способа состоит в том, что при переключении присоединения с одной системы шин на другую необходимо производить переключение питания его защиты на трансформатор напряжения другой системы шин. Такое переключение делается автоматически при операциях с разъединителями (рис. 6-5) или вручную — переключателями.

6-2. ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Трансформатор напряжения работает с погрешностью, искажающей вторичное напряжение как по величине, так и по фазе.

В «идеальном» трансформаторе напряжения, работающем без погрешностей, вторичное напряжение

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{n_н}, \qquad (6\text{-}1)$$

где U_1 — напряжение, подведенное к зажимам первичной обмотки (первичное напряжение); $n_н$ — коэффициент трансформации «идеального» трансформатора напряжения, равный отношению числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной.

Однако за счет падения напряжения ΔU в первичной и вторичной обмотках действительное значение вторичного напряжения будет равно:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{n_н} - \Delta U, \qquad (6\text{-}2)$$

что вытекает из эквивалентной схемы замещения трансформатора напряжения на рис. 6-6, *а*.

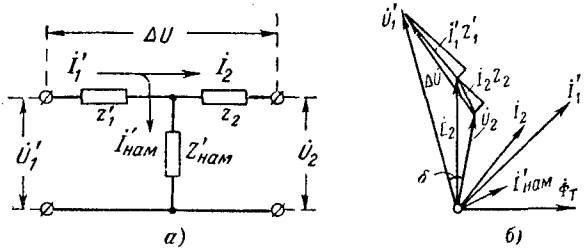


Рис. 6-6. Схема замещения (*а*) и векторная диаграмма (*б*) трансформатора напряжения. Первичный ток, напряжение и сопротивление приведены к числу витков вторичной обмотки.

Из этой же схемы следует, что

$$\Delta U = \dot{I}_{нам}' z_1' + \dot{I}_2 (z_1' + z_2). \qquad (6\text{-}2а)$$

Таким образом, падение напряжения в обмотках трансформатора напряжения ΔU обусловливает появление погрешности, искажающей величину и фазу $\dot{U}_2$ (рис. 6-6, *б*), по сравнению с расчетным напряжением $\dot{U}_1/n_н = \dot{U}'$ по выражению (6-1).

Для уменьшения погрешности трансформатора напряжения [см. формулу (6-2а)] необходимо уменьшать сопротивление обмоток z_1 и z_2, ток намагничивания $I_{нам}$ и ток нагрузки, т. е. вторичный ток I_2.

Допустимые погрешности нормируются при номинальном напряжении, соответственно чему трансформаторы напряжения подразделяются на три класса: 0,5; 1 и 3. Один и тот же трансформатор напряжения может работать в различном классе точности в зависимости от величины его нагрузки.

Заводы СССР обычно указывают номинальную мощность, подразумевая под ней максимальную нагрузку, которую может питать трансформатор напряжения в гарантированном классе точности. При превышении номинальной мощности погрешности трансформатора напряжения выходят за гарантированные пределы. Кроме того, для трансформаторов напряжения указывается максимальная

мощность по условиям нагрева, которая обычно значительно превосходит его номинальную мощность.

Погрешность по величине вторичного напряжения принято оценивать в процентах:

$$\Delta U\% = \frac{U_2 - \frac{U_1}{n_н}}{U_1/n_н} \cdot 100. \qquad (6\text{-}3)$$

Погрешность по фазе оценивается углом сдвига δ между векторами первичного и вторичного напряжений (рис. 6-6, *б*).

6-3. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Для питания цепей релейной защиты используются междуфазные напряжения и фазные — относительно земли, а также симметричные составляющие этих напряжений.

Ниже рассматриваются типовые схемы соединений трансформаторов напряжения (ТН) и схемы фильтров, позволяющие получить указанные напряжения.

а) Схема соединений трансформаторов напряжения в звезду

Схема, приведенная на рис. 6-7, *а*, предназначена для получения напряжения фаз относительно земли и междуфазных (линейных) напряжений. Три первичные обмотки трансформатора напряжения (*ТН-1*) соединяются в звезду. Начала каждой обмотки (вывода *A*, *B*, *C*) присоединяются к соответствующей фазе линии, а концы *X*, *Y*, *Z* объединяются в общую точку (нейтраль H_1) и заземляются.

При таком включении к каждой первичной обмотке *ТН-1* подводится напряжение фазы линии относительно земли, которое затем трансформируется во вторичные обмотки. Концы вторичных обмоток *ТН-1* (*x*, *y*, *z* на рис. 6-7, *а*) также соединяются в звезду, нейтраль которой H_2 связывается проводом с нулевой точкой H_3 нагрузки (обмотки реле *1*, *2*, *3*).

В приведенной схеме нейтраль первичной обмотки (точка H_1) жестко связана с землей и имеет поэтому ее потенциал, а нейтраль нагрузки H_3 соединена с нейтралью вторичных обмоток H_2 и всегда имеет потенциал точки H_2.

При такой схеме фазные напряжения на вторичной стороне соответствуют фазным напряжениям относительно земли первичной стороны.

Если по каким-либо причинам первичная нейтраль *ТН* (H_1) окажется разземленной, как показано на рис. 6-7, *б*, то ее потенциал станет отличным от потенциала земли.

Из теории электротехники известно [Л. 29, 95], что потенциал изолированной от земли нейтрали, образованной тремя соединенными в звезду одинаковыми сопротивлениями *z* (какими являются сопротивления первичных обмоток *ТН*-2 на рис. 6-7, *б*),

находится в точке O' (рис. 6-7, *в*), лежащей на пересечении медиан треугольника линейных напряжений.

Векторы напряжений фаз относительно этой точки (называемой нулевой точкой системы линейных напряжений) $\dot{U}'_A$, $\dot{U}'_B$, $\dot{U}'_C$, обла-

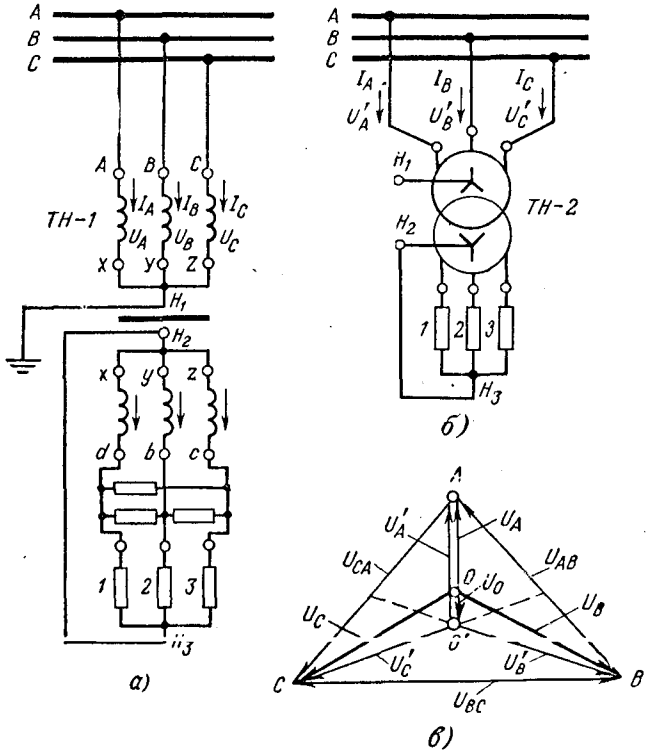


Рис. 6-7. Схема соединений однофазных трансформаторов напряжения в звезду

а — схема звезды с заземленной нейтралью первичной обмотки; *б* — то же с разземленной нейтралью; *в* — векторная диаграмма.

дают особенностью: при всех режимах и к. з. их геометрическая сумма равна нулю:

$$\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 0. \qquad (6\text{-}4)$$

Так как $\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 3\dot{U}_0$ [Л. 32], то из (6-4) следует, что *фазные напряжения относительно точки O' не содержат составляющих нулевой последовательности и этим они отличаются от фазных напряжений по отношению к земле.*

Справедливость выражения (6-4) доказывается следующим образом: фазные напряжения на *TH*-2 (рис. 6-7, *б*)

$$\dot{U}'_A = \dot{I}_A z; \quad \dot{U}'_B = \dot{I}_B z; \quad \dot{U}'_C = \dot{I}_C z,$$

где I_A, I_B, I_C — токи в первичных обмотках *ТН-2*, а z — сопротивление этих обмоток.

С учетом этого сумма

$$\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = z\,(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C). \qquad (6\text{-}4а)$$

Но поскольку согласно первому закону Кирхгофа $I_A + I_B + I_C = 0$, то и $\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 0$, как это и принято в (6-4).

Таким образом, фазные напряжения U'_A, U'_B, U'_C *ТН-2* с незаземленной нейтралью (рис. 6-7, *б*) могут содержать только те симметричные составляющие, которые удовлетворяют условию (6-4), т. е. прямую и обратную последовательность, сумма векторов каждой из которых равна нулю.

В нормальном режиме и при всех к. з., не связанных с землей, $U_0 = 0$. Поэтому в этих случаях потенциалы точек H_1, у заземленного *ТН* (т. е. у *ТН-1* и *ТН-2*) будут одинаковы. При этом точка *О* на векторной диаграмме будет совпадать с *О'*, а фазные напряжения обоих *ТН* окажутся равными: $U'_ф = U_ф$.

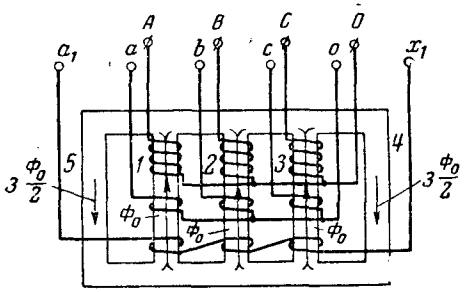


Рис. 6-8. Пути замыкания магнитных потоков нулевой последовательности в трехфазном пятистержневом трансформаторе напряжения.

При повреждениях с замыканием на землю появляется U_0. Потенциал нейтрали H_1 незаземленного *ТН-2* будет лежать в точке *О'*, совпадающей с точкой пересечения медиан, а точка *О*, соответствующая потенциалу заземленной нейтрали *ТН-1*, будет отстоять от *О'* на величину вектора $\dot{U}_0$.

В этом случае, как это видно из рис. 6-7, *в*, фазные напряжения относительно земли (точки *О*)

$$\dot{U}_A = \dot{U}'_A + \dot{U}_0; \quad \dot{U}_B = \dot{U}'_B + \dot{U}_0; \quad \dot{U}_C = \dot{U}'_C + \dot{U}_0.$$

Сумма

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 3\dot{U}_0, \text{ а } \dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 0.$$

Аналогичным образом на фазные напряжения влияет обрыв или отсутствие нулевого провода во вторичной цепи.

При отсутствии связи между H_2 и H_3 точка H_3 становится изолированной нейтралью; как было показано выше, сумма напряжений на обмотках реле (*1*, *2* и *3*) во всех случаях будет равна нулю, и, следовательно, на векторной диаграмме потенциал точки H_3 совпадет с точкой *О*, если принять для простоты, что $n_ц = 1$.

Из всего сказанного следует очень важный вывод, что *заземление нейтрали первичной обмотки ТН и наличие нулевого провода во вторичной цепи являются обязательным условием для получения фазных напряжений относительно земли.*

Соединение трансформаторов напряжения по схеме λ/λ может выполняться по 6-й и 12-й группам. Типовым является соединение по 12-й группе, показанное на рис. 6-7.

Рассмотренная схема соединений может быть выполнена посредством трех однофазных трансформаторов напряжения или одного трехфазного пятистержневого трансформатора напряжения. Трехфазные трехстержневые трансформаторы напряжения не могут применяться для данной схемы, так как в их магнитопроводе нет пути для замыкания магнитных потоков нулевой последовательности Φ_0, создаваемых током I_0 в первичных обмотках при замыканиях на землю в сети. В этом случае поток Φ_0 замыкается через воздух по пути с большим магнитным сопротивлением. Это приводит к уменьшению сопротивления нулевой последовательности трансформатора и резкому увеличению тока намагничивания $I_{\text{нам}}$.

Повышенный ток намагничивания вызывает недопустимый нагрев трансформатора, в связи с чем применение трехстержневых трехфазных трансформаторов недопустимо.

В пятистержневых трансформаторах для замыкания потоков Φ_0 служат четвертый и пятый стержни магнитопровода (рис. 6-8).

б) Схема соединения обмоток трансформаторов напряжения в открытый треугольник

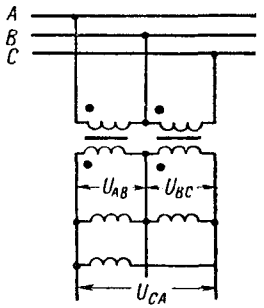


Рис. 6-9. Схема соединений однофазных трансформаторов напряжения в открытый треугольник.

Схема изображена на рис. 6-9. Она выполняется при помощи двух однофазных трансформаторов напряжения, включенных на два междуфазных напряжения, например U_{AB} и U_{BC}.

Напряжение на зажимах вторичных обмоток трансформаторов напряжения пропорционально междуфазным напряжениям, подведенным с первичной стороны. Между проводами вторичной цепи включаются реле. Схема позволяет получать три междуфазных напряжения: U_{AB}, U_{BC} и U_{CA}.

Рассмотренная схема на первичной и вторичной сторонах является схемой незавершенного треугольника (не имеющего одной стороны), что и определило ее название.

в) Схема соединения обмоток однофазных трансформаторов напряжения в фильтр напряжения нулевой последовательности

Схема выполняется посредством трех однофазных трансформаторов напряжения, как показано на рис. 6-10. Первичные обмотки соединены в звезду с заземленной нейтралью, а вторичные соединяются последовательно, образуя незамкнутый треуголь-

ник. К зажимам разомкнутой вершины треугольника подсоединяются реле. Как следует из схемы, напряжение $U_р$ на зажимах разомкнутого треугольника будет равно геометрической сумме напряжений вторичных обмоток:

$$\dot{U}_р = \dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c.$$

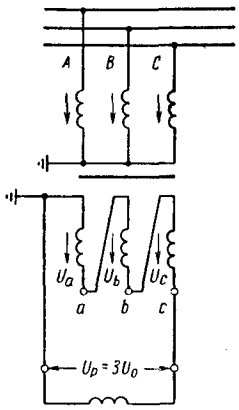


Рис. 6-10. Схема соединений однофазных трансформаторов напряжения в фильтр напряжения нулевой последовательности.

Выражая вторичные напряжения через первичные, получаем:

$$\dot{U}_р = \frac{\dot{U}_A}{n_н} + \frac{\dot{U}_B}{n_н} + \frac{\dot{U}_C}{n_н}.$$

Так как сумма трех фазных напряжений равна утроенному напряжению нулевой последовательности, то

$$\dot{U}_р = \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C}{n_н} = \frac{3U_0}{n_н}.$$

Следовательно, *на зажимах разомкнутого треугольника получается напряжение, пропорциональное напряжению нулевой последовательности.*

В нормальных условиях напряжения фаз симметричны и равны в сумме нулю. Поэтому в нормальном режиме $U_р = 0$.

При к. з. без земли сумма фазных напряжений всегда равна нулю, ибо в этом случае векторы напряжений не содержат составляющей нулевой последовательности. Поэтому напряжение $U_р$ и в этом случае также равно нулю. И только при замыканиях на землю геометрическая сумма напряжений фаз относительно земли не равна нулю за счет появления в них составляющей U_0.

В результате этого на зажимах разомкнутого треугольника появляется остаточное напряжение, равное $U_р = 3U_0/n_н$.

Напряжения прямой и обратной последовательностей образуют симметричные звезды и поэтому при суммировании в цепи разомкнутого треугольника всегда дают нуль на его зажимах.

Таким образом, рассмотренная схема является фильтром, пропускающим только напряжение нулевой последовательности. Рассмотренная схема соединения очень удобна и получила широкое распространение на практике.

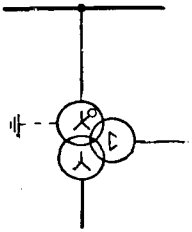


Рис. 6-11. Типовая схема соединений обмоток однофазных трехобмоточных трансформаторов напряжения.

Необходимым условием работы рассмотренной схемы в качестве фильтра U_0 является заземление нейтрали первичной обмотки ТН.

При отсутствии заземления к первичным обмоткам *ТН* будут подводиться, вместо фазных напряжений относительно земли,

азные напряжения относительно изолированной нейтрали (см. 6-3,а). Эти напряжения не содержат U_0, и их сумма всегда равна улю. Поэтому при замыканиях на землю напряжение на выходе кемы будет отсутствовать.

Применяя однофазные трансформаторы напряжения с двумя торичными обмотками, можно соединить одну вторичную обмотку о схеме звезды, а вторую — разомкнутым треугольником (рис. 6-11) получить, таким образом, от одного трансформатора напряжения ри вида напряжений: фазные, междуфазные и нулевой последовательности.

Номинальное вторичное напряжение у обмотки, предназначенной для соединения в разомкнутый треугольник, принимается авным для сетей с заземленной нейтралью 100 *в* и для сетей с изолированной нейтралью 100/3 *в*.

г) Схема соединения обмоток трехфазных трансформаторов напряжения в фильтр напряжения нулевой последовательности

Для получения напряжения нулевой последовательности от трехазного пятистержневого трансформатора (рис. 6-8) на каждом з его основных стержней *1*, *2* и *3* выполняется дополнительная ретья) обмотка, соединяемая, как и в предыдущем случае, по схеме азомкнутого треугольника. Напряжение на выводах этой обмотки оявляется, так же как и в предыдущем случае, только при к. з. а землю, когда возникают магнитные потоки нулевой последовательности, замыкающиеся по четвертому и пятому стержням магнипровода.

Схемы с пятистержневым трансформатором, показанные на ис. 6-8, позволяют получать одновременно с напряжением нулевой оследовательности фазные и междуфазные напряжения.

4. ПОВРЕЖДЕНИЯ В ЦЕПЯХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И КОНТРОЛЬ ЗА ИХ ИСПРАВНОСТЬЮ

а) Повреждения в цепях ТН

Во вторичных цепях трансформатора напряжения могут возникать повреждения (к. з. и обрывы). Короткие замыкания вызывают пасное увеличение тока в трансформаторе, и поэтому для его щиты устанавливаются предохранители или автоматы, прерывающие цепь при появлении повышенных токов. Повреждения вторичых цепей, а также их нарушение при перегорании предохранителей или действии автоматов искажают величину и фазу вторичого напряжения, что приводит к неправильной работе защиты.

Так, например, при к. з. или обрыве фаз вторичной цепи напряжение, подводимое к обмоткам реле защиты, снижается или полностью исчезает, что воспринимается защитой как к. з. в сети и ожет явиться причиной ложного действия защиты.

Для предупреждения ложных действий предусматриваются специальные устройства (б л о к и р о в к и), которые реагируют на повреждения во вторичных цепях напряжения, подают при этом сигнал о неисправности и выводят из действия (блокируют) защиты, которые могут неправильно сработать при повреждении в цепях напряжения.

Выполнение подобных устройств, полноценно реагирующих на все возможные повреждения, является трудной задачей.

б) Блокирующие устройства, реагирующие на появление U_0 и I_0 при повреждениях в цепях напряжения

На рис. 6-12 приведены наиболее распространенные устройства этого типа. Они реагируют на появление напряжения и тока нулевой последовательности во вторичных цепях трансформатора напря-

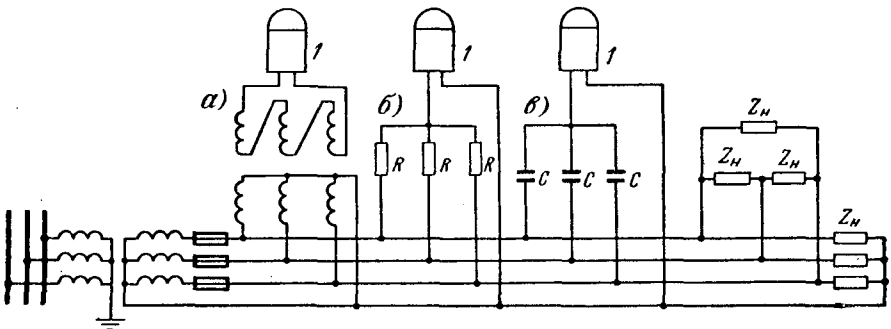


Рис. 6-12. Схемы сигнализации обрыва в цепях трансформатора напряжения.
а — с трансформаторным фильтром U_0; *б* — с фильтром на активных сопротивлениях; *в* — с фильтром на конденсаторах *C*.

жения. Для этого реле *1* включается на напряжение нулевой последовательности по одной из схем, приведенных на рис. 6-12.

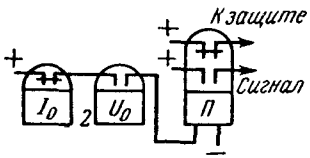


Рис. 6-13. Схема блокировки защиты при обрыве цепей трансформатора напряжения.

В нормальных условиях вторичные напряжения трансформатора напряжения симметричны, поэтому их сумма равна нулю и напряжение на реле *1* отсутствует. При обрыве одной или двух фаз цепи напряжения возникает U_0, под влиянием которого в реле появляется ток и оно срабатывает, давая сигнал и выводя защиту из работы.

Реле *2* может действовать не только при обрывах, но и при к. з. на землю в первичной сети; чтобы предотвратить при этом блокирование защиты, ставится реле I_0 (рис. 6-13), реагирующее на появление тока I_0 в первичной сети. При замыканиях на землю в первичной сети реле I_0 размыкает цепь блокировки своим контактом. В слу-

чае же повреждения в цепях напряжения и нормальном состоянии первичной сети реле I_0 не действует и разрешает реле *2* блокировать защиту и подать сигнал о повреждении цепей.

Рассмотренное устройство не реагирует на одновременный обрыв всех трех фаз цепи напряжения, на трехфазное к. з. во вторичных цепях и обрыв нулевого провода той же цепи. Однако вследствие своей простоты оно получило широкое распространение. Чебоксарский электроаппаратный завод выпускает устройства подобного типа: КРБ-11 и КРБ-12.

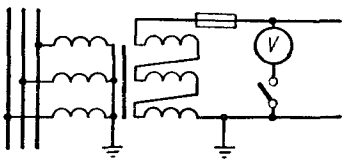


Рис. 6-14. Периодический контроль исправности цепи обмотки, соединенной в фильтр напряжения нулевой последовательности.

в) Контроль цепей разомкнутого треугольника ТН

Контроль исправности цепи вторичной обмотки *ТН*, соединенной по схеме фильтра нулевой последовательности, производится путем периодического измерения напряжения небаланса с помощью вольтметра, включаемого по схеме на рис. 6-14. При исправной цепи вольтметр показывает напряжение небаланса, имеющее величину 1—3 *в*, а при нарушении цепи показания пропадают.

г) Блокирующее устройство на сравнении напряжений двух вторичных обмоток ТН

Схема с семиобмоточным трансформатором. Более полноценным по сравнению с предыдущими является устройство контроля, показанное на рис. 6-15. Оно предназначено для трансформаторов напряжения с двумя вторичными обмотками *H1* и *H2*, соединенными по схеме звезды и разомкнутого треугольника. Действие этого устройства основано на сравнении одноименных фазных напряжений обмоток *H1* и *H2*, которые нормально одинаковы по величине и фазе.

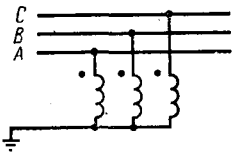
В случае же неисправности во вторичной цепи одной из обмоток равенство напряжений нарушается, что и служит признаком повреждения, на которое реагирует устройство. Сравнение напряжений обмоток *H1* и *H2* производится с помощью многообмоточного вспомогательного трансформатора *1* (рис. 6-15). Его обмотки A_1 и A_2, B_1 и B_2, C_1 и C_2, питаемые напряжением одноименных фаз, имеют попарно равное число витков и создают встречно направленные магнитные потоки. Витки обмоток, питающихся от разных фаз, неодинаковы и подобраны в определенном соотношении: $w_{A1} = w_{A2} = w$; $w_{B1} = w_{B2} = \frac{2}{3} w$; $w_{C1} = w_{C2} = \frac{1}{3} w$.

Одноименные напряжения контролируемых обмоток *H1* и *H2* одинаковы, поэтому создаваемые ими магнитные потоки в транс-

форматоре *1* взаимно уравновешиваются и ток в реле *2* отсутствует.

В случае обрыва одной или двух фаз в цепях обмотки *H1* или *H2* равновесие магнитных потоков соответствующих обмоток трансформатора *1* нарушается, появляется остаточный поток, вызывающий ток в реле *2*, под влиянием которого оно срабатывает.

При одновременном обрыве трех фаз вторичной цепи обмотки *H1* или *H2* сумма потоков в трансформаторе *1*, обусловленных напряжениями, например U_{A1}, U_{B1} и U_{C1} оставшейся обмотки *H1*, не будет уравновешиваться вследствие неравенства витков w_{A1}, w_{B1}, w_{C1}, что и вызовет работу реле *2*.



При к. з. в цепях обмотки *H1* или *H2* баланс напряжений на-

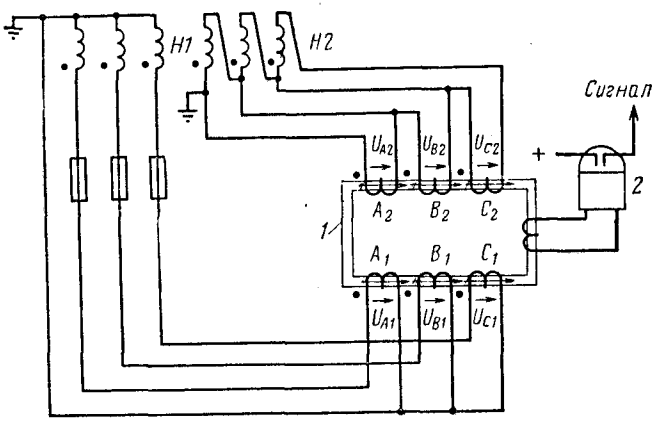


Рис. 6-15. Схема контроля с помощью семиобмоточного трансформатора.

рушается, но, как показывают анализ и испытания, в ряде случаев разница напряжений оказывается недостаточной, в результате чего реле *2* не действует.

На повреждения в первичной сети устройство не отзывается, поскольку при этом вторичные напряжения обеих обмоток равны.

Как отмечалось, обе схемы (по рис. 6-12 и 6-15) из-за недостаточной чувствительности не отзываются на некоторые случаи к. з. во вторичных цепях напряжения.

В этих случаях обе блокировки приходят в действие, но только после работы автоматов, установленных во вторичных цепях трансформаторов напряжения для защиты их от к. з. Контакты автоматов размыкают поврежденную цепь напряжения, после чего блокирующее устройство реагирует на появившийся обрыв цепи и срабатывает. Таким образом, блокировка в этих случаях работает с замедлением.

Для предотвращения неправильной работы защиты, приходящей в действие от понижения напряжения, обусловленного к. з. в цепях напряжения, необходимо выполнить условие

$$(t_а + t_б) < t_з, \tag{6-5}$$

где $t_а$, $t_б$ и $t_з$ — время срабатывания автомата, блокировки и защиты соответственно.

При быстродействующих защитах условие (6-5) не всегда выполнимо.

В связи с этим разработан новый вариант блокировки защит при нарушениях в цепях напряжения [Л. 92].

Схема с тремя однофазными трансформаторами. Принцип действия этой блокировки также основан на сравнении напряжений одно-

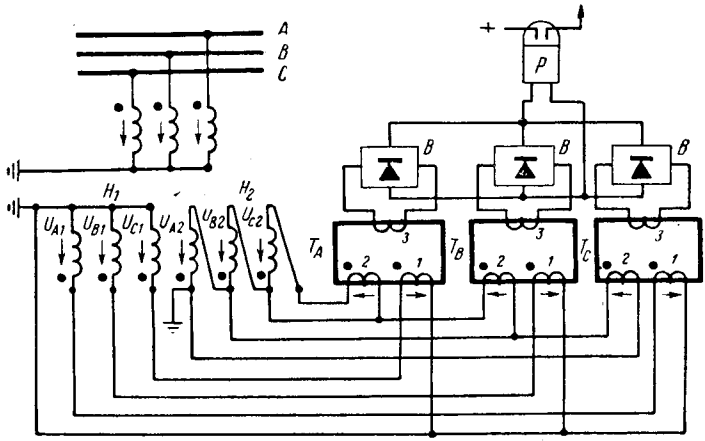


Рис. 6-16. Схема контроля исправности цепей напряжения с помощью трех однофазных трехобмоточных трансформаторов.

именных фаз обмоток TH, соединенных в звезду и треугольник ($\dot{U}_{A1}$ и $\dot{U}_{A2}$, $\dot{U}_{B1}$ и $\dot{U}_{B2}$, $\dot{U}_{C1}$ и $\dot{U}_{C2}$). Но в отличие от схемы на рис. 6-15 сравнение происходит с помощью трех трансформаторов T_A, T_B и T_C (рис. 6-16). Каждый трансформатор имеет две первичные обмотки (*1* и *2*), одна включена на фазу звезды, а другая на одноименную фазу треугольника. Намагничивающие силы этих обмоток действуют встречно и взаимно уравновешиваются.

Вторичные обмотки *3* каждого трансформатора питают через выпрямители B реле P. При обрыве или к. з. в цепях, питающих первичные обмотки *1* или *2* T_A, T_B или T_C, баланс н. с. соответствующего трансформатора нарушается, в его вторичной обмотке появляется ток, который выпрямляется и поступает в реле P, вызывая его действие. Рассмотренная схема обладает высокой чувствительностью и реагирует на все виды повреждений во вторичных цепях TH.

д) Оценка схем

Схемы, реагирующие на появление составляющих нулевой последовательности, проще других, но они недостаточно совершенны. Эти схемы не действуют при обрыве трех фаз вторичных цепей *TH*, а также при к. з. в цепях напряжения, не сопровождающихся появлением U_0.

Схемы на балансе напряжений с тремя трехобмоточными трансформаторами более совершенны, но и более сложны. Их следует применять для блокировки защит на линиях 220 *кв* и выше, отключение которых из-за ложной работы защиты существенно влияет на надежность энергосистемы.

6-5. ЕМКОСТНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

Для питания устройства релейной защиты наряду с трансформаторами напряжения могут также применяться емкостные делители напряжения. Емкостные делители состоят из нескольких последовательно соединенных конденсаторов, включаемых между проводом фазы и землей (рис. 6-17).

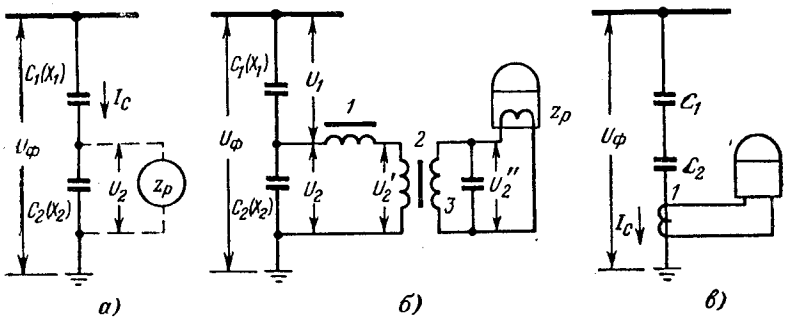


Рис. 6-17. Емкостные делители напряжения.

а и *б* — с измерением напряжения на конденсаторе C_2; *в* — с измерением зарядного тока, проходящего через конденсаторы C_1 и C_2.

Имеются два способа использования емкостных делителей для измерения напряжения.

Первый способ (рис. 6-17, *а*) состоит в том, что для питания защиты используется напряжение U_2, снимаемое с зажимов последнего конденсатора делителя C_2.

При отсутствии нагрузки z_p напряжение U_2 пропорционально первичному напряжению U_Φ и совпадает с ним по фазе, как это следует из рис. 6-17, *а*. Действительно,

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_C j x_2 = \frac{U_\Phi}{j(x_1 + x_2)} j x_2 = k U_\Phi,$$

где

$$k = \frac{x_2}{x_1 + x_2} = \text{пост.}$$

Нагрузка подключается к зажимам конденсатора C_2 через понизительный трансформатор напряжения *2* (рис. 6-17, *б*), так как величина U_2 достигает не-

скольких киловольт. Присоединение сопротивления нагрузки $z_р$ искажает как величину, так и фазу U_2, что и вызывает погрешность измерения. Для уменьшения этой погрешности предусматривается компенсирующее устройство, состоящее из реактора *1* и конденсатора *3*.

Соответствующим подбором их параметров и ограничением величины нагрузки $z_р$ можно с достаточной точностью обеспечить пропорциональность и совпадение по фазе напряжения U_2, подводимого к нагрузке $z_р$, с измеряемым напряжением $U_ф$.

Во втором способе (рис. 6-17, *в*) для измерения напряжения используется зарядный ток I_C, проходящий в делителе.

Ток $I_C = \frac{U_ф}{x_{C_1} + x_{C_2}}$ и, следовательно, пропорционален первичному напряжению. Ко вторичной обмотке трансформатора тока подсоединяется реле. Ток в реле пропорционален первичному току I_C, а следовательно, и первичному напряжению $U_ф$.

В качестве емкостных делителей для отбора напряжения используются специальные конденсаторные вводы выключателей и силовых трансформаторов (рис. 6-18) или конденсаторы связи, применяемые для подключения к линии электропередачи высокочастотных постов связи и защиты.

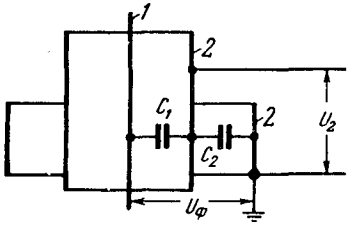


Рис. 6-18. Отбор напряжения от конденсаторного ввода выключателя.

1 — токоведущая часть ввода; *2* — обкладка из фольги.

Существенным недостатком емкостных делителей является относительно малая мощность и бóльшая, чем у трансформаторов напряжения, погрешность.

Так, например, при отборе напряжения от конденсаторных вводов (выключателей и трансформаторов) удается получить мощность порядка 15 *ва* на вводах 110 *кв* и 35 *ва* — на вводах 220 *кв* при погрешности по величине напряжения порядка ±6%, и по углу ±1°.

В случае использования конденсаторов связи удается получить мощность порядка 100—120 *ва* (на напряжении 220 *кв*) при соблюдении погрешности измерения, соответствующей первому классу точности трансформаторов напряжения. Отечественные заводы выпускают с использованием конденсаторов связи измерительные устройства типа НДЕ-500 для сетей 500 *кв*.

6-6. ФИЛЬТР НАПРЯЖЕНИЯ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Фильтр напряжения обратной последовательности является устройством (рис. 6-19), при помощи которого можно получить напряжение U_{mn}, пропорциональное составляющей обратной последовательности, содержащейся в напряжении сети:

$$U_{mn} = kU_{2\text{сети}}.$$

Составляющие прямой и нулевой последовательностей такой фильтр не пропускают. Поэтому реле, подсоединенное к выходным зажимам фильтра, реагирует только на U_2.

Для упрощения конструкции фильтр обычно включается на линейные напряжения, которые не содержат нулевой последовательности.

Наибольшее распространение получили фильтры, состоящие из активных и реактивных сопротивлений, образующих два «плеча» A и C (рис. 6-19), питающихся напряжениями U_{AB} и U_{BC}.

Сопротивления плеч фильтра (z_{A1}, z_{A2} и z_{C1}, z_{C2}) подбираются с таким расчетом, чтобы при подводе к фильтру напряжений прямой последовательности напряжение на его выходных зажимах было равно нулю:

$$U_{mn1} = 0. \qquad (6\text{-}5а)$$

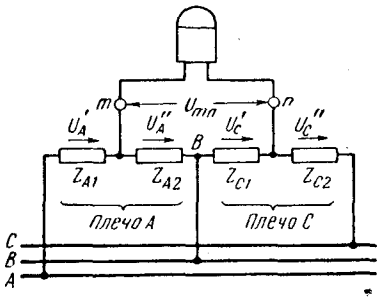


Рис. 6-19. Принципиальная схема фильтра напряжения обратной последовательности.

Рассматривая контур mBn (рис. 6-19), легко убедиться, что для выполнения условия (6-5а) напряжение U''_A должно компенсировать напряжение U'_C или, иначе говоря,

$$U''_A = -U'_C. \qquad (6\text{-}6)$$

Существует большое число сочетаний сопротивлений, образующих фильтр, удовлетворяющий условиям (6-5) и (6-6).

В схемах защиты, распространенных в СССР, чаще всего используются фильтры с активным и емкостным сопротивлениями (рис. 6-20, *а*).

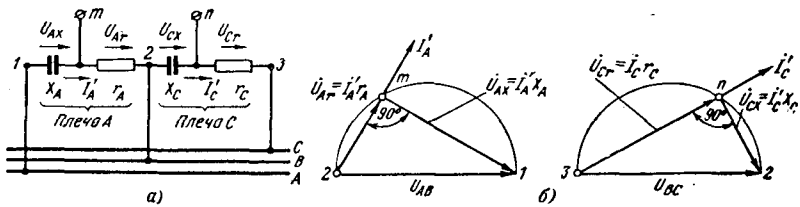


Рис. 6-20. Активно-емкостный фильтр напряжения обратной последовательности.

а — схема; *б* — векторные диаграммы напряжений в плечах A и C.

Анализ работы фильтра и выбор его параметров ведутся с помощью векторных диаграмм при разомкнутой выходной цепи фильтра.

Векторы падения напряжения в активном и емкостном сопротивлениях каждого плеча сдвинуты на 90° и равны в сумме напряжению, питающему данное плечо, т. е.

$$\dot{U}_{Ar} + \dot{U}_{Ax} = \dot{U}_{AB} \quad \text{и} \quad \dot{U}_{Cr} + \dot{U}_{Cx} = \dot{U}_{BC}.$$

Таким образом, напряжения каждого плеча образуют прямоугольный треугольник (рис. 6-20, *б*).

Векторная диаграмма фильтра при питании его напряжением прямой последовательности построена на рис. 6-21.

Показав векторы напряжений между зажимами *1*, *2* и *2*, *3*, строят падения напряжения в плечах (между *1* и *2*, *2* и *3*) так, чтобы выполнялись условия (6-5а) и (6-6), для чего точки *m* и *n* должны совпадать, как это показано на диаграмме рис. 6-21. Из полученных при этом треугольников напряжений плеч *A* и *C* следует:

$$\frac{U_{Ar1}}{U_{Ax1}}=\frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{1}{2}}=\sqrt{3} \quad \text{и}$$

$$\frac{U_{Cx1}}{U_{Cr1}}=\frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{1}{2}}=\sqrt{3}. \quad (6\text{-}7)$$

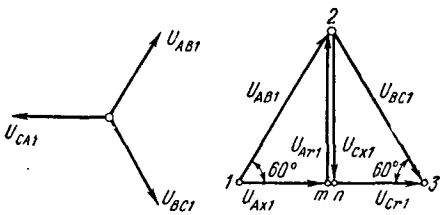


Рис. 6-21. Векторная диаграмма фильтра при подводе напряжения прямой последовательности.

Учитывая, что при разомкнутых зажимах *mn* напряжения пропорциональны сопротивлениям, находим соотношения сопротивлений соответствующих плеч, необходимые для выполнения условия (6-5а), а именно:

$$r_A=\sqrt{3}\,x_A \quad \text{и} \quad x_C=\sqrt{3}\,r_C.$$

Теперь посмотрим, что получится на выходе фильтра с выбранными параметрами, если к его зажимам *1*, *2* и *3* подвести напряжения обратной последовательности $\dot{U}_{AB2}$ и $\dot{U}_{BC2}$. Для этого строится векторная диаграмма фильтра (рис. 6-22). На ней показываются векторы напряжений $\dot{U}_{AB2}$ и $\dot{U}_{BC2}$ между зажимами *1*, *2* и *2*, *3* и векторы падений напряжения в активных и реактивных сопротивлениях плеч. На основе этого построения находятся точки, соответствующие зажимам *m* и *n*. Вектор напряжения $\dot{U}_{mn2}$ является напряжением на выходе фильтра, появляющимся при питании фильтра напряжением обратной последовательности, оно равно:

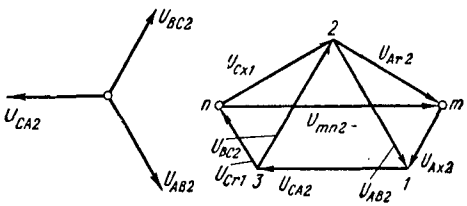


Рис. 6-22. Векторная диаграмма фильтра при подводе напряжения обратной последовательности.

$$\dot{U}_{mn2}=1{,}5\dot{U}_{CA_2}=1{,}5\sqrt{3}\,\dot{U}_{\Phi 2}e^{j30}=k\dot{U}_{\Phi 2}, \quad (6\text{-}8)$$

где $\dot{U}_{\phi 2} = \dot{U}_{CA2}/\sqrt{3}$ — составляющая обратной последовательности фазного напряжения. Это означает, что фильтр, изображенный на рис. 6-20, действительно является фильтром обратной последовательности.

Сопротивление подключаемого к фильтру реле $z_р$ подбирается с расчетом, чтобы отдаваемая фильтром мощность была максимальной. Для выполнения этого $z_р$ должно равняться сопротивлению фильтра $z_{ф.х.х}$ в режиме, когда его выходные зажимы разомкнуты

$$z_р = z_{ф.х.х}.$$

Оптимальные условия отдачи мощности имеют место, когда реактивные сопротивления фильтра и реле равны, но различны по знаку (см. § 3-8).

При трехфазных к. з. и в режиме симметричной нагрузки напряжение, питающее фильтры, содержит только составляющую прямой последовательности, и поэтому напряжение на выходе фильтра в этих случаях равно нулю или, точнее, напряжению небаланса.

Напряжение небаланса возникает из-за неточности подбора сопротивлений плеч, а также из-за наличия некоторой несимметрии напряжения, питающего фильтр, и при отклонении частоты этого напряжения от номинального значения 50 *гц*. В последнем случае изменится сопротивление конденсаторов x_C и произойдет нарушение заданных соотношений между x_C и r, включенных в плечи фильтра.

Если в рассмотренном фильтре переставить местами напряжения U_C и U_B, то при питании фильтра напряжением обратной последовательности выходное напряжение U_{mn} будет равно нулю, а при питании его напряжением прямой последовательности на зажимах появится напряжение, пропорциональное U_1. Таким образом, рассмотренная схема превратится в фильтр прямой последовательности. Этот вывод нетрудно подтвердить, построив векторные диаграммы фильтра для указанных случаев.

Глава седьмая

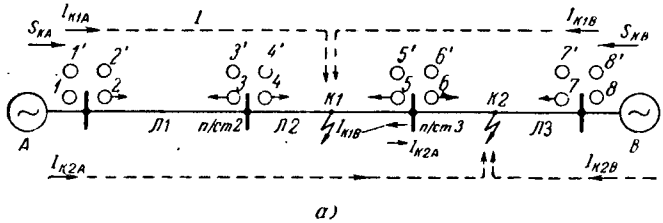
ТОКОВАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА

7-1. НЕОБХОДИМОСТЬ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ В СЕТЯХ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

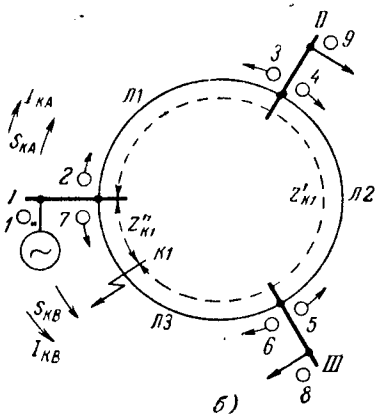
Направленной называется защита, действующая только при определенном направлении (знаке) мощности к. з. Необходимость в применении направленных защит возникает в сетях с двусторонним питанием. Защита в этих сетях должна не только реагировать на появление тока к. з., но для обеспечения селективности должна также учитывать направление мощности к. з. в защищаемой

линии (или, иначе говоря, фазу тока в линии относительно напряжения на шинах).

В сетях с двусторонним питанием (рис. 7-1, *а*) и кольцевых сетях (рис. 7-1, *б*) направление тока и мощности к. з. зависит от места возникновения повреждения и может иметь два противоположных значения. Например, как следует из рис. 7-1, *а*, при к. з. на линии *Л2* в точке *К1* через защиту *5* проходит ток $I_{К1В}$ от источника питания *В* к точке к. з.



а)



б)

Рис. 7-1. Схемы сети с двусторонним питанием и размещение защит в этих сетях.

а — радиальные сети; *б* — кольцевые сети; ↑ — токовая направленная защита (стрелка указывает направление мощности, при которой защита действует на отключение).

При к. з. в точке *К2* на линии *Л3* ток $I_{К2А}$, проходящий по линии *Л2* через защиту *5*, направлен от источника *А* и противоположен $I_{К1В}$.

Если принять, что в первом случае $I_{К1}$ (рис. 7-2) отстает от напряжения $U_ш$ на шинах подстанции *3* на угол $\varphi_{К1}$, а мощность к. з. (активная *P* и реактивная *Q*) положительна и направлена от шин в линию, то во втором случае ток $I_{К2}$ сдвинут на 180° относительно $I_{К1}$, а соответствующая этому мощность к. з. (как это видно из рис. 7-2) отрицательна и поэтому направлена из линии к шинам. Таким образом, направление мощности к. з., проходящей по линии, характеризует, где возникло повреждение: на защищаемой линии или на других присоединениях, отходящих от шин данной подстанции.

Это обстоятельство используется в направленной защите, которая по знаку мощности определяет, на каком присоединении возникло повреждение, и действует только при к. з. на защищаемом участке.

Простая токовая защита, не реагирующая на знак мощности, действует как при к. з. на защищаемой линии, так и при повреждениях на других присоединениях, отходящих от шин подстанции, питающей защищаемую линию. Поэтому получить селективное отключение к. з. в сетях с двусторонним питанием с помощью простой токовой защиты, как правило, невозможно.

Действительно, предположим, что в сети на рис. 7-1, *а* установлены максимальные токовые защиты, и рассмотрим действие какой-либо из них, например защиты *5′*. При к. з. в точке *К1* выдержка времени защиты *5′* должна быть меньше времени действия защит *6′*, *7′* и *8′*, т. е. $t_{5'} < t_{6'}$, $t_{7'}$ и $t_{8'}$. В случае же к. з. в точке *К2* защита *5′* должна действовать медленнее защиты *6′* ($t_{5'} > t_{6'}$). Одновременное выполнение обоих требований невозможно. Выполнение же только одного из двух требований приведет к неселективной работе защиты.

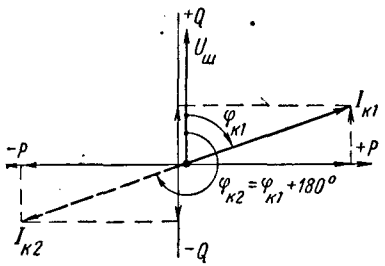


Рис. 7-2. Векторная диаграмма токов и напряжения в месте установки защиты *5* (рис. 7-1, *а*) при к. з. в точках *К1* и *К2*.

Так, при выполнении первого требования (т. е. при $t_{5'} < t_{6'}$, $t_{5'} < t_{7'}$, $t_{5'} < t_{8'}$) максимальная защита *5′* будет действовать *неселективно при к. з. на линии Л3*.

Эту неселективность можно устранить, заменив максимальную защиту *5′* направленной защитой *5*, действующей только при направлении мощности к. з. от шин в линию. В этом случае защита *5* не будет действовать при к. з. на *Л3* и поэтому второе требование ($t_5 > t_6$) отпадает. При аналогичном выполнении всех остальных защит сети селективное отключение повреждений становится возможным при выборе выдержек времени защит, действующих в одном направлении, по ступенчатому принципу.

На основании изложенного можно сформулировать следующие принципы выполнения селективной защиты в сетях с двусторонним питанием:

1. Защита должна устанавливаться с обеих сторон каждой линии и действовать при направлении мощности от шин в линию.

2. Выдержки времени на защитах, работающих при одном направлении мощности (от генератора *А* или генератора *В*), должны согласовываться между собой по ступенчатому принципу, нарастая по направлению к источнику питания, от тока которого действуют рассматриваемые защиты (см. § 7-6).

7-2. СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ

Максимальная направленная защита должна реагировать на величину тока и направление мощности при к. з. Она представляет собой максимальную токовую защиту дополненную реле направления мощности. Схема защиты, упрощенно показанная для одной фазы (рис. 7-3), состоит из трех основных элементов (называемых иногда органами защиты):

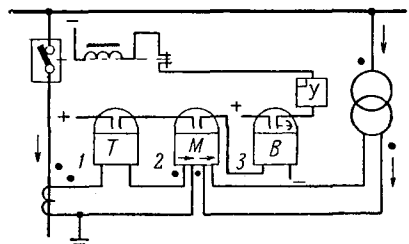


Рис. 7-3. Упрощенная схема максимальной направленной защиты (стрелки указывают положительные направления токов).

токового реле *1*, реагирующего на появление к. з. (пусковой орган защиты); реле направления мощности *2*, определяющего направление мощности к. з. (орган направления), и реле времени *3* (орган времени).

В качестве реле направления мощности могут служить электромеханические реле (§ 2-12) или реле на полупроводниках (§ 2-14, б). Поведение этих реле зависит от знака подведенной к их зажимам мощности:

$$S_р = U_р I_р \sin(\alpha - \varphi_р), \qquad (7\text{-}1)$$

где угол α имеет постоянную величину, равную 0, 90° или α_1° ($90^\circ > \alpha_1 > 0$).

При к. з. на защищаемой линии или на следующих за ней участках токовые реле и реле направления мощности замыкают свои контакты и приводят в действие реле времени. Через установленную выдержку времени его контакты замыкаются, подавая импульс на отключение выключателя. При к. з. на других присоединениях, отходящих от данной подстанции, мощность к. з. направлена к шинам, поэтому контакты реле мощности размыкаются, не позволяя защите действовать на отключение.

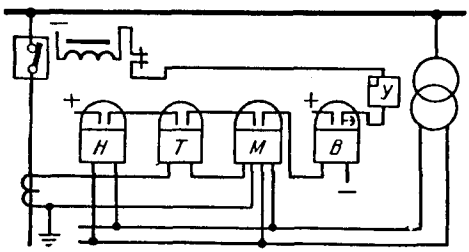


Рис. 7-4. Упрощенная схема максимальной направленной защиты с блокировкой минимального напряжения.

В нормальном режиме при направлении мощности нагрузки от шин в линию реле направления мощности могут замыкать свои контакты, однако срабатывание защиты в этом случае предотвра-

щается пусковым реле, контакты которого остаются разомкнутыми. С этой целью пусковые реле отстраиваются от тока нагрузки. В тех случаях, когда по условию чувствительности при к. з. токовые реле не удается отстроить от максимальной нагрузки, применяется блокировка от реле минимального напряжения. Упрощенная схема максимальной направленной защиты с блокировкой минимального напряжения, приведенная на рис. 7-4, аналогична рассмотренной в § 4-6 схеме максимальной токовой защиты.

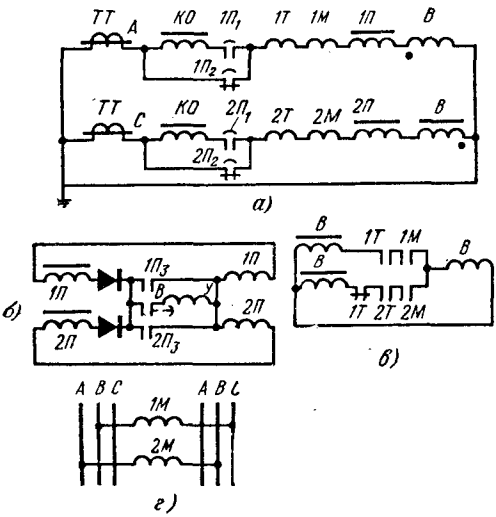


Рис. 7-5. Схема токовой направленной защиты на переменном оперативном токе.

а — токовые цепи и цепи отключения защиты; *б* — цепи промежуточных реле *П*; *в* — цепи реле времени *В*; *г* — цепи напряжения.

В сетях с изолированной нейтралью максимальная направленная защита устанавливается на двух одноименных фазах во всей сети. В сетях с глухозаземленной нейтралью защита устанавливается на трех фазах, если же защита служит для действия только при междуфазных повреждениях, то она устанавливается на двух фазах.

Токовые направленные защиты выполняются как на постоянном, так и на переменном оперативном токе. Двухфазная схема на переменном оперативном токе представлена на рис. 7-5.

Она выполнена с дешунтированием катушки отключения, с токовым реле времени *В* и промежуточными реле *1П* и *2П* с мощными переключающими контактами.

При нарушении цепей напряжения одной или двух фаз, питающих реле направления мощности, защита может при к. з. подействовать неправильно. Поэтому для своевременного выявления повреждения цепей напряжения необходимо иметь устройства, контролирующие их исправность (см. § 6-4).

7-3. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

а) Требования к схемам

Реле направления мощности включаются, как правило, на фазный ток и фазное или междуфазное напряжение. Сочетание фаз тока и напряжения питающих реле, называемое схемой его включения, должно быть таким, чтобы реле правильно определяло знак

мощности к. з. при всех возможных случаях и видах повреждений и чтобы к нему подводилась наибольшая мощность $S_р$.

Таблица 7-1

90-градусная схема включения			30-градусная схема включения		
Реле	$I_р$	$U_р$	Реле	$I_р$	$U_р$
I	I_A	U_{BC}	I	I_A	U_{AC}
II	I_B	U_{CA}	II	I_B	U_{BA}
III	I_C	U_{AB}	III	I_C	U_{CB}

Мощность $S_р$, как это следует из формулы (7-1), может иметь недостаточную для действия реле величину при к. з., близких к месту установки реле, за счет снижения напряжения $U_р$ или при неблагоприятном значении угла $\varphi_р$, при котором $\sin(\alpha - \varphi_р)$ равен или близок к нулю. Отсюда следует, что, во-первых, реле должно включаться на такое напряжение, которое при близких к. з. не снижается до нуля, и, во-вторых, напряжение и ток, подводимые к реле, должны подбираться так, чтобы угол сдвига между ними $\varphi_р$ в условиях к. з. не достигал значений, при которых мощность на зажимах реле приближается к нулю.

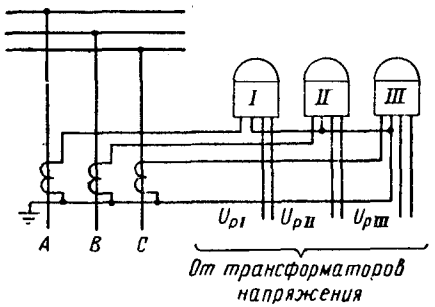


Рис. 7-6. Схема включения реле направления мощности.

Следует отметить, что первое требование выполнимо только при двухфазных и однофазных к. з., в случае же трехфазного к. з. все фазные и междуфазные напряжения могут снижаться до нуля.

В современных схемах максимальных направленных защит применяется включение реле направления мощности по так называемым 90-градусной и иногда 30-градусной схемам. Соответствующие указанным схемам сочетания токов и напряжений приведены в табл. 7-1 применительно к схеме включения реле на рис. 7-6.

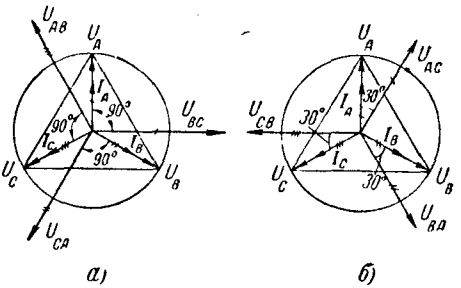


Рис. 7-7. Векторные диаграммы токов и напряжений, подводимых к реле направления мощности.

а — при 90-градусной схеме; *б* — при 30-градусной схеме.

Названия схем 90-градусная, 30-градусная и т. п. носят условный характер. Схемы именуются по углам $\varphi_р$ между током и напряжением, подведенными к реле в симметричном трехфазном режиме при условии, что токи в фазах совпадают с одноименными фазными напря-

жениями (рис. 7-7). Свойства каждой схемы могут быть выявлены анализом работы реле мощности, включенного по той или иной схеме, при к. з.

б) 90-градусная схема

В качестве примера ниже рассмотрена работа реле направления мощности типа РБМ-171 с углом максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч} = -30°$, включенного по 90-градусной схеме. Угол внутреннего сдвига этого реле $\alpha = 90° + \varphi_{м.ч} = 90-30 = 60°$ (см. § 2-12, б).

Момент такого реле $M = kU_р I_р \cos(\varphi_р + 30)$.

Анализ ведется графическим методом для реле, включенного на ток $I_р = I_A$ и напряжение $U_р = U_{BC}$.

На рис. 7-8 изображена векторная диаграмма напряжений и тока I_A при трехфазном к. з. на линии. Ток I_A отстает от напряжения U_A на угол $\varphi_к$, определяемый соотношением активного и реактивного сопротивлений линии от шин до точки к. з. и влиянием активного сопротивления дуги, возникающей в месте повреждения. Соответственно этому вектор I_A имеет два предельных положения. Одно I'_A — при к. з. за чисто реактивным сопротивлением, когда $\varphi_к = 90°$, и второе I''_A — при к. з. через дугу в начале линии, когда $\varphi_к = 0$.

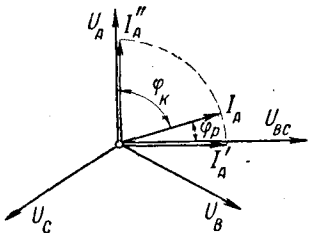


Рис. 7-8. Векторная диаграмма напряжений и тока фазы A при трехфазном к. з. на линии.

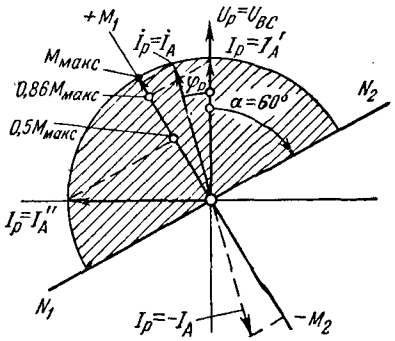


Рис. 7-9. Векторная диаграмма токов и напряжений на зажимах реле и линии моментов реле направления мощности $M_{вр} = k$, $U_р I_р \sin(60° - \varphi_р)$. Зона положительных моментов заштрихована.

На основе полученной векторной диаграммы можно установить, что угол сдвига между напряжением и током на зажимах реле, т. е. между U_{BC} и I_A, $\varphi_р = \varphi_к - 90°$, а его предельные значения колеблются в зависимости от $\varphi_к$ от 0 до 90°.

По найденным значениям $\varphi_р$ определяются знак и относительная величина момента реле. С этой целью строится диаграмма тока и напряжения на зажимах реле для рассмотренного случая к. з. (рис. 7-9). На ней относительно вектора напряжения $U_р$ наносится линия изменения знака момента N_1N_2 и линия максимального момента M_1M_2 для данного типа реле. Проекция тока I_A на линию максимального момента, равная $I_A \sin(\alpha - \varphi_р)$, наглядно характеризует величину и знак момента.

При к. з. в зоне проекция тока I_A имеет положительный знак, а в случае к. з. вне зоны — отрицательный, так как при этом фаза тока I_A меняется на 180°. Величина момента достигает своего максимума $M_{макс}$ при $\varphi_р = -30°$ (чему соот-

ветствует $\varphi_к = 60°$). При изменении $\varphi_р$ в сторону уменьшения от —30 до 0° момент снижается от $M_{макс}$ до 0,86 $M_{макс}$, а при увеличении $\varphi_р$ до —90° момент уменьшается до 0,5 $M_{макс}$.

Из приведенных результатов следует, что поведение реле при трехфазных к. з. в зоне и вне зоны будет правильным и величина момента вполне достаточной для действия реле.

Указанные выводы могут быть получены и аналитически путем рассмотрения значений $\sin(\alpha - \varphi_р)$ при указанных выше величинах $\varphi_р$.

С точки зрения величины $U_р$ при трехфазных к. з. схема обеспечивает максимально возможное значение напряжения на зажимах реле, поскольку реле питается линейным, а не фазным напряжением.

Построив аналогичным образом диаграммы для токов и напряжений при однофазных и двухфазных к. з. и определив предельные значения $\varphi_к$ и $\varphi_р$, можно проанализировать работу реле при данной схеме включения и для этих видов повреждений.

Подобным анализом можно выяснить наиболее выгодные углы внутреннего сдвига реле α. Так, если положить $\alpha = 90°$, то рассматриваемое реле станет косинусным. При включении его по 90-градусной схеме линия изменения знака момента N_1N_2 расположится перпендикулярно вектору $U_р = U_{BC}$, а линия максимальных моментов будет совпадать с $U_р$ (рис. 7-10). Из диаграммы на рис. 7-10 видно, что при $\varphi_к = 0$ момент реле равен нулю, поэтому косинусные реле не следует включать по 90-градусной схеме.

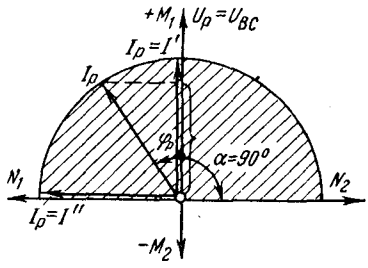


Рис. 7-10. Линия моментов реле направления мощности $M_{вр} = U_р I_р \cos\varphi_р$. Зона положительных моментов заштрихована.

Исследования показывают, что 90-градусная схема оказывается наиболее выгодной для реле направления мощности с углом α от 30 до 60°. Оптимальные условия имеют место при $\alpha = 45°$.

Теоретический анализ и практический опыт позволяют сделать следующие общие выводы о включении реле смешанного типа с $\varphi_{м.ч} = -30°$ и —45° по 90-градусной схеме:

1) Знак момента реле при всех видах к. з. в зоне положителен, а при повреждениях вне зоны — отрицателен.

2) Величина момента $M_э$ в диапазоне возможных изменений угла $\varphi_р$ остается значительной и достаточной для действия реле.

3) Напряжение $U_р$ при симметричных к. з. имеет максимально возможное значение, обеспечивающее минимальную величину мертвой зоны.

Недостатком 90-градусной схемы является возможность неправильной работы однофазных реле мощности при к. з. за силовым трансформатором с соединением обмоток звезда — треугольник [Л. 23]. В случае двухфазного к. з. на стороне звезды через электрическую дугу с большим сопротивлением может неправильно выбрать направление мощности одно из реле, установленных со стороны треугольника. Трехфазные реле мощности в подобных случаях действуют правильно. Однако сочетания опасных условий настолько редки, что в практике эксплуатации указанный недостаток не проявляется. Поэтому 90-градусная схема в настоящее

время считается лучшей и рекомендуется как типовая для реле направления мощности смешанного типа.

Тридцатиградусная схема включения может использоваться для реле косинусного типа. Реле, включенные по этой схеме, ведут себя правильно при всех видах к. з. Недостатком 30-градусной двухфазной схемы является возможность отказа в действии реле при двухфазных к. з. из-за недостаточной величины напряжения. Ввиду этого для двухфазных защит 30-градусная схема не применяется. Включенные по 30-градусной схеме реле направления мощности могут работать неправильно в случае к. з. за трансформатором с соединением обмоток звезда — треугольник с той же степенью вероятности, что и при 90-градусной схеме включения.

7-4. ПОВЕДЕНИЕ РЕЛЕ МОЩНОСТИ, ВКЛЮЧЕННЫХ НА ТОК НЕПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ

а) Токи в неповрежденных фазах

При двухфазных к. з. на линии, питающей нагрузку, в неповрежденной фазе проходит ток нагрузки $I_н$.

В сетях с глухозаземленной нейтралью при замыканиях на землю (двухфазных и однофазных) в неповрежденных фазах появляется, кроме тока нагрузки $I_н$, еще некоторая доля тока к. з. $I_к$. Ее величина определяется расчетом и равна части тока нулевой последовательности I_0, возникающего в месте к. з.

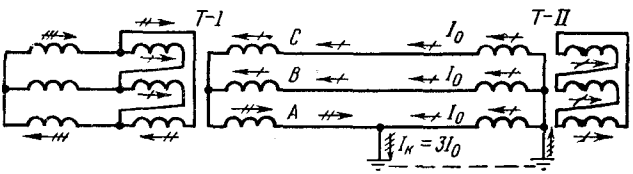


Рис. 7-11. Пути прохождения тока к. з. в сети с заземленной нейтралью.

Таким образом, при замыканиях на землю полный ток в неповрежденной фазе равен:

$$\dot{I}_{н.ф} = \dot{I}_н + k\dot{I}_к,$$

где k — коэффициент, учитывающий долю тока $I_к$, замыкающегося по неповрежденной фазе ($k < 1$).

На рис. 7-11 на частном примере показана причина появления тока к. з. в неповрежденных фазах. При однофазном замыкании ток к. з., замыкаясь через место повреждения и землю, притекает к нулевой точке трансформатора *T-II*. Здесь он разветвляется по всем трем фазам трансформатора *T-II* и, замыкаясь через обмотки трансформатора *T-I*, возвращается к месту повреждения. В приве-

денном случае токи к. з., замыкающиеся через неповрежденные фазы B и C, равны 1/3 тока $I_к$, проходящего в месте повреждения, поэтому $k = 1/3$ или $kI_к = I_0$.

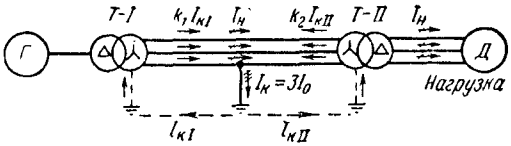


Рис. 7-12. Наложение токов повреждений на токи нагрузки в неповрежденных фазах.

При наличии заземленных трансформаторов с обеих сторон линии (рис. 7-12) в неповрежденных фазах появляется ток к. з. $kI_к$, ответвляющийся в них через нулевые точки трансформаторов T-I и T-II. Этот ток равен $k_1I_{кI} - k_{II}I_{кII}$.

б) Влияние тока в неповрежденных фазах на реле

Анализ и опыт показывают, что ток нагрузки $I_н$ и составляющая тока повреждения $kI_к = k3I_0$, ответвляющаяся в неповрежденные фазы, могут создать момент на реле, противоположный по знаку моменту реле поврежденных фаз.

Поэтому реле направления мощности, включенные на ток неповрежденных фаз, могут действовать неправильно. Например, если при к. з. на линии $ЛIII$ (рис. 7-13) направление мощности в фазах линии $ЛI$ будет соответствовать показанному на рисунке, то реле направления мощности, установленные на неповрежденных фазах B и C линии $ЛI$, замкнут свои контакты и разрешат защите отключить неповрежденную линию.

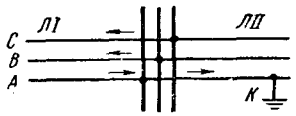


Рис. 7-13. Направление токов в поврежденных и неповрежденных фазах. При к. з. возможно неправильное действие направленной защиты линии $ЛI$ под влиянием токов нагрузки.

Трехфазное реле мощности под действием элементов, питающихся током неповрежденных фаз, может также работать неправильно. Результирующий момент этого реле:

$$M_р = M_A + M_B + M_C.$$

Если при повреждении на одной фазе A (рис. 7-13) моменты M_B и M_C от токов неповрежденных фаз будут противоположны моменту M_A и превзойдут его в сумме $(M_B + M_C) > M_A$, то реле на линии $ЛI$ подействуют неправильно.

в) Пофазный пуск

Неправильное действие реле мощности неповрежденных фаз предотвращается применением пофазного пуска. Принцип пофазного пуска состоит в том, что пусковые реле разрешают замыкать

цепь на отключение только реле мощности, включенным на токи поврежденных фаз.

В схемах с однофазными реле мощности пофазный пуск принято выполнять подачей оперативного тока к реле мощности от пускового реле, включенного на тот же ток (рис. 7-14).

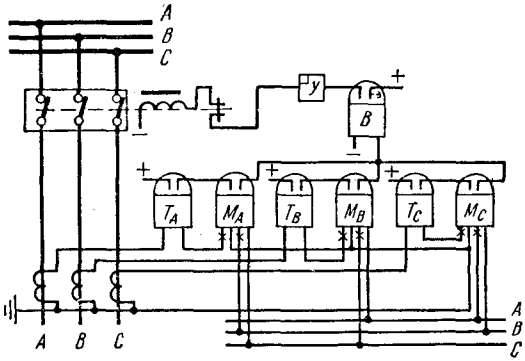


Рис. 7-14. Схема максимальной направленной защиты с пофазным пуском при однофазных реле направления мощности.

В защитах с трехфазными реле мощности пофазный пуск осуществляется подводом напряжения к элементам реле мощности через контакты пусковых реле (рис. 7-15). В момент к. з. пусковое

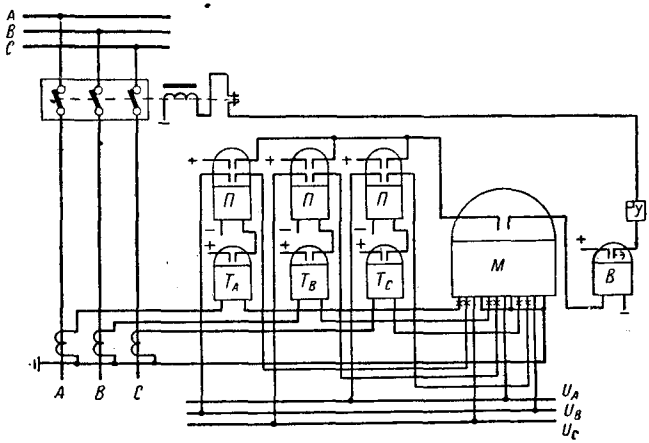


Рис. 7-15. Схема максимальной направленной защиты с пофазным пуском при трехфазном реле направления мощности.

реле, включенное на ток неповрежденной фазы, не действует, поэтому включенный на этот же ток элемент мощности не получает напряжения и не участвует в создании момента на оси реле. Такой

способ пофазного пуска может применяться и в схемах с однофазными реле. При пофазном пуске пусковые реле неповрежденных фаз не должны действовать; для этого их ток срабатывания отстраивается от токов, возникающих в неповрежденных фазах при к. з., т. е. $I_{с.р} > I_{н.ф}$.

В сети с глухозаземленной нулевой точкой при к. з. на землю ток $I_{н.ф}$ может оказаться значительным за счет большой величины тока повреждения $kI_к$. Это приводит к необходимости загрубления защиты.

7-5. БЛОКИРОВКА МАКСИМАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

Для отключения однофазных к. з. обычно применяются защиты, реагирующие на токи и напряжения нулевой последовательности. Поэтому максимальная направленная защита, включаемая на фазные токи, часто используется только в качестве защиты от междуфазных замыканий. В связи с этим при к. з. на землю защита блокируется (т. е. автоматически выводится из действия) посредством

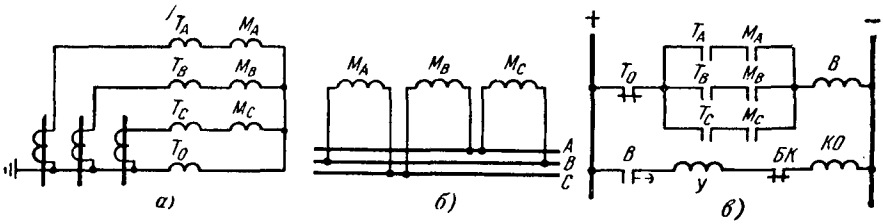


Рис. 7-16. Развернутая схема максимальной направленной защиты с блокировкой при замыкании на землю.

а — цепи тока; *б* — цепи напряжения; *в* — цепи постоянного тока; *Т* — пусковые токовые реле; T_0 — блокирующее токовое реле; *М* — реле направления мощности; *В* — реле времени; *У* — сигнальное реле; *КО* — отключающая катушка и *БК* — блокировочный контакт выключателя.

токового реле T_0. Реле T_0 включается в нулевой провод трансформаторов тока, соединенных в звезду, и при замыканиях на землю срабатывает и снимает плюс с защиты, лишая ее возможности действовать на отключение (рис. 7-16).

Пофазный пуск в таких схемах сохраняется для исключения из работы реле мощности неповрежденной фазы при двухфазных к. з. При наличии блокировки при замыканиях на землю ток срабатывания пусковых реле выбирается из условия отстройки от тока нагрузки $I_н$, проходящего в неповрежденной фазе во время двухфазных к. з. Необходимость в учете тока повреждения отпадает, благодаря чему повышается чувствительность защиты и упрощается выбор тока срабатывания пусковых реле.

7-6. ВЫБОР УСТАВОК ЗАЩИТЫ

а) Ток срабатывания пусковых реле

Для предотвращения неправильной работы защиты ток срабатывания пусковых реле необходимо отстроить от токов нагрузки с учетом самозапуска двигателей в послеаварийном режиме (т. е. после отключения внешнего к. з.) и от токов повреждения, возникающих в неповрежденных фазах при к. з. на землю в сети с глухозаземленной нейтралью.

Выбор тока срабатывания $I_{с.з}$ по первому условию производится так же, как и для максимальной защиты, на основе соображений, изложенных в § 4-5, по формуле

$$I_{с.з} = \frac{k_{зап} k_з I_{н.макс}}{k_{воз}}. \qquad (7\text{-}2)$$

Максимальное значение тока $I_{н.макс}$ следует определять исходя из наиболее тяжелых, но возможных в эксплуатации режимов. В кольцевых сетях и радиальных с двусторонним питанием (рис. 7-1, *а* и *б*) максимальные нагрузки на линиях возникают при размыкании сети. Например, в случае отключения линии $Л_3$ в сети, показанной на рис. 7-1, *б*, ток нагрузки на линии $Л_1$ достигает максимального значения.

Для повышения чувствительности защиты в отдельных случаях можно не считаться с максимальной нагрузкой, направленной к шинам подстанции, так как при этом реле мощности не позволяет защите действовать на отключение. Однако при этом нужно учитывать возможность неправильного действия защиты при нарушении ее цепи напряжения.

В этом случае фазы напряжений, подводимых к защите, искажаются и поэтому реле мощности может замкнуть свои контакты, разрешая подействовать защите при направлении мощности к шинам подстанции.

По второму условию ток срабатывания защиты находится по выражению

$$I_{с.з} = k_н I_{н.ф}, \qquad (7\text{-}3)$$

где $I_{н.ф} = I_н + kI_к$ (§ 7-4), а коэффициент надежности $k_н$ в зависимости от точности оценки величины $I_{н.ф}$ принимается равным 1,15—1,3.

За окончательное значение $I_{с.з}$ принимается большая величина, полученная по выражениям (7-2) и (7-3).

Для защит в сети с малым током замыкания на землю (где $I_{н.ф} = I_н$) и для защит в сети с глухозаземленной нейтралью, блокируемых при замыканиях на землю, ток срабатывания пусковых реле выбирается только по первому условию, т. е. по формуле (7-2).

Для обеспечения селективности чувствительность защит, действующих в одном направлении, необходимо согласовывать так,

чтобы токи срабатывания нарастали при обходе защит против направления их действия.

Такое согласование предотвращает неселективную работу защиты при токах к. з., близких по своему значению к токам срабатывания защит. Сказанное иллюстрируется рис. 7-1, *б*. При к. з. вблизи питающих шин в точке *К1* соотношение токов к. з. I_{KA} и I_{KB} обратно пропорционально сопротивлениям z'_{K1} и z''_{K1}, т. е.

$$\frac{I_{KA}}{I_{KB}}=\frac{z''_{K1}}{z'_{K1}}.$$

Чем ближе точка *К1* к шинам питающей подстанции, тем меньше ток I_{KA}.

Если ток I_{KA} окажется меньше $I_{с.з\,6}$ защиты *6*, то последняя не будет действовать до тех пор, пока линия не отключится со стороны питающей подстанции защитой *7*. После этого ток I_{KA} возрастет и защита *6* придет в действие. Такое поочередное отключение линии сначала с одного, а потом с другого конца называется к а с к а д н ы м.

В случае несогласованности защит по чувствительности, например, если защита *4* чувствительнее защиты *6*, а ток к. з. $I_{KA} < I_{с.з6}$, но больше $I_{с.з4}$, защита *4* сработает неселективно, раньше чем произойдет отключение линии $Л_3$ со стороны питающей подстанции, и подстанция *III* лишится напряжения.

Таким образом, в показанной на рис. 7-1, *б* сети токи срабатывания защит должны удовлетворять условию

$$I_{с.з6} < I_{с.з4} < I_{с.з2} < I_{с.з1}, \qquad (7\text{-}4)$$

а для защит, действующих при обратном направлении мощности,

$$I_{с.з3} < I_{с.з5} < I_{с.з7} < I_{с.з1}. \qquad (7\text{-}5)$$

Разница в величине тока срабатывания двух смежных защит обычно принимается около 10%.

В схемах с блокировкой по напряжению напряжение срабатывания реле минимального напряжения выбирается по (4-15).

Чувствительность пусковых реле при к. з. проверяется, так же как и чувствительность максимальной защиты, по (4-6).

б) Выдержка времени защиты

Выдержка времени выбирается из условия селективности. Для этой цели согласуются выдержки времени защит, действующих в одном и том же направлении, которые по этому признаку делятся на две группы (рис. 7-17):

1) защиты $А_1$, $А_3$, $А_5$ и $А_7$, действующие при направлении мощности к. з. по стрелке *А* (от источника *А*);

2) защиты $Б_2$, $Б_4$, $Б_6$ и $Б_8$, действующие при обратном направлении мощности к. з. (от источника *Б*).

Их выдержки времени должны удовлетворять условиям (7-1) и (7-2). В соответствии с этими условиями необходимо обеспечить: $t_{A7} \leqslant t_{A5} < t_{A3} < t_{A1}$ и

$$t_{Б2} < t_{Б4} < t_{Б6} < t_{Б8}.$$

Обозначая через Δt ступень времени между двумя смежными защитами, покажем графически согласование времени действия защит (рис. 7-17).

Рассматривая диаграмму выдержек времени на рис. 7-17, можно заметить, что направленность действия требуется не для всех защит. Например, выдержка времени защиты $А_3$ больше, чем защиты $Б_2$; следовательно, селективность защиты $А_3$ при направлении мощности к. з. к шинам может быть обеспечена без органа направления. То же самое относится и к защите $Б_6$. Отсюда вытекает общее правило, что орган направления должен устанавливаться на тех защитах, у которых при направлении мощности к. з. к шинам нельзя обеспечить селективность посредством выдержки времени. В тех же случаях, когда при направлении мощности к. з. к шинам селективность удается обеспечить при помощи выдержки времени, можно применять максимальную токовую защиту. Для выяснения, в каких именно точках сети можно установить ненаправленные защиты, нужно сначала выбрать выдержки времени по встречно-ступенчатому принципу.

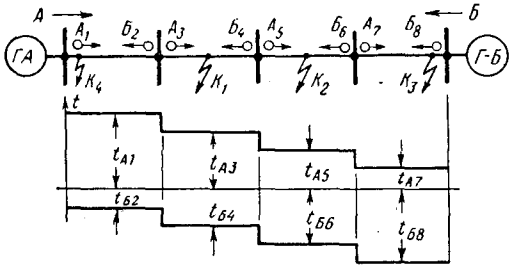


Рис. 7-17. Ступенчатый принцип выбора выдержки времени.

Защита должна согласовываться по времени не только с защитами, установленными на транзитных линиях кольцевой или радиальной сети, но также с защитами других присоединений, отходящих от шин противоположной подстанции. Так, например, защита *4* на рис. 7-1, *б* должна иметь выдержку времени, согласованную с защитой *6* и защитой *8*. Выдержка времени t_4 выбирается на ступень выше той защиты, у которой время действия больше. Если $t_8 > t_6$, то $t_4 = t_8 + \Delta t$.

7-7. МЕРТВАЯ ЗОНА

Выше указывалось на возможность отказа в действии реле мощности при к. з. вблизи места установки защиты вследствие недостаточной величины напряжения (рис. 7-18). *Участок линии т при к. з., в пределах которого реле мощности не работает из-за того,*

что мощность на его зажимах оказывается меньше мощности срабатывания, называется мертвой зоной.

Для характеристики чувствительности защиты важно знать протяженность мертвой зоны m. Подсчет мертвой зоны ведется для металлического трехфазного к. з. на границе мертвой зоны в точке M, где мощность на зажимах реле $S_р = S_{с.р}$. Зная выражение и величину $S_{с.р}$ и вычислив ток в реле $I_р$ (для упрощения этот ток заменяется током при к. з. в начале линии), можно определить наименьшее значение $U_р$, необходимое для срабатывания реле (т. е. найти $U_{с.р}$ при заданном $S_{с.р}$ и вычисленном $I_р$). По найденному $U_{с.р}$ определяется расстояние m (рис. 7-18).

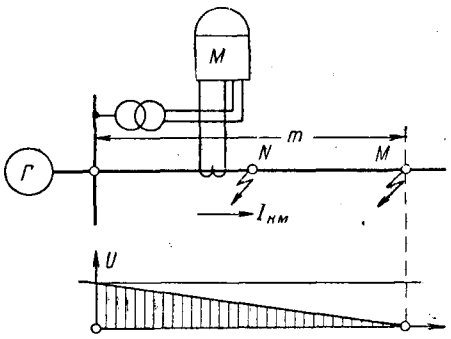


Рис. 7-18. «Мертвая зона» реле направления мощности.

Рассмотрим в качестве примера порядок вычисления мертвой зоны для реле мощности, имеющего:

$$S_{с.р} = U_р I_р \sin(\alpha - \varphi_р). \qquad (7\text{-}6)$$

При к. з. на границе мертвой зоны в точке M (рис. 7-18)

$$U_р = U_{с.р} = \frac{S_{с.р}}{I_р \sin(\alpha - \varphi_р)}. \qquad (7\text{-}7)$$

Для вычисления $U_{с.р}$

а) определяют $S_{с.р}$, пользуясь лабораторными испытаниями или заводскими данными;

б) вычисляют ток в реле при трехфазном к. з. в самом начале линии (точка N), тогда

$$I_р = \frac{I^{(3)}_{кN}}{n_т};$$

в) вычисляют $\sin(\alpha - \varphi_р)$, для чего сначала находят $\varphi_к = \operatorname{arctg}(x_у/r_у)$, здесь $x_у$ и $r_у$ — удельные сопротивления данной линии; зная $\varphi_к$ и схему включения реле, можно найти $\varphi_р$, например: для 90-градусной схемы $\varphi_р = \varphi_к - 90$; зная угол внутреннего сдвига α, можно найти $\sin(\alpha - \varphi_р)$;

г) подставляют в выражение (7-7) $S_{с.р}$, $I_р$ и $\sin(\alpha - \varphi_р)$ и находят $U_{с.р}$.

После этого вычисляют первичное фазное напряжение $U_{ф1}$, необходимое для срабатывания реле.

Если реле включено на фазное напряжение, то $U_{ф1} = U_{с.р} n_н$, где $n_н$ — коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

При включении на линейное напряжение $U_{ф1} = U_{с.р}/\sqrt{3}$.

Определяют величину сопротивления z_m участка m, в котором падение напряжения от тока $I_{кN}$ равно $U_{ф1}$:

$$z_m = \frac{U_{ф1}}{I_{kN}}.$$

Определяют длину мертвой зоны $m = z_m/z_y$ (*км*), где z_y — удельное сопротивление 1 *км* линии:

$$z_y = \sqrt{x_y^2 + r_y^2}.$$

Мертвая зона является недостатком защиты. Однако опыт эксплуатации показывает, что в случае применения чувствительных реле отказ последних из-за мертвой зоны крайне редок вследствие малого значения m.

7-8. ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ОТСЕЧКИ

Токовые направленные отсечки основаны на том же принципе, что и токовые ненаправленные отсечки (см. гл. 5).

Реле направления мощности в схеме отсечки не позволяет ей действовать при мощности к. з., направленной к шинам. Следовательно, отстройка тока срабатывания направленной отсечки ведется только от токов к. з., направленных от шин подстанции. В этом заключается принципиальное отличие направленной отсечки от ненаправленной.

Направленная отсечка применяется в сети с двусторонним питанием, когда токовая отсечка оказывается слишком грубой из-за необходимости отстройки ее от тока к. з., притекающего с противоположного конца защищаемой линии к шинам подстанции, где установлена отсечка.

Ток срабатывания у направленной отсечки меньше, чем у ненаправленной; поэтому зона действия у первой отсечки значительно больше, чем у второй.

Вследствие наличия мертвой зоны у реле мощности направленная отсечка должна применяться только в тех случаях, когда простая отсечка не удовлетворяет условию чувствительности. Схема мгновенной направленной отсечки отличается от схемы направленных токовых защит (рис. 7-4) только отсутствием реле времени.

Направленные отсечки выполняются мгновенными и с выдержкой времени. Выбор тока срабатывания производится, как и у простой токовой отсечки, по выражению (5-2) (см. § 5-5) с тем отличием, что направленную отсечку не требуется отстраивать от к. з. за шинами данной подстанции, так как в этом случае мощность направлена к шинам и отсечка блокируется реле мощности. Направленные отсечки реагируют на токи качаний. Поэтому их следует отстраивать от токов при качаниях, как это было показано в § 5-5, или снабжать блокировкой от качаний, если отстройка от токов качания вызывает недопустимое загрубление отсечки.

В ряде случаев оказывается возможным применять трехступенчатые направленные защиты, состоящие из мгновенной отсечки, отсечки с выдержкой времени и чувствительной токовой защиты. Применение ступенчатой токовой направленной защиты следует рекомендовать во всех случаях, когда она удовлетворяет требованиям чувствительности и быстродействия.

7-9. КРАТКАЯ ОЦЕНКА ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ

Принцип действия токовых направленных защит прост и надежен и позволяет обеспечить селективную защиту сетей с двусторонним питанием. Сочетание направленных отсечек с направленной токовой защитой дает возможность получить защиту, во многих случаях обеспечивающую достаточную быстроту отключения к. з. и чувствительность. Опыт эксплуатации показывает, что направленная защита работает надежно.

К недостаткам защиты следует отнести:

1) большие выдержки времени, особенно вблизи источников питания;

2) недостаточную чувствительность в сетях с большими нагрузками и небольшими относительно их кратностями тока к. з.;

3) мертвую зону при трехфазных к. з.;

4) возможность неправильного выбора направления при нарушении цепи напряжения, питающей реле направления мощности.

Максимальная направленная защита широко применяется в качестве основной защиты сетей напряжением до 35 *кв* с двусторонним питанием.

В сетях 110 и 220 *кв* направленная токовая защита применяется в основном как резервная, а иногда, в сочетании с отсечкой, как основная.

Глава восьмая

ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С БОЛЬШИМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

8-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для защиты линий от к. з. на землю (однофазных и двухфазных) применяется защита, реагирующая на ток и мощность нулевой последовательности. Необходимость специальной защиты от к. з. на землю вызывается тем, что этот вид повреждений является преобладающим, а защита, включаемая на ток и напряжение нулевой последовательности, осуществляется более просто и имеет ряд преимуществ по сравнению с рассмотренной выше токовой защитой, реагирующей на полные токи фаз. Защиты нулевой последовательности выполняются в виде токовых максимальных защит и отсечек как простых, так и направленных.

Напомним некоторые положения, касающиеся токов и напряжений нулевой последовательности, возникающих в сети при к. з. на землю (подробнее см. [Л. 29, 32]):

1. Ток и напряжение нулевой последовательности в какой-либо точке сети равны:

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C); \tag{8-1}$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C), \tag{8-1а}$$

где $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$, $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$ — фазные токи и напряжения в той точке сети, в которой определяются $\dot{U}_0$ и $\dot{I}_0$.

Из этих выражений следует, что если геометрическая сумма фазных токов или фазных напряжений равна нулю, то I_0 и U_0 также равны нулю. Поэтому в нормальном режиме при качаниях и к. з. между фазами I_0 и U_0 отсутствуют и возникают только при замыканиях на землю или неполнофазных режимах [1], когда нарушается симметрия фазных токов и напряжений сети.

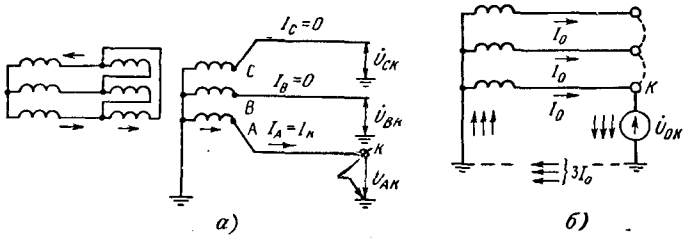


Рис. 8-1. Однофазное к. з. в сети (*а*) и прохождение токов I_0 под действием $\dot{U}_{0K}$ (*б*).

$$\dot{U}_{AK} = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0};\ \dot{U}_{BK} = \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0};\ U_{CK} = U_{C1} + U_{C2} + U_{C0};\ U_{A0} = U_{B0} = U_{C0} = U_{0K}.$$

2. Пользуясь выражениями (8-1) и (8-1а), установим связь между составляющими нулевой последовательности и полными фазными токами и напряжениями при однофазном к. з.

Например, при к. з. на фазе *A* (рис. 8-1, *а* и 3-12, *в*) токи в месте повреждения равны: $\dot{I}_A = \dot{I}_к$; $\dot{I}_B = 0$; $\dot{I}_C = 0$. Подставив эти значения токов в (8-1), найдем:

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}\dot{I}_A = \frac{1}{3}\dot{I}_к,$$

$$\text{откуда} \quad I_к = 3I_0. \tag{8-2}$$

Напряжение поврежденной фазы в месте к. з. (точка *K*) $U_{AK} = 0$, так как эта фаза связана с землей. С учетом этого из (8-1а) получим:

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_B + \dot{U}_C). \tag{8-3}$$

Таким образом, *из сказанного следует, что при однофазном к. з. ток нулевой последовательности равен* $^1/_3$ *тока к. з., проходящего в месте повреждения, и совпадает с ним по фазе, а напряжение* $\dot{U}_{0к}$ *в точке к. з. равно* $^1/_3$ *геометрической суммы напряжений неповрежденных фаз.* Векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном к. з. приводятся на рис. 8-9.

---

[1] Неполнофазным режимом называется такой режим, при котором на одном из участков сети отключены или оборваны одна или две фазы.

3. Для анализа работы защит нулевой последовательности и расчета токов к. з. необходимо определять распределение (пути прохождения) токовой нулевой последовательности в конкретных схемах сети.

Из теории симметричных составляющих известно, что распределение токов нулевой последовательности может рассматриваться независимо от токов прямой и обратной последовательностей.

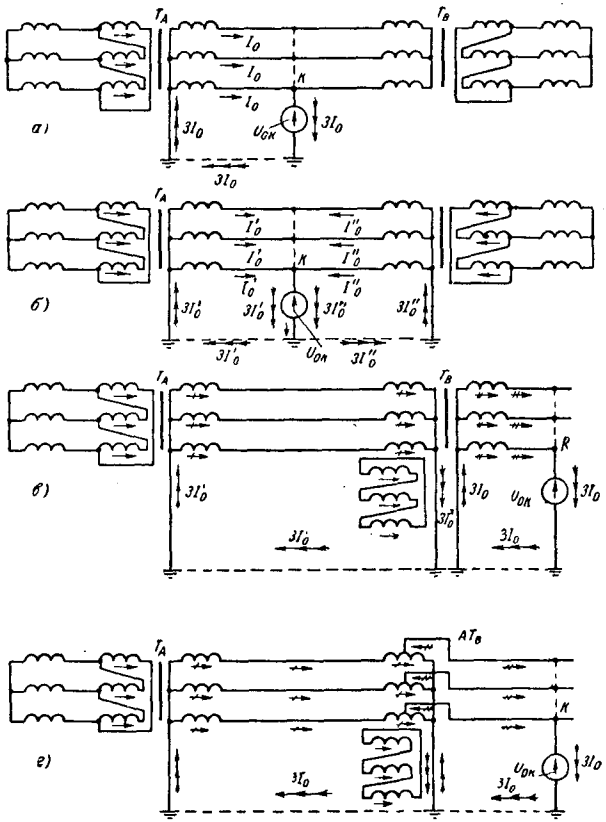


Рис. 8-2. Распределение токов нулевой последовательности при однофазном к. з.

а — при заземлении нейтрали с одной стороны линии; *б* — при заземленных нейтралях с обеих сторон линии; *в* — при заземлении нейтралей в сети высшего и низшего напряжения; *г* — при к. з. в сети с автотрансформатором.

Источником появления токов нулевой последовательности можно считать напряжение U_{0K}, появляющееся на каждой фазе в месте к. з. (точка *K* на рис. 8-1, *а* и *б*). Под влиянием этого напряжения в каждой фазе возникают токи I_0. Они замыкаются по контуру фаза — земля через место повреждения и заземленные нейтрали.

Так как неповрежденные фазы не связаны с точкой повреждения непосредственно, то для образования контура циркуляции токов I_0 необходимо представить, что в месте замыкания на землю имеется условное соединение между всеми фазами (показанное на рис. 8-1, *б* пунктиром). Тогда в месте замыкания на землю

проходит ток, равный сумме токов нулевой последовательности I_0 всех трех фаз, который и является действительным током повреждения: $I_к = 3I_0$. Этот ток направляется через землю к заземленным нейтралям трансформаторов и через них возвращается в фазы сети.

Таким образом, при замыканиях на землю появление токов I_0 возможно только в сети, где имеются трансформаторы с заземленными нейтралями.

При нескольких заземленных нейтралях ток нулевой последовательности, возникший в месте повреждения, разветвляется между нейтралями обратно пропорционально сопротивлениям их ветвей.

На рис. 8-2 показаны некоторые характерные случаи распределения токов нулевой последовательности в схемах сети. Направление токов, проходящих к месту к. з., принято положительное.

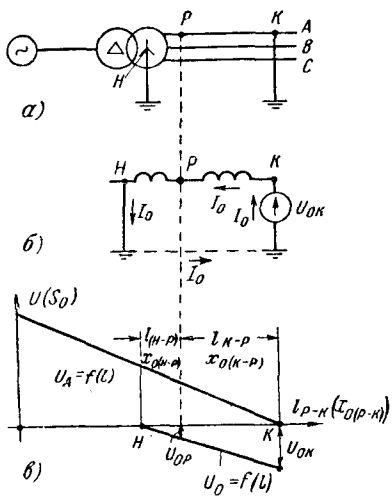


Рис. 8-3.

а — однофазное к. з.; *б* — схема замещения нулевой последовательности; *в* — зависимость $U_0 = f(I_{P-K})$ и $U_ф = f(I_{P-K})$.

Если заземлена нулевая точка трансформатора только с одной стороны линии электропередачи (рис. 8-2, *а*), то при замыкании на землю на этой линии токи нулевой последовательности проходят только на участке между местом повреждения и заземленной нулевой точкой.

Если же заземлены нулевые точки трансформаторов с двух сторон рассматриваемого участка (рис. 8-2, *б*), то токи нулевой последовательности проходят по нему с обеих сторон от места к. з.

Это позволяет сделать вывод, что распределение токов нулевой последовательности в сети определяется расположением не генераторов, а заземленных нейтралей.

Если трансформатор имеет соединение обмоток звезда — треугольник, то *замыкание на землю на стороне треугольника не вызывает токов нулевой последовательности на стороне звезды.* Поэтому защиты, установленные в сети звезды, не действуют при замыкании на землю в сети треугольника.

Если же сети различных напряжений связаны трансформатором, имеющим соединение обмоток звезда — звезда, с заземленными нулевыми точками обеих обмоток (рис. 8-2, *в*), то замыкание на землю в сети одной звезды вызывает появление токов нулевой последовательности в сети второй звезды. Для устранения этой связи необходимо разземлить нейтраль одной из обмоток трансформатора T_B.

При наличии автотрансформатора AT_B, связывающего сети двух напряжений (рис. 8-2, *г*), *замыкание на землю в сети одного напряжения вызывает появление токов нулевой последовательности в сети другого напряжения*, так же как и в схеме на рис. 8-2, *в*.

4. Из схемы замещения нулевой последовательности, приведенной на рис. 8-3, *б*, следует, что напряжение U_0 в какой-либо точке сети, например в точке P, всегда меньше напряжения $U_{0к}$ в точке к. з. K на величину падения напряжения в сопротивлении $x_{0(K-P)}$ между точками K и P, т. е.

$$\dot{U}_{0P} = \dot{U}_{0K} - \dot{I}_0 x_{0(K-P)}. \qquad (8\text{-}4)$$

Таким образом, чем дальше отстоит точка P от места повреждения K, тем меньше напряжение U_{0P}.

В месте заземленных нейтралей трансформаторов (точка H) напряжение $U_{0H} = 0$, так как точка H непосредственно связана с землей. Зависимость $U_{0P} =$

$= f\,l_{(K-P)}$ имеет линейный характер и представлена на рис. 8-3, *в*. Для сравнения на рис. 8-3 показано изменение напряжения поврежденной фазы U_A в зависимости от расстояния до точки K. Учитывая, что в точке H напряжение U_{0H} равно нулю, напряжение U_0 в точке P можно определять как падение напряжения от точки H до точки P в сопротивлении $x_{0(H-P)}$ по выражению

$$U_{0P} = I_0 x_{0\,(H-P)}. \qquad (8\text{-}4а)$$

8-2. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

а) Схема и принцип действия защиты

Защита (рис. 8-4) состоит из пускового реле *1* и реле времени *2*. Реле *1* включается на фильтр тока нулевой последовательности, в качестве которого обычно используется нулевой провод трансформаторов тока, соединенных по схеме полной звезды. Реле времени *2* создает выдержку времени, необходимую по условию селективности.

Ток в реле *1* равен сумме вторичных токов трех фаз; пренебрегая погрешностью трансформаторов тока, получаем:

$$I_р = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{n_т} = \frac{3I_0}{n_т}. \qquad (8\text{-}4б)$$

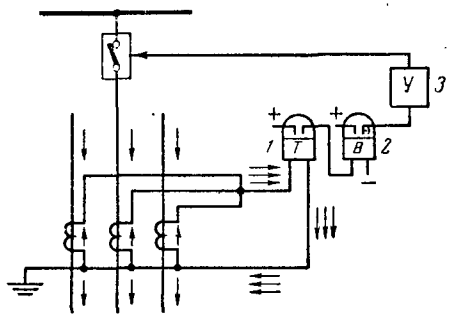


Рис. 8-4: Схема токовой защиты нулевой последовательности.

Согласно (8-4б) и § 3-6, *б* ток в пусковом реле защиты появляется только в том случае, когда имеется ток I_0. Поэтому защита нулевой последовательности, показанная на рис. 8-4, может работать только при однофазных и двухфазных к. з. на землю.

При междуфазных к. з. (без «земли»), а также при нагрузке и качаниях защита нулевой последовательности не действует, поскольку в этих режимах сумма токов $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ и ток I_0 отсутствуют.

Важным преимуществом защиты нулевой последовательности является то, что она не реагирует на нагрузку. Благодаря этому ее не требуется отстраивать от токов нормального режима и перегрузок, что позволяет обеспечить высокую чувствительность этой защиты по сравнению с защитами, реагирующими на фазные токи.

Однако в действительности работа защиты осложняется погрешностью трансформаторов тока, обусловленной их током намагничивания (см. § 3-1).

Поэтому в режимах, когда имеет место баланс первичных токов ($\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$), сумма вторичных токов $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \neq 0$.

В нулевом проводе и пусковом реле защиты появляется остаточный ток, называемый *током небаланса* ($I_{нб}$), который может вызвать нежелательное действие защиты при отсутствии тока I_0.

б) Ток небаланса

Значение $I_{нб}$ можно найти, если в выражении (8-4б) учесть токи намагничивания трансформаторов тока; тогда

$$I_р = \left(\frac{\dot I_A - \dot I_{Анам}}{n_т}\right) + \left(\frac{\dot I_B - \dot I_{Внам}}{n_т}\right) + \left(\frac{\dot I_C - \dot I_{Снам}}{n_т}\right) = \frac{\dot I_A + \dot I_B + \dot I_C}{n_т} - \left(\frac{\dot I_{Анам}}{n_т} + \frac{\dot I_{Внам}}{n_т} + \frac{\dot I_{Снам}}{n_т}\right). \quad (8\text{-}5)$$

Очевидно, что второй член в выражении (8-5) является током небаланса. Обозначив его $I_{нб}$ и выразив первый член (8-5) через I_0, получим:

$$I_р = \frac{3I_0}{n_т} - I_{нб}. \quad (8\text{-}6)$$

Выражение (8-6) показывает, что ток в пусковом реле защиты состоит из двух слагающих: одно обусловлено первичным током I_0 и второе — погрешностью трансформаторов тока. Последнее искажает величину тока $3I_0$, на которую реагирует защита.

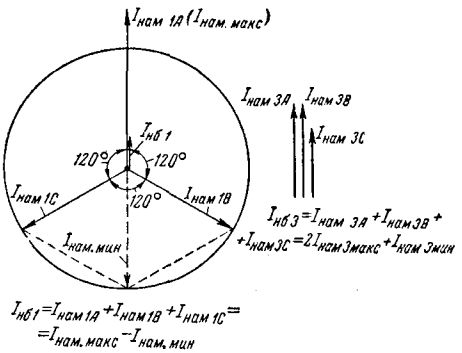


Рис. 8-5. Определение $I_{нб}$ по первой и третьей гармоникам токов намагничивания трансформаторов тока фильтра I_0.

Как следует из (8-5), ток небаланса равен сумме намагничивающих токов трансформаторов тока:

$$\dot I_{нб} = \frac{\dot I_{Анам}}{n_т} + \frac{\dot I_{Внам}}{n_т} + \frac{\dot I_{Снам}}{n_т}. \quad (8\text{-}7)$$

Сумма намагничивающих токов обычно не равна нулю. Это объясняется тем, что токи намагничивания имеют несинусоидальную форму и, кроме того, различаются по величине и фазе вследствие нелинейности и неидентичности характеристик намагничивания и неравенства в величине вторичных нагрузок трансформаторов тока различных фаз.

Токи намагничивания состоят в основном из первой и третьей гармоник $I_{нам1}$ и $I_{нам3}$ [Л. 35, 23]. При трехфазных к. з., качаниях и нагрузке токи третьей гармоники $I_{нам3}$ фаз A, B и C практически совпадают по фазе и поэтому суммируются в нулевом проводе трансформаторов тока арифметически.

При тех же режимах токи $I_{нам1}$ сдвинуты по фазе циклически приблизительно на 120° и суммируются в нулевом проводе геометрически (рис. 8-5).

В результате этого ток небаланса состоит, так же как и ток намагничивания, из первой и третьей гармоник ($I_{нб1}$ и $I_{нб3}$).

Исследования показывают, что третьи гармоники составляют около 20—40%, а первые — 80—60% полного тока намагничивания.

Имея кривые намагничивания трансформаторов тока $E_2 = f(I_{нам})$ и определяя вторичные э. д. с. трансформаторов тока E_2, можно приближенно оценить [Л. 10] величины намагничивающих токов, а затем $I_{нб1}$ и $I_{нб3}$, пользуясь формулами, вытекающими из диаграмм, и на рис. 8-5:

$$\left.\begin{aligned} I_{нб1} &= 0{,}66\,(I_{нам.\,макс} - I_{нам.\,мин}); \\ I_{нб3} &= 0{,}34\,(I_{нам.\,мин} + 2I_{нам.\,макс}), \end{aligned}\right\} \qquad (8\text{-}8)$$

где $I_{нам.\,макс}$ и $I_{нам.\,мин}$ — максимальные ($I_{нам\,1A}$) и минимальные значения $I_{нам}$ ($I_{нам1B}$ и $I_{нам1C}$), найденные по кривым намагничивания.

Действующее значение полного тока небаланса в нулевом проводе находится по выражению

$$I_{нб} = \sqrt{I_{нб1}^2 + I_{нб3}^2}. \qquad (8\text{-}8а)$$

За расчетное значение для определения $I_{нб.\,макс}$ следует принимать ток трехфазного к. з., поскольку он, как правило, больше двухфазного и, кроме того, в трехфазном режиме $I_{нб3}$ значительно больше, чем при двухфазном к. з. При двухфазном к. з. $I_{нам3}$ поврежденных фаз имеют противоположные знаки, вследствие чего $I_{нб\,3}$ равен их разности, а при трехфазном — их сумме.

Для ограничения тока небаланса необходимо работать в ненасыщенной части характеристики намагничивания и иметь одинаковые токи намагничивания во всех фазах. Чтобы обеспечить эти условия, трансформаторы тока, питающие защиту, должны:

а) удовлетворять условию 10%-ной погрешности при максимальном значении тока трехфазного к. з. в начале следующего участка;

б) иметь идентичные (совпадающие) характеристики намагничивания на всех трех фазах;

в) иметь одинаковые нагрузки вторичных цепей во всех фазах.

В неустановившихся режимах под влиянием апериодического тока к. з. токи намагничивания, а вместе с ними и токи небаланса могут значительно возрасти, что необходимо учитывать при выборе параметров защит, работающих без выдержки времени.

Чтобы исключить действие защиты от токов небаланса, величину тока срабатывания пусковых реле защиты выбирают больше тока небаланса.

в) Уставки защиты

Время действия защиты выбирается по ступенчатому принципу и нарастает от приемного конца в сторону расположения трансформаторов с заземленной нейтралью (рис. 8-6):

$$t_3 < t_2 < t_1.$$

Если сети высшего и низшего напряжений связаны между собой через трансформатор *Т-3* с соединением обмоток Y/Δ или Y/Y,

то защита нулевой последовательности *3*, установленная на трансформаторе *Т-3*, может быть мгновенной, поскольку она не действует при к. з. и замыканиях на землю на стороне низшего напряжения. В результате этого выдержки времени (t_2 и t_1) остальных защит нулевой последовательности существенно уменьшаются и получаются меньше, чем t' у защит от междуфазных к. з., реагирующих на фазный ток (рис. 8-6). Это объясняется тем, что последние действуют при к. з. за трансформатором, вследствие чего их приходится согласовывать по времени с защитами на стороне низшего напряжения трансформаторов (рис. 8-6). Если же связь между сетями разного напряжения осуществляется через автотрансформатор *Т-3*, то, как показано на рис. 8-2, при замыкании на землю в сети одного напряжения ток I_0 появляется в обеих сетях. Поэтому выдержки времени защиты нулевой последовательности сети одного напряжения должны согласовываться с защитами сети другого напряжения.

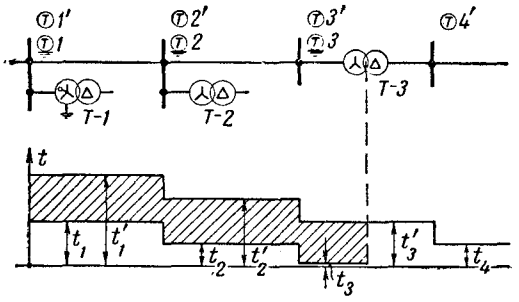


Рис. 8-6. Ступенчатый принцип выбора выдержек времени максимальной токовой защиты нулевой последовательности.

1', *2'*, *3'*, *4'* — максимальные токовые защиты; *1*, *2*, *3* — максимальные токовые защиты нулевой последовательности.

В этих условиях защита *3*, работающая в предыдущем случае без выдержки времени ($t_3 = 0$), будет иметь теперь $t_3 = t_4 + \Delta t$, т. е. время действия защит, реагирующих на ток I_0, увеличивается и получается равным времени действия максимальных защит, реагирующих на фазный ток.

Ток срабатывания пусковых реле максимальной защиты нулевой последовательности выбирается из условия надежного действия защиты при к. з. в конце следующего (второго) участка и из условия отстройки от токов небаланса.

По первому условию $I_{с.з} < 3I_{0к.мин}$, а по второму $I_{с.з} > I_{нб.макс}$. Определяющим является второе условие, согласно которому

$$I_{с.з} = k_{зап} I_{нб.макс}, \qquad (8\text{-}9)$$

где $k_{зап} = 1{,}3 \div 1{,}5$. Ток $I_{нб.макс}$ рассчитывается для нормального режима или для режима к. з. в зависимости от выдержки времени защиты. Если выдержка времени t_0 защиты нулевой последовательности превышает время действия $t_{м.ф}$ защит от междуфазных к. з., установленных на следующем участке, то $I_{с.з}$ защиты нулевой последовательности отстраивается только от небалансов в нормальном режиме, поскольку междуфазные повре-

ждения отключаются быстрее, чем может подействовать защита нулевой последовательности.

Ток небаланса в нормальном режиме $I_{нб(н)}$ обычно определяется измерением. У трансформаторов тока с $I_{ном.в} = 5$ *а* его величина колеблется от 0,01 до 0,2 *а*. Поэтому ток срабатывания по второму условию можно выбрать очень маленьким: примерно 0,5—1 *а* вторичных (или 10—20% от $I_{ном}$ трансформаторов тока).

Если $t_0 < t'_{м.ф}$, то защиту нужно отстраивать от небаланса $I_{нб(к)}$ при трехфазных к. з. в начале следующего участка. Отстройка ведется от максимального $I_{нб(к)}$ при установившемся режиме, поскольку защита действует с выдержкой времени 0,5 *сек* и больше. По данным опыта эксплуатации при правильно выбранных трансформаторах тока и их равномерной загрузке ток срабатывания можно выбрать в зависимости от значения кратности тока к. з. 2—4 *а* (вторичного тока).

Установившийся ток небаланса при к. з., необходимый для определения $I_{с.з}$, должен находиться по выражению (8-8) и (8-8а).

Если трансформаторы тока работают в прямолинейной части характеристики, то тогда третьи гармоники в $I_{нам}$ малы. В этом случае можно пренебречь составляющей $I_{нб\,з}$, рассчитывая ток небаланса по выражению

$$I_{нб} = k_{одн} f_i I_к^{(3)}, \qquad (8\text{-}10)$$

где $k_{одн}$ в зависимости от идентичности характеристик и нагрузок трансформаторов тока выбирается от 0,5—1; f_i — погрешность трансформаторов тока, при подборе их по 10%-ным характеристикам принимается равным 0,1; $I_к^{(3)}$ — максимальное значение тока трехфазного к. з. при повреждении в начале следующего участка.

Следует иметь в виду, что формула (8-10) дает приближенные результаты.

Чувствительность защиты характеризуется коэффициентом чувствительности

$$k_ч = \frac{3I_{0\,мин}}{I_{с.з}}, \qquad (8\text{-}11)$$

где $I_{0\,мин}$ — минимальный ток нулевой последовательности при однофазном или двухфазном к. з. на землю в конце второго участка. Надежность считается достаточной при $k_ч \geqslant 1{,}5$.

Если в сети, где установлена защита, возможна работа какой-либо линии на двух фазах (например, во время действия ОАПВ), то ток срабатывания защиты нужно дополнительно отстроить от токов нулевой последовательности $3I_0$, появляющихся в указанном режиме, или принять выдержки времени защиты больше $t_{ОАПВ}$.

8-3. ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В сетях с заземленными нулевыми точками, расположенными с обеих сторон рассматриваемого участка сети, селективное действие максимальной токовой защиты нулевой последовательности

можно обеспечить только при наличии органа направления мощности (см. § 7-1).

Направленные защиты нулевой последовательности действуют при к. з. на защищаемой линии и не работают при повреждениях на всех остальных присоединениях, отходящих от данной подстанции. Такое поведение защиты обеспечивается с помощью реле направления мощности, реагирующего на знак или направление мощности нулевой последовательности при к. з.

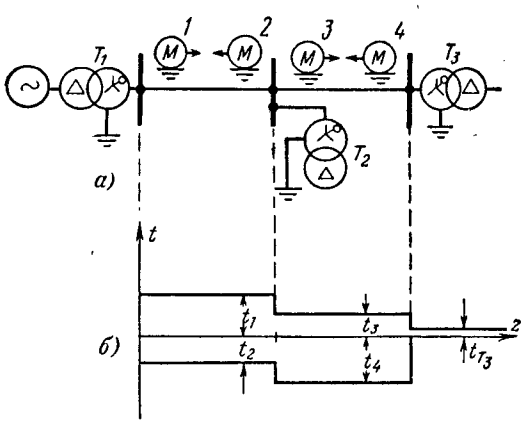


Рис. 8-7. Размещение максимальных направленных защит нулевой последовательности (*а*) и график их выдержки времени (*б*).

М — максимальная направленная защита нулевой последовательности.

Выдержки времени на защитах, действующих при одном направлении мощности, подбираются по ступенчатому принципу. На рис. 8-7 показаны размещение направленных защит нулевой последовательности и график их выдержек времени. Схема защиты приведена на рис. 8-8.

Защита состоит из токового реле *1*, реагирующего на появление к. з. на землю, реле мощности *2*, определяющего направление мощности при к. з., и реле времени *3*, создающего выдержку времени, необходимую по условию селективности.

Пусковое реле и токовая обмотка реле мощности включаются в нулевой провод трансформаторов тока на ток $3I_0$, а поляризующая обмотка (обмотка напряжения) реле мощности питается напряжением $3U_0$ от разомкнутого треугольника трансформатора напряжения.

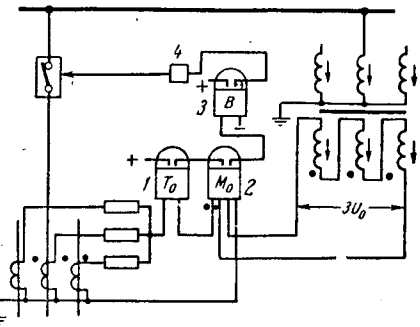


Рис. 8-8. Схема токовой направленной защиты нулевой последовательности.

При таком включении реле *2* реагирует на мощность нулевой последовательности $S_0 = U_0 I_0$. С учетом угла внутреннего сдвига α поляризующей обмотки и равенств $U_р = 3U_0$, $I_р = 3I_0$ реле направления мощности согласно (7-1) реагирует

на мощность:

$$S_p = U_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p) = 3U_0 3I_0 \sin(\alpha - \varphi_0), \qquad (8\text{-}12)$$

где $\varphi_p = \varphi_0$ — угол сдвига фаз между U_p и I_p или U_0 и I_0.

Условия работы реле мощности и его поведение можно уяснить из рассмотрения векторных диаграмм напряжения и тока питающих реле (U_0 и I_0) при однофазных и двухфазных к. з. на землю (рис. 8-9 и 8-10).

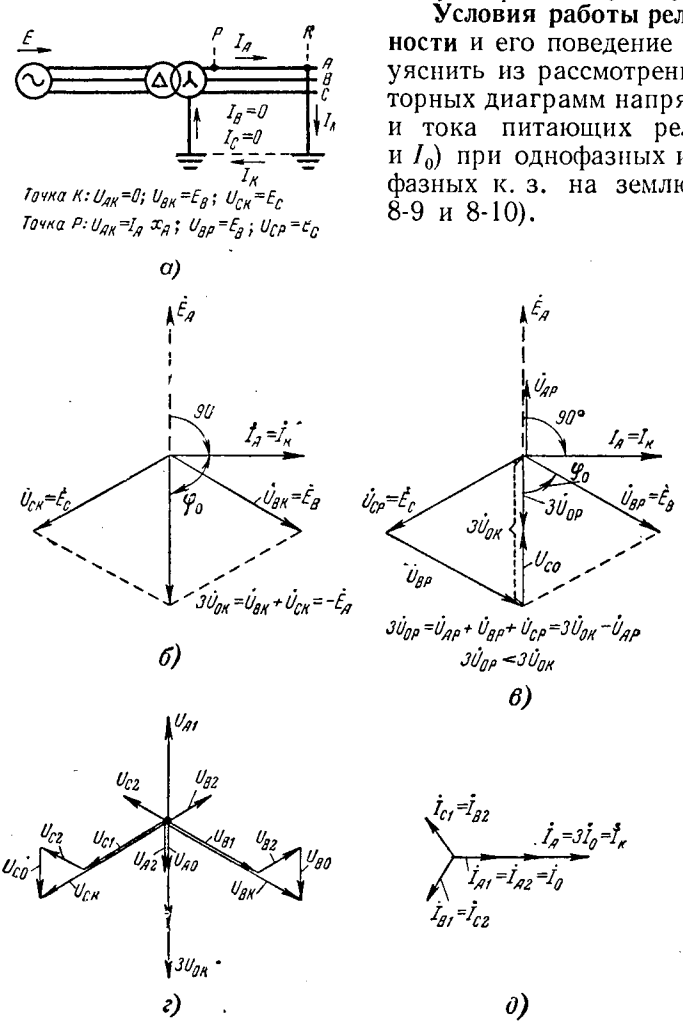


Рис. 8-9. Векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном к.з.

а — схема сети; *б* — диаграмма в точке *K*; *в* — диаграмма в точке *P*; *г*, *д* — диаграммы, построенные с помощью симметричных составляющих.

Для упрощения принято, что поврежденная линия разомкнута (рис. 8-9, *а*). За исходные при построении всех диаграмм взяты

векторы э. д. с. эквивалентного генератора системы $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$, $\dot{E}_C$, которые можно считать не изменяющимися при к. з.

Однофазное к. з. [Л. 32, 13], например, на фазе A характеризуется следующими условиями, вытекающими из рис. 8-9, *а*:

1) В поврежденной фазе A под действием э. д. с. $\dot{E}_A$ проходит ток к. з. $I_A = I_к$. Если принять активное сопротивление сети равным нулю, то ток I_A отстает от э. д. с. E_A на 90°.

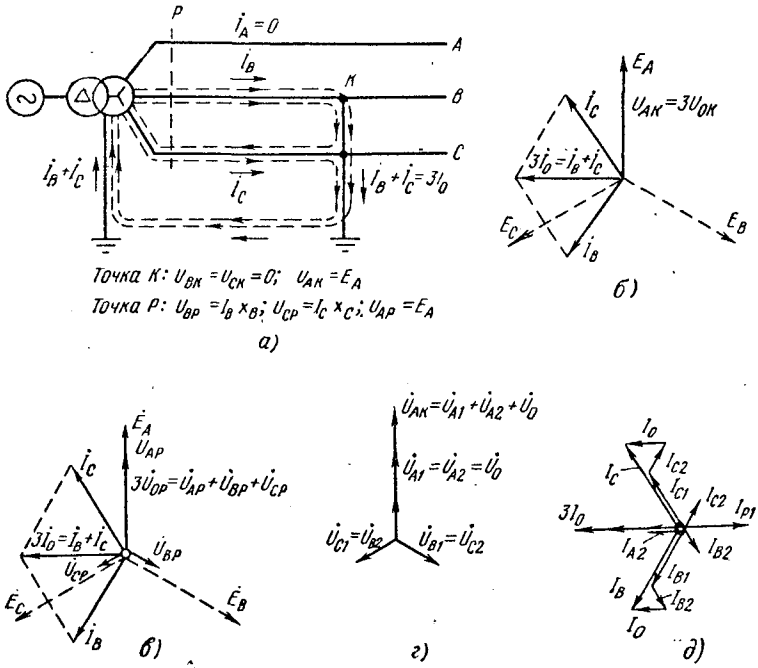


Рис. 8-10. Векторные диаграммы при двухфазном к. з. на землю.

а — токораспределение при двухфазном к. з; *б* и *в* — диаграмма в точке K и P; *г*, *д* — диаграммы, построенные с помощью симметричных составляющих.

2) Токи в неповрежденных фазах I_B и I_C равны нулю.

3) Напряжение поврежденной фазы A относительно земли в точке K $U_{AK} = 0$, поскольку эта фаза имеет глухое замыкание на землю.

4) Напряжения неповрежденных фаз U_B и U_C равны э. д. с. этих фаз.

Для этих условий построена векторная диаграмма фазных токов и напряжений для места повреждения в точке K (рис. 8-9, *б*).

Векторы $3I_0$ и $3U_0$ находятся на основе уравнений (8-1а) и (8-1) путем геометрического сложения векторов фазных токов и напряжений. Согласно этим уравнениям в месте к. з. вектор $\dot{I}_{0K} = \frac{1}{3}\dot{I}_A$

совпадает по направлению с I_A, а вектор $\dot{U}_{0K} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{BK} + U_{CK})$. ри принятых допущениях $\dot{U}_{BK} + \dot{U}_{CK} = -\dot{E}_A$, поэтому

$$\dot{U}_{0K} = -\frac{1}{3}\dot{E}_A. \qquad (8\text{-}13)$$

Из диаграммы 8-9, *б* следует, что ток I_{0K} опережает напряжение $_{0K}$ на 90°.

Векторная диаграмма однофазного к. з. в точке P, удаленной места к. з., отличается от предыдущего случая величиной U_A U_0. Напряжение поврежденной фазы A в точке P $U_{AP} \neq 0$, оно вно падению напряжения в сопротивлении x_{P-K} (рис. 8-9, *а*): $_{AP} = jI_к x_{P-K}$. Напряжения неповрежденных фаз B и C в точке P вны э. д. с. соответствующих фаз (рис. 8-9, *в*).

Векторы U_{0P} и I_{0K} аналогично предыдущему находятся геометрическим суммированием фазных напряжений и токов. В соответствии с этим $\dot{I}_{0P} = \frac{1}{3}\dot{I}_A$, $\dot{U}_{0P} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{AP} + \dot{U}_{BP} + \dot{U}_{CP})$. Как следует из диаграммы, $U_{0P} < U_{0K}$.

При двухфазном к. з. на землю [Л. 32, 13] векторная диаграмма токов и напряжений в месте повреждения фаз и C приведена на рис. 8-10, *б*.

Этот вид повреждения характеризуется в месте к. з. тремя условиями, очевидными из рис. 8-10, *а*: $\dot{U}_{BK} = 0$; $\dot{U}_{CK} = 0$; $\dot{I}_A = 0$.

Напряжение в неповрежденной фазе $\dot{U}_A = \dot{E}_A$. В поврежденных фазах под йствием э. д. с. $\dot{E}_B$ и $\dot{E}_C$ проходят токи I_B и I_C. Каждый из этих токов состоит двух составляющих, показанных на рис. 8-10, *б* пунктиром.

Одна составляющая замыкается по контуру поврежденных фаз B и C и обусловливается разностью э. д. с. $\dot{E}_B - \dot{E}_C$, а вторая проходит по контуру поврежденная фаза — земля под действием $\dot{E}_B$ и $\dot{E}_C$ соответственно.

Результирующие токи $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ в отличие от токов при двухфазном к. з. без мли сдвинуты между собой на угол θ, меньший 180° (рис. 8-10, *б*).

Векторы $\dot{I}_0$ и $\dot{U}_0$ находятся геометрическим суммированием фазных токов и пряжений:

$$\dot{U}_{0K} = \frac{1}{3}\dot{U}_{AK}, \quad \text{а} \quad I_{0K} = \frac{1}{3}(\dot{I}_B + \dot{I}_C).$$

Диаграмма для точки P, находящейся на некотором удалении от места повреждения, представлена на рис. 8-10, *в*. Очевидно, что токи в точке P такие же, к и в точке K.

Напряжение неповрежденной фазы также не меняется. Напряжение поврежденных фаз U_{BP} и U_{CP} больше нуля. Они равны падению напряжения от точки до точки P.

Напряжение $\dot{U}_{0P} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{AP} + \dot{U}_{BP} + \dot{U}_{CP})$; с учетом того, что $\dot{U}_{AP} = \dot{E}_A$, ходим:

$$\dot{U}_{0P} = \frac{1}{3}(\dot{E}_{AP} + \dot{U}_{BP} + \dot{U}_{CP}).$$

Отсюда и из векторной диаграммы следует, что $U_{0P} < U_{0K}$. Ток $\dot{I}_0$ опережает $_K$ и $\dot{U}_{0P}$ на угол φ_{0K}. Если не учитывать активного сопротивления, то $\varphi_{0K} = 90°$.

Приведенные диаграммы построены с указанными выше допущениями и являются поэтому приближенными.

Более строго и точно подобные диаграммы могут быть построены на основе совместного решения уравнений, характеризующих данный вид повреждений, и уравнений, выражающих связь симметричных составляющих с фазными токами и напряжениями. Построенные подобным способом диаграммы для места к. з. показаны на рис. 8-9, *г*, *д* и 8-10, *г*, *д*; там же приведены исходные уравнения (подробнее о этих диаграммах см. [Л. 10, 13, 32]).

Векторные диаграммы на рис. 8-9 и 8-10 позволяют сделать следующие выводы:

1. У г о л с д в и г а $\varphi_р$ согласно формуле (8-12) определяющий знак и величину мощности $S_р$, на которую реагируют реле мощности нулевой последовательности, равен φ_0 (рис. 8-9). Без учета активного сопротивления сети $\varphi_0 = 90°$. При учете его φ_0 составляет 100—120°.

Отсюда следует, что *для направленной защиты нулевой последовательности необходимо применять реле мощности синусного или смешанного типа,* имеющие максимальный момент в диапазоне значений $\varphi_р = 90 \div 120°$.

К подобным реле относятся реле типов РБМ-177 и РБМ-178, у которых $M_э = kU_р I_р \sin(\alpha - \varphi_р)$ и угол $\alpha = -20°$.

Угол максимальной чувствительности у этих реле, как следует из приведенного выше выражения, $\varphi_{м.ч} = \alpha - 90° = -20° - 90° = -110°$ или при принятом заводом обозначении однополярных зажимов тока и напряжения $\varphi_{м.ч} = 180—110 = +70°$. Это значение $\varphi_{м.ч}$ указывается в каталогах и справочниках.

2. Т о к $3I_0$ при однофазном к. з. равен $I_к$ (в режиме одностороннего питания), а при двухфазном к. з. с землей — геометрической сумме токов поврежденных фаз, т. е. току к. з., проходящего через землю.

3. Н а п р я ж е н и е $3U_0$ имеет наибольшее значение (порядка фазного напряжения) в месте к. з. (точка K).

По мере удаления от точки повреждения K напряжение $3U_0$ уменьшается. Это вытекает из диаграмм на рис. 8-9 и 8-10, а также из уравнения (8-2в) и показано графически на рис. 8-3.

Из выражения (8-2в) и рис. 8-3, *в* следует, что *чем дальше от места к. з. находится реле мощности, тем хуже условия его работы.* Действительно, мощность $S_р$ на зажимах реле уменьшается с уменьшением U_0. Зависимость $U_0 = f(l_{P-K})$ (рис. 8-3, *в*) может рассматриваться как зависимость $S_0 = f(l_{P-K})$, если принять, что $I_р$ и $\varphi_р$ постоянны. При удаленных к. з. мощность $S_р$ может оказаться меньше $S_{с.р}$, в результате чего реле мощности, а следовательно, и защита не будут работать.

Для расширения зоны действия защиты нулевой последовательности необходимы высокочувствительные реле мощности.

4. Векторные диаграммы, особенно при однофазном к. з., наглядно показывают, что при положительном $\varphi_к$ угол φ_0 отрицателен.

Это означает, что *мощность S_0 и мощность к. з. в поврежденной фазе $S_{к.з}$ имеют противоположные знаки.* Например, при однофаз-

ном к. з. на защищаемой линии (рис. 8-9, *а*) мощность к. з. в фазе имеет положительный знак и направлена от источника питания к месту к. з., *мощность же нулевой последовательности отрицательна, т. е. направлена от места к. з. к нулевой точке трансформаторов*. Поэтому обмотки напряжения и тока реле мощности нулевой последовательности должны включаться разноименной полярностью.

Уставки направленной защиты. Ток срабатывания пускового токового реле выбирается так же, как и у ненаправленной защиты нулевой последовательности (см. § 8-2).

Чувствительность пускового реле защиты проверяется при к. з. в конце второго участка по формуле (8-11).

На очень длинных линиях следует дополнительно проверять чувствительность реле мощности по выражению $k_ч = S_{р.мин}/S_{с.р}$, где $S_{р.мин}$ мощность на зажимах реле в режиме, когда U_0 и I_0 имеют минимальное значение.

Выдержки времени направленной защиты выбираются по встречно-ступенчатому принципу (рис. 8-7). Каждая защита отстраивается от соседней защиты, действующей при одном направлении мощности, на ступень $\Delta t : t_1 = t_3 + \Delta t$.

8-4. ОТСЕЧКИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

а) Назначение, принцип действия и разновидности отсечек

Для ускорения отключения к. з. на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью применяются отсечки, реагирующие на ток нулевой последовательности. Принцип действия их такой же, как и у отсечек, реагирующих на фазный ток (см. гл. 5). Отсечки нулевой последовательности выполняются простыми токовыми и направленными, мгновенными и с выдержкой времени.

б) Токовые ненаправленные отсечки нулевой последовательности

Токовые (ненаправленные) отсечки нулевой последовательности применяются на линиях с односторонним прохождением тока I_0 при к. з. на землю, т. е. там, где заземленные нейтрали трансформаторов расположены с одной стороны линии (рис. 8-11).

Мгновенные отсечки нулевой последовательности отстраиваются от тока $3I_{0макс}$ при к. з. на землю на шинах противоположной подстанции по выражению, аналогичному (5-3):

$$I_{с.з} = k_{зап} 3I_{0макс}. \qquad (8\text{-}14)$$

Отсечки с выдержкой времени (реле *2* на рис. 8-11, *а*) отстраиваются по току и времени от мгновенной отсечки нулевой последовательности *3* следующей линии.

При расположении нейтралей с одной стороны защищаемой линии *Л1* ток $3I_0$ в отсечках *2* и *3* при к. з. на *Л2* одинаков. Поэтому принимается, что

$$I_{с.з2} = (1{,}1 \div 1{,}2)\, I_{с.з3}. \qquad (8\text{-}15)$$

Выдержка времени $t_2 = t_3 + \Delta t$.

Зона действия отсечек находится графически по точке пересечения кривой $3I_0 = f(l_{P-K})$ с прямой $I_{с.з}$, как это показано на рис. 8-11, *б*.

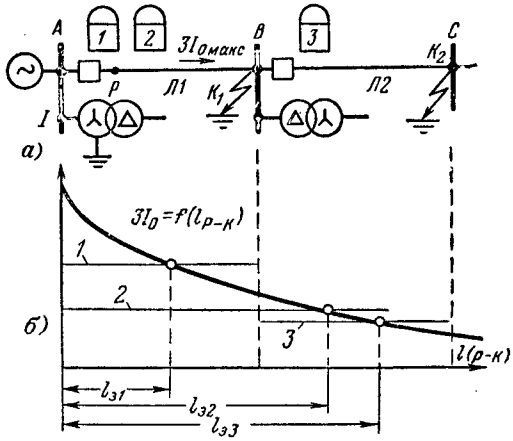


Рис. 8-11. Защита линии с помощью отсечек нулевой последовательности (*а*); графический расчет и зона действия этих отсечек (*б*); согласование времени и зон действия защит *2* и *3* (*в*).

1 — $I_{с.з}$ мгновенной отсечки на линии *Л1*; *2* — $I_{с.з}$ отсечки с выдержкой времени на линии *Л1*; *3* — $I_{с.з}$ отсечки мгновенного действия на линии *Л2*; $l_{з1}$, $l_{з2}$, $l_{з3}$ — зона действия отсечки *1*, *2*, *3*.

Схема отсечки с выдержкой времени выполняется по рис. 8-4. Мгновенная отсечка выполняется так же, но без реле времени *2*.

Ненаправленные токовые отсечки нулевой последовательности можно применять также в сети, имеющей заземленные нейтрали с обеих сторон защищаемой линии (рис. 8-12).

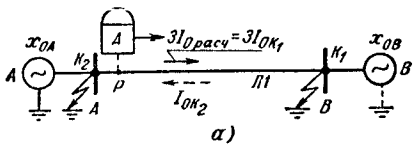
В этом случае $I_{с.з}$ отстраивается от токов $3I_0$, проходящих через защиту, как при к. з. на шинах противоположной подстанции *B*, так и при к. з. на шинах подстанции *A*, где установлена отсечка (рис. 8-12, *а*). Однако если $3I_{0K2} > 3I_{0K1}$, то чувствительность отсечки получается недостаточной. В этих случаях следует применять направленную отсечку нулевой последовательности.

в) Направленные отсечки нулевой последовательности

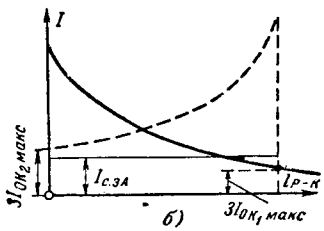
Схема направленной отсечки нулевой последовательности с выдержкой времени аналогична показанной на рис. 8-8. Направленная отсечка без выдержки времени выполняется по той же схеме, но без реле времени *3*.

Орган направления мощности, имеющийся в направленной отсечке, блокирует ее при к. з. на шинах подстанции *А* (рис. 8-12, *а*), когда мощность S_{0K2} направлена от шин подстанции [1], благодаря чему отпадает необходимость отстройки защиты от тока I_{0K2}.

Для обеспечения селективности направленную отсечку достаточно отстроить только от тока I_{0K1}, проходящего по защищаемой линии при к. з. на подстанции *В*.



а)



б)

Рис. 8-12. Расчет $I_{с.з}$ мгновенной направленной отсечки нулевой последовательности в сети с двусторонним питанием токами I_0.

а — схема сети; *б* — графический расчет.

Ток срабатывания мгновенной направленной отсечки выбирается так, чтобы она не действовала при к. з. за шинами противоположной подстанции *В* (рис. 8-12, *а*, *б*). Для выполнения этого условия необходимо принять:

$$I_{с.з} = k_{зап} 3I_{0расч}, \quad (8\text{-}16)$$

где $k_{зап}$ — коэффициент запаса, принимаемый равным для реле типа ЭТ или РТ 1,2—1,3, а для реле типа РТ-80 1,4—1,5; $I_{0расч}$ — наибольший ток I_0, проходящий по защищаемой линии *Л1*, от которого должна быть отстроена отсечка.

Ток срабатывания мгновенных отсечек на параллельных линиях необходимо выбирать с учетом наличия значительной в з а и м о и н д у к ц и и от параллельной цепи, которая оказывает существенное влияние на сопротивление нулевой последовательности [Л. 3, 33, 32].

При одинаковом направлении токов I_0 в обеих цепях взаимоиндукция одной линии увеличивает сопротивление второй, а при различном — уменьшает его. В результате этого в первом случае токи I_0 в параллельных линиях уменьшаются, а во втором — увеличиваются.

Имея это в виду, максимальное значение тока I_0 в параллельных линиях при внешних к. з. определяют из рассмотрения трех расчетных схем (рис. 8-13, *а*, *б*, *в*).

---

[1] Как было показано выше, мощность нулевой последовательности направлена от места повреждения к заземленным нейтралям сети.

Наиболее близким внешним повреждением является к. з. в точке K_1 на шинах противоположной подстанции (рис. 8-13, *а*, *б*). При этом максимальный ток в линии получается в случае отключения одной из параллельных цепей и заземления ее с двух сторон (рис. 8-13, *б*).

В этом режиме сопротивление оставшейся в работе линии *Л1* вследствие взаимоиндукции от тока I_{02} уменьшается, что влечет за собой увеличение расчетного тока I_{01}.

При определенных сочетаниях сопротивлений x_0 элементов рассматриваемой сети ток в линии *Л1* при внешних к. з. может

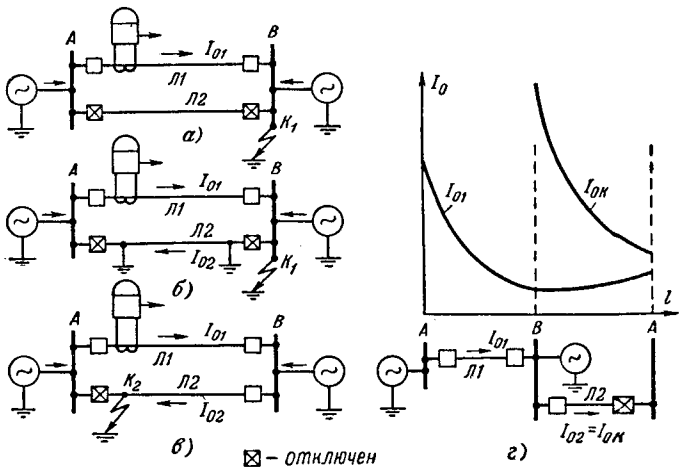


Рис. 8-13. Расчет токовой отсечки на параллельных линиях. Расчетные схемы для выбора тока срабатывания отсечек нулевой последовательности на параллельных линиях (*а*, *б*, *в*) и характер изменения тока I_{01} при к. з. односторонне отключенной параллельной линии *Л2* (*г*).

достигнуть максимального значения не в случае повреждения на шинах в точке K_1, а при к. з. на параллельной линии в точке K_2, в режиме одностороннего отключения этой линии (рис. 8-13, *в*). Хотя к. з. в точке K_2 является более удаленным, чем к. з. в K_1, ток I_{01} в линии *Л1* в этом случае может оказаться больше благодаря изменению токораспределения в параллельных ветвях расчетной схемы из-за уменьшения сопротивления линии *Л1*, вызванного сильной взаимоиндукцией от линии *Л2*.

На рис. 8-13, *г* приведен подобный случай изменения тока I_{01} и полного тока в месте к. з. I_{0K} в зависимости от местоположения точки к. з.

В качестве $I_{0\ расч}$ берется большее из полученных значений I_{01}. Токи нулевой последовательности необходимо рассчитывать при том виде к. з. на землю, при котором их значение получается наибольшим.

Из теории расчета токов к. з. [Л. 3] известно, что при равенстве суммарных сопротивлений прямой и обратной последовательностей схемы замещения [$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma}$] ток $I_0^{(1)} > I_0^{(1,1)}$, если $x_{0\Sigma} > x_{1\Sigma}$. Подсчитав и сопоставив $x_{0\Sigma}$ с $x_{1\Sigma}$, находят расчетный вид к. з. (однофазное или двухфазное к. з. на землю).

Ток срабатывания направленной отсечки с выдержкой времени отстраивается от тока $I_{0\ расч}$, появляющегося в реле при к. з. в конце зоны действия мгновенной защиты B (рис. 8-14, *а*), установленной на следующем участке *Л2*. Расчет ведется по выражению (8-16).

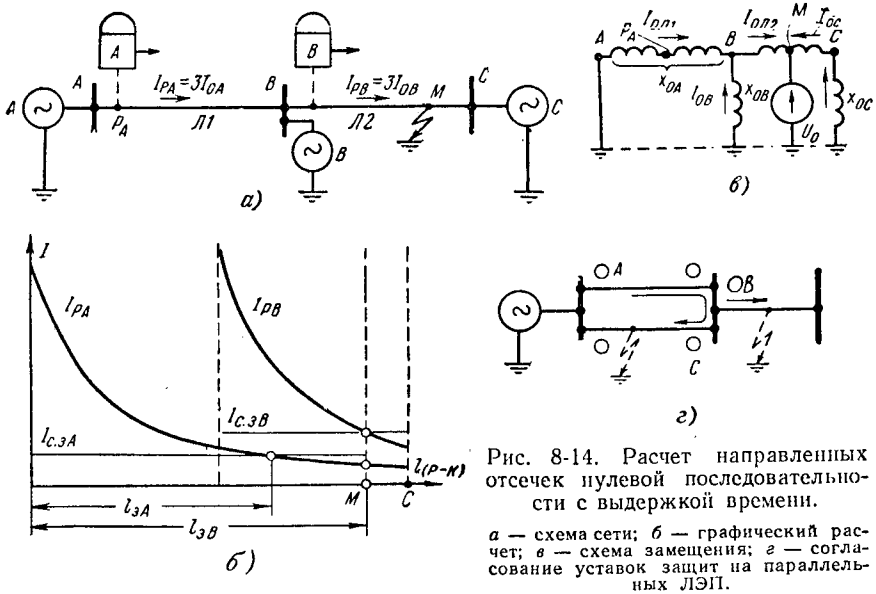


Рис. 8-14. Расчет направленных отсечек нулевой последовательности с выдержкой времени.

а — схема сети; *б* — графический расчет; *в* — схема замещения; *г* — согласование уставок защит на параллельных ЛЭП.

На рис. 8-14 показан графический способ определения величины $I_{0\ расч}$ для отсечки A. Он сводится к следующему. Строятся кривые I_{PA} и I_{PB} (рис. 8-14, *б*) изменения тока $3I_0$, проходящего в реле отсечек A и B при к. з. в разных точках линии *Л2*. По точке пересечения кривой I_{PB} с прямой $I_{c.зB}$ находится граница (точка M) зоны действия мгновенной отсечки B, установленной на *Л2*.

Для найденной точки M по кривой I_{PA} определяется значение тока $3I_{0M}$, проходящего через отсечку A при к. з. в конце зоны действия отсечки B. Полученный ток $3I_{0M}$ является расчетным током, от которого нужно отстроить отсечку A.

Подставляя найденный ток в выражение (8-16), находим $I_{c.зA}$, при котором отсечка A не работает за пределами зоны действия отсечки B.

Ток $I_{c.зA}$, удовлетворяющий этому условию, можно найти аналитически, определив коэффициент распределения токов I_0

в схеме нулевой последовательности рассматриваемого участка сети (рис. 8-14, *а*).

Их схемы замещения этого участка (рис. 8-14, *в*) следует, что при к. з. в любой точке линии *Л2* отношение между токами $I_{0Л1}$ и $I_{0Л2}$ является постоянной величиной и равно:

$$\frac{I_{0Л1}}{I_{0Л2}} = \frac{x_{0B}}{x_{0A} + x_{0B}} = k_р.$$

Отсюда

$$I_{0Л1} = k_р I_{0Л2}. \qquad (8\text{-}16а)$$

При к. з. в конце зоны отсечки *B* в условиях, когда последняя находится на грани действия, ток $I_{0Л2} = I_{с.з\,B}$; подставив это в (8-16а), найдем, что в этом случае по отсечке *A* будет проходить ток $I_{Л1} = k_р I_{с.з\,B}$.

Если принять $I_{с.з\,A} = k_р I_{с.з\,B}$, то при токе $I_{0Л2} < I_{с.з\,B}$ ток $I_{0Л1}$, проходящий по отсечке *A*, также будет меньше $I_{с.з\,A}$ и, следовательно, защита *A* не будет действовать за пределами зоны действия защиты *B*.

При выборе $I_{с.з\,A}$ отсечки с выдержкой времени на параллельных линиях для определения максимального значения $I_{0расч}$ необходимо исходить из расчетных схем, приведенных на рис. 8-13. В этом случае чувствительность отсечки *A* согласуется с мгновенной отсечкой *B* и *C* (рис. 8-14, *г*).

Выдержка времени t_A отсечки *A* принимается на ступень больше времени действия отсечки *B*, а на параллельных линиях и отсечки *C*.

8-5. СТУПЕНЧАТАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Большое распространение в сетях с глухозаземленной нейтралью получила ступенчатая защита нулевой последовательности, токовая и направленная. Наиболее полноценной является трехступенчатая защита, состоящая из мгновенной отсечки, отсечки с выдержкой времени и максимальной защиты нулевой последовательности.

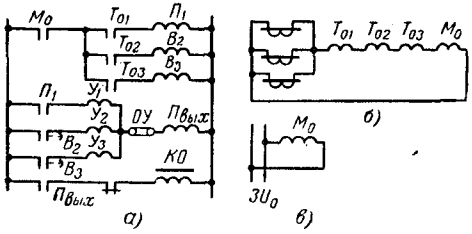


Рис. 8-15. Трехступенчатая направленная защита нулевой последовательности.

а — оперативные цепи; *б* — токовые цепи; *в* — цепи напряжения.

Схема и характеристика такой трехступенчатой направленной защиты показаны на рис. 8-15 и 8-16.

Первая ступень защиты выполняется мгновенной с помощью пускового токового реле T_{01}. Вторая ступень отстраивается от мгновенной отсечки следующего участка и имеет $t_{II} \approx 0{,}4 \div 0{,}6$ *сек*; она осуществляется посредством пускового

токового реле T_{02} и реле времени B_2. Третья ступень предназначена для резервирования защиты следующего участка. Она выполняется с помощью токового реле T_{03} и реле времени B_3.

Для отстройки первой ступени защиты от разрядников предусмотрено промежуточное реле $П_1$ с $t = 0{,}03 \div 0{,}06$ *сек*. Реле мощности M_0 является общим для всех ступеней. В схеме имеется отключающее устройство *ОУ* для удобного вывода защиты из действия.

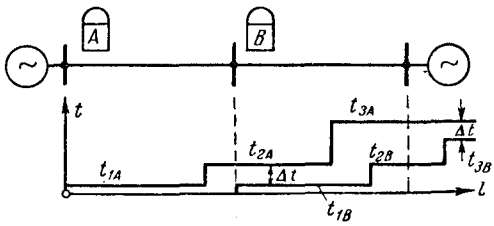


Рис. 8-16. Характеристика времени действия трехступенчатой защиты нулевой последовательности и согласование ее со смежной защитой *B*.

t_{2A} с t_{1B}; t_{3A} с t_{2B} и t_{3B}.

Выбор уставок каждой ступени защиты производится в полном соответствии с рассмотренным выше расчетом уставок для мгновенной отсечки, отсечки с выдержкой времени и максимальной защиты нулевой последовательности.

8-6. ПИТАНИЕ ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙ ОБМОТКИ РЕЛЕ МОЩНОСТИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

На рис. 8-17 изображена схема направленной защиты нулевой последовательности, не требующей трансформатора напряжения. В этой схеме поляризующая обмотка (обмотка напряжения) реле мощности *2* питается от трансформатора тока *5*, установленного в заземляющем проводе силового трансформатора *6*. При замыкании на землю ток нулевой последовательности I_0 в заземляющем проводе, поступающий в поляризующую обмотку реле мощности, всегда направлен в одну сторону. Направление же тока в защищаемой линии зависит от положения точки повреждения.

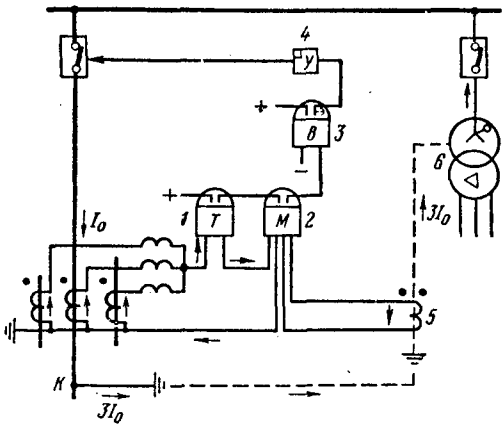


Рис. 8-17. Принципиальная схема максимальной защиты нулевой последовательности с питанием поляризующей обмотки реле мощности от трансформатора тока.

Ток I_{0K1} (рис. 8-18) в месте установки защиты при к. з. на защищаемой линии в точке K_1 противоположен току I_{0K2}, проходящему через защиту при к. з. в точке K_2 за шинами

подстанции. Векторные диаграммы этих токов показаны на рис. 8-18, *б*. При повреждении на защищаемой линии угол $\varphi_р$ (между токами $I_{от}$ и I_{0K1}) равен 180°; при этом контакты реле мощности должны замыкаться.

В случае к. з. на землю вне зоны $\varphi_р = 0$ и реле мощности не должно действовать. Отсюда следует, что при данной схеме включения необходимо применять реле косинусного или смешанного

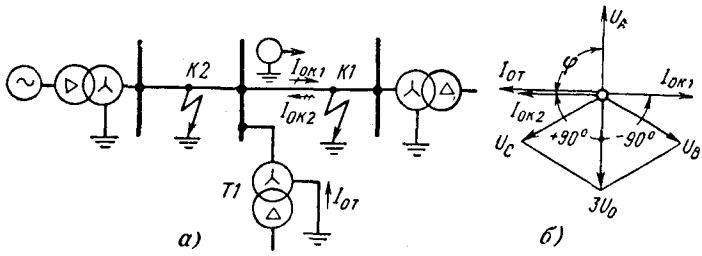


Рис. 8-18. Векторные диаграммы токов нулевой последовательности для реле мощности на рис. 8-17.

а — распределение токов I_0; *б* — векторная диаграмма при к. з. K_1 и K_2. Поляризующая обмотка реле питается током $I_{0т}$, а токовая — токами I_{0K1} и I_{0K2}. На диаграмме принято, что токи, направленные к шинам, на защищаемой линии и в трансформаторе имеют одинаковый знак.

типа, надежно работающее при $\varphi_р = 180°$. Для включения по такой схеме используется специальное реле типа РБМ-272, имеющее две токовые обмотки. Угол максимальной чувствительности этого реле $\varphi_{м.ч} = 0$. Освоено и выпускается промышленностью реле направления мощности с токовой поляризацией типа РМП-272 на выпрямленных токах. Рассмотренная схема применяется в тех случаях, когда на подстанции отсутствует трансформатор напряжения или когда его установка нецелесообразна.

8-7. ОЦЕНКА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТЫ

В энергосистемах Советского Союза защита нулевой последовательности получила весьма широкое распространение в сетях 110—500 *кв*. Положительными качествами защиты являются простота схемы и высокая надежность, что подтверждается опытом эксплуатации.

Пусковой орган защиты нулевой последовательности имеет высокую чувствительность, поскольку его не нужно отстраивать от токов нагрузки.

В благоприятных условиях работает и орган направления мощности защиты. При наиболее тяжелых к. з. вблизи шин подстанций и электростанций реле мощности нулевой последовательности получает большое напряжение U_0 и поэтому работает в отличие от реле мощности, включаемых на фазный ток, очень надежно. Угол сдвига $\varphi_р$ между $U_р$ и $I_р$, подводимых к реле мощности нулевой

последовательности, всегда близок к оптимальному, вследствие чего реле работает в условиях наибольшей чувствительности.

Благодаря наличию трансформаторов с заземленными нейтралями на каждой подстанции сети 110—500 *кв*, являющихся источником тока нулевой последовательности, имеется широкая возможность применения отсечек нулевой последовательности, а вместе с тем и многоступенчатых защит нулевой последовательности практически на всех линиях средней и большой протяженности.

К недостаткам, свойственным принципу действия защиты, следует отнести то, что она реагирует на токи в неполнофазном режиме и может работать ложно при обрыве фазного провода во вторичной цепи трансформаторов тока.

Глава девятая

ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С МАЛЫМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ [1]

9-1. ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ

Сети с малым током замыкания на землю работают с изолированной нейтралью или с заземленной через дугогасящую катушку (ДГК).

Как уже отмечалось в § 1-2, в таких сетях (в отличие от сетей с глухозаземленной нейтралью) замыкание на землю одной фазы не вызывает короткого замыкания и не сопровождается поэтому снижением междуфазных напряжений и появлением повышенных токов в сети.

Рассмотрим характер изменения токов и напряжений в сети и их векторные диаграммы при однофазных замыканиях на землю (рис. 9-1), принимая для упрощения, что нагрузка сети отключена.

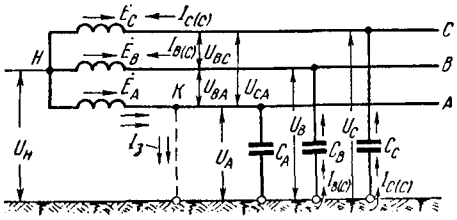


Рис. 9-1. Токи и напряжения при замыкании на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью.

В нормальных условиях напряжения проводов A, B и C по отношению к земле равны соответствующим фазным напряжениям $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$, которые в свою очередь равны э. д. с. источника питания $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$, $\dot{E}_C$, поскольку нагрузка отключена. Векторы этих фазных напряжений образуют симметричную звезду

[1] В СССР с малыми токами замыкания на землю работают сети с напряжением 35 *кв* и ниже.

(рис. 9-2, *а*), а их сумма равна нулю, в результате чего напряжение в нейтрали H отсутствует: $U_н = 0$.

Под действием фазных напряжений через емкости фаз относительно земли C_A, C_B и C_C проходят токи, опережающие соответствующие напряжения на 90°:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{-jx_C}; \qquad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{-jx_C}; \qquad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{-jx_C}. \tag{9-1}$$

Сумма емкостных токов, проходящих по фазам в нормальном режиме, равна нулю, и поэтому I_0 отсутствует.

Напряжения сети при замыкании на землю. При металлическом замыкании на землю одной фазы, например A,

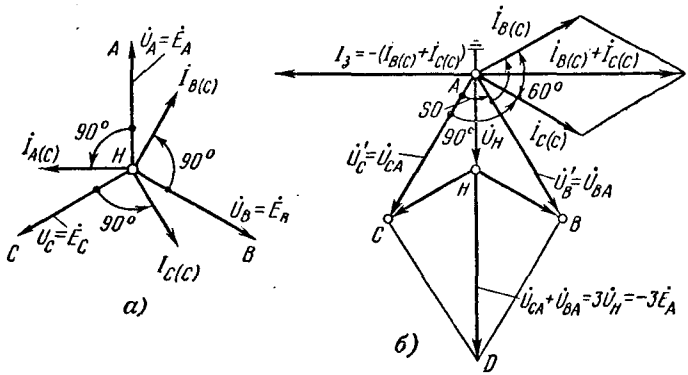


Рис. 9-2. Векторные диаграммы токов и напряжений в сети с изолированной нейтралью.

а — в нормальном режиме; *б* — при замыкании на землю фазы A.

ее напряжение относительно земли снижается до нуля ($U_A = 0$), так как в результате соединения с землей точка K приобретает потенциал, равный нулю (потенциал земли).

Напряжение нейтрали U_H по отношению к земле становится равным напряжению между точками K и H (рис. 9-1 и 9-2, *б*), т. е. напряжению, равному по величине и обратному по знаку э. д. с. заземлившейся фазы:

$$\dot{U}_H = \dot{U}_{KH} = -\dot{E}_A. \tag{9-2}$$

Напряжение неповрежденных фаз B и C относительно земли повышается до междуфазного. Действительно, на рис. 9-1 видно, что напряжение фазы B относительно земли равно напряжению между проводом B и точкой K, следовательно, $\dot{U}'_B = \dot{U}_{BA}$.

Аналогично напряжение фазы C по отношению к земле $\dot{U}'_C = U_{CA}$.

Учитывая, что нейтраль H имеет относительно земли напряжение U_H, можно (исходя из рис. 9-1) выразить напряжения $\dot{U}'_B$ и $\dot{U}'_C$ через U_H:

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_H + \dot{E}_B \quad \text{и} \quad \dot{U}'_C = \dot{U}_H + \dot{E}_C$$

или с учетом (9-2):

$$\dot{U}'_B = -\dot{E}_A + \dot{E}_B = \dot{U}_{BA} \quad \text{и} \quad \dot{U}'_C = -\dot{E}_A + \dot{E}_C = \dot{U}_{CA}. \qquad (9\text{-}2а)$$

Междуфазные напряжения между проводами фаз остаются неизменными, что также следует из рассмотрения рис. 9-1.

На основе полученных выражений на рис. 9-2, *б* построена (топографическая) векторная диаграмма напряжений проводов и нейтрали сети по отношению к земле ($\dot{U}'_A$, $\dot{U}'_B$, $\dot{U}'_C$ и $\dot{U}_H$). На этой диаграмме точки A, B и C представляют собой провода линии, а точка H соответствует нейтрали источника питания. Точка A связана с землей и имеет нулевой потенциал.

Токи при замыкании на землю. В месте повреждения проходят токи, замыкающиеся через емкости фаз сети (рис. 9-1).

Поскольку $U_A = 0$, то $I_{A(C)} = 0$. В двух других фазах под действием напряжения $\dot{U}'_B$ и $\dot{U}'_C$ появляются токи, опережающие на 90° напряжения:

$$\dot{I}_{B(C)} = j\frac{\dot{U}_{BA}}{x_C} \quad \text{и} \quad \dot{I}_{C(C)} = j\frac{\dot{U}_{CA}}{x_C}. \qquad (9\text{-}3)$$

Ток $I_з$ в месте повреждения равен геометрической сумме токов в фазах B и C и противоположен им по фазе, что видно из токораспределения на рис. 9-1:

$$\dot{I}_з = -(\dot{I}_{B(C)} + \dot{I}_{C(C)}).$$

С учетом (9-3)

$$\dot{I}_з = -j\left(\frac{\dot{U}_{BA}}{x_C} + \frac{\dot{U}_{CA}}{x_C}\right).$$

Из диаграммы на рис. 9-2, *б* следует, что $\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{CA} = -3\dot{E}_A$, с учетом этого

$$\dot{I}_з = j\frac{3\dot{E}_A}{x_C} = j\frac{3\dot{U}_ф}{x_C}. \qquad (9\text{-}4)$$

Таким образом, ток $I_з$ равен утроенному значению нормального емкостного тока фазы ($I_{Cф} = U_ф/x_C$). Из рис. 9-2, *б* видно, что ток $I_з$ отстает от напряжения U_H на 90°. Величина тока $I_з$ зависит от величины напряжения сети и емкости фаз ($x_C = 1/\omega C$) и может быть подсчитана по формуле

$$I_з = 3I_{Cф} = 3\frac{U_ф}{x_C} = 3U_ф\omega C_{уд}l \cdot 10^{-6},\ а,$$

где l — общая протяженность одной фазы сети; $C_{уд}$ — емкость 1 *км* фазы сети относительно земли.

Емкость фаз относительно земли в воздушных сетях значительно меньше, чем в кабельных.

Токи и напряжения нулевой последовательности, возникающие при замыканиях на землю. Вследствие нарушения симметрии и баланса емкост-

ных токов и фазных напряжений появляются составляющие нулевой последовательности:

$$\dot{U}_{0к} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C); \tag{9-5}$$

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C). \tag{9-6}$$

Подставляя в (9-5) значения напряжений из (9-2а) и учитывая, что $U_A = 0$, получаем:

$$\dot{U}_{0к} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{CA}); \tag{9-6а}$$

и так как $\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{CA} = -3\dot{E}_A = 3\dot{U}_н$, то $\dot{U}_{0к} = -\dot{E}_A = \dot{U}_н$.

Таким образом, напряжение нулевой последовательности равно и противоположно нормальному напряжению E_A поврежденной фазы и равно напряжению $U_н$ в нейтрали сети. Пренебрегая сопротивлением проводов, которое значительно меньше x_C, получаем, что во всех точках сети $U_0 = U_{0к}$.

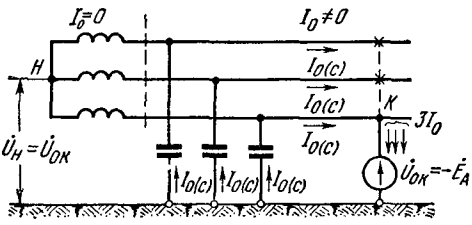


Рис. 9-3. Прохождение токов нулевой последовательности при замыкании на землю.

Токи I_0, возникающие под действием $U_{0к}$, замыкаются через емкость фаз и заземленные нулевые точки генераторов и трансформаторов, если такие заземления имеются (рис. 9-3).

Из распределения токов I_0, показанного на рис. 9-3, следует, что

$$I_0 = -j\frac{\dot{U}_{0к}}{x_C} = -j\frac{\dot{E}_A}{x_C} = -j\frac{U_ф}{x_C}, \tag{9-7}$$

где $U_ф$ — нормальное напряжение поврежденной фазы.

Знак минус в выражении (9-7) учитывает, что за положительное направление токов и напряжений принято направление от источника питания к месту повреждения. С учетом (9-4) ток замыкания на землю в месте повреждения

$$I_з = 3I_0. \tag{9-8}$$

Токи I_0 и $I_з$ совпадают по фазе и отстают от вектора напряжения $U_{0к}$ на 90°.

Ток I_0 в обмотках генератора отсутствует, поскольку нулевая точка генератора изолирована и сумма токов, проходящих в фазах генератора, равна нулю.

Замыкание на землю через переходное сопротивление (рис. 9-4). Напряжение поврежденной фазы $\dot{U}_A = I_з r_п = \dot{U}_к$, а напряжение в нулевой точке $\dot{U}_н = -\dot{E}_A + \dot{U}_к$, т. е. оно оказывается меньшим, чем при металлическом замыкании. Соответственно уменьшаются напряжения неповрежденных фаз относительно

земли, а также токи I_0 и $I_з$. В емкости поврежденной фазы появляется ток $I_A = U_к/-jx_C$.

В расчетах снижение тока и напряжения нулевой последовательности, обусловленное сопротивлением $r_п$, учитывается коэффициентом полноты замыкания

$$\beta = \frac{U_{0к}}{U_ф},$$

где $U_ф$ — нормальное значение напряжения поврежденной фазы.

При металлическом замыкании $\beta = 1$, так как $U_{0к} = U_ф$.

При неполном замыкании на землю $U_{0к} = \beta U_ф$, ток $I_0 = \beta U_ф/x_C$, а ток

$$I_з = 3I_0 = 3\frac{\beta U_ф}{x_C}. \quad (9\text{-}9)$$

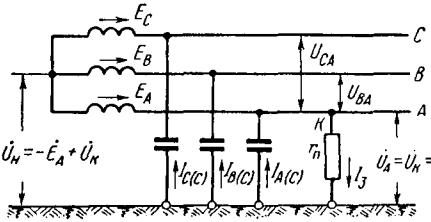


Рис. 9-4. Однофазное замыкание на землю через переходное сопротивление $r_п$.

Поскольку защиты от замыканий на землю реагируют на составляющие тока и напряжения нулевой последовательности, то для анализа их работы весьма удобно пользоваться токораспределением не фазных, а нулевых токов, а для вычисления значения $U_{0к}$, I_0 и $I_з$ применять формулы (9-5), (9-6), (9-8) и (9-9).

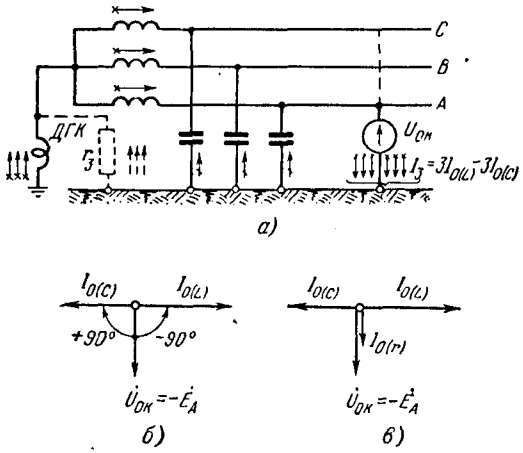


Рис. 9-5. Однофазное замыкание на землю в компенсированной сети.

а — прохождение токов нулевой последовательности; *б* и *в* — векторные диаграммы в месте повреждения.

Компенсированная сеть [Л. 36]. Рассмотрим сеть (рис. 9-5, *а*), нулевая точка которой заземлена через дугогасящую катушку *ДГК*, предназначенную для компенсации емкостных токов в месте повреждения.

При замыкании на землю напряжения во всех точках такой сети имеют те же значения, что и в сети с изолированной нулевой точкой.

Под влиянием напряжения нулевой последовательности $U_{0к}$, возникающего в месте повреждения, кроме токов I_{0C}, замыкающихся через емкости C фаз, в каждой фазе появляется ток $I_{(0)L} = U_{0к}/jx_L$, замыкающийся через дугогасящую катушку.

Ток $I_{0(L)}$ опережает напряжение $U_{0к}$ на 90°, ток же $I_{0(C)}$ отстает от $U_{0к}$ на 90°. Следовательно, фазы токов $I_{0(L)}$ и $I_{0(C)}$ противопо-

ложны (рис. 9-5, *б*), и поэтому ток $I_з$ в месте повреждения равен их разности:

$$I_з = 3\,(I_{0(L)} - I_{0(C)}). \qquad (9\text{-}10)$$

При полной компенсации $I_{0(L)} - I_{0(C)} = 0$. Иногда параллельно дугогасящей катушке включается активное сопротивление $r_з$ (показанное пунктиром на рис. 9-5). Тогда, кроме токов $I_{0(C)}$ и $I_{0(L)}$, появляется третий ток $I_{0(r)} = U_{0к}/r_з$, совпадающий по фазе с $U_{0к}$ и сдвинутый на 90° по отношению к токам I_{0C} и I_{0L}. Таким образом, при наличии сопротивления $r_з$ ток в месте повреждения:

$$I_з = \sqrt{(3I_{0(L)} - 3I_{0(C)})^2 + (3I_{0(r)})^2}. \qquad (9\text{-}11)$$

9-2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ

Требования к защите от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю существенно отличаются от требований, предъявляемых к защитам от к. з.

Поскольку замыкания на землю не вызывают появления сверхтоков и не искажают величины междуфазных напряжений, они не отражаются на питании потребителей и не сопровождаются перегрузкой оборудования опасными токами. Поэтому в отличие от к. з. замыкания на землю не требуют немедленной ликвидации.

Однако отключение замыканий на землю является все же необходимым, так как в результате теплового воздействия тока замыкания на землю в месте повреждения возможно повреждение изоляции между фазами и переход однофазного замыкания в междуфазное к. з. Помимо того, из-за перенапряжений, вызываемых замыканием на землю, возможен пробой или перекрытие изоляции на неповрежденных фазах, что приводит к образованию двойных замыканий на землю в разных точках сети.

Как показывает опыт, в компенсированных сетях и сетях с малыми емкостными токами (20—30 *а* в сети 10 и 6 *кв*) замыкания на землю могут оставаться довольно длительное время (порядка 2 *ч*), не вызывая развития повреждения и не нарушая работы потребителей.

Исходя из этого в СССР принято выполнять защиту от замыканий на землю в сетях с малым током повреждения с действием на сигнал.

Получив сигнал о появлении замыкания на землю, дежурный персонал принимает меры к переводу нагрузки поврежденной линии на другой источник питания, разгружает поврежденную линию и затем отключает ее.

Защиты от замыкания на землю должны быть селективными и иметь высокую чувствительность. Последнее вызывается тем, что токи повреждения, на которые реагирует защита, очень малы (5—10 *а*).

Кроме того, желательно, чтобы защита от замыканий на землю реагировала не только на устойчивые, но также и на неустойчивые повреждения.

Особые требования предъявляются к защите от замыканий на землю в сетях, питающих электродвигатели торфоразработок и передвижных установок. Здесь представляет опасность переход замыкания на землю одной фазы в двойное замыкание. При двойном замыкании на землю «шаговое напряжение» и «напряжение прикосновения» достигают значений, опасных для людей, обслуживающих установки. Поэтому для безопасности персонала, ведущего добычу торфа, защита от замыкания на землю в таких сетях должна при появлении «земли» немедленно отключать поврежденный участок. Эти защиты должны отличаться особенно высокой чувствительностью, так как емкостные токи в сетях, питающих торфоразработки, обычно имеют величину около 0,5—1 *а*.

9-3. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Простейшей защитой от замыканий на землю является общая неселективная сигнализация о появлении замыкания на землю без указания поврежденного участка.

Такое устройство состоит из трех реле минимального напряжения (рис. 9-6, *а*), включенных на напряжение фаз относительно земли, или схемы с одним реле напряжения (рис. 9-6, *б*), включенным на напряжение нулевой последовательности.

При появлении «земли» схемы дают сигнал, а затем дежурный поочередным отключением присоединений определяет поврежденный элемент. Указанный способ определения повреждения связан с кратковременным нарушением питания потребителей, требует много времени и особенно неудобен на подстанциях без постоянного дежурного персонала.

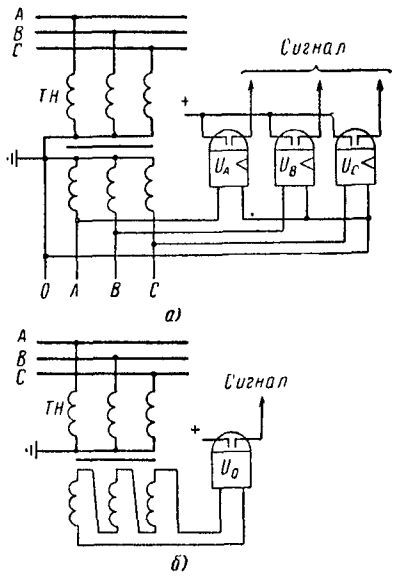


Рис. 9-6. Схема неселективной сигнализации при замыканиях на землю.

а — с реле минимального напряжения, включенными не на фазные напряжения; *б* — с реле напряжения, включенным на напряжение нулевой последовательности.

В качестве селективных защит от замыканий на землю, указывающих поврежденный участок, применяются токовые и направленные защиты, реагирующие на токи и мощность нулевой последовательности [Л. 38].

Для обеспечения селективной работы защиты используется различие в величине и направлении токов, появляющихся при замыкании на землю на поврежденном и неповрежденном присоедине-

ниях. Реагируя на это различие, защита должна действовать только на поврежденном присоединении и не работать на неповрежденных присоединениях.

Однако токи, возникающие при замыканиях на землю на поврежденных и неповрежденных элементах, особенно в компенсированной сети, обладают недостаточно четкими и устойчивыми различиями, в связи с чем создание селективной защиты от замыканий на землю является сложной задачей, пока еще не имеющей полноценного и подтвержденного опытом эксплуатации решения.

В некомпенсированных сетях наиболее простым решением является применение токовых защит, реагирующих на емкостный ток сети I_{0c}. Но это оказывается возможным только при большом числе присоединений, когда суммарный емкостный ток сети во много раз превосходит емкостный ток каждого присоединения (см. § 9-5), так как только при этом условии можно обеспечить требуемую селективность защиты.

В компенсированных сетях емкостный ток основной частоты (50 *гц*) компенсируется током дугогасящей катушки.

В связи с этим для действия в компенсированной сети защиты приходится создавать ток искусственным путем или использовать остаточные (естественные) некомпенсированные токи (например, активные и неосновных гармоник) или применять защиты, реагирующие на токи и напряжения, возникающие в переходном режиме в первый момент повреждения.

Все известные и применяемые на практике защиты можно подразделить на три группы:

1) защиты, реагирующие на токи нулевой последовательности, создаваемые искусственным путем;

2) защиты, реагирующие на установившиеся остаточные токи, возникающие в поврежденной линии при резонансной компенсации емкостных токов;

3) защиты, реагирующие на токи переходного режима, возникающие в первый момент замыкания на землю.

Ниже в краткой форме рассматриваются основные разновидности защиты каждой из этих групп.

9-4. ЗАЩИТЫ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ИСКУССТВЕННО СОЗДАННЫЕ ТОКИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

а) Способы получения искусственного тока

Одним из способов искусственного создания тока является временное нарушение компенсации. В момент возникновения повреждения кратковременно (автоматически) отключается дугогасящая катушка. Под действием емкостного некомпенсированного тока, проходящего по поврежденному присоединению, работает защита, фиксируя место повреждения. После истечения времени, достаточного для действия защиты (1—3 *сек*), дугогасящая катушка также автоматически включается обратно и компенсация восстанавливает-

ся. Нарушение компенсации ухудшает условия гашения дуги и увеличивает вероятность развития повреждения, поэтому данный способ не рекомендуется применять.

Вторым способом получения тока, необходимого для действия защиты, является включение активного сопротивления $r_з$ параллельно дугогасящей катушке (рис. 9-5) с последующим его автоматическим отключением аналогично предыдущему случаю. При этом появляется активный ток, который проходит по поврежденной линии к месту замыкания и используется для действия защиты. В неповрежденных линиях активный ток определяется активными потерями данной линии и практически очень мал. Этот способ требует высоковольтного сопротивления и другой вспомогательной аппаратуры, появление активного тока в месте замыкания на землю ухудшает условия гашения дуги и способствует развитию повреждения. Поэтому в настоящее время второй способ, так же как и первый, не применяется.

Третьим способом создания искусственного тока является работа с постоянной перекомпенсацией, при которой ток *ДГК* выбирается больше емкостного тока сети.

Избыточный ток $3I_{0L} - 3I_{0C}$ имеет индуктивный характер и используется для действия защиты. Величина избыточного тока ограничивается по условию гашения дуги и предупреждения развития повреждения. Для сети 6—10 *кв* избыточный ток не должен превышать 25—15 *а*.

Расстройка компенсации, хотя бы и в ограниченных пределах, ухудшает условия работы сети и поэтому не является желательным методом.

Четвертым способом создания тока для действия защиты является наложение на ток повреждения тока непромышленной частоты (например, 100 или 25 *гц*), подаваемого от специального источника в цепь ДГК. Этот ток замыкается по тому же контуру, что и ток дугогасящей катушки. На появление этого тока реагирует защита.

Частота 100 или 25 *гц* выбрана на основе имеющихся данных о том, что эти гармоники в естественном емкостном токе отсутствуют. На этом основана селективность защиты, исключающая работу защиты на всех присоединениях, кроме поврежденного. При высокой чувствительности защиты для ее действия достаточен ток примерно 3—5 *а*. Такой ток не ухудшает условий компенсации, и поэтому *данный способ может иметь широкое применение, если опыт эксплуатации подтвердит надежность положенного в основу его принципа селективности.*

б) Токовая защита, реагирующая на полный ток нулевой последовательности

Защита предназначена для радиальных сетей. В некомпенсированной сети она реагирует на естественный емкостный ток, а в компенсированной действует от остаточного тока перекомпенсации (если

таковая предусмотрена). Основной трудностью в выполнении рассматриваемой защиты является обеспечение необходимой чувствительности при малых значениях тока повреждения — 10 *а* и меньше.

На рис. 9-7 показаны два варианта защиты, различающиеся своей чувствительностью. Реагирующий орган защиты состоит из токового реле *1*, питающегося через фильтр нулевой последовательности. В схеме рис. 9-7, *а* используется трехтрансформаторный фильтр, рассмотренный в § 3-4. В схеме рис. 9-7, *б* в качестве фильтра применен специальный трансформатор тока нулевой последовательности (ТНП) особой конструкции.

В трехтрансформаторном фильтре ток $3I_0$ получается суммированием вторичных токов трех фаз: $3\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$.

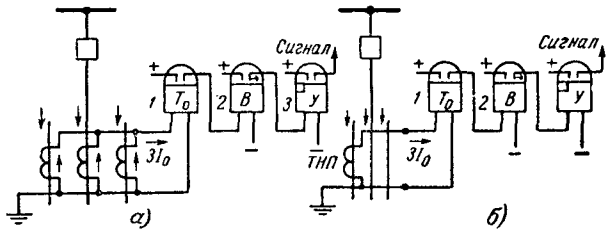


Рис. 9-7. Схема селективной сигнализации.

а — с трехтрансформаторным фильтром I_0; *б* — с трансформатором тока нулевой последовательности (ТНП).

В однотрансформаторном фильтре, выполняемом с помощью трансформатора тока нулевой последовательности (рис. 9-8), ток $3I_0$ получается суммированием первичных токов трех фаз:

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

Указанное принципиальное различие в способе суммирования токов трех фаз (вторичных в одном случае и первичных в другом) порождает существенные различия в чувствительности защит с фильтрами I_0 первого и второго типа.

Защита трехтрансформаторного фильтра имеет ряд недостатков, снижающих ее чувствительность.

1. Коэффициент трансформации трансформаторов тока фильтра, выбираемый по нагрузке линии, получается большим, вследствие чего вторичные токи при замыкании на землю имеют весьма малую величину. Так, например, если по току нагрузки коэффициент трансформации трансформаторов тока $n_т = 800/5$, то при реальном значении тока замыкания на землю 20 *а* вторичный ток трансформаторов тока будет равен 0,124 *а*, т. е. очень мал.

2. Токовые реле, реагирующие на столь малые токи, имеют большое число витков и значительное сопротивление (примерно 30—40 *ом*). Такое сопротивление реле соизмеримо с сопротивлением намагничивания трансформаторов тока.

Вследствие этого значительная часть тока повреждения отсасывается в трансформаторы тока неповрежденных фаз и теряется на намагничивание трансформатора тока поврежденной фазы, при этом в реле попадает лишь 50—60% вторичного тока замыкания на землю (в приведенном выше примере этот ток составляет только 0,06 *а*).

3. Токовое реле *1* не должно действовать от токов небаланса, возникающих при нагрузке и междуфазных к. з., для чего принимается $I_{с.з} > I_{нб}$. В трехтрансформаторном фильтре ток небаланса согласно (8-7) равен сумме намагничивающих токов трансформаторов тока, образующих фильтры (§ 8-2), и имеет величину, соизмеримую с величиной вторичного тока повреждения.

Совокупность указанных причин и обусловливает относительно низкую чувствительность защиты от замыканий на землю, выполненной с помощью трехтрансформаторного фильтра. Первичный ток срабатывания такой защиты получается не меньше 20—25 *а*.

Защита с трансформатором тока нулевой последовательности получается значительно чувствительнее.

Главное преимущество ТНП состоит в значительно меньшем небалансе и возможности подбора числа витков вторичной обмотки из условия наибольшей чувствительности защиты без каких-либо ограничений по нагрузке. В результате этого ТНП позволяет обеспечить действие защиты при первичных токах порядка 3—5 *а*, а при сочетании ТНП с высокочувствительными реле чувствительность защиты повышается до 1—2 *а*.

Вследствие этого схема защиты с ТНП (рис. 9-7, б) является основной для сети с малым током замыкания на землю.

Схема с трехтрансформаторным фильтром находит применение в воздушных сетях 35 *кв*, для которых конструкция ТНП еще не разработана.

Опыт эксплуатации показал, что *токовое реле 1 может неправильно работать на неповрежденных линиях в первый момент повреждения под влиянием бросков токов, появляющихся в неустановившемся режиме.*

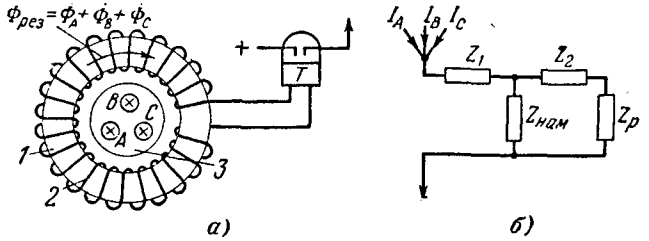
Исключить ложную работу защиты по указанной причине можно загрублением защиты по току срабатывания, введением выдержки времени или применением фильтра, не пропускающего в реле тока высших частот, составляющих значительную долю в токе неустановившегося режима. В схеме на рис. 9-7 для отстройки от броска емкостного тока предусмотрено реле времени *2*. Схемы с включением реле через фильтр высокой частоты также применяются. Защита с фильтром выполняется без выдержки времени и поэтому может реагировать на кратковременные замыкания на землю.

Действие защиты фиксируется с помощью указательного реле *3*.

в) Принцип работы и устройство ТНП

Устройство ТНП приведено на рис. 9-8. Магнитопровод *1*, собранный из листов трансформаторной стали, имеет обычно форму

кольца или прямоугольника, охватывающего все три фазы защищаемой линии. Провода фаз *A*, *B* и *C*, проходящие через отверстие ТНП, являются первичной обмоткой трансформатора, вторичная обмотка *2* располагается на магнитопроводе.



а) *б)*

Рис. 9-8. Трансформатор тока нулевой последовательности (ТНП).

а — устройство; *б* — схема замещения; *1* — магнитопровод; *2* — обмотка; *3* — трехфазный силовой кабель.

Токи фаз I_A, I_B и I_C создают в магнитопроводе соответствующие магнитные потоки Φ_A, Φ_B и Φ_C; складываясь, они образуют результирующий поток первичной обмотки:

$$\dot{\Phi}_{рез}=\dot{\Phi}_A+\dot{\Phi}_B+\dot{\Phi}_C. \qquad (9\text{-}12)$$

Если поток $\Phi_{рез}\neq 0$, то во вторичной обмотке появляется э. д. с. E_2, обусловливающая ток в реле. Каждый магнитный поток в выражении (9-12) связан с создающим его током I уравнением

$$\Phi=\frac{wI}{R_m}=kI. \qquad (9\text{-}13)$$

При одинаковом расположении проводов фаз относительно магнитопровода и вторичной обмотки коэффициент k может считаться одинаковым для всех фаз. Тогда

$$\dot{\Phi}_{рез}=\dot{\Phi}_A+\dot{\Phi}_B+\dot{\Phi}_C=k\,(\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C). \qquad (9\text{-}14)$$

Так как сумма токов фаз $\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C=3\dot{I}_0$, то можно сказать, что результирующий поток, создаваемый первичными токами ТНП, пропорционален составляющей тока нулевой последовательности:

$$\Phi_{рез}=k3I_0. \qquad (9\text{-}15)$$

Поток $\Phi_{рез}$, а следовательно, вторичная э. д. с. E_2 и вторичный ток I_2 могут возникнуть только при условии, что сумма токов фаз не равна нулю, или, иначе говоря, когда фазные токи, проходящие через ТНП, содержат составляющую I_0. Поэтому ток в реле *T*, питающемся от ТНП, будет появляться только при замыканиях на землю.

В режиме нагрузки, трехфазного и двухфазного к. з. (без замыкания на землю) сумма токов фаз $\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C=0$, и поэтому ток в реле отсутствует.

Однако практически расположение проводов фаз относительно торичной обмотки неодинаково. Коэффициент взаимоиндукции фаз вторичной обмоткой k имеет различную величину, вследствие чего, смотря на полный баланс первичных токов, сумма их магнитных токов не равна нулю. Появляется поток небаланса, вызывающий вторичной обмотке э. д. с. и ток небаланса.

Ток небаланса ТНП значительно меньше, чем в трехтрансформаторном фильтре; это объясняется тем, что в последнем суммируются торичные токи, которые искажены погрешностью трансформации нам), особенно проявляющейся при насыщении стали, в то время как в ТНП трансформация тока не влияет на небаланс. В ТНП суммируются магнитные потоки, и ток $_б$ зависит только от несимметрии расположения фаз первичного тока.

Для получения максимальной увствительности защиты, питающейся от ТНП, сопротивление обтки реле должно равняться сопротивлению ТНП. Пренебрегая противлением вторичной обмотки (рис. 9-8, *б*), можно выразить казанное условие равенством

$$z_р = z_{нам}. \qquad (9\text{-}16)$$

Из эквивалентной схемы ТНП ис. 9-8, *б*) видно, что при выполнении условия (9-16) вторичный к, поступающий в реле, и ток магничивания оказываются одиковыми: $I_{нам} = I_р$. Отсюда следует, что погрешность ТНП достигает примерно 50%. При столь большой погрешности нельзя числять вторичный ток по первичному, пользуясь коэффициентом трансформации $n_т = w_2/w_1$.

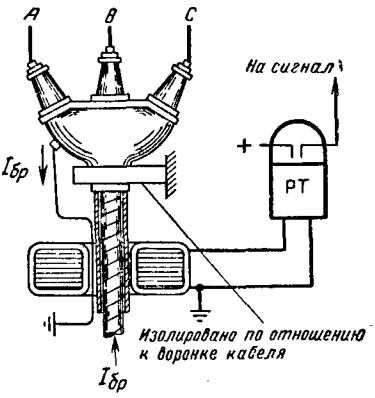


Рис. 9-9. Установка ТНП на кабеле.

Для защиты линий ТНП выполняются пока только кабельного па. При необходимости осуществления защиты воздушных линий лается кабельная вставка, на которой устанавливается ТНП.

Для кабельных линий заводы электропромышленности изготовют ТНП типа ТЗ с неразъемным сердечником, надеваемым на бель до монтажа воронки, и типов ТЗР и ТФ с разъемным магтопроводом, которые можно устанавливать на кабелях, находящихся в эксплуатации, без снятия кабельной воронки.

При прохождении токов $I_{бр}$ по оболочке неповрежденного кабеля, ваченного ТНП, в реле защиты появляется ток, от которого защита может подействовать (рис. 9-9). Опыт эксплуатации показывает, о через оболочку кабелей (стальную броню и свинец) могут продить токи $I_{бр}$, замыкающиеся через землю. Эти токи появляются и замыканиях на землю вблизи кабеля, работе сварочных аппаратов и в других подобных случаях. Прохождение тока $I_{бр}$ по броне

неповрежденного кабеля через ТНП вызывает вторичный ток в его обмотке и, как следствие этого, неправильное действие защиты.

Для исключения этого необходимо компенсировать влияние токов, которые могут проходить по свинцовой оболочке и броне кабеля. С этой целью броня и оболочка кабеля на участке от его воронки до ТНП изолируются от земли (рис. 9-9). Заземляющий провод присоединяется к воронке кабеля и пропускается через окно ТНП. При таком исполнении ток, проходящий по броне кабеля, возвращается по заземляющему проводу, поэтому магнитные потоки в сердечнике ТНП от токов в броне и проводе взаимно уничтожаются. Сердечник ТНП должен быть также надежно изолирован от брони кабеля.

г) Размещение защит в сети

Для определения поврежденного участка в радиальных сетях (рис. 9-10) токовые защиты устанавливаются на всех линиях каждого радиального направления *А* и *Б*. Защита устанавливается в начале каждой линии. При возникновении замыкания на землю (в точке *К*) по действию защиты на питающей подстанции определяется то радиальное направление, на котором произошло повреждение. Затем осмотром сигналов защит на линиях этого направления устанавливается поврежденный участок. Поврежденным является тот участок, на котором подействовавшая защита является последней ($Б_2$). Если защиты действуют на отключение, то для обеспечения селективности время действия на них подбирается по ступенчатому принципу, как на максимальных защитах.

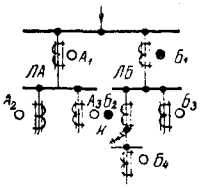


Рис. 9-10. Действие защиты в сети при замыкании на землю.

● — сработавшая защита; ○ — не подействовавшая защита.

д) Распределение токов нулевой последовательности в сети при замыканиях на землю

Для уяснения условий работы защиты на рис. 9-11 приведено распределение токов I_0. При замыкании на землю одной из фаз линии *Л1* (например, в точке *К*) в месте повреждения возникает напряжение нулевой последовательности $U_{0к}$, под действием которого проходят токи нулевой последовательности I_0, замыкающиеся через емкости фаз каждой линии и ДГК (если последняя установлена). Из рассмотрения приведенного токораспределения можно сделать следующие выводы:

1) Емкостный ток нулевой последовательности проходит по всем поврежденным и неповрежденным линиям сети. Ток дугогасящей катушки замыкается только по поврежденной линии *Л1*.

2) В неповрежденных линиях *Л2* и *Л3* через ТНП защиты проходит емкостный ток нулевой последовательности ($3I_{0Л2}$ и $3I_{0Л3}$),

замыкающейся через емкости фаз данной линии $C_{Л2}$ и $C_{Л3}$. Эти токи направлены к шинам, а их величины равны:

$$3I_{0Л2} = 3U_{0к}\omega C_{Л2} \quad \text{и} \quad 3I_{0Л3} = 3U_{0к}\omega C_{Л3}. \tag{9-17}$$

3) Емкостный ток, проходящий через ТНП поврежденной линии *Л1*, $I_{ТНП\,пов.л}$, равен сумме емкостных токов всех неповрежденных линий или, иначе говоря, полному емкостному току сети $3I_{0C}$ за вычетом тока $I_{0Л1}$, замыкающегося через емкость $C_{Л1}$ поврежденной линии:

$$I_{ТНП\,пов.л} = 3I_{0C} - 3I_{0Л1} = \\ = 3U_{0к}\omega C - 3U_{0к}\omega C_{Л1}, \tag{9-18}$$

где C — емкость фазы всей сети.

Этот ток направлен от шин к месту замыкания, т. е. противоположен току в неповрежденных линиях.

При наличии ДГК на указанный емкостный ток накладывается индуктивный ток дугогасящей катушки $3I_{0L} = 3U_{0к}/x_L$, показанный на рис. 9-11 пунктиром.

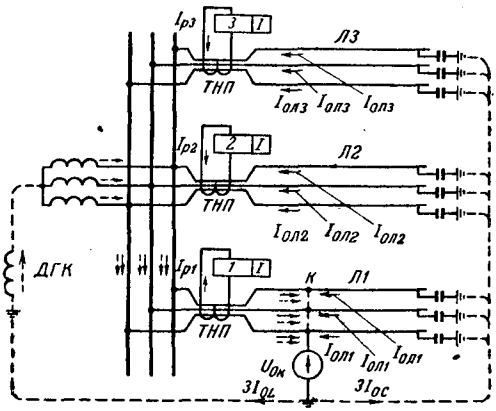


Рис. 9-11. Распределение токов нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю.

В этом случае результирующий ток в ТНП поврежденной линии *Л1* равен разности двух токов:

$$I_{ТНП\,пов.л} = 3I_{0L} - (3I_{0C} - 3I_{0Л1}) = \frac{3U_{0к}}{x_L} - 3U_{0к}\omega\,(C - C_{Л1}). \tag{9-19}$$

Направление результирующего тока $I_{ТНП\,пов.л}$ зависит от того, какая составляющая (индуктивная или емкостная) преобладает в нем.

4) Токораспределение показывает, что в некомпенсированной сети могут применяться направленные защиты, реагирующие на реактивную мощность нулевой последовательности, обусловленную емкостным током.

В сети с перекомпенсацией емкостного тока направленная защита реактивной мощности не применима, так как реактивный ток в поврежденной линии и емкостный в неповрежденной имеют одинаковое направление.

е) Ток срабатывания токовой защиты

Для обеспечения селективного действия защиты (например, защиты *1* на рис. 9-11) необходимо отстроить ее ток срабатывания от емкостного тока, проходящего по защищаемой линии *Л1* при

замыканиях на землю на других присоединениях, и от тока небаланса при к. з. в сети. Если емкость фазы защищаемой линии равна $C_л$, то емкостный ток в защите при внешнем замыкании на землю равен утроенному току $I_{0л}$ этой линии, т. е. $I_р = 3I_{0(л)} = 3U_ф\omega C_л$.

При перемежающейся дуге в месте повреждения возможны броски емкостного тока, в 4—5 раз превышающие его установившееся значение. Исходя из этого, первичный ток срабатывания защиты принимают равным:

$$I_{с.з} = k_{зап}k_б 3U_ф\omega C_л, \qquad (9\text{-}20)$$

где $k_б$ — коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока, равный 4—5; при наличии выдержки времени $k_б \approx 2 \div 3$;
$k_{зап}$ — коэффициент запаса, равный 1,1—1,2.

Выбранный, таким образом, ток срабатывания всегда оказывается надежно отстроенным и от токов небаланса, возникающих в ТНП не только при нагрузке, но и при междуфазных к. з.

Чувствительность защиты при замыканиях на землю на защищаемой линии проверяется по отношению токов, протекающих через ТНП поврежденной линии, к току срабатывания защиты:

$$k_ч = \frac{I_{ТНП\,пов.л}}{I_{с.з}}. \qquad (9\text{-}21)$$

В числитель (9-21) подставляется $I_{ТНП\,пов.л}$ по (9-18) или (9-19). Чувствительность защиты считается достаточной, если коэффициент чувствительности $k_ч$ равен 1,25 для кабельных и 1,5 для воздушных линий.

Вследствие сложности вычисления вторичного тока ТНП по первичному, реле регулируется на заданный ток срабатывания подачей тока в первичную цепь.

ж) Оценка токовой защиты

Чувствительность рассмотренной токовой защиты ограничивается необходимостью ее отстройки от бросков емкостного тока при замыканиях на землю на других линиях. В результате этого для надежного и селективного действия токовой защиты требуется увеличение тока замыкания на землю сверх допустимого предела, в то время как для повышения надежности работы компенсированных сетей необходимо снижать этот ток. Недостаточная чувствительность токовых защит, реагирующих на емкостный ток сети, особенно проявляется на подстанциях с малым числом линий, а также в в компенсированных сетях с малым остаточным током. В этих случаях емкостный ток неповрежденной линии (от которого отстраивается ее защита) становится соизмеримым с током замыкания на землю в поврежденной линии.

В связи с этим токовая защита в компенсированных сетях применяется редко.

В сетях торфоразработок применяется реле типа МТР-77 повышенной чувствительности [Л. 40, 41]. Это реле выполнено с помощью

магнитного усилителя и питается от специального ТНП типа КНТ-36, имеющего сердечник из пермаллоя (МО). Реле МТР в сочетании с трансформатором КНТ действует при 0,3 *а* первичного тока $3I_0$.

з) Защита с использованием токов непромышленной частоты

На рис. 9-12 приведена схема устройства, использующего ток с частотой 100 *гц* [Л. 38].

На сердечнике обычной дугогасящей катушки *1* помещается дополнительная обмотка низкого напряжения *2*, включаемая кратковременно через специальный контактор *3* при появлении напряжения нулевой последовательности. Дополнительная обмотка *2* замыкается через однополупериодный выпрямитель *4* на балластное сопротивление *5*.

Нормально в дугогасящей катушке тока нет. При замыкании на землю через катушку идет ток, который наводит в дополнительной обмотке э. д. с. E_2. С помощью автоматики, реагирующей на появление U_0, контактор *3* замыкает цепь дополнительной обмотки, в которой при этом возникает ток. Благодаря однополупериодному выпрямителю ток в дополнительной обмотке содержит значительную составляющую второй гармоники (100 *гц*).

Наличие последней вызывает появление второй гармоники и в первичном токе ДГК.

Поскольку ток дугогасящей катушки замыкается через место повреждения, то ток второй гармоники появляется в ТНП только заземлившейся линии, обеспечивая селективную сигнализацию.

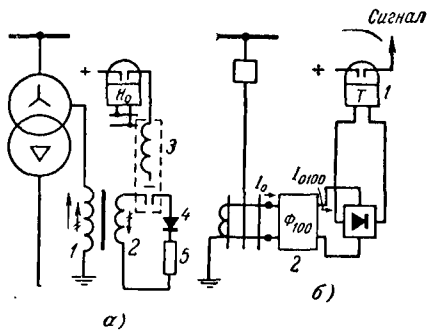


Рис. 9-12. Схема селективной сигнализации с использованием тока 2-й гармоники (с частотой 100 *гц*).

а — устройство для получения 2-й гармоники тока замыкания на землю; *б* — устройство сигнализации, реагирующее на ток 2-й — 5-й гармоник.

Устройство, реагирующее на ток второй гармоники (рис. 9-12, *б*), состоит из токового реле *1*, выполненного на выпрямленном токе. Реле включено на ТНП через фильтр токов второй гармоники *2*. Для токов других гармоник фильтр имеет большое сопротивление. Поскольку это сопротивление имеет конечную величину, небольшая часть тока других частот попадает в реле *1*. Поэтому для обеспечения селективности ток срабатывания реле *1* рекомендуется принимать не меньше 10% емкостного тока защищаемой линии. Такая отстройка предупреждает срабатывание реле при повреждениях на других присоединениях.

и) Направленная защита

В радиальных сетях, когда собственные емкостные токи отдельных присоединений велики и соизмеримы с полным емкостным током сети, токовая защита неприменима. В этом случае имеется принципиальная возможность использовать направленные защиты, которые не требуется отстраивать от собственных емкостных токов защищаемой линии.

Направленная защита (рис. 9-13) состоит из одного реле мощности, которое включается на ток и напряжение нулевой последовательности.

В некомпенсированной сети защита реагирует на мощность нулевой последовательности, создаваемую емкостным током линии. Как следует из токораспределения на рис. 9-11, направление тока, а следовательно, и мощности на поврежденной и неповрежденной линиях противоположны и, следовательно, по знаку мощности направленное реле может определить поврежденную линию.

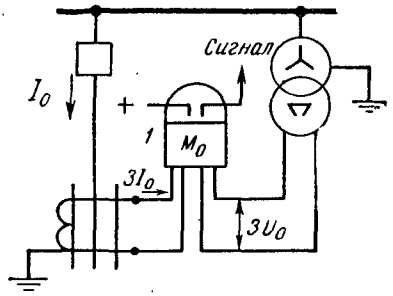


Рис. 9-13. Принципиальная схема направленной защиты от замыканий на землю.

Учитывая, что емкостный ток I_0 сдвинут относительно напряжения на 90°, применяют реле мощности синусного типа, реагирующее на

$$S_p = 3U_0 3I_0 \sin \varphi_0.$$

В сети, работающей с перекомпенсацией емкостного тока, направленная защита неприменима, так как реактивный ток, протекающий в поврежденной линии, и емкостный ток в неповрежденной имеют одинаковое направление.

В компенсированной сети реле мощности используется в тех случаях, когда для действия защиты создается активный ток искусственным путем. В этом случае должно применяться реле мощности косинусного типа.

Для обеспечения селективности при «земле» в сети реле мощности направленной защиты должно отстраиваться от тока и напряжения небаланса, обусловленного нагрузкой, протекающей по данной линии; этим условием ограничивается чувствительность защиты.

Реле мощности должны иметь высокую чувствительность. При питании токовой обмотки реле от ТНП нужно учитывать большую угловую погрешность последнего.

Для правильной работы направленной защиты требуется большая угловая точность измерительных трансформаторов и самого реле. Опыт эксплуатации этих защит показывает, что они имеют относительно большой процент неправильной работы.

Чебоксарский электроаппаратный завод начал выпуск направленной защиты типа ЗЗП-1 [Л. 40], предназначенной для электросетей, питающих торфоразработки. Эта защита имеет угол максимальной чувствительности, равный 90°, выполнена на полупроводниках и обладает высокой чувствительностью, реагируя на ток $I_з = 0{,}07 \div 2$ *а*.

9-5. ЗАЩИТЫ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ОСТАТОЧНЫЕ ТОКИ КОМПЕНСИРОВАННОЙ СЕТИ

Дугогасящая катушка компенсирует емкостный ток основной частоты (50 *гц*). Исследования показали, что ток замыкания на землю содержит, кроме основной гармоники, составляющие высших

гармоник, а также активную составляющую основной частоты, которые остаются нескомпенсированными.

Активная составляющая тока замыкания на землю обусловливается активным сопротивлением дугогасящей катушки и сопротивлением, определяющим активные потери в сети.

Эта составляющая невелика и достигает 3—5% тока катушки. Активный ток катушки замыкается только по поврежденному присоединению на него, и должна реагировать защита.

Защита выполняется с помощью реле мощности, как показано на рис. 9-13, косинусного типа, реагирующего только на активную составляющую мощности нулевой последовательности. Токовая защита реагирует на полный ток и поэтому не может действовать только от его активной составляющей.

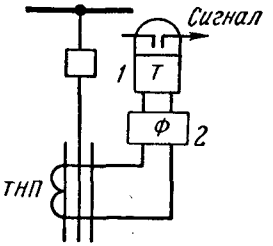


Рис. 9-14. Принципиальная схема токовой защиты от замыканий на землю, реагирующая на токи высших гармоник.

Составляющие высших гармоник в установившемся индуктивном и емкостном токе при замыканиях на землю вызываются наличием гармонических составляющих в э. д. с. генераторов и искажений, обусловленных нелинейностью нагрузок (главным образом силовых трансформаторов).

Ток в поврежденном присоединении равен сумме основных и высших гармоник емкостных токов всех неповрежденных присоединений, на этот ток накладывается ток дугогасящей катушки, имеющий много гармоник, поэтому результирующий ток I_0 поврежденного присоединения содержит значительно больше гармоник, чем ток в неповрежденных присоединениях.

Основываясь на этом различии, выполняют токовую защиту, реагирующую на сумму высших гармоник тока I_0.

Защита осуществляется с помощью токового реле *1* (рис. 9-14), включенного на ток сети через фильтр *2*, запирающий путь в реле токам основной частоты 50 *гц*.

Состав гармоник и их величина зависят от режима сети, числа линий и уровня напряжения, что является недостатком, ограничивающим использование защит, действующих на указанном принципе. В Советском Союзе применяется защита типов УСЗ-1 и УСЗ-3, разработанная ВНИИЭ. Схемы этих защит подробно описаны в [Л. 38, 55]. Опыт эксплуатации показывает, что защита, реагирующая на высшие гармоники тока I_0, обладает достаточно хорошей селективностью и поэтому начинает применяться в сетях 6—10 *кв*.

9-6. ЗАЩИТЫ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ТОКИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

К этой группе относятся два вида защит. Одни реагируют на появление тока высокой частоты, а вторые — на знак волн тока или соответствующей ему мощности.

Токи высокой частоты возникают во время переходного процесса при замыканиях на землю. Их появление объясняется тем, что в начальный момент замыкания на землю емкость заземлившейся фазы разряжается, а емкости двух других фаз дозаряжаются, поскольку напряжения на них относительно земли возрастают до междуфазного [Л. 37].

Указанный *процесс разряда и дозаряда емкостей фаз носит характер периодических, затухающих колебаний* (рис. 9-15). Частота колебаний и скорость их затухания определяются L, C и R зарядного и разрядного контуров. Расчеты и опыты показывают, что частота переходного тока меняется в зависимости от параметров сети от 200 до 3 000 *гц*, а время его затухания очень мало и имеет величину от 0,01 до 0,025 *сек*.

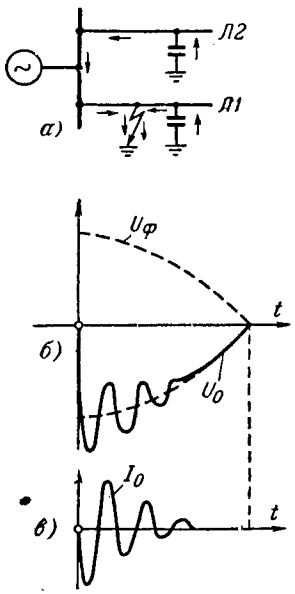


Рис. 9-15. Переходный процесс при замыкании на землю.

а — схема сети; *б* — кривая напряжений U_0 и $U_ф$ в начальный момент замыкания на землю; *в* — кривая изменения тока I_0 в начальный момент повреждения.

С некоторым приближением считается, что отношение максимальных значений переходных токов к их установившимся значениям пропорционально отношению частот f переходного режима к рабочей частоте 50 *гц*. Поэтому переходные токи могут в десятки раз превосходить токи установившегося режима.

На поврежденной линии переходный ток имеет максимальное значение. На неповрежденных линиях величина этого тока соответственно меньше, а его направление противоположно направлению тока в поврежденной линии.

Наличие компенсации не влияет на характер переходного процесса, так как индуктивность дугогасящих катушек и заземляющих трансформаторов значительно больше индуктивности проводов, и поэтому ток дугогасящего устройства нарастает очень медленно и появляется после завершения переходного процесса.

В сетях с большим R_0 и при удаленных замыканиях, связанных с увеличением R контура, процесс разряда и заряда может приближаться к апериодическому, что ограничивает возможности применения подобных защит. Защита выполняется с помощью быстродействующих токовых реле, включаемых через фильтр, пропускающий в реле только токи высокой частоты.

Защита, реагирующая на величину тока переходного периода, разработанная в Одессаэнерго [Л.39], показана на рис. 9-16. Реагирующее токовое реле должно отличаться особым быстродействием и реагировать на кратковременный (импульсный) ток, каким явля-

ется переходный ток высокой частоты. В схеме на рис. 9-16 используется реле типа ЭТ с дополнительной удерживающей обмоткой постоянного тока, с помощью которой сработавшее от импульса тока реле *1* удерживается в сработанном состоянии, пока не подействует указательное реле *2*.

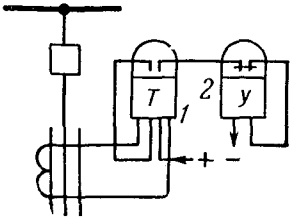


Рис. 9-16. Принципиальная схема токовой защиты от замыканий на землю, реагирующей на емкостные токи переходного процесса.

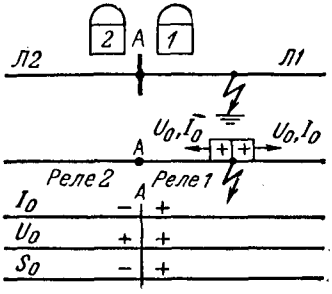


Рис. 9-17. Знак волн тока, напряжения и мгновенной мощности при замыкании на землю.

Принцип действия защиты, реагирующей на волновые процессы, основан на появлении в момент замыкания на землю электромагнитных волн.

Разряд емкости заземлившейся фазы, происходящий в первый момент замыкания, характеризуется появлением волн тока и напряжения нулевой последовательности, распространяющихся в обе стороны от места повреждения (рис. 9-17) по контуру фаза — земля.

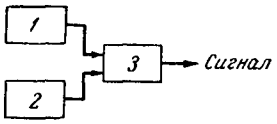


Рис. 9-18. Блок-схема устройства УСЗ-1.

1 — орган, реагирующий на переходный процесс; *2* — орган, реагирующий на высшие гармоники переходного процесса; *3* — логическая часть схемы.

Как видно из рис. 9-17, направление (или знак) тока и мгновенной мощности в поврежденном и неповрежденных присоединениях (относительно шин *А*) будет различным. Это различие в знаках используется для выполнения защиты, реагирующей на знак волны тока или на знак мгновенной мощности на фронте волны. В качестве реагирующих органов в первом случае используется реле, сравнивающее направление тока с направлением напряжения нулевой последовательности (на поврежденном элементе они совпадают, а на неповрежденном различны). Конструкция такой защиты с тиратронным реле разработана и применяется в Одессаэнерго [Л. 38].

Во втором случае применяется импульсное реле мощности. Конструкция подобного реле разработана в Энергетическом институте имени Г. М. Кржижановского [Л. 38]. Во ВНИИЭ разработана

универсальная защита типа УСЗ-1, состоящая из элемента, реагирующего на знак мощности S_0 переходного процесса, и элемента, реагирующего на высшие гармоники. Такая защита (рис. 9-18) способна фиксировать установившиеся повреждения и кратковременные замыкания.

Глава десятая

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ

10-1. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

На линиях, отходящих от шин электростанций или узловых подстанций энергосистем, часто по условиям устойчивости требуется обеспечить отключение к. з. в пределах всей защищаемой линии без выдержки времени ($t = 0$). Это требование нельзя выполнить с помощью рассмотренных выше мгновенных токовых отсечек, так как зона их действия охватывает только часть защищаемой линии. Кроме того, отсечки неприменимы на коротких линиях, где токи к. з. в начале и конце линии не имеют существенного различия. В этих случаях используются защиты, принцип действия которых обеспечивает отключение повреждений без выдержки времени в пределах всей защищаемой линии, в том числе и на линиях малой протяженности.

К защитам такого типа относятся дифференциальные защиты. Они обеспечивают мгновенное отключение к. з. в любой точке защищаемого участка и обладают селективностью при к. з. за пределами защищаемой линии (внешние к. з.).

Дифференциальные защиты подразделяются на продольные и поперечные. Первые служат для защиты как одинарных, так и параллельных линий, вторые — только параллельных линий.

10-2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Принцип действия продольных дифференциальных защит основан на сравнении величины и фазы токов в начале и конце защищаемой линии.

Как видно из рис. 10-1, при внешнем к. з. токи I_{I} и I_{II} на концах линии AB направлены в одну сторону и равны по величине, а при к. з. на защищаемой линии они направлены в разные стороны и, как правило, не равны друг другу [1]. Следовательно, сопоставляя

[1] Обычно токи, проходящие от сборных шин в линию, считаются положительными, а к сборным шинам — отрицательными. При такой условности токи по концам линий в режиме внешнего к. з. и нагрузки имеют противоположные знаки, т. е. сдвинуты по фазе на 180°, а при к. з. на линии — одинаковые или совпадают по фазе.

величину и фазу токов I_I и I_{II}, можно определять, где возникло к. з. — на линии или за ее пределами. Такое сравнение токов по величине и фазе осуществляется в реагирующем органе (реле) дифференциальной защиты.



Рис. 10-1. Токи по концам линии.
а — при внешних к. з.; *б* — при к. з. на линии.

Для этой цели по концам линии устанавливаются трансформаторы тока *TI* и *TII* (рис. 10-2) с одинаковым коэффициентом трансформации. Их вторичные обмотки соединяются при помощи соединительного кабеля и подключаются к дифференциальному реле таким образом, чтобы при внешних к. з. ток в реле был равен разности токов в начале и конце линии, т. е. $\dot{I}_I - \dot{I}_{II}$, а при к. з. на линии — их сумме $\dot{I}_I + \dot{I}_{II}$.

Имеются две принципиально различные схемы дифференциальных защит: с циркулирующими токами и уравновешенными напряжениями.

В схеме с циркулирующими токами (рис. 10-2, *а*) вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются так, чтобы при внешнем к. з. их э. д. с. были направлены последовательно, а токи в соединительных проводах имели одинаковое направление. Дифференциальное реле *Р* включается параллельно вторичным обмоткам трансформаторов тока, образуя цепь для замыкания вторичных токов $I_{вI}$ и $I_{вII}$.

При к. з. вне защищаемой линии (рис. 10-2, *а*), а также в нормальном режиме первичные токи $\dot{I}_I$ и $\dot{I}_{II}$ в начале и в конце линии равны по величине и направлены в одну сторону. Вторичные токи $\dot{I}_{вI}$ и $\dot{I}_{вII}$ каждого трансформатора тока замыкаются через обмотку реле *Р* и проходят по ней в противоположных направлениях, навстречу друг к другу. Поэтому ток в реле равен геометрической разности вторичных токов, т. е.

$$\dot{I}_р = \dot{I}_{вI} - \dot{I}_{вII}. \qquad (10\text{-}1)$$

или, выражая вторичные токи через первичные, получаем:

$$\dot{I}_р = \frac{\dot{I}_I}{n_{тI}} - \frac{\dot{I}_{II}}{n_{тII}}. \qquad (10\text{-}1а)$$

При равенстве коэффициентов трансформации $n_{тI} = n_{тII} = n$ и отсутствии погрешностей в работе трансформаторов тока $I_{вI} = I_{вII}$ вторичные токи, поступающие в обмотку реле, балансируются, ток $I_р = 0$ и реле не работает. Аналогичное положение имеет место и при качаниях. Таким образом, по принципу действия дифференциальная защита не реагирует на внешние к. з., токи нагрузки и ка-

чания, поэтому она осуществляется без выдержки времени и не должна отстраиваться от токов нагрузки и качания. В действительности (см. § 3-1 и 3-2) трансформаторы тока работают с погрешностью (рис. 10-2, *б*), вследствие этого вторичные токи имеют некоторое различие по величине и по фазе, а их разность не равна нулю. В реле появляется ток небаланса

$$\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{вI} - \dot{I}_{вII}. \quad (10\text{-}2)$$

Для исключения неселективной работы защиты при внешних к. з. ток срабатывания дифференциальной защиты должен превышать максимальное значение тока небаланса:

$$I_{с.з} > I_{нб.макс}. \quad (10\text{-}2а)$$

При к. з. на защищаемой линии (рис. 10-2, *в*) первичные токи I_I и I_{II} направлены от шин подстанции в линию (к месту к. з.). При этом направление первичного тока на одном из концов линии, по сравнению с его направлением при внешнем к. з., меняется на противоположное (ток I_{II} на рис. 10-2, *в*). Соответственно меняется направление вторичного тока $I_{вII}$ в трансформаторе тока на этом конце линии. Из показанного на рис. 10-2, *в* токораспределения видно, что вторичные токи $I_{вI}$ и $I_{вII}$ в этом случае проходят в обмотке реле P в одном направлении, поэтому ток в реле равен их сумме

$$\dot{I}_р = \dot{I}_{вI} + \dot{I}_{вII} = \frac{\dot{I}_I}{n} + \frac{\dot{I}_{II}}{n} = \frac{\dot{I}_{к.з}}{n}, \quad (10\text{-}3)$$

где $I_{к.з}$ — полный ток к. з., равный сумме токов I_I и I_{II}, притекающих к месту повреждения (к точке K).

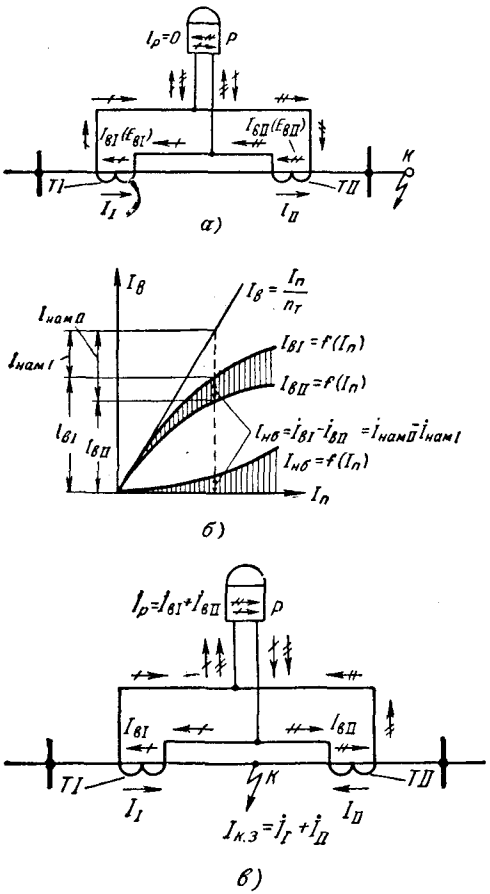


Рис. 10-2. Принцип действия дифференциальной защиты.

а — токораспределение при к. з. вне защищаемой линии; *б* — ток небаланса; *в* — токораспределение при к. з. на защищаемой линии.

Под влиянием этого тока защита срабатывает. Выражение (10-3) показывает, что *дифференциальная защита реагирует на полный ток к. з. $I_{к.з}$ в месте повреждения, и поэтому в сети с двусторонним питанием она обладает большей чувствительностью, чем токовые защиты, реагирующие на ток, проходящий только по одному концу линии.* Зона действия защиты охватывает участок линии, расположенный между трансформаторами тока *TI* и *TII*.

В схеме с уравновешенным напряжением (рис. 10-3, *а*) вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются так, чтобы в условиях внешнего к. з. их э. д. с. были направлены встречно, а реле включается последовательно в цепь соединительных проводов.

При внешних к. з., а также при прохождении токов нагрузки вторичные э. д. с. трансформаторов тока равны и совпадают по фазе

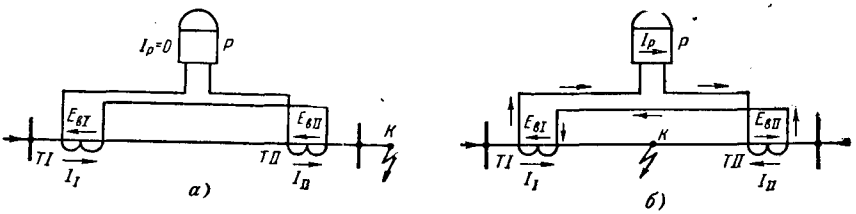


Рис. 10-3. Принцип действия дифференциальной защиты на равновесии напряжения.

а — при внешних к. з.; *б* — при к. з. на защищаемой линии.

($\dot{E}_{вI} = \dot{E}_{вII}$), поскольку $I_I = I_{II}$, а $n_{тI} = n_{тII}$. Отсюда следует, что ток

$$I_р = \frac{\dot{E}_{вI} - \dot{E}_{вII}}{z} = 0,$$

где z — полное сопротивление контура «трансформаторы тока — реле».

Погрешности трансформаторов тока нарушают баланс вторичных э. д. с. и вызывают появление э. д. с. небаланса ($\dot{E}_{нб} = \dot{E}_{вI} - \dot{E}_{вII}$). Под действием $\dot{E}_{нб}$ в реле возникает ток небаланса $I_{нб}$. Так же как и в схеме с циркулирующими токами, для обеспечения селективности защиты при внешних к. з. ток срабатывания реле должен превышать ток небаланса.

При к. з. в зоне защиты (рис. 10-3, *б*) вторичные э. д. с. $\dot{E}_{вI}$ и $\dot{E}_{вII}$ складываются и вызывают в реле ток $I_р$, под действием которого оно срабатывает.

В схемах дифференциальных защит находят применение оба принципа. Ниже рассмотрены дифференциальные защиты, основанные на принципе циркуляции токов, так как защиты этого типа получили распространение в СССР.

10-3. ТОКИ НЕБАЛАНСА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЕ

Правильный учет тока небаланса в схеме дифференциальной защиты имеет существенное значение, поскольку от его величины зависит ток срабатывания защиты (10-2а).

В схеме защиты с циркулирующими токами (рис. 10-2, *а*) ток $\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{вI} - \dot{I}_{вII}$.

Выразив вторичные токи через первичные с учетом погрешности трансформаторов тока (см. § 3-1), получим:

$$\dot{I}_{нб} = \left(\frac{\dot{I}_{I}}{n_т} - \dot{I}_{Iнам}\right) - \left(\frac{\dot{I}_{II}}{n_т} - \dot{I}_{IIнам}\right),$$

где $\dot{I}_{I\,нам}$ и $\dot{I}_{II\,нам}$ — токи намагничивания, отнесенные ко вторичным обмоткам *ТТ*.

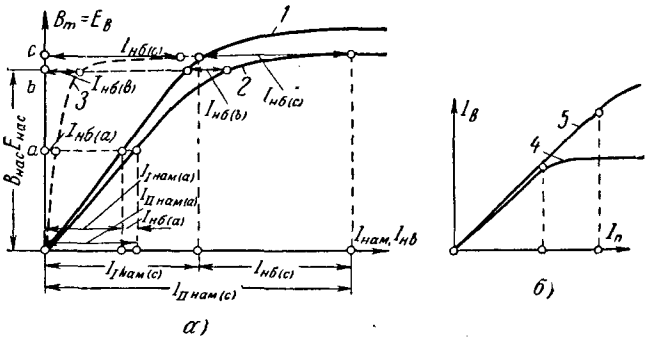


Рис. 10-4. Характеристика намагничивания трансформаторов тока *TI* и *TII* на рис. 10-2 и ток небаланса, обусловленный неидентичностью характеристик (*а*) и характеристики намагничивания трансформаторов тока класса 0,5 и класса Д (*б*).

1 — вторичная э. д. с. *TI* $E_{Iв} = f(I_{Iнам})$; *2* — вторичная э. д. с. *TII* $E_{IIв} = f(I_{IIнам})$; *3* — $I_{нб} = f(E_в$ или $B_m)$ при $E_{Iв} = E_{IIв}$; *4* — характеристика трансформатора тока класса 0,5; *5* — характеристика трансформатора тока класса Д.

Так как при внешнем к. з. $I_I = I_{II}$, то

$$\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{IIнам} - \dot{I}_{Iнам}. \qquad (10\text{-}4)$$

Выражение (10-4) показывает, что для уменьшения тока небаланса необходимо выравнивать токи $I_{I\,нам}$ и $I_{II\,нам}$ (рис. 10-2, *б*) по величине и фазе, тогда их разность будет минимальной.

Ток намагничивания зависит от магнитной индукции B или от вторичной э. д. с. $E_в$ трансформаторов тока (рис. 10-4, *а*), поскольку B и $E_в$ пропорциональны.

Из характеристик *1*, *2* и *3*, приведенных на рис. 10-4, *а*, следует, что ток небаланса будет равен нулю при полной идентичности (совпадении) характеристик намагничивания *1* и *2* трансформаторов тока *TI* и *TII* (рис. 10-2, *а*) и равенстве вторичных э. д. с. $E_в$.

Выполнить эти требования с абсолютной точностью на практике не удается, и поэтому ток небаланса всегда имеется. Он возрастает с увеличением магнитной индукции B, которая в свою очередь повышается при увеличении первичного тока $I_{к.з}$ и вторичной нагрузки $z_н$. Особенно значительно растет $I_{нб}$ при насыщении трансформаторов тока, так как при этом резко усиливается различие в токах намагничивания трансформаторов тока. Поэтому, помимо обеспечения наибольшей идентичности характеристик намагничивания, стремятся к тому, чтобы при максимальном токе внешнего к. з. сердечники трансформаторов тока не насыщались.

Для выполнения этого условия используются следующие пути:

1. Применяются трансформаторы тока, насыщающиеся при возможно больших кратностях тока к. з. и вторичной нагрузки $z_н$.

Этому требованию наилучшим образом удовлетворяют трансформаторы тока класса Д, специально изготовляемые для дифференциальных защит (рис. 10-4, *б*).

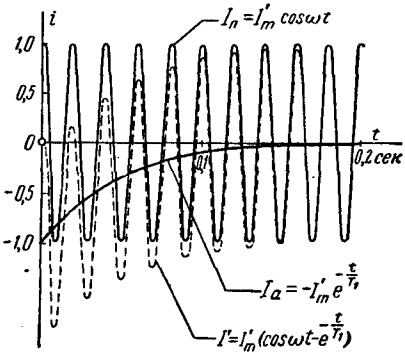


Рис. 10-5. Периодическая и апериодическая слагающие тока к. з.

2. Принимаются меры для ограничения величины вторичной э. д. с. $E_в$, от которой зависит магнитная индукция B ($B \equiv E_в$). Чтобы избежать насыщения, как видно из рис. 10-4, *а*, необходимо иметь $E_в < E_{нас}$. Поскольку

$$E_в = I_в (z_в + z_н) = \frac{I_{к.з}}{n_т} (z_в + z_н), \qquad (10\text{-}5)$$

то для ограничения $E_в$ необходимо при заданных $I_{к.з}$ и $z_в$ уменьшать нагрузку $z_н$ трансформаторов тока и увеличивать их коэффициент трансформации $n_т$.

Кроме того, для выравнивания токов $I_{I\,нам}$ и $I_{II\,нам}$ необходимо выравнивать нагрузку вторичных обмоток трансформаторов тока, т. е. обеспечивать условие $z_{I\,н} = z_{II\,н}$.

В схеме с циркуляцией токов нагрузку каждого трансформатора тока составляет сопротивление соединительных проводов от трансформаторов тока до места включения реле. Сопротивление реле не учитывается, так как в условиях внешнего к. з. ток в нем отсутствует.

Сопротивление нагрузок $z_{I\,н}$ и $z_{II\,н}$, при которых трансформаторы тока работают в прямолинейной части характеристики намагничивания, выбирается по кривым 10%-ной погрешности трансформаторов тока.

Токи намагничивания, а вместе с ними и токи небаланса резко возрастают в первый момент к. з. Как известно, в первый момент к. з. ток к. з. состоит из периодической $I_п$ и апериодической I_a составляющих (рис. 10-5).

Каждая составляющая, протекая по первичной обмотке трансформатора тока, делится на две части: одна трансформируется во вторичную обмотку, а вторая идет на намагничивание сердечника, образуя ток $I_{нам}$, что наглядно иллюстрируется с помощью схемы замещения трансформатора тока, показанной на рис. 10-6.

Скорость изменения апериодической составляющей $I_а = -I_m e^{t/T_1}$ значительно меньше скорости изменения переменной составляющей $I_п = I_m \sin(\omega t - 90)$. Поэтому ток $I_а$ плохо трансформируется во вторичную цепь и большая его часть $I_{а.нам}$ идет на намагничивание сердечника. В результате этого трансформатор тока насыщается, что ухудшает трансформацию периодической составляющей и повышает долю этого тока $I_{п.нам}$, идущую на намагничивание. Таким образом, *подмагничивающее действие*

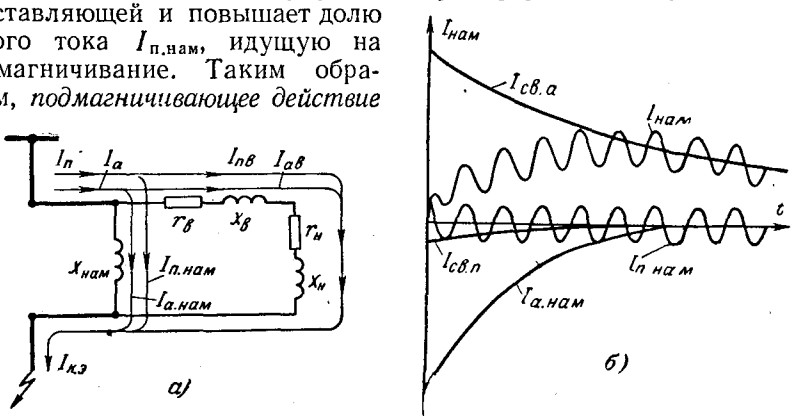


Рис. 10-6. Схема замещения трансформатора тока и распределение периодической и апериодической составляющих тока к. з. между ветвями намагничивания и вторичной обмотки (*а*) и кривые тока намагничивания и его составляющих (*б*).

апериодической составляющей резко увеличивает намагничивающие токи и токи небаланса в переходном режиме к. з.

Существенное влияние на увеличение тока небаланса оказывает также остаточное намагничивание сердечников трансформаторов тока.

Трансформатор тока остается в намагниченном состоянии, если проходящий через него ток прерывается (отключается) в момент времени, когда он и создаваемый им магнитный поток не равны нулю. В этом случае в сердечнике трансформатора тока остается магнитный поток $\Phi_{ост}$, который был в нем в момент отключения тока. Если при последующем к. з. остаточный поток $\Phi_{ост}$ совпадает по знаку с магнитным потоком, обусловленным током к. з. (особенно его апериодической составляющей), то результирующий поток, равный их сумме, может достигнуть весьма большой величины и вызвать насыщение магнитопровода, в результате которого резко возрастает ток намагничивания и как следствие этого увеличится ток небаланса.

Поэтому при разработке мер, предупреждающих ложное действие дифференциальных защит от токов небаланса, необходимо считаться с влиянием остаточного намагничивания.

Типичная кривая сквозного тока к. з. и тока небаланса в переходном режиме к. з. приведена на рис. 10-7, *а* и *б*. Кривая тока небаланса имеет две характерные особенности: во-первых, ток $I_{нб}$ достигает наибольшего значения не в момент максимума первичного тока к. з. (кривая $I_к$), а несколько позже и затухает медленнее тока $I_к$. Во-вторых, кривая $I_{нб}$ имеет асимметричный характер и содержит большую апериодическую составляющую $I_{а.нб}$, которая в основном определяет продолжительность затухания и величину тока $I_{нб}$ в переходный период. В этом можно убедиться, разложив кривую $I_{нб}$ на ее составляющие, как это показано на рис. 10-7, *в*. Каждая из этих составляющих является (при отсутствии насыщения) разностью соответствующих токов намагничивания трансформаторов тока защиты, поскольку $I_{нб} = I_{IIнам} - I_{Iнам}$.

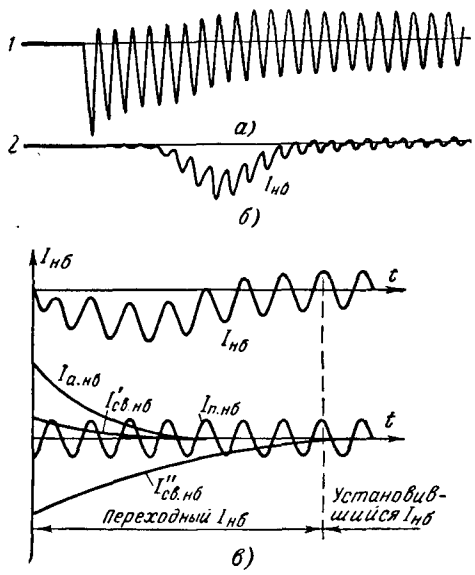


Рис. 10-7. Ток небаланса в реле при внешних к. з.

а — ток к. з.; *б* — ток небаланса; *в* — разложение $I_{нб}$ на периодическую и апериодическую составляющие: $I_{п.нб} = I_{п.намII} - I_{п.намI}$; $I_{а.нб} = I_{а.намII} - I_{а.намI}$.

В частном случае, когда один из трансформаторов тока дифференциальной защиты работает без погрешности (например, $I_{Iнам} = 0$), ток небаланса имеет наибольшую величину и равен току намагничивания второго трансформатора тока, т. е. $I_{нб} = I_{IIнам}$. В этом предельном случае кривые $I_{нам}$ и $I_{нб}$ совпадают, а в общем случае при $I_{Iнам}$ и $I_{IIнам} > 0$ кривая $I_{нб}$ аналогична по форме кривой $I_{нам}$.

Типичная кривая тока $I_{нам}$ трансформатора в переходный период при к. з. с током $I_к$ по рис. 10-7, *а* приведена на рис. 10-6, *б*. Как показано на рис. 10-6, *а*, при к. з. в сети в ветви намагничивания появляются вынужденные периодические и апериодические токи намагничивания: $I_{п.нам}$ и $I_{а.нам}$. Так как в цепи, содержащей индуктивность, ток изменяться скачком не может, то в ветви намагничивания появляются свободные апериодические токи $I_{св.п}$ и $I_{св.а}$, компенсирующие в первый момент времени вынужденные составляющие: $I_{п.нам}$ и $I_{а.нам}$.

Диаграмма вынужденных и свободных токов небаланса показана на рис. 10-7, *в*.

Свободные токи замыкаются в контуре вторичной обмотки (рис. 10-6, *а*) и затухают с постоянной времени T_2, определяемой параметрами этого контура:

$$T_2 = \frac{L_{нам} + L_в + L_н}{r_в + r_н}.$$

Результирующий ток намагничивания $I_{нам}$ (рис. 10-6, *б*) равен в каждый момент времени алгебраической сумме четырех составляющих: $I_{нам} = I_{п.нам} - I_{св.п} + I_{а.нам} - I_{св.а}$. Из рис. 10-6, *б* видно, что величина и время затухания $I_{нам}$ зависят в основном от свободного тока $I_{св.а}$.

Постоянная времени $T_2 \gg T_1$, что и приводит к запаздыванию нарастания и увеличению продолжительности переходного процесса в токе намагничивания, а следовательно, и в токе небаланса. Из сказанного вытекает, что характерные особенности кривой $I_{нб}$ обусловливаются появлением свободной составляющей в токе намагничивания, замыкающейся в контуре вторичной обмотки трансформаторов тока. После затухания апериодических токов изменение $I_{нб}$ прекращается и его величина достигает установившегося значения. Таким образом, возникновение к. з. сопровождается переходным процессом как в первичной, так и во вторичной цепи трансформаторов тока; появляющиеся при этом апериодические свободные токи ухудшают работу трансформаторов тока, вызывая повышенное намагничивание их магнитопровода. В результате этого в дифференциальной защите во время переходного периода возникают повышенные токи небаланса. Точных и удобных для практики способов расчета тока небаланса пока еще не разработано. На практике пользуются приближенными расчетными формулами, приведенными в «Руководящих указаниях по релейной защите». В частности, для приближенного учета влияния апериодической составляющей тока к. з. в неустановившемся режиме при выборе трансформаторов тока вводится коэффициент $k_а$, с учетом которого $m_{расч} = k_а I_{к.макс}/I_{ном.т.т}$. Для быстродействующих защит $t \leqslant 0{,}1$ *сек* принимают $k_а = 2$, для защит с $t = 0{,}1 \div 0{,}3$ *сек* $k_а = 1{,}5$ и при 1 *сек* $k_а = 1$. Такой способ учета влияния апериодической составляющей является приближенным и требует уточнения.

10-4. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ

В основе всех разнообразных схем и конструкций дифференциальных защит лежат некоторые общие принципы, обусловленные особенностями условий работы этих защит на линиях. Рассмотрим основные из них.

1. В дифференциальных защитах линий трансформаторы тока, соединяемые в дифференциальную схему, находятся на значительном расстоянии. Соединительные провода между ними имеют большое сопротивление и во много раз превышают допустимые пределы

нагрузки самых мощных современных трансформаторов тока. Так, например, при длине линии 10 *км* сопротивление одного соединительного медного провода сечением 1,5 *мм*^{2} составляет:

$$r = \frac{l}{gs} = \frac{10\,000}{57 \cdot 1{,}5} = 130 \text{ ом},$$

в то время как трансформаторы тока допускают нагрузку 1—2 *ом*.

Это затруднение преодолевается при помощи промежуточных трансформаторов тока *ПТ* (рис. 10-8, *а*), которые уменьшают ток в соединительных проводах в $n_п$ раз и снижают благодаря этому нагрузку соединительных проводов, приведенную к зажимам основных трансформаторов тока, в $n_п^2$ раз.

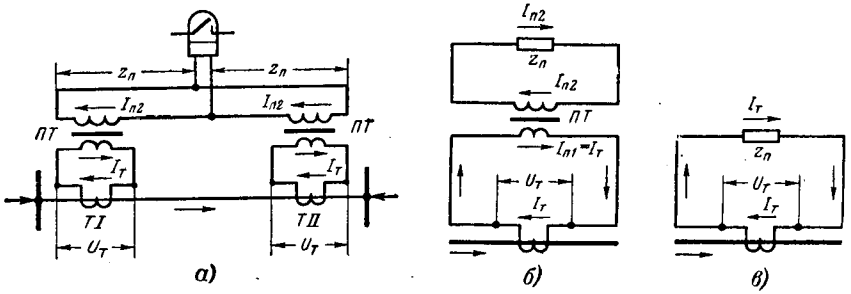


Рис. 10-8. Применение промежуточных трансформаторов тока ПТ для снижения нагрузки на основные трансформаторы тока в n^2 раз.

а — схема включения ПТ; *б* и *в* — загрузка трансформаторов тока при наличии ПТ и без него.

Покажем это с помощью рис. 10-8, *б* и *в*. Мощность, отдаваемая трансформатором тока в нагрузку,

$$S_т = U_т I_т. \qquad (10\text{-}6)$$

Напряжение $U_т$ зависит от сопротивления соединительных проводов $z_п$ и проходящего по ним тока $I_{п2}$. В схеме с промежуточным трансформатором (рис. 10-8, *б*) $U_т = I_{п2} z_п / n_п$, но так как $I_{п2} = I_{п1}/n_п$, то $U_т = \frac{I_{п1} z_п}{n_п^2} = \frac{I_т z_п}{n^2}$; здесь учтено, что $I_{п1} = I_т$.

Подставляя полученное значение $U_т$ в (10-6), получаем, что при наличии *ПТ*

$$S_т = \frac{I_т^2 z_п}{n_п^2} = I_т^2 \frac{z_п}{n_п^2}. \qquad (10\text{-}6а)$$

Если же включить нагрузку $z_п$ непосредственно на вторичные зажимы трансформатора тока (рис. 10-8, *в*), то напряжение $U_т = I_т z_п$, отсюда

$$S_т = U_т I_т = I_т^2 z_п. \qquad (10\text{-}6б)$$

Из сопоставления (10-6а) и (10-6б) следует, что при промежуточном трансформаторе *ПТ* нагрузка трансформаторов тока уменьшается $n_п^2$ раз.

Указанный способ снижения нагрузки соединительных проводов используется во всех дифференциальных защитах линий.

2. Дифференциальная защита должна воздействовать на отключение выключателей на обоих концах защищаемой линии. Для осу-

ществления этого устанавливаются два дифференциальных реле *1* и *2* — по одному на каждом конце линии (рис. 10-9). Каждое из этих реле действует на свой выключатель.

Введение в схему второго, параллельно включенного реле вносит следующие изменения в условия работы защиты по схеме с циркуляцией токов:

а) Ток, поступающий от трансформаторов тока *TI* и *TII*, распределяется между ближним и дальним реле обратно пропорционально сопротивлениям их цепей (рис. 10-9). В контуре дальнего реле участвуют соединительные провода, и поэтому ток, направляющийся в дальнее реле, меньше, чем ток, поступающий в реле, расположенное вблизи данных трансформаторов тока. Так, например, вторичный ток трансформаторов тока *TI* распределяется между реле *1* и *2*; при этом ток $I'_{\text{I}} > I''_{\text{I}}$; аналогичным образом ток трансформаторов тока *TII* делится между реле *2* и *1* так, что $I''_{\text{II}} > I'_{\text{II}}$. В результате этого токи, поступающие в реле, не балансируются, и поэтому при сквозном к. з. даже при работе трансформаторов тока без погрешностей в реле *1* появляется ток небаланса $I_{\text{р1}} = I'_{\text{I}} - I'_{\text{II}} = I'_{\text{нб.р1}}$, а в реле *2* $I_{\text{р2}} = I''_{\text{II}} - I''_{\text{I}} = I'_{\text{нб.р2}}$. Из сказанного следует, что в схеме с двумя реле кроме тока $I_{\text{нб.т.т}}$, вызванного погрешностью трансформаторов тока, возникает дополнительный ток небаланса $I'_{\text{нб}}$, обусловливаемый неравномерным распределением вторичных токов трансформаторов тока между реле. Величина $I'_{\text{нб}}$ пропорциональна току к. з. Для уменьшения $I'_{\text{нб}}$ необходимо уменьшать сопротивление соединительных проводов $z_{\text{пр}}$. Каждая защита в зависимости от ее чувствительности имеет предельно допустимое значение $z_{\text{пр}}$. При превышении его защита будет работать неправильно от возросших токов небаланса $I'_{\text{нб}}$.

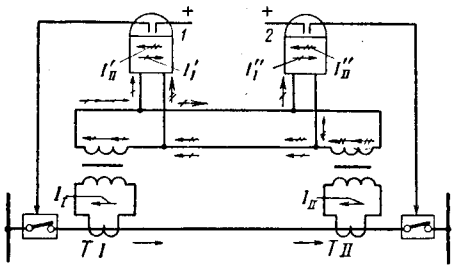


Рис. 10-9. Схема продольной дифференциальной защиты с установкой реле на обоих концах защищаемой линии.

б) При к. з. в зоне в схеме с одним реле в последнее поступает сумма вторичных токов трансформаторов тока $I_{\text{р}} = I_{\text{I}} + I_{\text{II}} = I_{\text{к}}$, а в схеме с двумя реле в каждое из них попадает только часть вторичного тока от первого и второго трансформаторов тока.

Если сопротивление проводов равно нулю, то ток в каждом реле $I_{\text{р}} = \frac{I_{\text{I}}}{2} + \frac{I_{\text{II}}}{2} = \frac{I_{\text{к. з}}}{2}$ т. е. в 2 раза меньше, чем в схеме с одним реле. Вследствие этого чувствительность защиты уменьшается. В дифференциальной защите с уравновешенными напряжениями установка двух реле не меняет условий работы схемы.

3. Токи небаланса в дифференциальных защитах линий при сквозных к. з. могут достигать значительных величин не только

в переходных режимах, но и в установившихся. Повышенное значение токов небаланса может обусловливаться большими кратностями токов внешнего к. з., вынужденной разнотипностью трансформаторов тока по концам линии, их значительной загрузкой, сопротивлением соединительных проводов и появлением $I'_{нб}$.

Для отстройки от токов небаланса получили распространение дифференциальные реле с торможением. Ток срабатывания у таких реле возрастает с увеличением тока внешнего к. з. Это достигается механическим или магнитным торможением, которое осуществляется от тока к. з.

В качестве примера на рис. 10-10 показано устройство электромагнитного дифференциального реле с тормозным действием. Реле имеет стальной якорь $Я$ в виде коромысла и два электромагнита: рабочий $Р$ и тормозной $Т$. Момент от тока в рабочей обмотке действует на замыкание контактов $К$,

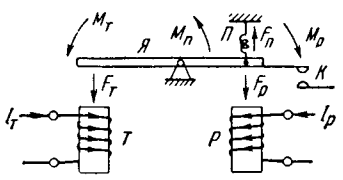


Рис. 10-10. Реле с тормозным действием.

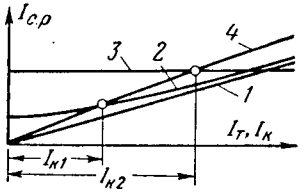


Рис. 10-11. Характеристика $I_{ср}$ реле с тормозным действием.

$M_р = k_1 I_р^2 w_р^2$. Момент от тока в тормозной обмотке, действующий на размыкание контактов реле, $M_т = k^2 I_т^2 w_т^2$. Пружина $П$ создает момент $M_п$, противодействующий замыканию контактов.

Условием начала работы реле является равенство моментов: $M_р = M_т + M_п$. Если принять $M_п = 0$ и выразить моменты через соответствующие токи, то $k_1 I_р^2 w_р^2 = k_2 I_т^2 w_т^2$. Отсюда ток в рабочей обмотке, необходимый для срабатывания реле, равен:

$$I_р = I_{с.р} = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \frac{w_т}{w_р} I_т = k_т I_т. \qquad (10\text{-}7)$$

Из выражения (10-7) следует, что ток срабатывания реле $I_{с.р}$ тем больше, чем больше ток в тормозной обмотке $I_т$.

Уравнение (10-7) изображается в осях координат прямой линией *1* (рис. 10-11), ее наклон зависит от коэффициента $k_т$, который называется коэффициентом торможения.

Коэффициент торможения зависит от конструктивных особенностей реле (числа витков обмоток $w_р$ и $w_т$ и др.). С учетом момента пружины зависимость $I_{с.р} = f(I_т)$ имеет вид гиперболы *2* (рис. 10-11).

На рис. 10-12 показана схема включения такого реле. Рабочая обмотка включается дифференциально, а тормозная — на ток трансформатора тока в рассечку соединительного провода. При внешнем

к. з. в рабочей обмотке появляется ток небаланса, а в тормозной — ток к. з., под влиянием последнего реле загрубляется и не действует.

При к. з. в зоне как в тормозной, так и в рабочей обмотке реле проходит ток к. з. Соотношение витков $w_р$ и $w_т$ подбирается таким, чтобы рабочий момент в этом случае превосходил момент $M_т$, благодаря чему реле срабатывает.

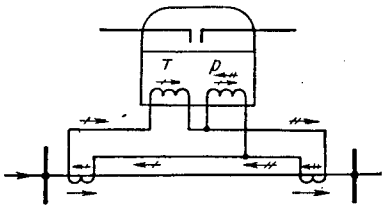


Рис. 10-12. Схема включения реле с торможением.

В дифференциальных защитах линий применяются также тормозные реле на выпрямленном токе (рис. 10-13, *а*). Реагирующий орган этих реле выполняется с помощью поляризованного реле P, имеющего две обмотки: тормозную $w_т$ и рабочую $w_р$ (рис. 10-13, *б*). Обмотка $w_т$ включается в плечо дифференциальной защиты через выпрямитель $B_т$, а рабочая обмотка $w_р$ включается на разность сравниваемых токов через выпрямитель $B_р$ так, чтобы создаваемые ими магнитные потоки $Ф_т$ и $Ф_р$ имели встречное направление.

Реле срабатывает, если поток $Ф_р$ больше $Ф_т$ на величину $Ф_{р0}$, достаточную для преодоления трения якоря и противодействия полюса S постоянного магнита. Условие срабатывания реле можно

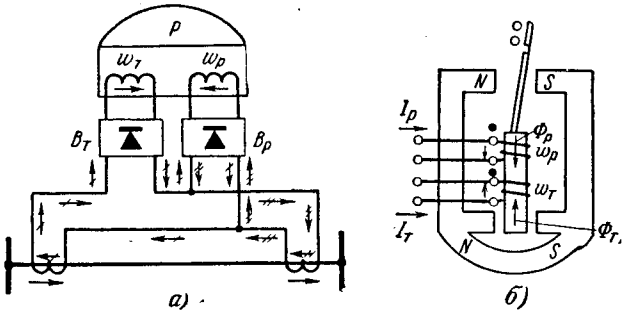


Рис. 10-13. Дифференциальная защита с тормозным реле на выпрямленном токе.

а — схема защиты; *б* — реагирующий орган.

выразить уравнением $Ф_р - Ф_т = Ф_{р0}$ или $I_р w_р - I_т w_т = I_{р0} w_р$; разделив обе части последнего равенства на $w_р$, получим ток срабатывания

$$I_{с.р} = I_{р0} + \frac{w_т}{w_р} I_т = I_{р0} + k_т I_т, \qquad (10\text{-}8)$$

где $I_{р0}$ — ток срабатывания реле при $I_т = 0$; $k_т = w_т/w_р$ — коэффициент торможения.

Графически характеристика срабатывания реле представлена на рис. 10-11. Наклон прямой зависит от коэффициента $k_т$.

Применение реле с тормозным действием повышает чувствительность защиты к к. з. в зоне, что следует из сравнения характеристик простого токового реле (прямая *3*) и тормозного (кривая *2*) на рис. 10-11. При к. з. в зоне ток к. з., протекающий в рабочей обмотке реле, изображается прямой *4*. Как видно, тормозное реле срабатывает при токе $I_{к1}$, меньшем $I_{к2}$, при котором срабатывает простое токовое реле.

4. Во всех рассмотренных схемах подразумевалась установка реле на трех фазах в тех случаях, когда защита должна реагировать на все виды к. з. Для выполнения таких схем необходимо шесть дифференциальных реле и не менее четырех соединительных проводов.

Для уменьшения числа реле и соединительных проводов реле включаются через фильтры симметричных составляющих или суммирующие трансформаторы, как показано на принципиальной схеме рис. 10-14.

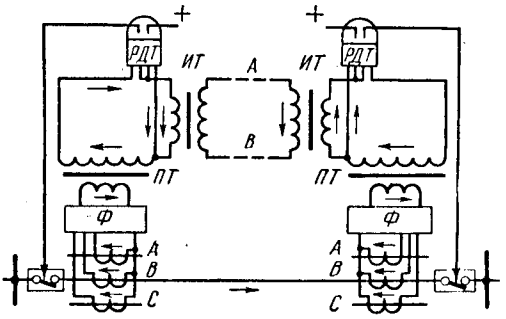


Рис. 10-14. Полная принципиальная схема односистемной дифференциальной защиты линий.

Помимо уже рассмотренных элементов, в этой схеме предусмотрены разделительные (изолирующие) трансформаторы *ИТ*, с помощью которых цепь соединительного кабеля *AB* отделяется от цепей реле. Такое разделение исключает появление в цепях реле высоких напряжений, наводимых в жилах кабеля при протекании токов к. з. по защищаемой линии или возникающих в них по любым другим причинам.

В нормальном режиме и при внешних к. з. по соединительным жилам, цепям промежуточного и изолирующего трансформаторов и тормозным обмоткам реле циркулирует ток, пропорциональный первичному току линии, а в рабочих обмотках проходит ток небаланса

$$I_{нб} = I_{нб.т.т} + I'_{нб}.$$

При к. з. на линии токи в рабочих обмотках суммируются, и хотя в тормозных обмотках реле протекает ток к. з., защита срабатывает, так как действие рабочей обмотки превосходит противодействие тормозной обмотки реле. В соединительных проводах *A* и *B* проходит небольшой ток, равный разности токов $I_I - I_{II}$.

На практике получили распространение защиты с комбинированными фильтрами прямой и обратной последовательностей или прямой и нулевой последовательностей. Ток (или напряжение) на выходе таких фильтров пропорционален $I_1 + kI_2$ или $I_1 + kI_0$.

Составляющая прямой последовательности $\dot{I}_1$ имеется при всех видах к. з.

Слагающая $k\dot{I}_2$ возникает при несимметричных повреждениях (двухфазных и однофазных) и позволяет повысить чувствительность защиты, увеличивая ток в реле. То же самое достигается с помощью слагающей $k\dot{I}_0$, но только при замыканиях на землю. В связи с этим за последнее время отдается предпочтение фильтру $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$. Отечественная промышленность изготовляет защиту, построенную на основе изложенных выше принципов, типа ДЗЛ с фильтром $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$. Раньше выпускалась защита типа РДЛ, имевшая аналогичное исполнение, но с фильтром $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$.

10-5. УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ИСПРАВНОСТИ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ

Повреждения проводов. Повреждение соединительных проводов может вызвать неправильную работу дифференциальной защиты. Возможны обрывы соединительных проводов, короткие замыкания между ними и замыкания на землю одного из проводов.

При обрыве соединительного провода (рис. 10-15, *а*) весь ток, поступающий от трансформаторов тока, замыкается через рабочие обмотки дифференциальных реле. Ток в тормозной и рабочей обмотках реле становится одинаковым, вследствие чего реле может сработать при нормальной нагрузке или сквозном к. з. в зависимости от величины $\dot{I}_{с.з}$.

Замыкание между соединительными проводами (рис. 10-15, *б*) шунтирует рабочие обмотки реле, благодаря чему защита может не подействовать и отказать в работе при к. з. в зоне.

Замыкание на землю не нарушает токораспределения и не угрожает поэтому непосредственной опасностью неправильного действия или отказа защиты. Однако если в жилах соединительного кабеля появятся э. д. с., наведенные токами вблизи расположенных линий электропередачи (§ 10-6), то создаются условия для ложной работы защиты в режиме нагрузки или внешнего к. з.

Устройство контроля. Для повышения надежности защиты ее снабжают устройством, контролирующим исправное состояние соединительных проводов. Устройство контроля может автоматически выводить защиту из действия, разрывая ее цепь отключения при повреждении соединительных проводов, или подавать сигнал о неисправности. Первый способ более надежен.

Получило распространение устройство контроля, основанное на наложении на рабочий переменный ток, протекающий в соединительных проводах защиты, непрерывно циркулирующего контрольного постоянного тока. Принцип выполнения устройства показан на рис. 10-15, *в*.

К соединительным проводам A и B подводится контрольное напряжение от выпрямителя B_1, который питается от трансформатора собственных нужд подстанции. Для создания контура для

контрольного тока вторичные обмотки изолирующих трансформаторов *ТИ* на обоих концах линии, состоящих из двух секций, соединяются через конденсатор C_3. Конденсатор C_3 свободно пропускает переменный ток, но запирает путь постоянному току контроля.

Ток контроля $I_к$, поступающий от выпрямителя B_1, замыкается через обмотку реле *Р1*, провод *А*, реле *Р2*, провод *В* и возвращается в выпрямитель, как показано стрелками на рис. 10-15, *в*. Ток контроля не трансформируется в первичные обмотки трансформаторов *ТИ* и поэтому не влияет на работу защиты. Под действием этого тока якори реле *Р1* и *Р2* подтянуты.

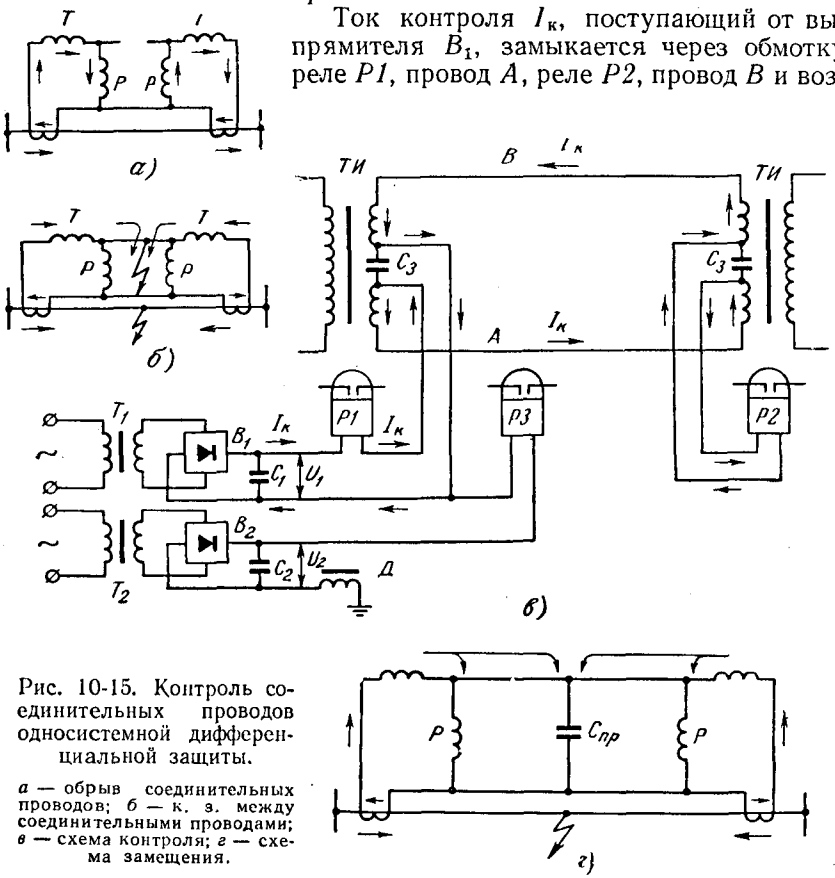


Рис. 10-15. Контроль соединительных проводов односистемной дифференциальной защиты.

а — обрыв соединительных проводов; *б* — к. з. между соединительными проводами; *в* — схема контроля; *г* — схема замещения.

При обрыве соединительного провода ток контроля исчезает и оба реле *Р1* и *Р2* срабатывают, подавая сигнал и разрывая оперативную цепь защиты.

При замыкании между проводами *А* и *В* обмотка реле *Р2* шунтируется. Ток $I_к$ в реле *Р2* исчезает, и реле срабатывает, подавая сигнал о неисправности и выключая защиту на своем конце линии. Такое действие контроля допустимо, поскольку при возникновении

к. з. между соединительными проводами автоматическое отключение защиты не требуется. Обычно нормальное значение контрольного тока $I_к = 5 \div 6$ *ма*, а напряжения $U_к = 80$ *в*.

Для сигнализации о замыкании на землю в соединительных проводах предусматривается второй выпрямитель B_2. Он подключается одним полюсом к соединительным проводам, а вторым — к земле, через заземляющий дроссель *Д*.

При отсутствии замыкания на землю цепь реле *РЗ* разомкнута и оно не работает. В случае нарушения изоляции относительно земли одного из проводов под действием напряжения U_2 возникает искусственный ток замыкания на землю $I_з$, который проходит через реле *РЗ*, место повреждения и возвращается в выпрямитель B_2 через землю и дроссель *Д*. Реле *РЗ* срабатывает и дает сигнал. Для срабатывания *РЗ* нужен ток порядка 0,8 *ма*. В качестве реле *Р1*, *Р2*, *РЗ* используются поляризованные реле типа РП-7.

Опыт эксплуатации подобных схем показывает, что они работают достаточно надежно и эффективно.

Соединительные провода. Связь между комплектами защиты, расположенными на концах защищаемой линии, осуществляется с помощью бронированного кабеля, прокладываемого по трассе, обеспечивающей его сохранность.

В целях удешевления обычно применяется многожильный кордельный телефонный кабель типа ТЗБ, ТБ или ТЗСБ, используемый одновременно для телефонной связи и телемеханики.

Для обеспечения правильной работы защиты жилы кабеля должны иметь возможно меньшее сопротивление и небольшую емкость. Первое необходимо для ограничения токов небаланса, обусловленных влиянием сопротивления соединительных проводов (§ 10-4), а второе — для повышения чувствительности защиты, так как емкость между жилами и на землю шунтирует рабочую обмотку дифференциального реле и уменьшает поступающий в нее ток при к. з. на защищаемой линии (рис. 10-15, *а*).

10-6. ПРОДОЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ ТИПА ДЗЛ

Дифференциальная защита ДЗЛ [Л. 43] (рис. 10-16) построена на таких же принципах, как и схема, изображенная на рис. 10-14. Она основана на сравнении величины и фазы токов $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ на концах защищаемой линии. Защита состоит из двух полукомплектов, установленных на каждой стороне линии и соединенных с помощью двух жил соединительного кабеля. В каждый полукомплект защиты ДЗЛ (рис. 10-16) входят следующие элементы: комбинированный фильтр *1* ($\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$), промежуточный трансформатор *2* со стабилизатором напряжения *3*, дифференциальное реле с торможением *4*, состоящее из поляризованного реле *Д* и питающих его выпрямителей *5* и *6*, промежуточное реле *7*, указательное реле *8* и изолирующий трансформатор *9*.

Рассмотрим основные элементы защиты.

Комбинированный активно-индуктивный фильтр $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ (рис. 10-17) состоит из трансреактора *ТР* и двух активных сопротивлений R_1 и R_2.

Трансреактор имеет две первичные обмотки w_1 и w_0 и одну вторичную w_2. Обмотка w_1 питается током фазы *В* (I_B), а обмотка w_0 — током $3I_0$, при этом об-

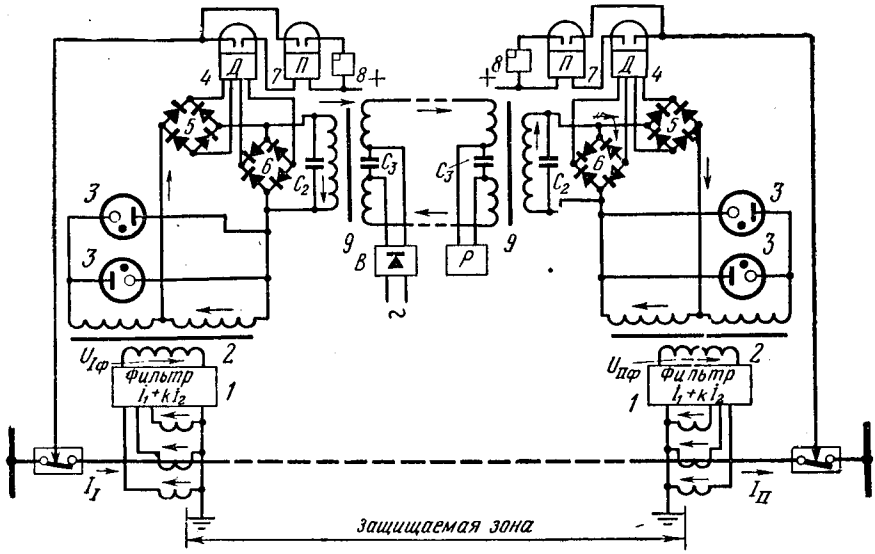


Рис. 10-16. Принципиальная схема защиты ДЗЛ.

мотки включены на питающий их ток разной полярности так, чтобы вторичная э. д. с. трансреактора $E_т$ была пропорциональна разности намагничивающих сил: $w_1 \dot{I}_B - w_0 3\dot{I}_0$.

$U_ф = E_ф$. Конденсатор C_1 и сериесная обмотка реле 7 не показаны.

Число витков

$$w_0 = \frac{1}{3} w_1.$$

Обозначая сопротивления взаимной индукции между обмотками w_1 и w_2 через $x_ф$ и учитывая, что э. д. с., индуктированная токами I_B и $3I_0$, отстает от них по фазе на 90°, получаем, что

$$\dot{E}_т = jx_ф \dot{I}_B - j\frac{1}{3} x_ф 3\dot{I}_0. \qquad (10\text{-}9)$$

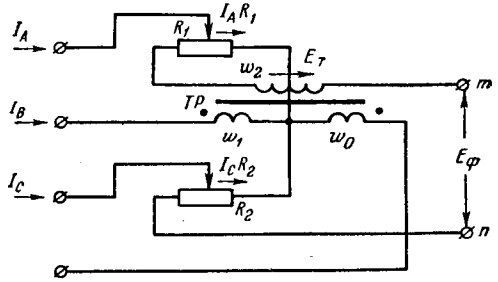


Рис. 10-17. Комбинированный фильтр защиты ДЗЛ $I_1 + kI_2$.

Стальной сердечник TP выполнен с воздушным зазором и не насыщается при вторичных токах к. з. от 0 до 200 a. Это позволяет обеспечить необходимое для правильной работы фильтра постоянство $x_ф$ и строгую пропорциональность между токами, питающими трансреактор, и его вторичной э. д. с. $E_т$.

Сопротивление R_1 включено в цепь тока I_A, а R_2 — в цепь тока I_C. Величина этих сопротивлений одинакова: $R_1 = R_2 = R_ф$.

Как следует из схемы фильтра, выходное напряжение $E_ф$ на зажимах mn равно геометрической сумме э. д. с. $\dot{E}_т$, напряжения $\dot{I}_A R_1$ и напряжения $\dot{I}_C R_2$, т. е.

$$\dot{E}_ф = \dot{E}_т + \dot{I}_A R_1 - \dot{I}_C R_2. \qquad (10\text{-}10)$$

Напряжение $I_C R_2$ взято со знаком минус с учетом того, что токи I_A и I_C в контуре *mn* направлены встречно. Заменив $E_т$ выражением (10-9), получим окончательно:

$$\dot{E}_ф = j\dot{I}_B x_ф + (\dot{I}_A - \dot{I}_C) R_ф + j3\dot{I}_0 \frac{x_ф}{3}. \qquad (10\text{-}11)$$

По выражению (10-11) определим, как зависит $\dot{E}_ф$ от симметричных составляющих I_1, I_2 и I_0 полных токов, питающих фильтр. Если допустить, что рассмат-

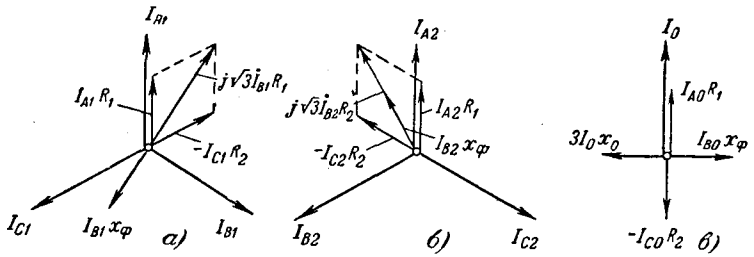


Рис. 10-18. Векторная диаграмма $I_1 + kI_2$.

риваемый фильтр питается токами прямой последовательности, то согласно (10-11)

$$\dot{E}_ф = jx_ф\dot{I}_{B1} + (\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{C1}) R_ф.$$

Из диаграммы фильтра на рис. 10-18, *а* следует, что $\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{C1} = -j\dot{I}_{B1}\sqrt{3}$, с учетом этого

$$\dot{E}_ф = jx_ф\dot{I}_{B1} - j\dot{I}_{B1}R_ф\sqrt{3} = j\dot{I}_{B1}(x_ф - R_ф\sqrt{3}).$$

Принимая $x_ф - R_ф\sqrt{3} = k_1$, получаем, что на выходе фильтра образуется э. д. с.

$$\dot{E}_{ф1} = jk_1\dot{I}_{B1}. \qquad (10\text{-}12)$$

При питании фильтра токами I_2 напряжение на выходе фильтра $\dot{E}_{ф2}$ находится аналогичным методом с учетом диаграммы на рис. 10-18, *б*:

$$\dot{E}_{ф2} = jx_ф\dot{I}_{B2} + (\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{C2}) R_ф = jx_ф\dot{I}_{B2} + jR_ф\sqrt{3}\,\dot{I}_{B2} = j\dot{I}_{B2}(x_ф + \sqrt{3}R_ф).$$

Принимая $x_ф + \sqrt{3}R_ф = k_2$, получаем:

$$\dot{E}_{ф2} = jk_2\dot{I}_{B2}. \qquad (10\text{-}13)$$

Если к фильтру подводятся токи I_0 (рис. 10-18, *в*), то на основании (10-9)

$$\dot{E}_{ф0} = jx_ф\dot{I}_{B0} - j\frac{1}{3}x_ф 3\dot{I}_0 + (\dot{I}_{A0} - \dot{I}_{C0}) R_ф. \qquad (10\text{-}14)$$

Учитывая, что $\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{C0}$, получаем, что $\dot{E}_{ф0} = 0$. Следовательно, токи I_0 не пропускаются данным фильтром. Как следует из схемы и описания фильтра, это достигается встречным включением обмоток ω_1 и ω_0 трансреактора, выбранным соотношением их витков и встречным включением э. д. с., созданных током $\dot{I}_A$ и $\dot{I}_C$ в выходном контуре *mn*. С учетом (10-13)—(10-12) полная э. д. с. на выходе фильтра, выраженная через симметричные составляющие, будет равна:

$$\dot{E}_ф = \dot{E}_{ф1} + \dot{E}_{ф2} + \dot{E}_{ф0} = jk_1\dot{I}_{B1} + jk_2\dot{I}_{B2},$$

вынося за скобку k_1 и заменяя k_2/k_1 через k, получаем:

$$\dot{E}_ф = jk_1(\dot{I}_{B1} + k\dot{I}_{B2}). \qquad (10\text{-}15)$$

Выражение (10-15) показывает, что рассмотренный фильтр действительно является комбинированным фильтром прямой и обратной последовательностей, э. д. с. которого пропорциональна $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$. Из рис. 10-16 видно, что ток в реле защиты *4* определяется величиной выходного напряжения фильтра и поэтому $I_р = k'E_ф$. Отсюда следует, что и чувствительность защиты полностью зависит от величины $E_ф$. Коэффициент k позволяет повысить влияние токов обратной последовательности на величину $E_ф$. Поэтому при увеличении k повышается чувствительность защиты к несимметричным к. з.

Величина и знак k зависят от величин $x_ф$ и $R_ф$. В этом нетрудно убедиться, если заменить k_1 и k_2 их выражением через $x_ф$ и $R_ф$; тогда

$$k = \frac{k_2}{k_1} = \frac{x_ф + \sqrt{3}R_ф}{x_ф - \sqrt{3}R_ф}. \qquad (10\text{-}16)$$

В защите ДЗЛ принято, что $x_ф < \sqrt{3}R_ф$, благодаря этому коэффициент k согласно (10-16) имеет отрицательный знак. Отрицательное k позволяет получить лучшую чувствительность защиты (т. е. большее $E_ф$) при двухфазном к. з. на землю, чем в случае, когда k положительно.

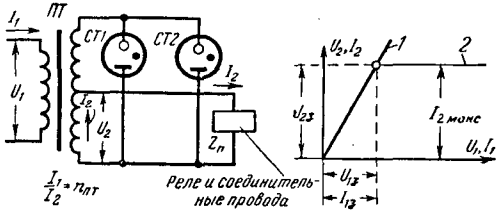


Рис. 10-19. Промежуточный трансформатор.

а — схема; *б* — характеристика; *1* — при отсутствии стабилизатора; *2* — при наличии стабилизатора.

Промежуточный трансформатор *2* является понизительным трансформатором тока. Вторичная обмотка трансформатора имеет две секции. От одной питается защита, а от второй газонаполненные стабилизаторы *СТ1* и *СТ2* (рис. 10-19, *а*). Коэффициент трансформации секции *ПТ*, питающей реле, $n_{ПТ} = I_1/I_2 = 25$.

При некотором определенном напряжении (около 110 *в*) на вторичной стороне промежуточного трансформатора стабилизаторы зажигаются. В результате этого нагрузка трансформатора скачкообразно возрастает, трансформатор насыщается, благодаря чему дальнейшее увеличение вторичного напряжения U_2, а следовательно, и тока I_2 прекращается (рис. 10-19, *б*).

В схеме предусмотрены два стабилизатора. Один работает при положительной полуволне напряжения, а второй при отрицательной.

Промежуточный трансформатор в сочетании со стабилизаторами выполняет три весьма важные функции:

1) ограничивает напряжение на выпрямителях и соединительных проводах до допустимого для них значения при токах к. з.;

2) ограничивает ток небаланса в дифференциальном реле, поскольку при больших токах к. з. после зажигания стабилитронов ток, поступающий в дифференциальные реле *4*, остается неизменным. В этих условиях работа защиты зависит практически только от фазы (направления) сравниваемых токов в начале и конце линии;

3) ограничивает нагрузку на трансформаторы тока. При малых токах (пока не сказывается влияние стабилизаторов) нагрузка уменьшается в $n^2_{ПТ}$ раз за счет коэффициента трансформации *ПТ*. После зажигания стабилизатора рост тока I_2 в соединительных проводах прекращается.

В связи с этим мощность, потребляемая соединительными проводами ($I_{\frac{3}{2}}^{2} z_{п}$), также перестает расти при увеличении тока в линии.

Дифференциальное реле *4*. В качестве дифференциального реле с торможением применено поляризованное реле, питающееся выпрямленным током. Реле устроено так же, как и реле на рис. 10-13, *б*.

Выпрямитель тормозной обмотки *5* питается током насыщающегося трансформатора, который определяется током к. з. Выпрямитель рабочей обмотки *6* включен дифференциально, т. е. на разницу токов в начале и конце линии.

Конденсатор *С1* сглаживает пульсацию выпрямленного тока, питающего рабочую обмотку реле, устраняя вибрацию его контактов. В конструкции реле *4* не предусматривается приспособлений для регулировки токов срабатывания и коэффициента торможения. При отсутствии торможения $I_{с.р} = 2{,}5$ *ма*. Время действия реле равно 0,04 *сек*.

Промежуточное выходное реле *7* имеет шунтовую обмотку, в которую подается ток при срабатывании защиты контактами реле *4*, и сериесную обмотку, включаемую последовательно с катушкой отключения выключателя, для удерживания реле в сработанном состоянии до отключения выключателя. Время действия реле 0,02 *сек*.

Изолирующий трансформатор *9* выполняет две функции:

1) отделяет цепь реле от соединительных проводов, на которых могут возникать повышенные напряжения, наводимые извне;

2) уменьшает ток в соединительных проводах, чтобы дополнительно снизить нагрузку от них на трансформаторы тока. Коэффициент трансформации трансформатора *9* равен 3.

Для уменьшения погрешности, вносимой изолирующими трансформаторами при внешнем к. з., и уменьшения отсоса в них при к. з. в зоне параллельно первичной обмотке изолирующего трансформатора включен конденсатор C_2. Его ток компенсирует $I_{нам}$ трансформатора *9*. Конденсатор C_3 емкостью 10 *мф* необходим для выполнения устройства контроля исправности соединительных проводов.

Устройство контроля. Для предотвращения неправильной работы защиты при повреждении соединительных проводов устанавливается автоматическое устройство контроля, выполняемое по принципиальной схеме (рис. 10-15), рассмотренной в § 10-5.

Работа защиты при внешних к. з., нагрузках и качаниях. В этих режимах токи на обоих концах линии и соответствующие им напряжения на выходе фильтра $E_{фI}$ и $E_{фII}$ равны по величине и сдвинуты по фазе на 180°. При этом в рабочих обмотках реле протекает разность токов своего и противоположного концов, т. е. ток небаланса, а в тормозных — ток к. з., проходящий по линии. Токи, поступающие в изолирующий трансформатор, сдвинуты по фазе на 180° и циркулируют по соединительным проводам, как показано стрелками на рис. 10-16. Защита не действует, так как н. с. тормозных обмоток превосходит н. с. рабочих.

При повреждениях на защищаемой линии токи по ее концам, а следовательно, и напряжения $E_{фI}$ и $E_{фII}$ совпадают по фазе. В рабочих обмотках реле протекают согласно направленные токи, которые суммируются, а в тормозных обмотках — полные токи I_I и I_{II} соответственно. Благодаря подобранному соотношению витков ток в рабочей обмотке преодолевает противодействие тормозного тока и защита действует на отключение.

Ток срабатывания защиты. Из выражения (10-11) следует, что величина тока на входе фильтра, необходимая для создания э. д. с. $E_ф = E_{с.р}$, достаточной для срабатывания защиты, зависит от значения $x_ф$ и $R_ф$. Это означает, что изменяя $x_ф$ и $R_ф$, можно регулировать ток срабатывания защиты. Сопротивление $x_ф$ определяется числом витков обмоток фильтра и может изменяться изменением витков первичной или вторичной обмоток w_1 и w_2.

В *ДЗЛ* предусмотрены три ответвления на обмотке w_1 фильтра (рис. 10-17). Соответственно этому можно получить три уставки тока срабатывания, условно выражаемые в относительных единицах коэффициентом h, имеющим три значения: 1; 1,5 и 2. Ток срабатывания h равен 1, когда включены все витки обмотки w_1. Одновременно с изменением числа витков w_1 предусматривается пропорциональное

изменение величины сопротивлений R_1 и R_2, так чтобы изменение $x_ф$ не влияло на коэффициент k.

Регулирование k осуществляется изменением сопротивлений R_1 и R_2 (независимо от w_1), при этом $x_ф$ остается неизменным. Предусмотрены четыре значения k (—4, —6, —8, —10).

Ток срабатывания защиты при одной и той же величине h и k зависит от вида к. з. и поврежденных фаз. Это объясняется тем, что в зависимости от характера повреждения меняются соотношения фазных углов и амплитуд составляющих $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ в полном токе к. з.

В связи с этим величина $E_ф$, от которой зависит ток в реле, оказывается различной при разных видах повреждений. Оперируя полными токами к. з. или их симметричными составляющими, можно, пользуясь (10-11) или (10-15) соответственно, определить значения $E_ф$ для разных случаев к. з.

Относительное изменение величины $E_ф$ при разных видах к. з. и одинаковых значениях токов к. з., питающих фильтр, можно характеризовать коэффициентом

$$n = \frac{E_{ф(x)}}{E^{(1)}_{ф(B)}},$$

где $E^{(1)}_{ф(B)}$ — э. д. с. $E_ф$ при однофазном к. з. на фазе B; $E_{ф(x)}$ — э. д. с. $E_ф$ при рассматриваемом случае к. з.

Если принять $E_{фB}$ равной э. д. с., необходимой для действия дифференциального реле, то $I_{с.з(x)}$ при рассматриваемом виде повреждения будет в n раз меньше $I_{с.з(B)}$ при к. з. на фазе B, т. е.

$$I_{с.з(x)} = \frac{I^{(1)}_{с.з(B)}}{n}. \qquad (10\text{-}17)$$

Согласно заводским данным ток срабатывания защиты на входе фильтра при $h = 1$, $k = -4$ и одностороннем питании к. з. на фазе B равен 3,8 a. С учетом (10-17) значения тока срабатывания для других значений h и k могут быть вычислены по выражению

$$I_{с.з} = \frac{3{,}8}{n} h, \qquad (10\text{-}18)$$

где $1/n$ берется из материалов заводской информации по ДЗЛ или [Л. 10].

Выбор уставок защиты сводится к выбору коэффициентов k и h, по которым определяется ток срабатывания защиты ($I_{с.з}$) при различных видах к. з., а затем находится коэффициент чувствительности при минимальных значениях $I_{к.з}$ при повреждениях на линии.

Коэффициент k выбирается так, чтобы при несимметричных к. з. составляющая kI_2 преобладала над I_1, обеспечивая величину $E_ф$, достаточную для действия защиты.

В соответствии с этим исходным для определения k является неравенство $kI_{2B} > I_{1B}$, которое можно преобразовать в равенство, умножив на коэффициент запаса $k_з$ составляющую I_{1B}.

С учетом этого $kI_{2B} = k_з I_{1B}$, отсюда

$$k = k_з \frac{I_{1B}}{I_{2B}}.$$

Расчетным является к. з., при котором отношение I_{1B}/I_{2B} имеет наибольшее значение, а угол сдвига фаз между $\dot{I}_{1B}$ и $\dot{I}_{2B}$ — минимальную величину.

Наихудшие угловые соотношения получаются при однофазном к. з. на фазе B, когда $\dot{I}_{1B} = \dot{I}_{2B}$. В этом случае $E_ф$ равно арифметической разности $I_1 - kI_2$ и имеет по этой причине наименьшее значение.

Однако за расчетный режим для определения k обычно принимается двухфазное к. з. на землю на защищаемой линии, так как при этом виде повреждения ток I_2 значительно меньше I_1 по величине, хотя сдвиг фаз равен при этом 120°.

Коэффициент h выбирается из условия, чтобы м. д. с. $I_B w_1$ не вызывала насыщения трансреактора. Если вторичный ток $I_{к.з\,макс} < 100$ *а*, то $h = 1$. При $I_{к.з} > 100$, но меньше 150 *а*, $h = 1{,}5$. При $I_{к.з} > 150$ $h = 2$.

Вторичный ток срабатывания защиты при одностороннем питании к. з. для разных случаев к. з. вычисляется по формуле (10-18).

10-7. ОЦЕНКА ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Принцип действия защиты прост и надежен. Защита не реагирует на качания и перегрузки и действует без выдержки времени при коротком замыкании в любой точке линии. К недостаткам защиты следует отнести высокую стоимость соединительного кабеля и работ по его прокладке, а также возможность ложной работы при повреждении соединительных проводов.

При наличии автоматического контроля повреждения кабеля обнаруживаются, как правило, своевременно, и случаи ложной работы защиты по этой причине редки. Защиту следует применять на коротких линиях в тех случаях, когда требуется мгновенное отключение повреждений в пределах всей линии.

Защита получила распространение на линиях 110 и 220 *кв* длиной до 10—15 *км*.

10-8. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ВИДЫ ПОПЕРЕЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Поперечные дифференциальные защиты применяются на параллельных линиях, имеющих одинаковое сопротивление, и основаны на сравнении величин и фаз токов, протекающих по обеим линиям. Благодаря равенству сопротивлений линий в нормальном режиме и при внешнем к. з. токи в них равны по величине и фазе ($I_I = I_{II}$) (рис. 10-20).

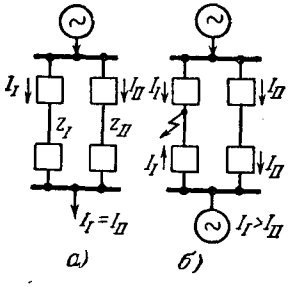


Рис. 10-20. Распределение токов в параллельных линиях.

а — при нормальной нагрузке; *б* — при к. з. на одной линии.

В случае возникновения к. з. на одной из линий равенство токов нарушается. На питающем конце линии токи I_I и I_{II} совпадают по фазе, но различаются по величине, а на приемном противоположны по фазе, что следует из токораспределения, приведенного на рис. 10-20, *б*. Таким образом, нарушение равенства токов в параллельных линиях по величине или фазе является признаком повреждения одной из них.

Поперечные дифференциальные защиты применяются двух видов: на параллельных линиях, включенных под один общий выключатель, — токовая поперечная дифференциальная защита, на параллельных линиях с самостоятельными выключателями — направленная поперечная дифференциальная защита.

10-9. ТОКОВАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

а) Принцип действия защиты

Токовая поперечная дифференциальная защита предназначается для параллельных линий с общим выключателем на обе линии.

При одностороннем питании параллельных линий защита устанавливается только со стороны источника питания, а в сети с двусторонним питанием — с обеих сторон параллельных линий.

Схема защиты для одной фазы изображена на рис. 10-21. На одноименных фазах каждой линии устанавливаются трансформаторы тока с одинаковым коэффициентом трансформации $n_{тI} = n_{тII} = n_т$. Вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются разноименными зажимами по схеме с циркуляцией токов в соединительных проводах и параллельно к ним включается обмотка токового реле *1*.

В нормальном режиме и при внешнем к. з. (рис. 10-21, *а*) ток в реле

$$\dot{I}_р = \dot{I}_{вI} - \dot{I}_{вII} = \frac{\dot{I}_I}{n_т} - \frac{\dot{I}_{II}}{n_т}. \qquad (10\text{-}19)$$

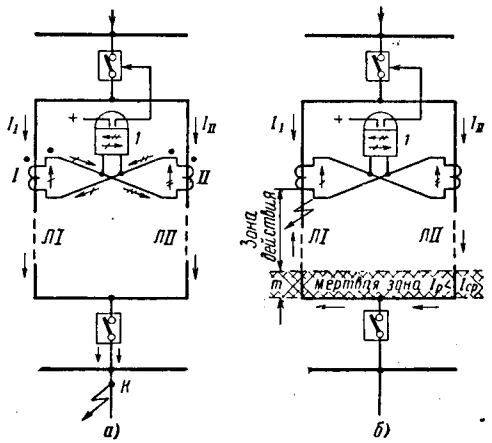


Рис. 10-21. Принцип действия токовой поперечной дифференциальной защиты.

а — режим нагрузки и внешнего к. з.; *б* — режим к. з. на одной линии *ЛI*.

При отсутствии погрешностей у трансформаторов тока $I_р = 0$ и защита не работает. Следовательно, по своему принципу действия рассматриваемая защита не реагирует на внешние к. з., нагрузку и качания. Поэтому ее выполняют без выдержки времени и не отстраивают от токов нагрузки. В действительности в реле протекает ток небаланса $I_{нб}$, вызванный погрешностью трансформаторов тока ($I'_{нб}$) и некоторым различием первичных токов $\left(I''_{нб} = \frac{I_I - I_{II}}{n_т}\right)$, обусловленным неточным равенством сопротивлений линии. Ток срабатывания реле $I_{с.р}$ должен быть больше максимального тока небаланса:

$$I_{с.р} > (I'_{нб} + I''_{нб}). \qquad (10\text{-}20)$$

В случае повреждения одной из параллельных линий, например *ЛI* (рис. 10-21, *б*), ток I_I в поврежденной линии становится больше тока во второй линии ($I_I > I_{II}$). Баланс токов в дифферен-

циальном реле нарушается, и в реле появляется ток

$$I_р = I_{вI} - I_{вII} = \frac{I_I - I_{II}}{n_т}. \qquad (10\text{-}21)$$

При токе в реле $I_р > I_{с.р}$ защита действует и отключает общий выключатель обеих линий.

б) Мертвая зона защиты

При удалении точки к. з. K от места установки защиты (рис. 10-22, *а*) соотношение токов I_I и I_{II} по поврежденной и неповрежденной линиям изменяется. Эти токи направляются к точке K по двум параллельным ветвям и распределяются по ним обратно пропорционально их сопротивлениям z_I и z_{II}:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{z_{II}}{z_I},$$

где $z_I = z_л - z_{BK}$, а $z_{II} = z_л + z_{BK}$.

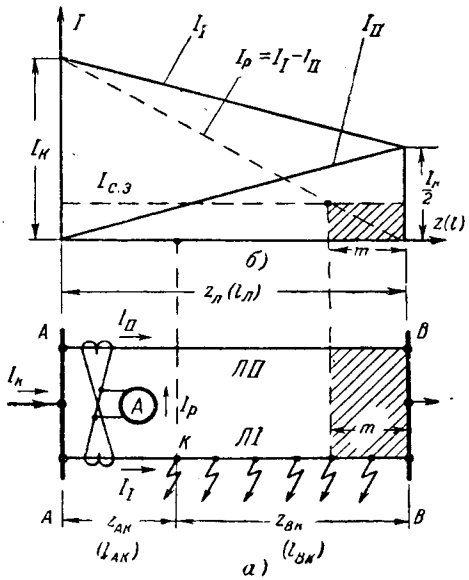


Рис. 10-22. «Мертвая зона» токовой поперечной дифференциальной защиты.

$z_л$ и $l_л$ — сопротивление и длина линии; z_{AK} и z_{BK} — сопротивление от шин A и B до точки к. з. K.

При перемещении точки K в сторону подстанции B сопротивление z_I растет, а z_{II} снижается, соответственно этому I_I уменьшается, I_{II} увеличивается, а ток в реле защиты $I_р = I_I - I_{II}$ постепенно понижается и при к. з. на шинах B становится равным нулю (рис. 10-22, *б*). В результате этого, при повреждениях на некотором участке вблизи подстанции B (рис. 10-22, *а* и *б*) ток $I_р$ оказывается меньше тока срабатывания защиты $I_{с.з}$ и она перестает работать. Границей действия защиты является точка к. з., отстоящая от шин противоположной подстанции B на расстоянии m, где $I_р = I_{с.з}$ (рис. 10-22, *б*). Таким образом, защита, реагирующая на разность токов параллельных линий $I_I - I_{II}$, не может охватить своей зоной действия защищаемых линий полностью.

Часть линий вблизи шин противоположной подстанции не охватывается защитой из-за недостаточной величины тока в реле, вследствие уменьшения различия в величине токов $I_I - I_{II}$, на разность которых реагирует защита.

Участок m линий при к. з., в пределах которого ток в защите недостаточен для ее срабатывания, называется мертвой зоной защиты.

Наличие мертвой зоны является существенным недостатком поперечной дифференциальной защиты. Для отключения к. з. в мертвой зоне требуется дополнительная защита.

Длина мертвой зоны m определяется на основе следующих соображений. Токи по линиям *ЛI* и *ЛII* (рис. 10-22) обратно пропорциональны сопротивлениям или длинам ветвей от шин, где установлена защита, до точки к. з. При к. з. на границе мертвой зоны в точке M

$$\frac{I_{\text{I}}}{I_{\text{II}}} = \frac{l+m}{l-m},$$

где l — длина линий.

Преобразуя это выражение, найдем: $m\,(I_{\text{I}} + I_{\text{II}}) = l\,(I_{\text{I}} - I_{\text{II}})$. Учитывая, что $I_{\text{I}} + I_{\text{II}} = I_{\text{к}}$ и что при к. з. на границе мертвой зоны ток в реле равен $I_{\text{I}} - I_{\text{II}} = I_{\text{с.з}}$, получаем:

$$mI_{\text{к}} = lI_{\text{с. з}},$$

откуда длина мертвой зоны

$$m = \frac{I_{\text{с. з}}}{I_{\text{к}}}\,l. \qquad (10\text{-}22)$$

Для упрощения расчета мертвой зоны ток $I_{\text{к}}$ определяется при к. з. на шинах противоположной подстанции, а не на границе мертвой зоны.

Защиту принято считать эффективной, если мертвая зона ее не превосходит 10%.

При отключении одной из параллельных линий поперечная дифференциальная защита превращается в мгновенную максимальную защиту оставшейся в работе линии и действует неселективно. Поэтому при отключении одной линии поперечная дифференциальная защита должна выводиться из действия.

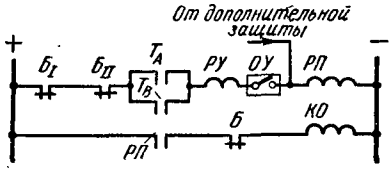


Рис. 10-23. Схема цепей постоянного тока токовой двухфазной поперечной дифференциальной защиты.

T_A, T_B — токовые реле, включенные в фазы A и B; *РП* — промежуточное реле; *РУ* — указательное реле; *ОУ* — отключающее устройство; $Б_I$ и $Б_{II}$ — блок-контакты разъединителей первой и второй линии; *Б* — блок-контакт в цепи отключающей катушки *КО*.

в) Схема защиты

В сетях с малым током замыкания на землю защита выполняется на двух фазах. В сетях с большим током замыкания на землю защита устанавливается на трех фазах. В этом случае трансформаторы тока на каждой линии соединяются по схеме полной звезды с нулевым проводом.

Для отключения защиты при отключении одной из параллельных линий устанавливается отключающее устройство (*ОУ*, рис. 10-23).

В дополнение к отключающему устройству можно предусматривать автоматическое отключение защиты посредством блок-контактов $Б_{I}$ и $Б_{II}$ на разъединителях. При отключении одного из разъединителей его блок-контакт разрывает цепь, по которой подается плюс к защите.

Оценка защиты. Токовая поперечная дифференциальная защита относится к числу простых и надежных. Важным достоинством ее является быстродействие. Защита не реагирует на токи качания.

Недостатками защиты являются наличие мертвой зоны и необходимость отключения защиты при выключении одной параллельной линии.

Кроме поперечной дифференциальной защиты, на параллельных линиях необходимо предусматривать дополнительную защиту, действующую при к. з. на шинах противоположной подстанции, в мертвой зоне, а также при выводе из работы одной линии.

10-10. НАПРАВЛЕННАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

а) Принцип действия

Направленная поперечная дифференциальная защита применяется на параллельных линиях с самостоятельными выключателями на каждой линии (рис. 10-24). К защите таких линий предъявляется требование — отключать только ту из двух линий, которая повредилась. Для выполнения этого требования токовая поперечная дифференциальная защита дополняется реле направления мощности двустороннего действия (рис. 10-24) или двумя реле направления мощности одностороннего действия, каждое из которых предназначается для отключения только одной линии.

Упрощенная принципиальная схема одной фазы защиты дана на рис. 10-24.

Токовые цепи защиты выполняются так же, как и у токовой поперечной дифференциальной защиты (см. § 10-9). Токовые обмотки реле мощности *2* и токового реле *1* соединяются последовательно и включаются параллельно вторичным обмоткам трансформаторов тока на разность токов параллельных линий, т. е. так, чтобы ток в реле $I_{р} = I_{I} - I_{II}$. Токовые реле *1* выполняют функции пусковых реле защиты. Реле направления мощности *2* служат для выявления поврежденной линии.

Напряжение к реле подводится от трансформатора напряжения шин подстанции. Оперативный ток к защите подается через блок-контакты выключателей $Б_{I}$ и $Б_{II}$, назначение которых поясняется ниже.

При срабатывании пускового реле *1* плюс постоянного тока подводится к реле направления мощности *2*. Последнее замыкает верхний или нижний контакт, в зависимости от того, какая из двух линий повреждена. От контакта $К_{1}$ подается импульс на отключение выключателя линии *ЛI*, а от контакта $К_{2}$ — линии *ЛII*.

Для двустороннего отключения поврежденной линии защита устанавливается с обеих сторон параллельных линий.

Рассмотрим поведение защиты при к. з., нагрузке и качаниях.

Внешние к. з. При внешних к. з. (точка K на рис. 10-24), а также при нагрузке и качаниях первичные токи I_{I} и I_{II} равны по величине и совпадают по направлению (см. § 10-9) на обоих концах линий.

Вторичные токи $I_{\text{вI}}$ и $I_{\text{вII}}$ (рис. 10-24) направлены в цепи обмоток реле навстречу друг другу, поэтому ток в реле $I_{\text{р}} = I_{\text{вI}} - I_{\text{вII}}$. При равенстве n_{I} и n_{II} и идеальной работе трансформаторов тока $I_{\text{вI}} = I_{\text{вII}}$, а $I_{\text{р}} = 0$. Это означает, что при внешних к. з., нагрузке и качаниях рассматриваемая защита (как и любая другая дифференциальная защита) не действует.

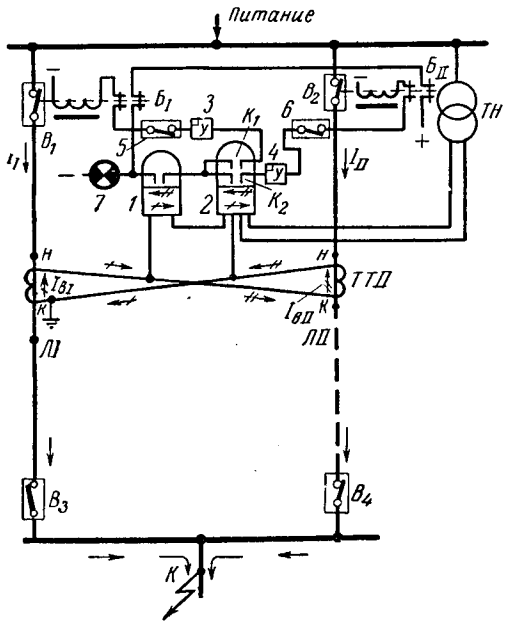


Рис. 10-24. Упрощенная схема и принцип действия направленной поперечной дифференциальной защиты параллельных линий.

Однако вследствие погрешности трансформаторов тока и некоторого неравенства сопротивлений линий вторичные токи $I_{\text{вI}}$ и $I_{\text{вII}}$ несколько различаются по величине и фазе, в результате чего в реле появляется ток небаланса $I_{\text{р}} = I_{\text{нб}}$.

Для исключения работы защиты при внешних к. з. ее ток срабатывания должен удовлетворять условию $I_{\text{с.з}} > I_{\text{нб}}$.

Короткое замыкание на параллельных линиях (*ЛI* и *ЛII*). На рис. 10-25, *а* и *б* показано распределение первичных и вторичных токов при к. з. на линии *ЛI* и *ЛII*.

На питающем конце (подстанция A) в случае повреждения на линии *ЛI* или *ЛII* первичные токи I_{I} и I_{II} имеют одинаковое направление. При этом, как видно из рис. 10-25, вторичные токи в защите питающего конца направлены в обмотках реле встречно, и поэтому ток

$$I_{\text{р}} = I_{\text{вI}} - I_{\text{вII}}. \qquad (10\text{-}22\text{а})$$

Токи I_{I} и I_{II} различаются по величине, в поврежденной линии ток всегда больше, чем в неповрежденной, так как сопротивление от шин A до точки к. з. K для тока поврежденной линии меньше,

чем для неповрежденной. Поэтому разность $(I_{вI} - I_{вII}) > 0$, и при к. з. на любой из двух линий в реле появляется ток. Направление и знак этого тока зависят от того, какая линия повреждена.

При к. з. на *ЛI* (рис. 10-25, *а*) $I_{вI} > I_{вII}$, ток $I_р$ направлен в сторону большого тока, которым является вторичный ток поврежденной линии $I_{вI}$. Согласно (10-22а) ток $I_р$ имеет положительный знак.

При к. з. на *ЛII* (рис. 10-25, *б*) $I_{вII} > I_{вI}$, в отличие от предыдущего случая ток $I_р$ согласно (10-22а) имеет отрицательный знак и направлен в сторону большого тока, т. е. тока поврежденной линии $I_{вII}$.

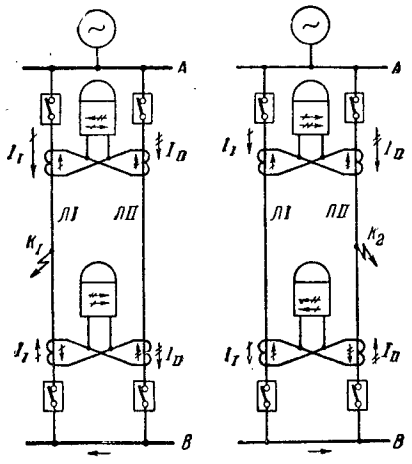


Рис. 10-25. Токораспределения в поперечной дифференциальной защите при к. з.
а — на *ЛI*; *б* — на *ЛII*.

На приемном конце *В* первичные токи I_I и I_{II} имеют противоположные направления.

На поврежденной линии ток идет от шин подстанции *В*, а на неповрежденной к шинам *В* (см. рис. 10-25, *а* и *б*). В соответствии с этим ток в реле на приемном конце равен:

$$I_р = I_{вI} + I_{вII}, \quad (10\text{-}22б)$$

как это следует из токораспределений на рис. 10-25, *а* и *б*. Знак тока $I_р$ зависит от того, какая линия повреждена: *ЛI* или *ЛII*. При к. з. на *ЛI* ток к. з. идет к месту повреждения (точке *К*) из линии *ЛII* в линию *ЛI* (рис. 10-26, *а*). В соответствии с этим ток в реле $I_р$ (рис. 10-25, *б*) будет, так же как и на питающем конце, положительным, совпадая по знаку со вторичным током поврежденной линии *ЛI*.

В случае повреждения на *ЛII* направление первичного тока к. з. изменится, он будет идти из линии *ЛI* в линию *ЛII*, где находится повреждение (рис. 10-25, *б*). Соответственно изменится направление вторичных токов и тока $I_р$, знак которого станет отрицательным.

Из сказанного следует, что *при к. з. на любой из параллельных линий в поперечной направленной дифференциальной защите появляется ток* $I_р$ *и она приходит в действие. При к. з. на ЛI ток* $I_р$ *имеет положительное направление, а при повреждении ЛII направлен в обратную сторону.*

Поскольку ток в поляризующей цепи реле мощности, питаемой напряжением шин, в обоих случаях имеет одинаковое направление, то знак мощности $S_р$ на зажимах реле направления мощности при к. з. на *ЛI* и на *ЛII* будет различным.

Для большей наглядности на рис. 10-26 приведены векторные диаграммы тока $I_р$ и напряжения $U_р$, подводимых к реле мощности. При построении диаграмм принято, что положительные токи отстают от $U_р$ на угол $\varphi_р = \varphi$, а отрицательные сдвинуты на угол $\varphi_р = \varphi + 180°$.

Если при к. з. на *Л1* (рис. 10-26, *а* и *б*) мощность на реле была положительна, то при повреждении на *ЛII* (рис. 10-26, *в* и *г*) знак мощности изменится на обратный за счет изменения фазы тока $I_р$ на 180°.

Поэтому если в первом случае реле мощности замыкает контакт K_1, разрешая защите подействовать на отключение поврежденной линии *Л1*, то во втором случае реле мощности замкнет контакт K_2 и разрешит отключение линии *ЛII* (рис. 10-24).

При наличии источников питания на приемной стороне характер распределения первичных токов, показанный на рис. 10-25, не меняется, и поэтому поведение защиты будет аналогичным.

Таким образом, при к. з. на одной из параллельных линий под действием тока $I_р$ срабатывают пусковые реле защиты, подводя оперативный ток к реле направления мощности. Последнее по знаку $S_р$ определяет поврежденную линию и замыкает цепь отключения ее выключателя.

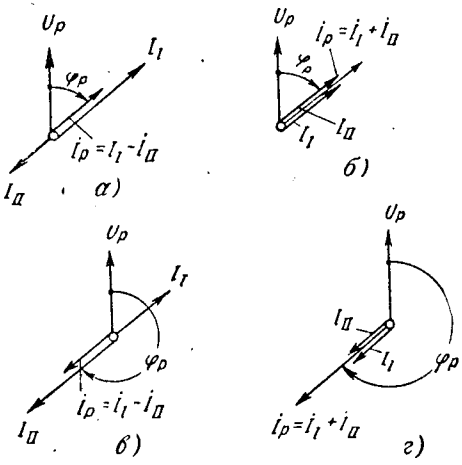


Рис. 10-26. Векторные диаграммы $U_р$ и $I_р$ на реле мощности.

а — при к. з. на *Л1* на питающем конце; *б* — то же на приемном конце; *в* — при к. з. на *ЛII* на питающем конце; *г* — то же на приемном конце.

Автоматическая блокировка защиты. Оперативная цепь защиты заводится последовательно через блок-контакты $Б_I$ и $Б_{II}$ выключателей линий *Л1* и *ЛII* (рис. 10-24).

При отключении выключателя блок-контакт размыкает оперативную цепь и автоматически выводит из действия защиту. Такое выполнение оперативной цепи необходимо для правильной работы защиты в следующих двух случаях:

1. Если при к. з. на линии, например *Л1* (рис. 10-24), выключатель B_1 отключится раньше выключателя B_3, то реле мощности защиты подстанции *А* под действием тока к. з., направляющегося к месту повреждения по линии *ЛII*, разрешит защите подстанции *А* отключить неповрежденную линию *ЛII*. Такое неправильное действие защиты предотвращается посредством блок-контакта $Б_1$, автоматически размыкающего оперативную цепь защиты при отключении выключателя B_1 (рис. 10-24).

Непременным условием надежности блокировки является регулировка блок-контактов так, чтобы получить $t_{бл} < t$ отключения выключателя.

2. При отключении одной из линий защита превращается в мгновенную направленную защиту. Она может неправильно работать при внешних к. з. и поэтому должна выводиться из действия.

Это осуществляется с помощью блок-контактов, снимающих плюс с защиты при отключении выключателя линии.

При отключении одной из линий с противоположной стороны (например, на подстанции *В*) автоматическая блокировка на защите подстанции *А* не действует; в этом случае защита должна отключаться вручную отключающими устройствами *5* и *6* (рис. 10-24).

Состояние блок-контактов контролируется лампой *7* (рис. 10-24), которая горит, если контакты $Б_I$ и $Б_{II}$ замкнуты.

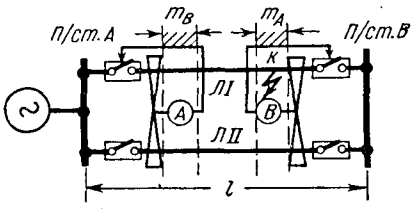


Рис. 10-27. Зона каскадного действия направленной поперечной дифференциальной защиты.

Зона каскадного действия. В § 10-9, *б* было показано, что разница токов в параллельных линиях $I_I - I_{II}$ уменьшается при удалении точки к. з. от места установки защиты (см. рис. 10-22, *б*). В результате этого направленная поперечная дифференциальная защита, так же как и токовая дифференциальная защита, имеет «мертвую зону» *m* (рис. 10-27). Однако после отключения поврежденной линии с противоположной стороны не работавшая до этого защита приходит в действие и отключает поврежденную линию. Так, например, при к. з. на *ЛI* в точке *К* вблизи шин подстанции *В* защита *А* не работает, так как $I_р < I_{с.з}$.

После отключения поврежденной линии *ЛI* со стороны подстанции *В* (где ток $I_р$ достаточен для надежного действия поперечной дифференциальной защиты *В*) весь ток $I_{к.з}$ направится от подстанции *А* к месту повреждения *К* по *ЛI*. В этом случае $I_I = I_{к.з}$, $I_{II} = 0$, а ток в пусковых реле защиты *А* резко возрастает $I_р = I_I - I_{II} = I_{к.з}$ и становится больше $I_{с.з}$.

Пусковые реле защиты *А* срабатывают, орган направления мощности выбирает поврежденную линию *ЛI*, и защита действует на ее отключение.

При к. з. вблизи шин подстанции *А*, отключение поврежденной линии происходит аналогично: сначала работает ближняя к месту к. з. защита *А*, а затем защита *В*.

Такое поочередное действие защит называется каскадным, а зона (m_A и m_B), в пределах которой направленная дифференциальная защита не действует, пока поврежденная линия не отключится с противоположной стороны, называется зоной каскадного действия защиты.

Зона каскадного действия определяется на основе таких же соображений, как и мертвая зона по выражению (10-22). *При каскадном действии защиты полное время отключения к. з. удваивается, что является недостатком защиты,* поэтому зону каскадного действия стремятся сократить, для чего следует уменьшать $I_{с.з}$.

Мертвая зона по напряжению. При к. з. вблизи места установки защиты остаточное напряжение, подводимое к зажимам реле мощности, очень мало, а при к. з. у шин подстанции оно равно нулю. В этом случае мощность на зажимах реле направления мощности оказывается недостаточной для его действия и защита отказывает в работе. Таким образом, направленная поперечная дифференциальная защита имеет мертвую зону по напряжению. Величина мертвой зоны невелика, она определяется расчетом, как указано в § 7-7.

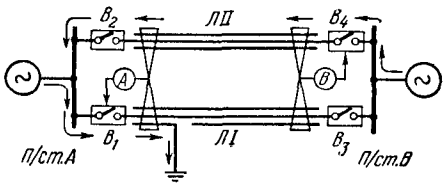


Рис. 10-28. Неправильное действие направленной поперечной дифференциальной защиты при обрыве одного провода с односторонним заземлением.

Работа защиты при обрыве провода линии с односторонним заземлением. На рис. 10-28 показано протекание тока к. з. при обрыве одного провода линии и заземлении его с одной из сторон. Направленная поперечная дифференциальная защита *А* под действием тока в линии *ЛІ* отключает поврежденную линию. Одновременно от тока к. з. в линии *ЛІІ* срабатывает защита *В* и неправильно отключает неповрежденную линию *ЛІІ*. Устранение этого недостатка защиты требует усложнения схемы. Опыт эксплуатации показывает, что рассмотренный вид повреждения бывает редко, поэтому специальных мер к устранению неправильной работы защиты обычно не применяют.

б) Схемы направленной поперечной дифференциальной защиты

Схемы защиты выполняются с учетом следующих общих положений:

1. Трансформаторы тока на каждой линии соединяются по схеме полной звезды для трехфазных защит и по схеме неполной звезды — для двухфазных.

2. Реле мощности включается на ток и напряжение по типовым схемам, обеспечивающим наивыгоднейшие условия для их работы (по 90-градусной схеме — при реле мощности смешанного типа).

3. Пуск защиты производится пофазно. При каскадном отключении поврежденной линии (рис. 10-27) реле мощности под действием токов нагрузки неповрежденных фаз здоровой линии *ЛІІ* могут замкнуть цепь на отключение этой линии. При пофазном

пуске реле мощности, включенные на ток неповрежденных фаз, не получают оперативного тока и не смогут вследствие этого подействовать на отключение.

4. Защита выполняется без выдержки времени, поскольку она не действует при внешних к. з.

5. В случае обрыва или перегорания предохранителя в цепи напряжения к реле мощности подводится искаженное по фазе и величине напряжение и реле может неправильно подействовать при к. з. на одной из параллельных линий. Поэтому предусматривается устройство контроля исправности цепи напряжения.

На рис. 10-29 приведена в качестве примера схема трехфазной защиты.

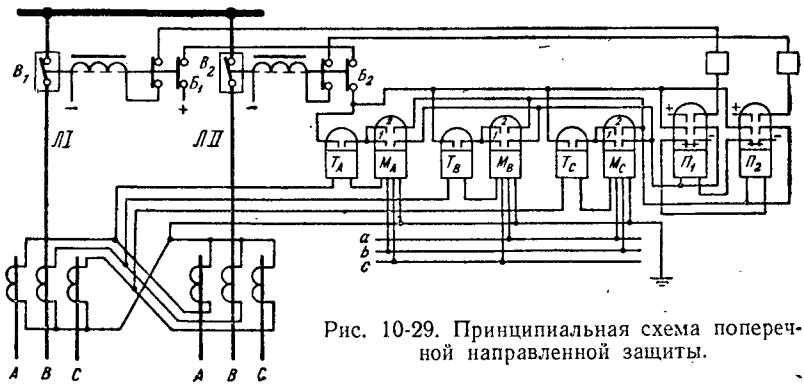


Рис. 10-29. Принципиальная схема поперечной направленной защиты.

В схеме имеются три пусковых токовых реле T_A, T_B и T_C, включенных на разность токов соответствующих одноименных фаз *ЛI* и *ЛIII*. В качестве органов направления мощности используются реле мощности M_A, M_B, M_C двустороннего действия типа РБМ-271, момент этого реле $M_э = kU_р I_р \cos(\varphi_р + 90°)$. Реле имеют по два контакта. Контакт *1* (нижний) замыкается при положительном знаке мощности, а контакт *2* (верхний) — при отрицательном.

Токовые обмотки реле *M* включаются последовательно с обмотками пусковых реле на ток фазы. Обмотки напряжения включены на линейное напряжение по 90-градусной схеме.

Плюс на оперативные цепи защиты подается через блок-контакты $Б_1$ и $Б_2$ выключателей линий *I* и *II*, чем осуществляется автоматическая блокировка защиты при отключении одного из выключателей. Контакты пусковых реле подают плюс к реле мощности, включенному на ток одноименной фазы, т. е. T_A — к реле M_A, T_B — к реле M_B и т. д.

В схеме предусматриваются два выходных промежуточных реле. Реле $П_1$ пускается от контактов *1* при к. з. на линии *ЛI* и действует на отключение выключателя B_1. Реле $П_2$ пускается от контактов *2* при к. з. на линии *ЛIII* и отключает B_2.

В схеме предусмотрена взаимная блокировка этих реле. С этой целью минус обмотки $П_1$ заведен через нормально замкнутые контакты $П_2$ и наоборот.

Оба реле, срабатывая, самоудерживаются, подавая питание на обмотку через один из своих контактов. При наличии такой блокировки отпадает необходимость в регулировке блок-контактов $Б_1$ и $Б_2$, обеспечивающей их размыкание раньше, чем прервется ток к. з. силовыми контактами выключателя.

Таким путем обеспечивается надежность автоматической блокировки защиты при каскадных отключениях поврежденной линии.

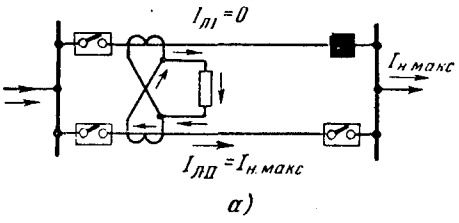
Рассмотренная трехфазная схема применяется в сети с большим током замыкания на землю, от всех видов к. з.

В сети с малым током замыкания на землю применяется двухфазная схема, отличающаяся от рассмотренной отсутствием трансформаторов тока, пусковых реле и реле мощности на одной фазе.

в) Выбор уставок направленной поперечной дифференциальной защиты, включенной на фазные токи (рис. 10-24)

Ток срабатывания пусковых реле защиты должен удовлетворять четырем требованиям:

1. Пусковые реле не должны действовать при внешних к. з. Для этого их ток срабатывания должен выбираться больше тока небаланса при к. з. на шинах противоположной подстанции:

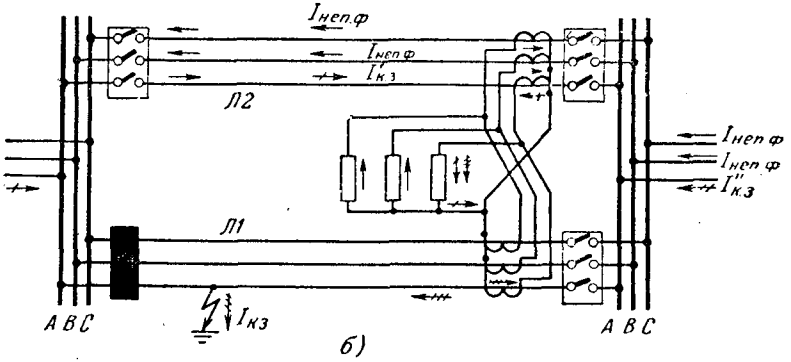


а)

$$I_{с.з} = k_н I_{нб.макс}, \quad (10\text{-}23)$$

где $k_н = 1{,}5 \div 2$.

2. Пусковые реле должны быть отстроены от суммарного тока на-



б)

Рис. 10-30. Токораспределение в защите при каскадном отключении поврежденной линии с учетом токов нагрузки.

грузки $I_{н.макс}$ параллельных линий для предотвращения ложного действия защиты при отключении одной из линий с противоположной стороны в нормальном режиме (рис. 10-30, *а*). В таких условиях по оставшейся в работе линии протекает суммарный ток $I_{н.макс}$ обеих параллельных линий, который поступает в пусковые реле и реле мощности.

Если нагрузка передается от шин в сторону линии, то реле мощности срабатывает, разрешая защите отключить оставшуюся линию.

Чтобы не допустить такого отключения, необходимо иметь: $I_{с.з} > I_{н.макс}$, или

$$I_{с.з} = k_н I_{н.макс}, \qquad (10\text{-}24)$$

где $k_н$ — коэффициент надежности.

3. Пусковые реле должны отстраиваться от токов в неповрежденных фазах $I_{неп.ф}$ при двухфазных и однофазных к. з. Для этой цели

$$I_{с.з} > I_{неп.ф}$$

или

$$I_{с.з} = k_н I_{неп.ф}, \qquad (10\text{-}25)$$

где

$$\dot{I}_{неп.ф} = \dot{I}_н + k\dot{I}_к.$$

Токи в неповрежденных фазах (B и C) влияют на работу защиты при каскадном отключении поврежденной линии (рис. 10-30, *б*), так как в этом режиме они текут только по одной оставшейся в работе линии *Л2*.

При выполнении условия (10-25) и пофазном пуске защиты неселективное отключение линии из-за ложной работы реле мощности исключается, поскольку пусковые реле неповрежденных фаз не будут работать.

4. Пусковые реле должны надежно возвращаться при максимальной нагрузке параллельных линий. При выборе тока срабатывания без учета условий возврата контакты пусковых реле могут остаться замкнутыми после внешнего к. з. (при работе одной линии, когда защита превращается в мгновенную максимальную защиту). Если при этом под действием нагрузки сработает реле направления мощности, то цепь отключения от защиты будет разомкнута только блок-контактом отключенного выключателя. В момент включения второго выключателя блок-контакт замкнется и защита подаст импульс на отключение работающей линии.

Условия возврата обеспечиваются, если

$$I_{с.з} = \frac{k_{зап} I_{н.макс}}{k_{воз}}, \qquad (10\text{-}26)$$

где $I_{н.макс}$ — суммарный максимальный ток нагрузки параллельных линий.

Ток срабатывания, выбранный по четвертому условию, обычно удовлетворяет всем остальным требованиям. Поэтому расчет $I_{с.з}$, ведется по формуле (10-26) и проверяется по (10-23) и (10-25).

Ток небаланса поперечной дифференциальной защиты (см. § 10-9) принимается равным арифметической сумме тока небаланса $I'_{нб}$, обусловленного погрешностью трансформаторов тока, и тока небаланса $I''_{нб}$, вызванного неравенством сопротивлений параллельных линий. При выборе уставок по выражению (10-23) необходимо исходить из максимального значения суммарного тока небаланса:

$$I_{нб.макс} = I'_{нб.макс} + I''_{нб.макс}. \qquad (10\text{-}26а)$$

Для уменьшения $I'_{нб}$ трансформаторы тока, питающие защиту, выбираются по кривым 10%-ной погрешности при максимальном значении тока внешнего к. з. на шинах противоположной подстанции, текущего по каждой параллельной линии $I_{к.макс}$. Расчетная кратность тока

$$m_р = \frac{k_а I_{к.\,макс}}{I_{пом.\,т.\,т}}, \qquad (10\text{-}27)$$

где $k_а$ — коэффициент, учитывающий влияние апериодической слагающей тока к. з., принимается равным 2.

Согласно [Л. 99] рекомендуется оценивать приближенное значение $I'_{нб}$ по выражению

$$I'_{нб.\,макс} = k_{одн} 0{,}1 k_а \frac{I_{к.макс}}{n_т}, \qquad (10\text{-}28)$$

где $I_{к.\,макс}$ — максимальный ток при трехфазном к. з. на шинах подстанций (A и B), проходящий по одной параллельной линии при работе обеих; 0,1 — погрешность трансформаторов тока, равная 10%; $k_{одн}$ — коэффициент однотипности, принимаемый при однотипных трансформаторах тока и равных сопротивлениях плеч равным 0,5; $k_а$ — принимается равным 1,5—2.

Вторую составляющую тока небаланса $I''_{нб}$ можно оценивать по формуле

$$I''_{нб.\,макс} = \frac{\Delta z\%}{100} \frac{k_а I_{к.\,макс}}{n_т}, \qquad (10\text{-}29)$$

где $\Delta z\% = \frac{z_{л\,I} - z_{л\,II}}{z_{л\,I}} \cdot 100$ — разница в процентах между сопротивлениями $z_{л\,I}$ и $z_{л\,II}$ прямой последовательности обеих линий; $I_{к.макс}$ — максимальное значение суммарного тока к. з. (по обеим линиям) при повреждении на шинах противоположной подстанции.

Обычно сопротивление линий одинаково ($z_{л\,I} = z_{л\,II}$). В таких случаях считается, что $I''_{нб} = 0$ и в расчетах учитывается только составляющая $I'_{нб}$.

Чувствительность защиты характеризуется величиной зоны каскадного действия защиты, коэффициентом чувствительности пусковых реле $k'_ч$ и величиной мертвой зоны по напряжению у реле мощности защиты [Л. 105].

Зона каскадного действия подсчитывается для защиты на каждом конце параллельных линий по (10-22) и не должна превышать 25% длины линии.

Чувствительность пусковых реле защиты проверяется для двух случаев:

а) При к. з. на границе зоны каскадного действия защиты после отключения поврежденной линии с противоположной стороны определяется коэффициент чувствительности (рис. 10-31, *а*)

$$k'_ч = \frac{I_{рк.\,д}}{I_{с.\,з}}, \qquad (10\text{-}30)$$

где $I_{р.к.д}$ — минимальный ток в реле, в этих условиях; рекомендуется иметь $k'_ч \geqslant 1{,}5$.

б) В случае установки поперечных дифференциальных защит с обеих сторон линии (рис. 10-31, *б*) определяется $k_ч''$ при повреждении в точке равной чувствительности обеих защит, которая находится из условия

$$\frac{I_{рA}}{I_{с.зA}} = \frac{I_{рB}}{I_{с.зB}}, \qquad (10\text{-}31)$$

где $I_{рA}$ и $I_{рB}$ — токи в реле защиты A и B при к. з. в точке K''.

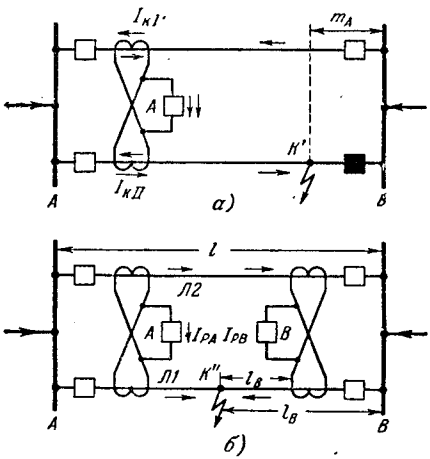


Рис. 10-31. Расчетные схемы для проверки чувствительности поперечной дифференциальной защиты.

а — при каскадном отключении поврежденной линии; *б* — при к. з. в точке равной чувствительности K''.

Если обозначить расстояние от защиты B до точки K'' через l_B, то, приравнивая падение напряжения в параллельных ветвях от подстанции B до точки K'' по контуру линий *Л1* и *Л2* и учитывая (10-31), получаем:

$$l_B = \frac{I_{с.зA}}{I_{с.зA} + I_{с.зB}} l. \qquad (10\text{-}32)$$

Определив местоположение точки K'', рассчитывают токи к. з. и токи в реле защиты A и B, после чего находят:

$$k_ч'' = \frac{I_{рA(к)}}{I_{с.зA}} = \frac{I_{рB(к)}}{I_{с.зB}}. \qquad (10\text{-}33)$$

Рекомендуется иметь $k_ч'' \geqslant 2$.

Мертвая зона по напряжению определяется на основании соображений, изложенных в § 7-7.

10-11. НАПРАВЛЕННАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Защита основана на сравнении величины и направления токов нулевой последовательности, протекающих по параллельным линиям при к. з. на землю. Схема защиты, показанная на рис. 10-32, состоит из пускового токового реле T_0 и реле направления мощности M_0 двустороннего действия, включенных на разность токов $3I_0$ параллельных линий I и II $I_р = 3I_{0I} - 3I_{0II}$. Для получения тока $3I_0$ используется нулевой провод трансформаторов тока, соединенных по схеме трехфазной звезды. Обмотка напряжения реле M_0 питается напряжением $3U_0$, которое подводится от разомкнутого треугольника трансформатора напряжения. Угол сдвига между U_0 и I_0 близок к 90° (см. гл. 8), вследствие чего применяется реле мощности синусного или смешанного типа, имеющее максимальную чувствительность при $\varphi_р \approx 90°$.

Выбор уставки на пусковом реле защиты. При внешних к. з. в дифференциальной цепи защиты появляется ток небаланса, от которого защита может ложно сработать. Для исключения ложного действия ток срабатывания пускового реле должен удовлетворять условию

$$I_{с.зо} = k_н I_{нб.макс}. \quad (10\text{-}34)$$

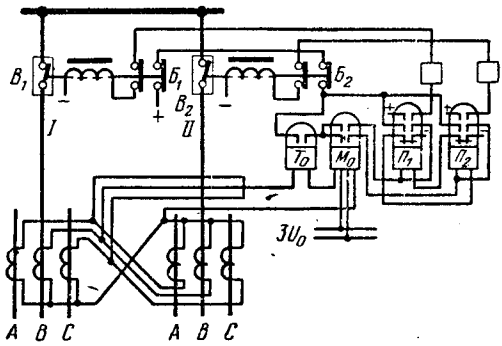


Рис. 10-32. Схема поперечной направленной дифференциальной защиты нулевой последовательности.

Ток небаланса подсчитывается по выражениям (10-28) и (10-29). Расчет $I_{нб}$ ведется при однофазных или двухфазных к. з. на землю на шинах противоположной подстанции.

Поперечная дифференциальная защита нулевой последовательности обладает более высокой чувствительностью при к. з. на землю, чем защита, реагирующая на фазный ток.

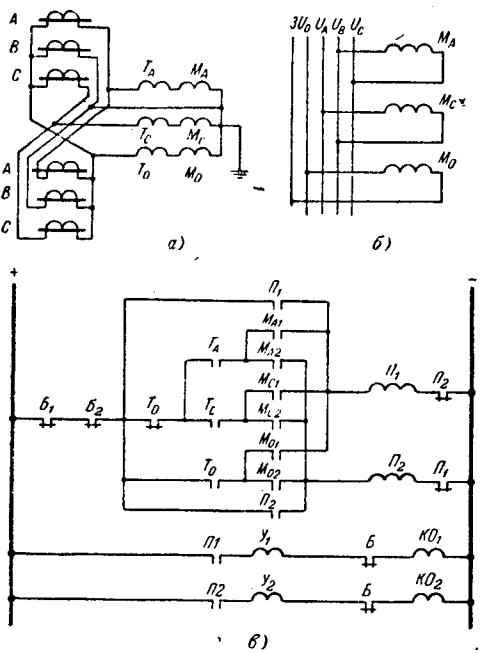


Рис. 10-33. Принципиальная схема направленной поперечной дифференциальной защиты с двумя комплектами, реагирующими на ток фаз и ток I_0.

10-12. НАПРАВЛЕННАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА С РАЗДЕЛЬНЫМИ КОМПЛЕКТАМИ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ И ОДНОФАЗНЫХ К. З.

В тех случаях, когда фазная поперечная дифференциальная защита имеет недостаточную чувствительность к однофазным к. з., ее дополняют комплектом дифференциальной защиты нулевой последовательности. Полная схема такой защиты показана на рис. 10-33. В этой схеме комплект, включенный на разность фазных токов, выполняется двухфазным.

Фазный комплект блокируется при к. з. на землю. При этом отпадает необходимость в отстройке пусковых реле T_A и T_C фазного комплекта от тока в неповрежденных фазах согласно условию (10-25). Блокировка осуществляется размыкающим контактом пускового реле T_0.

Ток срабатывания реле T_0 ($I_{с.з0}$) должен удовлетворять условию (10-34) не только при внешних к. з., но также при трехфазных к. з. на одной из параллельных линий у места установки защиты. Пусковое реле T_0 не должно работать от тока небаланса $I^{(3)}_{нб.макс}$, возникающего в этом случае, так как иначе фазный комплект будет выведен из действия. Поэтому $I_{с.з0} = k_н I^{(3)}_{нб.макс}$.

10-13. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПУСКОВЫХ ОРГАНОВ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Защита, включаемая на разность фазных токов. При больших токах нагрузки и относительно малых токах к. з. пусковые токовые реле защиты оказываются недостаточно чувствительными. Для повышения чувствительности применяется блокировка от реле напряжения (рис. 10-34). В защитах от всех видов к. з. блокировка выполняется тремя реле минимального напряжения H_{AB}, H_{BC}, H_{CA}, включаемыми на линейные напряжения, и реле H_0, включенным на напряжение нулевой последовательности.

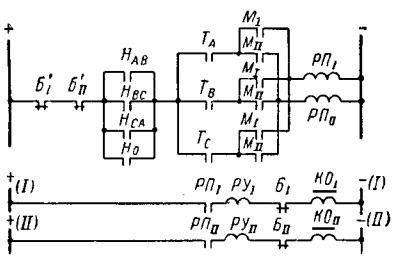


Рис. 10-34. Схема цепей оперативного тока трехфазной направленной поперечной дифференциальной защиты с блокировкой от реле напряжения.

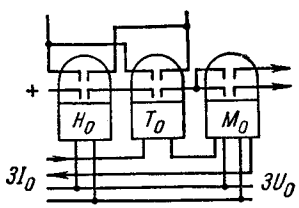


Рис. 10-35. Схема комбинированного пуска от H_0 и T_0 для повышения чувствительности защиты, реагирующей на разность токов I_0.

Реле напряжения срабатывают при к. з. и подают плюс к защите, разрешая ей действовать.

Напряжение срабатывания блокирующего реле напряжения H выбирается на основе соображений, изложенных в § 5-3, по формуле

$$U_{с.р} = \frac{U_{раб.мин}}{k_{воз} k_н n_н}.$$

Ток срабатывания пускового токового реле T не отстраивается от $I_{н.макс}$ и выбирается лишь по условию отстройки от $I_{нб}$ при внешних к. з. по выражению (10-23).

Защита, включаемая на разность токов I_0. При больших токах небаланса чувствительность пускового реле может оказаться недостаточной. Для повышения чувствительности токовое пусковое реле T_0 дополняется реле напряжения H_0, реагирующим на $3U_0$ (рис. 10-35). При к. з. на землю появляются ток I_0 и напряжение U_0. Оба реле T_0 и H_0 приходят в действие, разрешая защите работать.

При междуфазных к. з. реле H_0 не действует, и поэтому ложного пуска комплекта от однофазных к. з. и блокирования комплекта от междуфазных к. з. не может быть, даже если реле T_0 сработает от $I_{нб}$.

Напряжение срабатывания реле H_0 выбирается больше $U_{нб}$ при нормальном режиме. Обычно $U_{нб} \leqslant 5$ *в*. Поэтому $U_{с.р}$ принимается не больше 10 *в*.

Ток срабатывания T_0 при наличии пускового реле H_0 отстраивается только от тока небаланса при внешних к. з. на землю. Благодаря этому чувствительность пускового органа повышается.

10-14. ОЦЕНКА НАПРАВЛЕННЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

Положительными особенностями направленной поперечной защиты являются простота схемы, меньшая стоимость по сравнению с продольной дифференциальной защитой, отсутствие выдержки времени, нереагирование на качания, простота выбора параметров защиты.

К недостаткам защиты нужно отнести каскадное действие, вызывающее замедленное отключение к. з. в зоне каскадного действия; мертвую зону по напряжению; необходимость вывода из действия защиты при отключении одной линии, в связи с чем требуется дополнительная полноценная защита для оставшейся линии; неправильную работу защиты при обрыве провода линии с односторонним заземлением.

10-15. ТОКОВАЯ БАЛАНСНАЯ ЗАЩИТА [Л. 42].

Токовая балансная защита является разновидностью поперечной дифференциальной защиты. Она основана на сравнении величин токов в параллельных линиях с использованием для этой цели специальных балансных реле.

В отличие от направленной дифференциальной защиты она не реагирует на направление токов в параллельных линиях и поэтому не может применяться на приемном конце ВЛ. В Советском Союзе эта защита не получила распространения.

Глава одиннадцатая

ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА

11-1. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания рассмотренные выше максимальные и направленные защиты не могут обеспечить селективного отключения к. з. В этом нетрудно убедиться на примере кольцевой сети с двумя источниками питания, представленной на рис. 11-1.

При к. з. на линии *Л2* максимальная направленная защита *3* должна работать быстрее защиты *1*, а при к. з. на линии *Л1*, наоборот, защита *1* должна работать быстрее защиты *3*. Эти противоречивые требования не могут быть выполнены при помощи макси-

мальной направленной защиты. Кроме того, максимальные и направленные защиты часто не удовлетворяют требованию быстроты действия. Токовые отсечки далеко не всегда применимы, а продольные дифференциальные защиты могут устанавливаться только на коротких линиях.

В связи с этим возникла необходимость в применении других принципов, позволяющих получить защиты с необходимым быстродействием, обеспечивающие селективность и чувствительность в сетях любой конфигурации. Одной из таких защит является дистанционная защита.

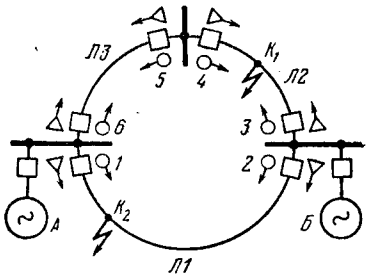


Рис. 11-1. Кольцевая сеть с двумя источниками питания.

○→ — максимальная направленная защита; ▷→ — дистанционная защита.

Выдержка времени дистанционной защиты t зависит от расстояния (дистанции) $l_{р.к}$ (рис. 11-2) между местом установки защиты и точкой к. з., т. е. $t = f(l_{р.к})$, и нарастает плавно или ступенчато с увеличением этого расстояния (рис. 11-3). При таком принципе действия ближайшая к месту повреждения дистанционная защита всегда имеет меньшую выдержку времени, чем более удаленные защиты, благодаря этому автоматически обеспечивается селективное отключение поврежденного участка.

Например, при к. з. в точке $К_1$ (рис. 11-2) защита *2*, расположенная ближе к месту повреждения, работает с меньшей выдержкой времени, чем более удаленная защита *1*. Если же к. з. возникнет в точке $К_2$, то время действия защиты *2* автоматически увеличится и к. з. будет селективно отключено защитой *3*, которая в этом случае срабатывает быстрее остальных защит (*2* и *1*).

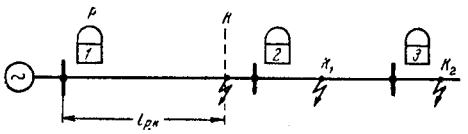


Рис. 11-2. Зависимость выдержки времени дистанционной защиты от расстояния $l_{р.к}$ до места к. з.

Основным элементом дистанционной защиты является дистанционный орган (называемый также измерительным органом), определяющий удаленность к. з. от места установки защиты.

В качестве дистанционного (измерительного) органа используются реле сопротивления, непосредственно или косвенно реагирующие на полное, активное или реактивное сопротивление линии (z, r, x). Сопротивление фазы линии от места установки реле до места к. з. пропорционально длине этого участка, так как

$$z_{р.к} = z_у l_{р.к}; \quad x_{р.к} = x_у l_{р.к};$$

$$r_{р.к} = r_у l_{р.к},$$

где $z_{р.к}$, $x_{р.к}$, $r_{р.к}$ — полное, реактивное и активное сопротивления участка линии длиной $l_{р.к}$; $z_у$, $x_у$, $r_у$ — удельное сопротивление на 1 *км* линии.

Таким образом, поведение реле, реагирующих на сопротивление линии, зависит от удаленности места повреждения $l_{р.к}$. В зависимости от вида сопротивления, на которое реагирует дистанционный орган (z, x или r), дистанционные защиты подразделяются на защиты полного, реактивного и активного сопротивлений. Дистанционные защиты реактивного и особенно активного сопротивлений применяются редко и поэтому в дальнейшем не рассматриваются.

Для обеспечения селективности дистанционные защиты в сетях сложной конфигурации необходимо выполнять направленными, действующими только при направлении мощности к. з. от шин в линию (рис. 11-1). Выдержки времени у защит, работающих при одинаковом направлении мощности, взаимно согласовываются так, чтобы при к. з. за пределами защищаемой линии каждая защита имела выдержку времени на ступень больше выдержки времени защит на следующем участке. Направленность действия дистанционных защит осуществляется при помощи обычных реле направления мощности или путем применения направленных измерительных органов или пусковых реле, способных реагировать на направление мощности к. з.

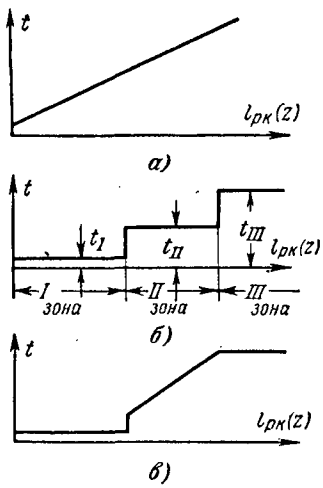


Рис. 11-3. Характеристики дистанционных защит $t = f(l_{р.к})$.

а — наклонная; *б* — ступенчатая; *в* — комбинированная.

11-2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫДЕРЖКИ ВРЕМЕНИ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

Зависимость времени действия дистанционной защиты от расстояния или сопротивления до места к. з. $t = f(l_{р.к})$ или $t = f(z)$ называется характеристикой выдержки времени дистанционной защиты. По характеру этой зависимости дистанционные защиты делятся на три группы: с плавно нарастающими характеристиками времени действия, ступенчатыми и комбинированными характеристиками (рис. 11-3).

Конструктивное выполнение дистанционных защит с наклонной и комбинированной характеристиками значительно сложнее, чем с характеристикой ступенчатого типа; в то же время ступенчатые защиты обеспечивают более быстрое отключение повреждений, чем защиты с наклонной характеристикой. В результате этого наиболее распространенными являются дистанционные защиты со ступенчатой характеристикой. Они выполняются в большинстве случаев

с тремя ступенями времени: t_{I}, t_{II}, t_{III}, соответствующими трем зонам действия защиты (рис. 11-3, *б*). Имеются защиты и с большим числом ступеней и зон, но увеличение их числа ведет к усложнению защит и не дает существенной пользы.

Принцип обеспечения селективности действия защит со ступенчатой характеристикой иллюстрируется на рис. 11-4.

Протяженность первой зоны берется несколько меньше протяженности линии с учетом погрешности Δz в сопротивлении срабатывания дистанционного реле. В зависимости от точности реле первая зона составляет 0,7—0,85 длины защищаемой линии. При к. з. в пределах первой зоны защита действует мгновенно. Остальная часть линии и шины противоположной подстанции охватываются второй зоной, протяженность и выдержка времени которой согласуются с первой зоной защиты следующего участка. Короткое замыкание в пределах второй зоны защита отключает с выдержкой времени t_2. Последняя, третья зона защиты является резервной, ее протяженность выбирается из условия охвата следующего участка на случай отказа его защиты или выключателя. При повреждениях в третьей зоне защита действует с выдержкой времени t_3.

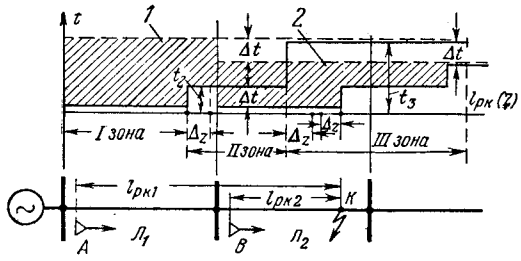


Рис. 11-4. Согласование выдержек времени дистанционных защит со ступенчатой характеристикой.

Δz — погрешность дистанционного реле; Δt — ступень селективности.

На диаграмме рис. 11-4 пунктиром показаны выдержки времени токовых направленных защит в предположении, что они установлены вместо дистанционных. Сравнение их с характеристиками дистанционных защит показывает, что дистанционный принцип позволяет существенно уменьшить время отключения к. з. на линиях и, что особенно важно, дает возможность отключать к. з. вблизи шин станций и подстанций быстрее, чем удаленные от шин к. з.

11-3. ЭЛЕМЕНТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Дистанционная защита относится к числу сложных защит. Все разновидности этой защиты состоят из нескольких общих элементов (органов защиты), выполняющих определенные однотипные функции.

Взаимную связь между органами дистанционной защиты, их назначение и выполняемые ими функции можно пояснить упрощенной структурной схемой защиты со ступенчатой характеристикой, показанной для одной фазы на рис. 11-5.

Защита состоит из следующих органов:

1) пускового органа *1*, пускающего защиту при возникновении к. з. Обычно пусковой орган выполняется при помощи реле полного сопротивления или токовых реле. На рис. 11-5 в качестве пускового органа *1* показано реле сопротивления, питаемое током $I_р$ и напряжением $U_р$ сети;

2) дистанционного органа *2*, определяющего удаленность места к. з. В ступенчатых защитах — выполняется с помощью реле минимального сопротивления. К реле подводится ток и напряжение защищаемой линии ($I_р$ и $U_р$) и оно срабатывает при условии

$$z_р = \frac{U_р}{I_р} < z_{с.р}, \qquad (11\text{-}1)$$

где $z_{с.р}$ — наибольшее сопротивление, при котором реле начинает действовать, т. е. сопротивление срабатывания реле.

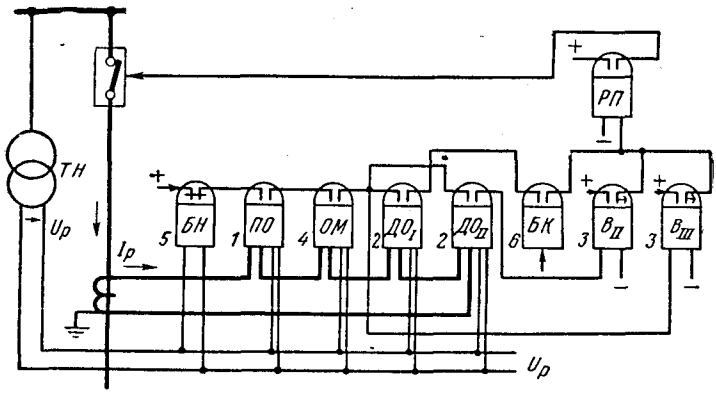


Рис. 11-5. Упрощенная схема трехступенчатой дистанционной защиты.

Сопротивление $z_р$ иногда называется фиктивным, так как в некоторых режимах (например, при нагрузке и качаниях) $z_р$ не является сопротивлением линии. В этих случаях оно представляет собой отношение $U_р/I_р$, обладающее размерностью сопротивления, но не имеющее физического значения;

3) органа выдержки времени *3*, создающего выдержку времени, с которой в зависимости от поведения дистанционного органа действует защита; выполняется в виде реле времени обычной конструкции;

4) органа направления мощности *4*, не позволяющего работать защите при направлении мощности к. з. к шинам подстанции. Выполняется при помощи реле направления мощности и предусматривается только в тех случаях, когда пусковые и дистанционные органы не обладают направленностью;

5) блокировки, автоматически выводящие защиту из действия в тех режимах, когда защита может сработать неправильно

при отсутствии повреждения. Обычно применяются две блокировки:

а) блокировка *5* от исчезновения напряжения $U_р$ при неисправностях в цепях напряжения, питающих защиту; при $U_р = 0$, как следует из (11-1), $z_р = 0$, в этих условиях пусковые реле (если они реагируют на z) и дистанционные органы защиты приходят в действие, что может привести к неправильной работе защиты; блокировка *5* выполняется по схемам, рассмотренным в § 6-4, она приходит в действие при неисправностях в цепях напряжения, снимает оперативный ток с защиты, не позволяя ей действовать на отключение;

б) блокировка *6* от неправильного действия защиты при качаниях в системе; в этом режиме напряжение $U_р$ снижается, а ток $I_р$ возрастает, при этом согласно (11-1) $z_р$ уменьшается, в результате чего пусковые и дистанционные органы защиты могут сработать и вызвать неправильное действие защиты; при возникновении качаний блокировка *6* (см. гл. 12) приходит в действие и выводит защиту из работы, размыкая ее цепь отключения.

При к. з. на линии работают пусковое реле *ПО* и реле мощности *М*. Через их контакты подается плюс постоянного тока к контактам дистанционных органов и на катушку реле времени третьей зоны. Если к. з. возникло в пределах первой зоны, то дистанционный орган первой зоны $ДО_I$ замыкает контакты, образуя цепь на отключение линии. Если к. з. произошло во второй зоне, $ДО_I$ не работает, так как сопротивление на его зажимах больше уставки сопротивления срабатывания первой зоны ($z_р > z_I$). В этом случае приходит в действие дистанционный орган второй зоны $ДО_{II}$. Он замыкает контакты и пускает реле времени $В_{II}$. По истечении времени t_{II} $В_{II}$ замыкает контакт и посылает импульс на отключение.

При к. з. за пределами второй зоны омметры $ДО_I$ и $ДО_{II}$ не работают, так как сопротивления на их зажимах превышают уставки сопротивления срабатывания. Защита не может действовать со временем первой и второй зон. Реле времени $В_{III}$, запущенное пусковым реле, срабатывает когда истечет его выдержка времени t_{III}, и посылает импульс на отключение выключателя. Специальных измерительных органов третьей зоны для упрощения защиты обычно не ставят.

11-4. ХАРАКТЕРИСТИКИ СРАБАТЫВАНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ РЕЛЕ И ИХ ИЗОБРАЖЕНИЕ НА КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ

а) Использование комплексной плоскости для изображения характеристик реле

Характеристикой срабатывания называется зависимость $z_{с.р} = f(\varphi_р)$, которая определяет значения векторов $z_р$ на зажимах реле при его срабатывании.

Сопротивление z является комплексной величиной, поэтому характеристики срабатывания реле и сопротивления на их зажимах удобно изображать на комплексной плоскости, в осях x, r (рис. 11-6). В этом случае по оси вещественных величин комплексной плоскости откладываются активные сопротивления r, а по оси мнимых величин j располагаются реактивные сопротивления x. Любое полное сопротивление на зажимах реле $z_р = U_р/I_р$ может быть выражено через активные и реактивные составляющие в виде комплексного числа $z_р = r_р + jx_р$ и изображено в осях r, x векто-

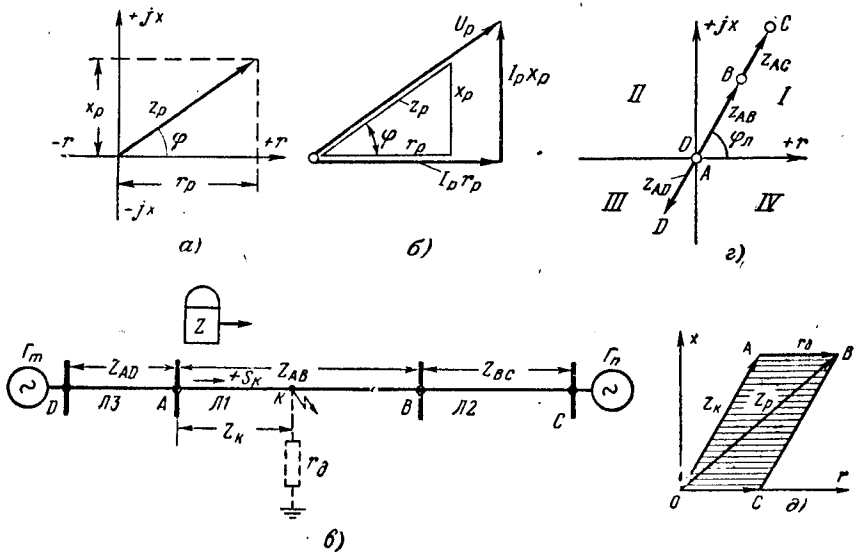


Рис. 11-6. Комплексная плоскость r, jx.

а — изображение вектора $z_р$; *б* — треугольник сопротивлений; *в* и *г* — участок сети и его изображения в осях r, jx; *д* — к. з. через сопротивление r электрической дуги; заштрихована область сопротивлений $z_р$ при к. з. через r электрической дуги.

ром с координатами $r_р$ и $x_р$ (рис. 11-6, *а*). Величина этого вектора характеризуется модулем $|z_р| = \sqrt{r_р^2 + x_р^2}$, а его направление — углом $\varphi_р$, который определяется соотношением $x_р$ и $r_р$, поскольку $\operatorname{tg}\varphi_р = x_р/r_р$. Из рис. 11-6, *б* видно, что угол $\varphi_р$ равен углу сдвига фаз между векторами тока $I_р$ и напряжения $U_р$ и, следовательно, можно считать, что на комплексной плоскости вектор $I_р$ совпадает с осью положительных сопротивлений r, а напряжение $U_р$ — с вектором $z_р$.

Любой участок сети, например линию *Л1*, показанную на рис. 11-6, *в*, можно также представить в осях r, x вектором $z_л$, имея в виду, что каждая точка линии характеризуется определенными сопротивлениями $r_л$ и $x_л$.

Если сопротивления всех участков сети имеют один и тот же угол $\varphi_л$, то их геометрическое место на комплексной плоскости

изобразится в виде прямой, смещенной относительно оси r на угол $\varphi_л$ (рис. 11-6, *г*).

Начало защищаемой линии, где установлена рассматриваемая защита A, совмещается с началом координат (рис. 11-6, *в* и *г*). Координаты всех участков сети, попадающих в зону защиты A, считаются положительными и располагаются в первом квадранте плоскости (рис. 11-6, *в*). Координаты участков сети, расположенных влево от точки A, считаются отрицательными и располагаются в третьем квадранте. Сопротивление линии *Л1* показано на диаграмме отрезком AB, линии *Л2* — отрезком BC и линии *Л3* — отрезком $AД$.

б) Характеристики срабатывания реле

Характеристики срабатывания основных типов реле минимального сопротивления изображены на рис. 11-7. Характеристики каждого реле представляют собой геометрическое место точек, удовлетворяющих условию $z_р = z_{с.р}$. Заштрихованная часть характеристики, где $z_р < z_{с.р}$, соответствует области действия реле. При $z_р$, выходящих за пределы заштрихованной части, т. е. при $z_р > z_{с.р}$, реле не работает. Таким образом, *характеристика работы реле является пограничной кривой, определяющей условия действия реле.* Эту характеристику можно рассматривать как зависимость величины (модуля) вектора сопротивления срабатывания реле $z_{с.р}$ от угла $\varphi_р$, определяющего его направление, и представлять в виде уравнения $z_{с.р} = f(\varphi_р)$.

Характеристика срабатывания реле должна обеспечивать работу реле при к. з. в пределах принятой зоны действия (z'). При к. з. вектор сопротивления на зажимах реле $z_р$ равен геометрической сумме вектора сопротивления линии z_K до места повреждения K и сопротивления электрической дуги $r_д$, которая может возникать в месте к. з. (рис. 11-6, *д*), т. е.

$$z_р = z_K + r_д. \qquad (11\text{-}1а)$$

На рис. 11-6, *д* отрезок OK изображает вектор сопротивления линии, равный сопротивлению $z_к$ зоны действия реле; отрезок KB представляет вектор сопротивления электрической дуги, имеющей активное сопротивление $r_д$*. Площадь $OKBC$ определяет область, в пределах которой может располагаться вектор $z_р$ при к. з. в различных точках линии, с учетом сопротивления электрической дуги. *Действие реле при к. з. будет обеспечено, если характеристики срабатывания реле, показанные на рис. 11-7, будут охватывать*

---

* Выражение (11-1а) справедливо для условий одностороннего питания места к. з. (от генератора $Г_m$). При двустороннем питании за счет сдвига фаз между токами к. з. от генератора $Г_m$ и $Г_n$ вектор AB будет расположен под углом к оси r. В этом случае $z_р = z_K + \dot{k}r$, где $\dot{k}$ — комплексная величина, зависящая от соотношения и фаз токов, притекающих к точке к. з.

область комплексной плоскости, в которой может находиться вектор сопротивления $z_р$ *при к. з. на линии* (площадь *ОКВС* на рис. 11-6, *д*). На рис. 11-7 приводятся наиболее распространенные характеристики реле, изображаемые в осях *x*, *r* в виде окружности, эллипса, прямой линии, многоугольника.

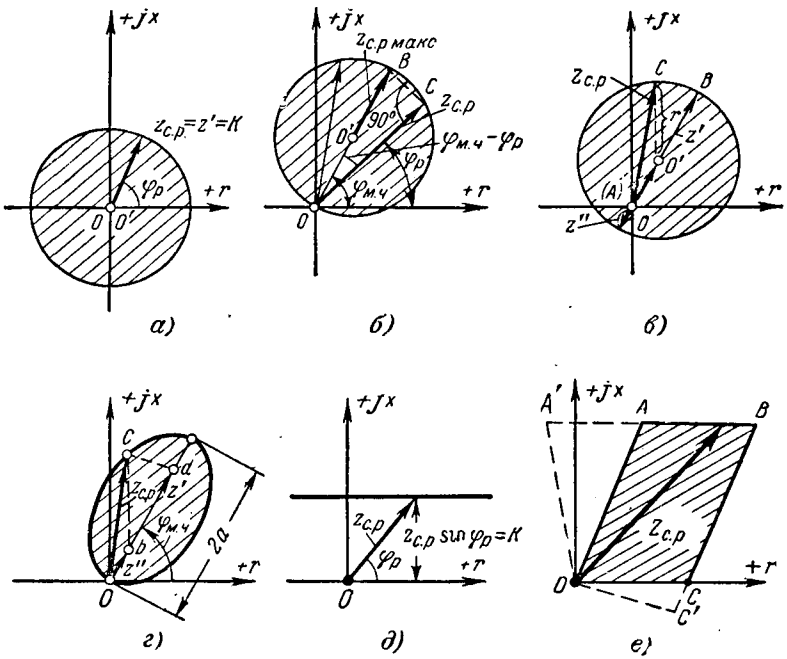


Рис. 11-7. Характеристики срабатывания реле сопротивления.

Ненаправленное реле полного сопротивления (рис. 11-7, *а*). Уравнение срабатывания реле

$$z_{с.р}=K, \qquad (11\text{-}2)$$

где K — постоянная величина.

Характеристика этого реле имеет вид окружности с центром в начале координат и радиусом, равным K. Реле работает при $z_р \leqslant K$, при любых углах $\varphi_р$ между вектором $z_р$ и осью r. Зона действия реле расположена в четырех квадрантах, в том числе в первом и третьем. Последнее означает, что реле с характеристикой (11-2) работает как ненаправленное реле сопротивления.

Направленное реле полного сопротивления имеет $z_{с.р}$, зависящее от угла $\varphi_р$ (рис. 11-7, *б*). Его характеристика срабатывания изображается окружностью, проходящей через начало координат. Сопротивление срабатывания имеет максимальное значение при

$$\varphi_р=\varphi_{м.ч},$$

где $\varphi_{м.ч}$ — угол максимальной чувствительности реле, при котором $z_{с.р} = z_{с.р\,макс}$, т. е. равен диаметру окружности OB.

Зависимость срабатывания этого реле от угла $\varphi_р$ может быть представлена уравнением

$$z_{с.р} = z_{с.р.макс} \cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_р). \qquad (11\text{-}3)$$

Оно легко получается из рассмотрения треугольника OBC на рис. 11-7, *б*. Реле не работает при $z_р$, расположенных в третьем квадранте. Это означает, что оно не может действовать, если мощность направлена к шинам подстанции. Следовательно, рассмотренное реле является н а п р а в л е н н ы м.

Реле со смещенной круговой характеристикой (рис. 11-7, *в*). Характеристика реле смещена относительно оси координат в третий квадрант на величину z''. Поэтому реле не только работает на защищаемой линии, но и захватывает шины A, питающие линию, и часть длины отходящих от них присоединений. Уравнение смещенной характеристики имеет вид:

$$\left|\frac{z' - z''}{2}\right| - \left|z_{с.р} - \frac{z' + z''}{2}\right| = 0. \qquad (11\text{-}4)$$

Уравнение (11-4) можно получить из рассмотрения треугольника $OO'C$. Как видно из чертежа, геометрическая разность вектора $z' - z''$ равна диаметру окружности, отсюда

$$\left|\frac{z' - z''}{2}\right| = r, \qquad (11\text{-}4а)$$

Из того же чертежа видно, что $\frac{z' + z''}{2} = \dot{O}\dot{O}'$, с учетом этого

$$\left|z_{с.р} - \frac{z' + z''}{2}\right| = |\dot{C}\dot{C} - \dot{O}\dot{O}'| = O'C = r, \qquad (11\text{-}4б)$$

где C — любая точка окружности; r — радиус окружности.

Приравнивая левые части уравнений (11-4а) и (11-4б), получаем (11-4).

Реле с эллиптической характеристикой. На рис. 11-7, *г* изображена характеристика направленного реле, имеющая вид эллипса. Сопротивление срабатывания $z_{с.р}$ такого реле зависит от угла $\varphi_р$ и имеет наибольшее значение при $\varphi_р = \varphi_{м.ч}$. Угол $\varphi_{м.ч}$ обычно принимается равным $\varphi_д$. Сопротивление $z_{с.р.макс}$ равно большей оси эллипса $2a$.

Как известно, эллипс является геометрическим местом точек, сумма расстояний которых до фокусов b и d постоянна и равна большой оси $2a$. На основании этого, обозначая координаты фокусов b и d, z'' и z', а координаты любой точки C эллипса $z_{с.р}$, получаем уравнение эллиптической характеристики

$$|z_{с.р} - z'| + |z_{с.р} - z''| = 2a. \qquad (11\text{-}5)$$

Зона действия реле заштрихована. По сравнению с круговой характеристикой эллиптическая характеристика имеет меньшую

рабочую область. Это дает возможность лучше отстроить реле от качаний и перегрузок.

Реле реактивного сопротивления срабатывает при

$$x_{\text{р}} = z_{\text{с.р}} \sin \varphi_{\text{р}} = x_{\text{с.р}} = K,$$

где $x_{\text{с.р}}$ — постоянная величина, не зависящая от $\varphi_{\text{р}}$.

Характеристика таких реле изображается прямой линией, параллельной оси r (рис. 11-7, *д*), отстоящей от нее на расстоянии $x_{\text{с.р}} = K$.

Реле с характеристикой в виде многоугольника. Подобная характеристика направленных реле сопротивлений показана на рис. 11-7, *е*. Сопоставляя эту характеристику с площадью *OKBC* на рис. 11-6, *д*, можно установить, что четырехугольная характеристика реле в большей мере, чем другие характеристики, совпадает с контуром области расположения векторов $z_{\text{р}}$ при к. з. и является, с этой точки зрения, наиболее рациональной.

Реле с характеристикой в виде многоугольника сложнее в конструктивном отношении и имеют пока ограниченное применение.

Пунктиром показан вариант характеристики подобных же реле в виде многоугольника $OA'BC'$. Такое расширение зоны реле предусматривается для обеспечения его действия при двустороннем питании к. з. через переходное сопротивление $r_{\text{д}}$.

11-5. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИХ КОНСТРУКЦИЯМ

Дистанционные реле могут выполняться на различных принципах (см. § 2-1). До последнего времени значительное распространение имеют электромеханические конструкции на электромагнитном и особенно индукционном принципе. За последние годы разработаны и внедряются реле с использованием полупроводниковых приборов. Реле сопротивления на полупроводниках обладают существенными преимуществами, отмеченными в § 2-11, и постепенно вытесняют электромеханические конструкции. Отечественная промышленность переходит на выпуск реле сопротивлений только на выпрямленном токе с полупроводниковыми приборами.

Принцип действия всех разновидностей реле сопротивления основан на сравнении по абсолютному значению или по фазе двух векторов напряжений $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$, являющихся функциями тока и напряжения сети $\dot{I}_{\text{р}}$ и $\dot{U}_{\text{р}}$ по выражениям (2-38). В общем случае

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_{\text{I}} &= k_1 \dot{U}_{\text{р}} + k_2 \dot{I}_{\text{р}}; \\ \dot{U}_{\text{II}} &= k_3 \dot{U}_{\text{р}} + k_4 \dot{I}_{\text{р}}. \end{aligned}\right\} \qquad (11\text{-}6)$$

В электромеханических конструкциях сравнение $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$ осуществляется тремя способами: механическим — путем сравнения электромагнитных моментов $M_{\text{эI}}$ и $M_{\text{эII}}$, пропорциональных соответственно U_{I}^2 и U_{II}^2; электрическим — непосредственным сравне-

нием $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$ и магнитным — путем сопоставления магнитного потока $\Phi_{\text{I}} \equiv U_{\text{I}}$ с потоком $\Phi_{\text{II}} \equiv U_{\text{II}}$.

В реле на полупроводниках напряжения U_{I} и U_{II} сравниваются с помощью схем сравнения, рассмотренных в § 2-11.

Меняя коэффициенты k в выражениях (11-6), можно получать реле сопротивления с различными характеристиками, изображенными на рис. 11-7, *а—г*.

Для получения реле с более сложными характеристиками, изображенными на рис. 11-7, *г, е* и другими разновидностями используется сравнение трех и более электрических величин, также являющихся линейными функциями $I_{\text{р}}$ и $U_{\text{р}}$.

Основные требования к параметрам реле сопротивления сводятся к следующему:

1. Реле сопротивления должны быть быстродействующими, чтобы обеспечить быстрое отключение к. з. в пределах первой зоны. Для этого в сетях 110—500 *кв* необходимо иметь $t_{\text{р}} = 0{,}02 \div 0{,}05$ *сек* и в сетях 35 *кв* с $t_{\text{р}} = 0{,}1$ *сек*.

2. Реле сопротивления, выполняющие функции дистанционных органов, должны отличаться точностью $z_{\text{с.р}}$ с тем, чтобы зоны действия защит были стабильными. Погрешность в отклонении величины $z_{\text{с.р}}$ от заданной установки $z_{\text{у}}$ не должна превышать 10%.

3. Пусковые реле сопротивления должны иметь высокий коэффициент возврата:

$$k_{\text{в}} = \frac{z_{\text{в}}}{z_{\text{с.р}}} = 1{,}05 \div 1{,}15.$$

11-6. РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ВЫПРЯМЛЕННОМ ТОКЕ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

а) Общие принципы выполнения реле

Реле сопротивления на выпрямленном токе отличаются простотой схемы, малым потреблением мощности и позволяют получать характеристики срабатывания различного вида (окружность, эллипс и др.).

Принцип действия этих реле основан на сравнении абсолютных величин двух напряжений U_{I} и U_{II}, являющихся в общем случае функцией напряжения и тока сети ($U_{\text{р}}$ и $I_{\text{р}}$) согласно (11-6). Для получения реле сопротивления в уравнениях (11-6), определяющих значение U_{I} и U_{II}, необходимо принять коэффициент $k_3 = 0$, $k_2 < 0$, а k_1 и $k_4 > 0$. Тогда подлежащие сравнению напряжения будут связаны с $U_{\text{р}}$ и $I_{\text{р}}$ следующими выражениями:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_{\text{I}} &= k_1\dot{U}_{\text{р}} - k_2\dot{I}_{\text{р}}; \\ \dot{U}_{\text{II}} &= k_4\dot{I}_{\text{р}}. \end{aligned}\right\} \qquad (11\text{-}7)$$

Сравнение указанных величин U_{I} и U_{II} производится так же, как и в схемах реле мощности, — непосредственным вычитанием одной величины из другой. Для устранения влияния сдвига фаз сравни-

ваемые напряжения выпрямляются, а затем выпрямленные величины $|\dot{U}_{\text{I}}|$ и $|\dot{U}_{\text{II}}|$, пропорциональные средним значениям U_{I} и U_{II}, вычитаются друг из друга по схемам, рассмотренным в § 2-11.

Типовая блок-схема реле сопротивления на сравнении абсолютных значений двух напряжений приведена на рис. 11-8.

Реле состоит из преобразующих (суммирующих) устройств *1* и *2*, выпрямителей на полупроводниковых диодах *3* и *4*, схемы сравнения *5* и реагирующего органа (нуль-индикатора) *6*.

К входным зажимам реле подводятся напряжение и ток сети $U_{\text{р}}$ и $I_{\text{р}}$. В суммирующих устройствах *1* и *2* напряжение $U_{\text{р}}$ преобразуется с помощью трансформатора в напряжение $k_1 U_{\text{р}}$, а ток $I_{\text{р}}$ посредством трансреактора превращается в два напряжения $k_2 \dot{I}_{\text{р}}$ и $k_4 \dot{I}_{\text{р}}$. Преобразованные величины суммируются согласно (11-7), в результате чего на выходе сумматора образуются два напряжения:

$$\dot{U}_{\text{I}} = k_1 \dot{U}_{\text{р}} - k_2 \dot{I}_{\text{р}} \quad \text{и} \quad \dot{U}_{\text{II}} = k_4 \dot{I}_{\text{р}}.$$

Каждое из них выпрямляется с помощью выпрямителей *3* и *4*, и полученные абсолютные значения $|U_{\text{I}}|$ и $|U_{\text{II}}|$ на выходе выпрямителей (или пропорциональные им токи $|I_{\text{I}}|$ и $|I_{\text{II}}|$) подводятся к схеме сравнения *5*, где вычитаются друг из друга. На выходе схемы сравнения образуется напряжение $U_{\text{вых}} = |\dot{U}_{\text{II}}| - |\dot{U}_{\text{I}}|$ или ток $I_{\text{вых}} = |\dot{I}_{\text{II}}| - |\dot{I}_{\text{I}}|$, которые подводятся к реагирующему органу *6*, обладающему направленностью, т. е. действующему только при определенном (положительном) знаке подведенного к нему напряжения или тока.

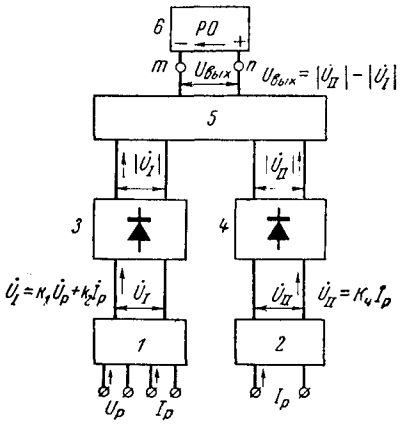


Рис. 11-8. Блок-схема реле сопротивления на выпрямленном токе.

Полярность включения реагирующего органа подбирается с таким расчетом, чтобы он работал при $U_{\text{II}} > U_{\text{I}}$ и не действовал, если $U_{\text{II}} < U_{\text{I}}$. Напряжение U_{II} называется р а б о ч и м, а U_{I} — т о р м о з н ы м, так как под влиянием U_{II} реагирующий орган приходит в действие, а от U_{I} — не работает. При выбранной функциональной связи сравниваемых напряжений с $U_{\text{р}}$ и $I_{\text{р}}$ по выражениям (11-7) относительное значение величин U_{I} и U_{II}, а следовательно, и поведение реле зависят от соотношения $U_{\text{р}}$ и $I_{\text{р}}$ или, иначе говоря, от $Z_{\text{р}} = U_{\text{р}}/I_{\text{р}}$.

В нормальном режиме напряжение $U_{\text{р}}$ близко к номинальному, а ток $I_{\text{р}}$ относительно невелик, поэтому $U_{\text{I}} = |k_1 \dot{U}_{\text{р}} - k_2 \dot{I}_{\text{р}}|$ превосходит $U_{\text{II}} = |k_4 \dot{I}_{\text{р}}|$ и реле не работает. При к. з. в зоне действия защиты ток $I_{\text{р}}$ возрастает, а напряжение $U_{\text{р}}$ снижается, в результате этого U_{II} становится больше U_{I} и реле приходит в действие.

Реагирующий орган может выполняться в трех вариантах, рассмотренных в § 2-16:

1) с помощью поляризованного или магнитоэлектрического реле, непосредственно подключенного к зажимам m и n;

2) с помощью тех же реле, включаемых через усилитель на полупроводниках (рис. 2-49, § 2-16), работающий в качестве нуль-индикатора, т. е. реагирующий на знак сигнала;

3) с помощью триггера (бесконтактного реле) на полупроводниках, на выходе которого появляется напряжение в зависимости от знака сигнала.

Общие положения о выполнении реагирующего органа и остальных элементов блок-схемы были рассмотрены в § 2-16.

Если принять в (11-7) $k_2 = 0$, то $\dot{U}_{\text{I}} = k_1\dot{U}_{\text{р}}$ и $\dot{U}_{\text{II}} = k_4\dot{I}_{\text{р}}$; в этом случае реле имеет характеристику срабатывания в виде окружности с центром в начале координат.

При $k_2 = k_4$ характеристика превращается в окружность, проходящую через начало координат. При $k_2 \neq k_4$ характеристика имеет вид окружности, смещенной относительно начала координат.

Таким образом, различные виды реле сопротивления на основе рассмотренной конструкции можно получить простым изменением сравниваемых напряжений U_{I} и U_{II} без принципиальных изменений схемы реле.

Рассмотрим в качестве примера конкретные схемы направленного и ненаправленного реле сопротивления.

б) Ненаправленное реле сопротивления с круговой характеристикой

Устройство и принцип действия реле. Два варианта реле со схемой сравнения на балансе токов и на балансе напряжений в упрощенном виде показаны на рис. 11-9.

Чтобы получить характеристику срабатывания в виде окружности с центром в начале координат, к схеме сравнения реле подводятся два напряжения:

$$\dot{U}_{\text{I}} = k_1\dot{U}_{\text{р}} \quad \text{и} \quad \dot{U}_{\text{II}} = k_4\dot{I}_{\text{р}}. \tag{11-8}$$

Эти напряжения получаются путем преобразования $U_{\text{р}}$ и $I_{\text{р}}$, которые, как показано на рис. 11-9, *а*, подаются на входные зажимы реле.

С помощью вспомогательного трансформатора напряжения TH $U_{\text{р}}$ превращается в $U_{\text{I}} = k_1\dot{U}_{\text{р}}$, а ток $I_{\text{р}}$ с помощью трансреактора TP преобразуется в напряжение $\dot{U}_{\text{II}} = k_4\dot{I}_{\text{р}}$. Полученные таким образом напряжения $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$ подводятся к выпрямителям B_1 и B_2, выполненным по двухполупериодной схеме на полупроводниковых диодах.

Под действием напряжений $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$ возникают пропорциональные им токи $\dot{I}_{\text{I}} = k'\dot{U}_{\text{р}}$ и $\dot{I}_{\text{II}} = k''\dot{I}_{\text{р}}$, которые выпрямляются выпрямителями и замыкаются через реагирующий орган PO. Токорас-

пределение токов I_I и I_{II} показано на рис. 11-9, *а* и *б*. В схеме сравнения на балансе токов реле *РО* (рис. 11-9, *а*) включается параллельно выпрямителям на разность выпрямленных токов. В этом случае ток в *РО* $\dot{I}_р = |\dot{I}_{II}| - |\dot{I}_I|$.

Как уже отмечалось, реагирующий орган выполняется с помощью направленного реле постоянного тока. Он работает, если $|\dot{I}_{II}| > |\dot{I}_I|$, и не действует, если $|\dot{I}_{II}| < |\dot{I}_I|$.

Аналогично этому в схеме сравнения на балансе напряжений (рис. 11-9, *б*) реле *РО* работает, если $|\dot{U}_{II}| > |\dot{U}_I|$, и не действует, если $|\dot{U}_{II}| < |\dot{U}_I|$.

Условием начала действия реле является равенство $|\dot{I}_{II}| = |\dot{I}_I|$ или $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I|$; первое для схемы на балансе токов, второе — на балансе напряжений.

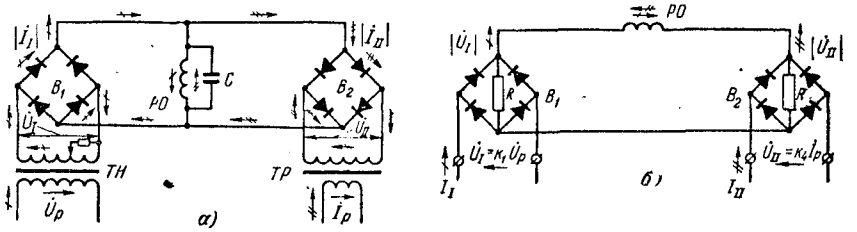


Рис. 11-9. Ненаправленное реле сопротивления, выполненное с помощью схем сравнения.

а — на балансе токов; *б* — на балансе напряжений.

Выражая токи и напряжения через $U_р$ и $I_р$ с учетом (11-28), получаем уравнения начала срабатывания для обоих реле:

$$|k_4\dot{I}_р| = |k_1\dot{U}_р|. \qquad (11\text{-}9)$$

Разделив обе части равенства на $k_1 I_р$, найдем $z_р$, при котором реле начнет действовать:

$$z_р = z_{с.р} = \frac{|\dot{U}_р|}{|\dot{I}_р|} = \frac{k_4}{k_1} = |z'| = \text{const}. \qquad (11\text{-}10)$$

Выражение (11-10) показывает, что реле будет работать при сопротивлении $z_р \leqslant z_{с.р}$; величина $z_{с.р}$ определяется отношением k_4/k_1, которое можно рассматривать как абсолютное значение сопротивления зоны $|z'|$. Это означает, что реле работает при любом $z_р$, модуль которого равен $|z'|$, независимо от его угла и знака.

Таким образом, рассмотренное реле действительно является ненаправленным реле сопротивления, имеющим характеристику срабатывания в виде окружности с центром в начале координат и радиусом, равным $|z'| = k_4/k_1$ (см. рис. 11-7, *а*).

Сопротивление срабатывания $z_{с.р}$ регулируется изменением k_4 и k_1, т. е. изменением коэффициентов трансформации *ТН* и *ТР*.

Зависимость $z_{с.р}$ от тока $I_р$. Условия срабатывания (11-9) являются идеальными, они не учитывают конечной чувствительности

реагирующего органа (нуль-индикатора) *РО*. В действительности для срабатывания реле необходимо приложить определенное избыточное напряжение U_0 для преодоления механических сил сопротивления подвижной системы реагирующего органа или создания напряжения, необходимого для начала работы бесконтактной релейной схемы на транзисторах (триггера).

С учетом этого для срабатывания реле необходимо выполнить условие

$$|k_4\dot{I}_р| = |k_1\dot{U}_р| + |\dot{U}_0|. \qquad (11\text{-}11)$$

Разделив все члены равенства на $|k_1 I_р|$ и сделав преобразования, получим:

$$z_{с.р} = \frac{k_4}{k_1} - \frac{|\dot{U}_0|}{|k_1\dot{I}_р|}. \qquad (11\text{-}12)$$

Из (11-12) следует, что $z_{с.р}$ зависит от $I_р$, во-первых, из-за конечной чувствительности реагирующего реле, характеризуемой напряжением U_0, и, во-вторых, из-за нелинейности сопротивления выпрямителей в магнитопроводе трансреакторов, в результате которой коэффициенты k_1 и k_4 не остаются постоянными, а меняются с изменением тока $I_р$.

Зависимость $z_{с.р}$ от $I_р$ является недостатком конструкции, она вызывает *непостоянство зоны действия реле* (см. § 11-11), т. е. погрешность в $z_{с.р}$.

Сглаживание пульсации выпрямленного тока. Для сглаживания кривой выпрямленных токов в схеме должны быть предусмотрены сглаживающие устройства, рассмотренные в § 2-16. В данной схеме для сглаживания тока предусмотрен конденсатор *С*. Как указывалось, сглаживающие устройства приводят к некоторому замедлению действия реле.

Реле подобного типа со схемой сравнения на балансе токов и магнитоэлектрическим реле в качестве реагирующего органа применяется в дистанционной защите ДЗ-1 для сети 35 *кв*, разработанной лабораторией Энергосетьпроекта с участием ЧЭТНИИ и выпускаемой ЧЭАЗ.

в) Направленное реле сопротивления с круговой характеристикой

Направленное реле сопротивления показано на рис. 11-10, *а*. Реле основано на сравнении абсолютных значений двух напряжений

$$\dot{U}_I = k_1\dot{U}_р - k_2\dot{I}_р \quad \text{и} \quad \dot{U}_{II} = k_4\dot{I}_р. \qquad (11\text{-}13)$$

Здесь $k_4 = k_2$.

Сравниваемые напряжения U_I и U_{II} получаются с помощью вспомогательного трансформатора напряжения *ТН* и двух одинаковых трансреакторов $ТР_1$ и $ТР_2$. Вторичные обмотки трансреакторов замкнуты на активное сопротивление *r*.

Напряжение сети $U_р$ подводится к TH_1 и трансформируется на вторичную сторону, образуя напряжение $k_1 U_р$, где k_1 является коэффициентом трансформации TH_1.

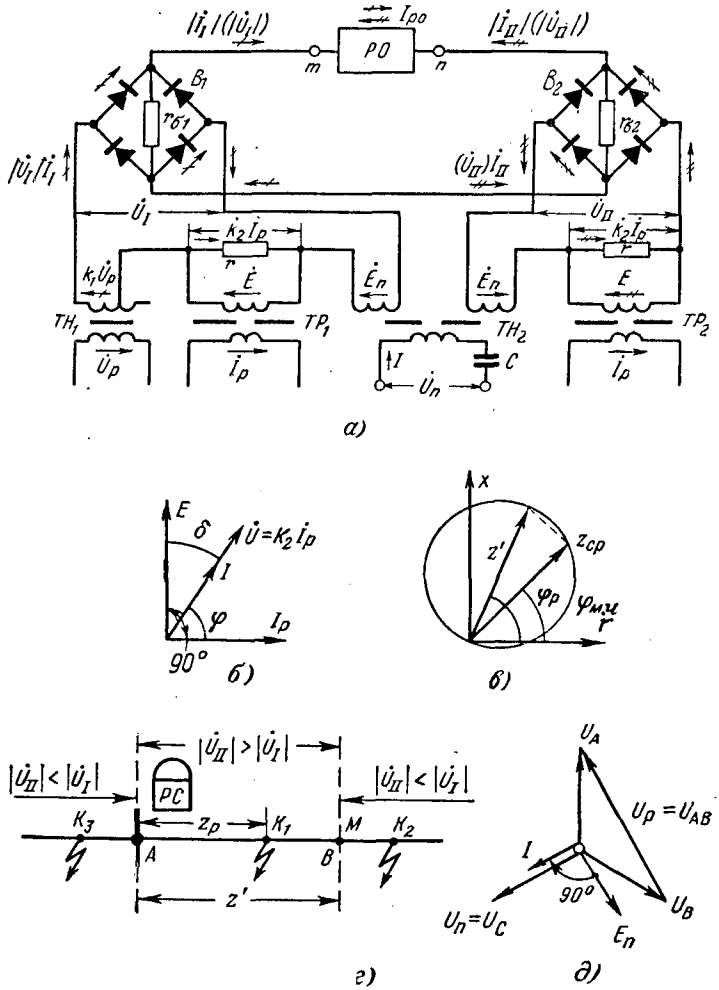


Рис. 11-10. Направленное реле сопротивления со схемой сравнения на балансе напряжений.

а — схема реле; *б* — векторная диаграмма трансреактора; *в* — характеристика реле, $\varphi_{м.ч}$ — угол между Z' и осью r; *г* — схема, поясняющая работу реле; *д* — векторная диаграмма TH_2.

Ток сети $I_р$ питает первичные цепи трансреакторов TP_1 и TP_2 и наводит во вторичной обмотке каждого из них э. д. с. $\dot{E} = jk\dot{I}_р$, пропорциональную току $I_р$ и сдвинутую от него на 90° (рис. 11-10, *б*). Под действием э. д. с. в контуре вторичной обмотки возникает ток

$I \equiv E \equiv I_р$, отстающий от E на угол δ, определяемый соотношением x и r контура. Напряжение на вторичных зажимах трансреактора $U = Ir$, с учетом что $I \equiv I_р$, $\dot{U} = \dot{k}_2 \dot{I}_р$. Здесь $\dot{k}_2$ — комплексная величина, имеющая размерность сопротивления и зависящая от параметров трансреактора.

Вторичные обмотки TH_1 и TP_1 соединяются между собой встречно (рис. 11-10, *а*), так чтобы на выходных зажимах образовалось напряжение $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_р - k_2 \dot{I}_р$. Напряжение $\dot{U}_{II} = k_2 \dot{I}_р$ получается с зажимов вторичной обмотки TP_2. Напряжение U_I подводится к двухполупериодному выпрямителю B_1, а U_{II} к выпрямителю B_2.

Выпрямленные напряжения сопоставляются по величине с помощью схемы сравнения на балансе токов или балансе напряжения. На рис. 11-10, *а* показана схема на балансе напряжения.

В качестве реагирующего органа *РО* используются высокочувствительные магнитоэлектрические реле или нуль-индикатор на полупроводниках с поляризованным реле на выходе. Сглаживание кривой выпрямленных напряжений и токов осуществляется конденсатором или фильтром, запирающим путь переменной составляющей в обмотку реле *РО*.

Как видно из схемы, напряжение $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ и создаваемые ими токи $|\dot{I}_I|$ и $|\dot{I}_{II}|$ направлены в контуре реле *РО* навстречу друг другу. Поэтому напряжение на зажимах mn реагирующего органа

$$\dot{U}_{РО} = |k_2 \dot{I}_р| - |k_1 \dot{U}_р - k_2 I_р|.$$

Реле срабатывает, если $|\dot{U}_{II}| > |\dot{U}_I|$. Условия начала работы реле характеризуются уравнением $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I|$ или

$$|k_2 \dot{I}_р| = |k_1 \dot{U}_р - k_2 \dot{I}_р|. \qquad (11\text{-}14)$$

Условия работы подобного реле на балансе токов аналогичны и выражаются таким же уравнением, так как $I_I \equiv U_I$, а $I_{II} \equiv U_{II}$. Разделив все члены выражения (11-14) на k_1 и $I_р$, приняв, что $k_2/k_1 = z'/2$, и учтя, что $z_р = U_р/I_р$, удовлетворяющее условию срабатывания (11-14), является $z_{с.р}$, получим:

$$\left|\frac{z'}{2}\right| - \left|z_{с.р} - \frac{z'}{2}\right| = 0. \qquad (11\text{-}15)$$

Уравнение (11-15) является уравнением окружности, проходящей через начало координат, с диаметром z' (см. рис. 11-10, *в*). В этом можно убедиться, сопоставив уравнение (11-15) с (11-4), приняв в последнем $z'' = 0$.

Следовательно, рассмотренное реле является направленным реле сопротивления.

Как уже отмечалось, у реле с такой характеристикой $z_{с.р}$ зависит от величины $\varphi_р$.

При $\varphi_р = \varphi_{м.ч}$, где $\varphi_{м.ч}$ — угол сопротивления z', $z_{с.р} = z'$ и имеет максимальное значение. При всех других значениях

$\varphi_р$ $z_{с.р} < z'$ и определяется из выражения $z_{с.р} = z' \cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_р)$. Последнее вытекает из рис. 11-10, *в*. Поскольку

$$z' = 2\frac{k_2}{k_1}, \text{ то} \qquad (11\text{-}16)$$

величина z' и $z_{с.р}$ может регулироваться изменением k_1 и k_2, т. е. коэффициентами трансформации (числом витков) TH_1 и TP. Угол $\varphi_{м.ч}$ определяется параметрами трансреактора TP_1 и TP_2 и может регулироваться изменением сопротивления r. Обычно $\varphi_{м.ч}$ принимается равным углу сопротивления защищаемой линии и колеблется в пределах от 60 до 80°.

Выше аналитическим методом было показано, что рассмотренное реле является направленным реле сопротивления. То же самое можно показать, исходя из физической картины зависимости величин I_I и I_{II} (или U_I и U_{II}) от местоположения точки к. з. (рис. 11-10, *г*).

Действительно, реле работает при $|\dot{U}_{II}| > |\dot{U}_I|$ или $\left|I_р \frac{z'}{2}\right| > \left|I_р z_р - I_р \frac{z'}{2}\right|$; сократив обе части на $I_р$, получим условие работы $\left|\frac{z'}{2}\right| > \left|z_р - \frac{z'}{2}\right|$, где $z_р$ — сопротивление до точки к. з. Рассмотрим более простой случай, когда $\varphi_р = \varphi_{м.ч}$. При этом векторы $z_р$ и z' совпадают по фазе, и условие срабатывания преобразуется в выражение $z_р \leqslant z'$.

При к. з. на участке AB (точка K_1) $z_р < z'$, поэтому реле будет работать, так как при этом $|U_{II}| > |U_I|$.

При к. з. за точкой B (в K_2) $z_р > z'$, значит реле не действует, поскольку при этом $|U_{II}| < |U_I|$.

При к. з. до точки A (в K_3) $z_р$ отрицательно, в этом случае реле опять не действует, так как $|U_{II}| < |U_I|$.

Приведенный анализ показывает, что соотношение $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ при выбранной функциональной связи по выражению (11-13) зависит от местоположения к. з.

Устранение мертвой зоны. Для устранения мертвой зоны в рабочий и тормозной контур реле вводится одинаковая э. д. с. «памяти» $E_п$, создаваемая трансформатором TH_2. Первичная обмотка TH_2 питается напряжением сети $U_п$ и с помощью емкости C настроена в резонанс при $f = 50$ *гц*. Схема включения TH_2 на напряжение сети выбрана так, что $E_п$ примерно совпадает по фазе с $U_р$, это видно из векторной диаграммы на рис. 11-10, *г*.

Для этого на вход TH_2 подается напряжение фазы, не подводимой к TH_1. Например, если $U_р = U_{AB}$, то $U_п = U_C$.

Тогда при близких двухфазных к. з., вызывающих снижения $U_р$ до нуля, напряжение третьей неповрежденной фазы, подведенное к TH_2, сохраняется и обеспечивает работу реле за счет напряжения, обусловленного э. д. с. $E_п$.

При трехфазных к. з. все напряжения падают до нуля. В этом случае э. д. с. $E_п$ поддерживается некоторое время за счет разряда конденсатора C.

В течение времени разряда конденсатора э. д. с. «памяти» создает ток в обоих контурах, обеспечивая работу реле. Чтобы свести к минимуму искажающее влияние $E_п$ на $z_{с.р}$, величина этой э. д. с. берется не больше 3—5% нормального значения $U_р$.

По рассмотренной схеме на балансе напряжений с магнитоэлектрическим реле на выходе завод ЧЭАЗ выпускает реле сопротивления типа КРС-1 [Л. 96].

Для упрощения анализа условие срабатывания (11-14) составлено без учета конечной чувствительности реагирующего органа *РО*. С учетом этого условие срабатывания реле примет вид $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I| + |U_0|$, где U_0 — наименьшее напряжение, которое нужно подать в рабочую цепь (выпрямитель B_2) для приведения в действие реле, при условии, что $U_I = 0$.

Как и в предыдущем случае, напряжение U_0 создает некоторую зависимость $z_{с.р}$ от тока $I_р$ (см. § 11-5, б).

г) Направленное реле сопротивления с эллиптической характеристикой

Реле, построенное на сравнении величин трех напряжений. Общий принцип выполнения реле представлен на рис. 11-11. К реле подводятся три напряжения: рабочее $\dot{U}_{раб} = 2a\dot{I}_р$ и два тормозных $\dot{U}'_т = \dot{U}_р - z'\dot{I}_р$ и $\dot{U}''_т = \dot{U}_р - z''\dot{I}_р$. Токи, создаваемые каждым из этих напряжений, суммируются и с помощью схемы сравнения сопоставляются с рабочим током. В качестве реагирующего органа *РО* служит нуль-индикатор.

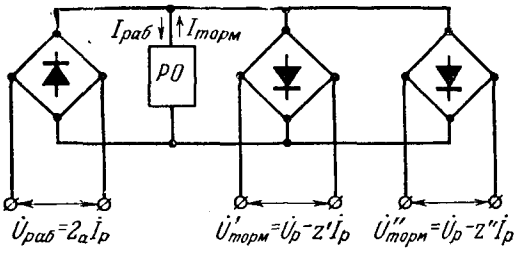


Рис. 11-11. Направленное реле сопротивления с эллиптической характеристикой, на сравнении трех напряжений.

Ток в реагирующем органе $I_р = |I_{раб}| - |I_{торм}|$. Пограничным условием начала работы реле является равенство

$$I_р = |\dot{I}_{раб}| - |\dot{I}_{торм}| = 0. \qquad (11\text{-}17)$$

Имея в виду, что токи пропорциональны создающим их напряжениям, заменим $I_{раб}$ и $I_{торм}$ соответствующими напряжениями, тогда уравнение срабатывания (11-17) примет вид:

$$2aI_р = |\dot{U}_р - z'\dot{I}_р| + |\dot{U}_р - z''\dot{I}_р|.$$

Деля все члены этого уравнения на $I_р$ и заменяя $U_р/I_р$ на $z_{с.р}$, получаем:

$$|z_{с.р} - z'| + |z_{с.р} - z''| = 2a.$$

Найденное уравнение срабатывания совпадает с (11-5) и является уравнением эллипса, проходящего через начало координат с большей осью, равной $2a$.

Сопротивления z' и z'' являются векторами, определяющими положение фокусов эллипса.

Рассмотренный способ выполнения реле с эллиптической характеристикой относительно сложен.

Ниже приводится более простое выполнение реле с эллиптической характеристикой.

д) Реле на сравнении величин двух напряжений с использованием переменной составляющей выпрямленных напряжений (или токов)

Реле выполняется так же, как и рассмотренные выше направленные реле сопротивления с круговой характеристикой (рис. 11-10).

Отличительными особенностями конструкции, позволяющими получить вместо круговой эллиптическую характеристику, являются:

1) использование переменной составляющей выпрямленного тока, в связи с чем пульсация последнего не сглаживается, а, наоборот, сохраняется;

2) применение в качестве реагирующего органа нуль-индикатора замедленного действия.

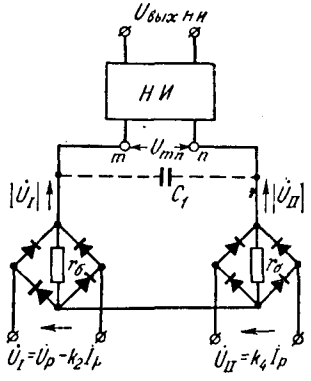


Рис. 11-12. Реле с эллиптической характеристикой, основанное на использовании переменной составляющей выпрямленного тока.

Упрощенная схема такого реле показана на рис. 11-12. К реле подводятся два напряжения: $\dot{U}_I = \dot{U}_р - z' \dot{I}_р$ и $\dot{U}_{II} = z' \dot{I}_р$. Первое является тормозным, а второе — рабочим.

Схема сравнения их величин может выполняться на балансе токов или, как показано на рис. 11-12, на балансе напряжений. В последнем случае напряжение на выходе схемы

$$\dot{U}_{mn} = |\dot{U}_{II}| - |\dot{U}_I|. \qquad (11\text{-}18)$$

Это напряжение подводится к зажимам нуль-индикатора, работающего с выдержкой времени $t = 0{,}01$ *сек*.

Выходное напряжение. В схеме не предусматривается сглаживающего устройства, поэтому выпрямленные напряжения $|\dot{U}_I|$ и

$|\dot{U}_{II}|$ и выходное напряжение $\dot{U}_{mn}$ имеют пульсирующий характер (рис. 11-13, *а* и *б*) и состоят из постоянной и переменной слагающих (см. § 2-15).

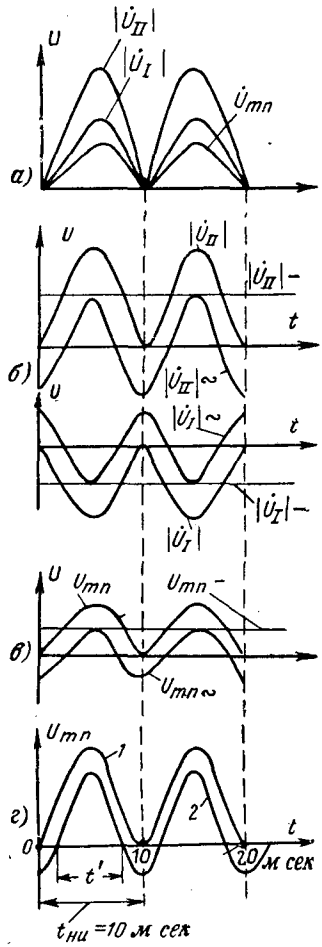
Из схемы сравнения и выражения (11-18) следует, что постоянная составляющая выходного напряжения U_{mn} равна разности постоянных составляющих сравниваемых напряжений $|\dot{U}_{II}|_-$ и $|\dot{U}_I|_-$:

$$U_{mn-} = |\dot{U}_{II}|_- - |\dot{U}_I|_-, \quad (11\text{-}18а)$$

а переменная составляющая U_{mn} ($U_{mn\sim}$) — геометрической разности переменных слагающих $|\dot{U}_{II}|_\sim$ и $|\dot{U}_I|_\sim$:

$$U_{mn\sim} = |\dot{U}_{II}|_\sim - |\dot{U}_I|_\sim. \quad (11\text{-}18б)$$

Как видно из (11-18а), величина постоянной составляющей



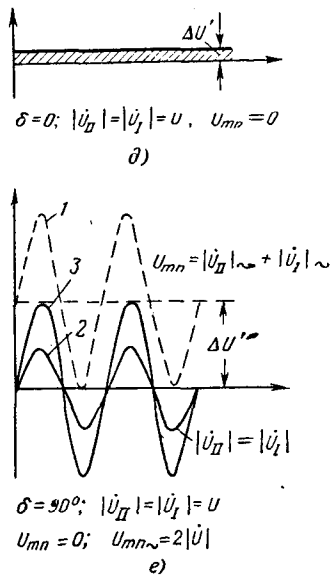


Рис. 11-13. Напряжение U_{mn} на входе нуль-индикатора и его составляющие (постоянная U_{mn} — и переменная $U_{mn}\sim$) при различных углах сдвига δ между $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

выходного напряжения U_{mn} зависит только от абсолютных значений $\dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I$, которыми определяются величины их постоянных слагающих.

Величина же переменной слагающей U_{mn}, определяемая геометрической разностью составляющих $|\dot{U}_{II}|_\sim$ и $|\dot{U}_I|_\sim$, зависит как

от величины этих составляющих, так и от сдвига фаз δ' между ними.

Величины $|\dot{U}_{II}|_{\sim}$ и $|\dot{U}_{I}|_{\sim}$ в свою очередь определяются величиной сравниваемых напряжений $\dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_{I}$, а δ' углом δ между ними, поэтому переменная составляющая на входе нуль-индикатора в конечном счете зависит от величины и сдвига фаз между сравниваемыми напряжениями $\dot{U}_{I}$ и $\dot{U}_{II}$.

Переменная слагающая выпрямленного напряжения приближенно равна его второй гармонике (см. § 2-15) и имеет поэтому в 2 раза большую частоту по сравнению с выпрямляемым напряжением. В результате этого при $\delta = \omega t$ $\delta' = 2\omega t$, т. е. $\delta' = 2\delta$.

При $\delta = 0$ или 180° $\delta' = 0$ или 360°, в этом случае переменные составляющие $|\dot{U}_{II}|_{\sim}$ и $|\dot{U}_{I}|_{\sim}$ совпадают по фазе и направлены в контуре схемы сравнения встречно, поэтому напряжение $U_{mn\sim}$ равно арифметической разности их абсолютных значений и имеет наименьшую, чем при других значениях δ, величину.

При $\delta = 90$ или 270° $\delta' = 180$ или 540°, переменные составляющие $|\dot{U}_{II}|_{\sim}$ и $|\dot{U}_{I}|_{\sim}$ противоположны по фазе и направлены в контуре схемы сравнения в одну сторону, вследствие чего $U_{mn\sim}$ равно арифметической сумме $|\dot{U}_{II}|_{\sim}$ и $|\dot{U}_{I}|_{\sim}$. В этом случае переменная слагающая $U_{mn\sim}$ на зажимах нуль-индикатора имеет максимальное значение.

При $\delta > 0$, но меньше 90°, $\delta' > 0$, но меньше 180°; напряжение U_{mn} равно геометрической разности $|\dot{U}_{II}|_{\sim}$ и $|\dot{U}_{I}|_{\sim}$ и имеет промежуточное (между максимальным и минимальным) значение.

Из сказанного следует, что величины $U_{mn\sim}$ и U_{mn} результирующего есть функция угла δ.

Условия срабатывания реле. Время действия нуль-индикатора $t_{ни}$ принято равным периоду переменной слагающей 100 *гц* (который равен 0,01 *сек*). При таком исполнении нуль-индикатор может сработать только в случае, если $U_{mn} = U_{mn-} - U_{mn\sim}$ имеет положительное значение в течение времени действия нуль-индикатора $t_{ни} = 0{,}01$ *сек* (кривая *1* на рис. 11-13, *г*).

Следовательно, для срабатывания рассматриваемого реле необходимо выполнить два условия:

первое, как обычно для реле на сравнении двух величин,

$$|\dot{U}_{II}| \geqslant |\dot{U}_{I}| \qquad (11\text{-}19)$$

и второе, обусловленное замедлением нуль-индикатора,

$$t_{\text{вых. пол}} \geqslant t_{ни} = 0{,}01 \ \textit{сек}, \qquad (11\text{-}19а)$$

где $t_{\text{вых. пол}}$ — продолжительность непрерывного положительного импульса выходного напряжения U_{mn}.

Графически условия срабатывания показаны на рис. 11-13, *г*. Кривая *1* напряжения U_{mn} соответствует началу работы реле, так как при этом $t_{\text{вых.пол}} = t_{ни}$. Если кривая U_{mn} расположена выше кривой *1*, $t_{\text{вых.пол}}$ увеличивается и условия работы реле улучшаются,

если же кривая U_{mn} окажется ниже (кривая 2), то условие (11-19а) не выполняется $t_{\text{вых.пол}} \lesssim t_{\text{ни}}$ и реле работать не будет.

Поскольку $U_{mn} = U_{mn-} - U_{mn\sim}$, то для обеспечения пограничных (начальных) условий действия реле необходимо иметь такое преобладание U_{II} над U_{I}, при котором синусоида $U_{mn\sim}$ займет предельное положение, совпадающее с кривой *1* на рис. 11-13, *г*.

Сопротивление срабатывания. Покажем, что ΔU (равное $U_{\text{II}} - U_{\text{I}}$), а следовательно, и $z_{\text{с.р}}$ зависят от угла δ сдвига фаз между $\dot{U}_{\text{II}}$ и $\dot{U}_{\text{I}}$. Действительно, при совпадении фаз $\dot{U}_{\text{II}}$ и $\dot{U}_{\text{I}}$, когда $\delta = 0$, пограничным условием действия реле будет равенство $U_{\text{II}} = U_{\text{I}}$. В этом случае постоянные и переменные слагающие U_{mn} равны разности соответствующих составляющих $|\dot{U}_{\text{II}}|$ и $|\dot{U}_{\text{I}}|$, вследствие чего $\dot{U}_{mn} = 0$. *Реле в этом случае обладает наибольшей чувствительностью*, так как для его срабатывания достаточно незначительное превосходство U_{II} над U_{I} (рис. 11-13,*д*). Соответствующее этому $z_{\text{с.р}}$ показано на рис. 11-14, вектором $z_{\text{с.р.макс}}$ с углом $\varphi_{\text{р}} = \varphi_{\text{м.ч}}$. Это $z_{\text{с.р}} = z'$, что следует из рассмотрения уравнений (11-19).

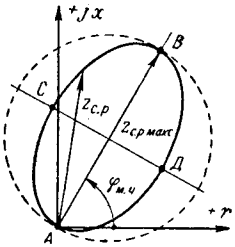


Рис. 11-14. Эллиптическая характеристика реле по рис. 11-12.

При $\delta \neq 0$ в U_{mn} появляется переменная составляющая $U_{mn\sim}$, достигающая максимального значения при $\delta = 90°$, когда $U_{mn\sim} = |\dot{U}_{\text{II}}|_{\sim} + |\dot{U}_{\text{I}}|_{\sim}$.

При $|U_{\text{II}}| = |U_{\text{I}}|$ постоянная составляющая $U_{mn-} = 0$ и к нуль-индикатору подводится только $U_{mn\sim}$, расположенное симметрично относительно нулевой линии (кривая *2* на рис. 11-13, *е*). Условие (11-19а) не выполняется, и реле не работает. Для срабатывания реле необходимо увеличить $\dot{U}_{\text{II}}$ на величину $\Delta U''$, так чтобы кривая напряжения U_{mn} не имела отрицательных значений (рис. 11-13,*е*). Условие срабатывания реле для этого случая можно выразить равенством

$$|\dot{U}_{\text{II}}| = |\dot{U}_{\text{I}}| + \Delta U. \qquad (11\text{-}19б)$$

Срабатывание реле в этом случае произойдет при большем U_{II}, а следовательно, и $I_{\text{р}}$, так как $U_{\text{II}} = kI_{\text{р}}$, чем это должно быть при $\delta = 0$ [уравнение (11-19)]. Это означает, что $z_{\text{с.р}}$ при $\delta \neq 0$ будет меньше, чем при $\delta = 0$, а угол $\varphi_{\text{р}}$ вектора $z_{\text{с.р}}$ будет отличаться от $\varphi_{\text{м.ч}}$: $\varphi_{\text{р}} \neq \varphi_{\text{м.ч}}$.

Чем ближе к 90° будет δ, тем больший избыток U_{II} (ΔU) необходим для работы реле, соответственно будет увеличиваться $I_{\text{р}}$ и уменьшаться $z_{\text{с.р}}$.

Сопротивления $z_{\text{с.р}}$, а следовательно, и чувствительность реле имеют наименьшее значение при $\delta = 90°$, так как амплитуда U_{mn} в этом случае будет равна арифметической сумме $U_{\text{II}\sim} + U_{\text{I}\sim}$ и достигнет наибольшего значения, чему соответствует максимальная величина ΔU в (11-19б).

Характеристика реле. Таким образом, когда $\delta = 0$, реле имеет наибольшую чувствительность (рис. 11-14) и его зона действия равна $z_{ср.макс} = z'$, т. е. равна диаметру AB окружности, а когда $\delta \neq 0$, чувствительность реле уменьшается и его зона действия сокращается, так как для срабатывания реле при том же $U_р$ необходимо большее, чем в предыдущем случае, увеличение $I_р$ (т. е. U_{II}). При этом $z_{с.р}$ получается меньшее, чем $z_{ср.макс}$ (диаметра окружности), что приводит к сжатию окружности и превращает ее в эллипс (рис. 11-14).

Степень сжатия окружности характеризуется величиной малой оси эллипса, ее можно изменять, включая емкость C_1, которая меняет относительное значение переменной составляющей в выпрямленном токе.

Подобная конструкция реле сопротивления разработана ВНИИЭ [Л. 47] и применяется в дистанционных защитах ДЗ-2, выпускаемых ЧЭАЗ.

11-7. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

а) Электромагнитное реле полного сопротивления

Реле (рис. 11-15) состоит из двух электромагнитов *1* и *2*, подвижного стального коромысла *3*, закрепленного на оси *6*, контактов *4* и противодействующей пружины *5*. Обмотка T питается током $I_р$, а обмотка H — напряжением сети $U_р$.

На коромысло *3* действуют моменты:

от тока

$$M_т = k_т I_р^2 \qquad (11\text{-}20)$$

на замыкание контактов реле,

от напряжения

$$M_н = k_н U_р^2 \qquad (11\text{-}21)$$

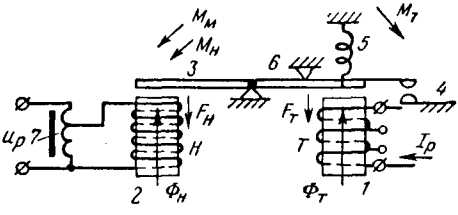


Рис. 11-15. Электромагнитное реле полного сопротивления.

на их размыкание и механический момент $M_{мех}$ (пружины *5* и трения), противодействующий замыканию контактов.

В нормальном режиме сети отношение $U_р/I_р = z_р$ таково, что $M_т < (M_н + M_{мех})$, при этом $z_р > z_{с.р}$ и реле не действует. В случае к. з. напряжение $U_р$ уменьшается, а ток $I_р$ возрастает и соответственно уменьшается тормозной момент $M_н$ и растет рабочий момент $M_т$. При $z_р \leqslant z_{с.р}$ момент $M_т \geqslant (M_н + M_{мех})$, реле срабатывает, замыкая свои контакты.

Пограничным условием начала работы реле является равенство моментов $M_т = M_н + M_{мех}$, при этом $z_р = z_{с.р}$. Пренебрегая моментом $M_{мех}$, с учетом (11-20) и (11-21) получаем:

$$k_т I_р^2 = k_н U_р^2.$$

Разделив обе части этого уравнения на $k_н$ и $I_р^2$, найдем сопротивление, при котором происходит срабатывание реле:

$$z_{с.р} = \frac{U_р}{I_р} = \sqrt{\frac{k_т}{k_н}}. \qquad (11\text{-}22)$$

Уравнение (11-22) показывает, что $z_{с.р}$ реле имеет п о с т о я н н у ю величину, не зависящую от $\varphi_р$. Характеристика такого реле изображается окружностью с радиусом $\sqrt{k_т/k_н}$ и центром в начале координат (рис. 11-7,*а*). Таким образом, рассмотренное реле является н е н а п р а в л е н н ы м р е л е сопротивления. Если в (11-22) учесть $M_{мех}$, то

$$z_{с.р} = \sqrt{\frac{k_т}{k_н} - \frac{M_{мех}}{k_н I_р^2}}. \qquad (11\text{-}22а)$$

Из этого выражения следует, что благодаря наличию механического момента $z_{с.р}$ зависит от $I_р$.

б) Индукционное ненаправленное реле полного сопротивления, реагирующее на угол сдвига фаз между напряжениями U_I и U_{II}, питающими обмотки реле

Устройство реле. Реле выполнено на четырехполюсной магнитной системе с цилиндрическим ротором (рис. 11-16), применяемой для реле мощности. На магнитопроводе реле расположены две обмотки *1* и *2*.

Обмотка *1* питается напряжением

$$\dot{U}_I = \dot{U}'_р + \dot{E}, \qquad (11\text{-}23)$$

а обмотка *2* — напряжением

$$\dot{U}_{II} = \dot{U}'_р - \dot{E}, \qquad (11\text{-}24)$$

где $\dot{U}'_р$ — напряжение, пропорциональное напряжению сети $\dot{U}_р$; $\dot{E}$ — э. д. с., пропорциональная току сети $I_р$.

Напряжение $U_р$ подводится к реле через автотрансформатор *АТН* с регулируемым коэффициентом трансформации $k_н$;

$$\dot{U}'_р = k_н \dot{U}_р.$$

Электродвижущая сила E создается трансреакторами T_1 и T_2, первичные обмотки которых питаются током $I_р$. Вторичная э. д. с. трансреактора равна:

$$\dot{E} = -jk_т \dot{I}_р, \qquad (11\text{-}25)$$

она отстает от индуктирующего ее тока $I_р$ на 90° и пропорциональна ему по величине (рис. 11-16, *б*).

При этом условии коэффициент $k_т$, характеризующий взаимоиндукцию между первичной и вторичной обмотками трансреактора, имеет постоянное значение.

Полярность включения вторичных обмоток T_1 и T_2 подбирается таким образом, чтобы э. д. с. E и напряжение U'_p имели согласно условиям (11-23) и (11-24) одинаковое направление в цепи обмотки *1* и противоположное в цепи обмотки *2*.

Принцип действия реле. Под действием напряжений U_I и U_{II} в обмотках *1* и *2* возникают токи:

$$\dot{I}_I = \frac{\dot{U}'_p + \dot{E}}{z_1} \text{ и}$$

$$\dot{I}_{II} = \frac{\dot{U}'_p - \dot{E}}{z_2}, \quad (11\text{-}26)$$

сдвинутые относительно напряжений на углы β_1 и β_2. Токи I_1 и I_{II} образуют магнитные потоки Φ_1 и Φ_2, смещенные в пространстве на 90° и сдвинутые по фазе на угол ψ. Векторная диаграмма напряжений, токов и потоков реле представлена на рис. 11-17, *а*. Взаимодействуя с вихревыми токами в подвижной системе, потоки создают электромагнитный момент (см. § 2-9, б)

$$M_э = k\Phi_1\Phi_2 \sin\psi. \quad (11\text{-}27)$$

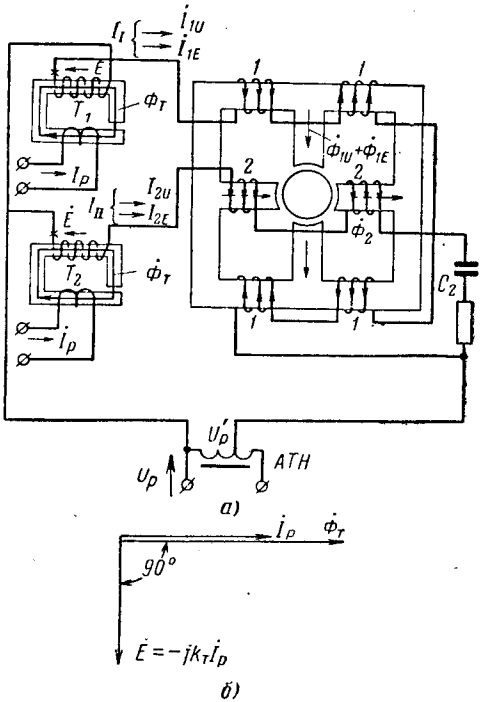


Рис. 11-16. Индукционное ненаправленное реле полного сопротивления.

а — устройство реле; *б* — векторная диаграмма токов и э. д. с. трансреакторов T_1 и T_2.

Как видно из векторной диаграммы, угол $\psi = \delta - (\beta_1 + \beta_2)$. Параметры цепей обмоток *1* и *2* подобраны при помощи конденсатора C_2 с таким расчетом, чтобы $\beta_1 + \beta_2 = 90°$.

При этом угол $\psi = \delta - 90°$, а $\sin\psi = \cos\delta$. С учетом этого, а также имея в виду, что $\Phi_1 = k_1 U_1$, $\Phi_2 = k_2 U_{II}$, выражение (11-27) приводится к виду

$$M_э = k' U_I U_{II} \cos\delta. \quad (11\text{-}28)$$

Из полученного выражения следует, что знак момента реле $M_э$ зависит от угла δ между напряжениями U_1 и U_{II}, питающими обмотки реле.

Условие начала действия реле, если пренебречь противодействием от механического момента $M_{мех}$, выражается на основе (11-28) равенством $M_э = 0$.

Из диаграммы рис. 11-17, *б* видно, что это условие наступает при

$$|k_в \dot{U}_p| = |k_T \dot{I}_p|. \quad (11\text{-}29)$$

В этом случае $\delta = 90°$ и, следовательно, $\cos\delta$ и $M_э$ равны нулю.

Разделив обе части (11-29) на $I_р$ и $k_н$, получим, что реле начинает работать при сопротивлении

$$z_р = \frac{k_т}{k_н}.$$

При

$$|k_н\dot{U}_р| < |k_т\dot{I}_р| \qquad (11\text{-}30)$$

согласно диаграмме на рис. 11-17, *г* угол $\delta < 90°$. Поэтому $\cos\delta > 0$, момент $M_э$ положителен и действует на замыкание контактов.

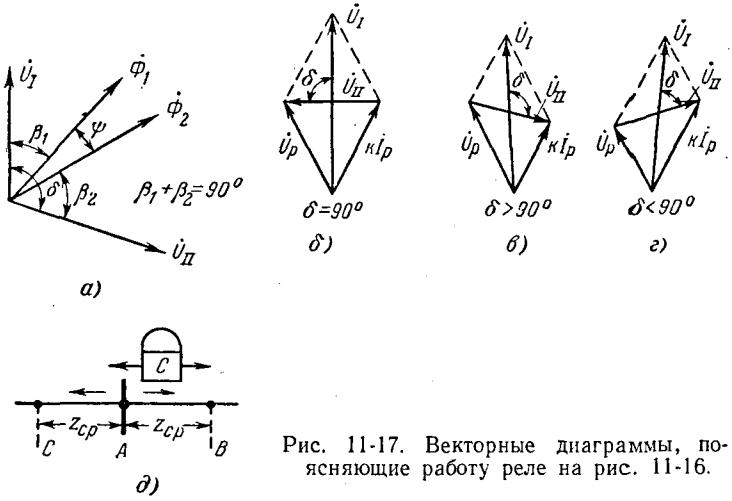


Рис. 11-17. Векторные диаграммы, поясняющие работу реле на рис. 11-16.

Разделив обе части неравенства (11-30) на $I_р$ и $k_н$, найдем, что при этом

$$|z_р| < \frac{k_т}{k_н}.$$

Если

$$|k_н\dot{U}_р| > |k_т\dot{I}_р|, \qquad (11\text{-}31)$$

то, как видно из диаграммы на рис. 11-17, *в*, $\delta > 90°$. Следовательно, $\cos\delta < 0$ и момент $M_э$ действует на размыкание контактов реле. Из неравенства (11-31) находим, что при этом $|z_р| > k_т/k_н$.

Таким образом, рассмотренное реле реагирует на угол сдвига δ между напряжениями $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, питающими обмотки реле, и ведет себя как реле минимального сопротивления, поскольку условием его действия является выражение

$$|z_р| \leqslant \frac{k_т}{k_н}.$$

Это условие справедливо при любом $\varphi_р$. Поэтому характеристика такого реле изображается в осях r, x окружностью с центром в начале координат (рис. 11-7, *а*) и радиусом $z' = k_т/k_н$.

Если такое реле установить в сети (рис. 11-17, *д*), то оно будет действовать в обе стороны от места установки защиты (точки *A*), т. е. на участке *AB* и *AC*, с сопротивлением

$$z_{AB} = z_{AC} = \frac{k_т}{k_н}.$$

Сопротивление срабатывания реле $z_{с.р}$ можно регулировать изменением $k_н$ или $k_т$, в первом случае меняется коэффициент трансформации автотрансформатора напряжения *АТН*, а во втором — число витков первичной обмотки обоих трансреакторов T_1 и T_2.

Рассмотренное реле можно превратить в реле сопротивления со смещенной характеристикой, показанной на рис. 11-7, *в*. Для этого нужно выбрать разную величину коэффициента $k_т$ в трансреакторах T_1 и T_2. В этом случае э. д. с. *E*, вводимые в цепь обмотки *1* и *2*, будут неодинаковы.

Центр окружности у такого реле смещается по отношению к началу координат. На рассмотренном принципе выпускались реле типов КРС-111 и КРС-112.

в) Индукционное направленное реле сопротивления, реагирующее на угол сдвига фаз между напряжениями U_I и U_{II}, питающими обмотки реле

Конструкция направленного реле сопротивления изображена на рис. 11-18.

Конструктивно реле выполнено так же, как и предыдущее реле (рис. 11-16), но отличается от него параметрами обмоток и питающими их напряжениями U_I и U_{II}.

Последние образуются из тока и напряжения сети ($I_р$ и $U_р$) по (11-6), при этом принимается, что $k_1 = k_н$; $k_2 = -z'$; $k_3 = k$; $k_4 = 0$.

Обмотка *1* называется р а б о ч е й, она питается напряжением $\dot{U}_I$, равным разности напряжения сети $\dot{U}_р$ и падения напряжения в сопротивлении зоны действия защиты z' при протекании по нему тока $I_р$, т. е.

$$\dot{U}_I = k_н\dot{U}_р - I_р z',$$

где $k_н$ — коэффициент пропорциональности.

Падение напряжения $I_р z' = U'$ называется к о м п е н с и р у ю щ и м, так как оно компенсирует в напряжении $U_р$ составляющую падения напряжения на сопротивлении участка линии $z_л = z'$. Благодаря компенсации обмотка реле *1* оказывается подключенной не на напряжение $U_р$ в месте установки защиты, а на напряжение в конце зоны действия защиты (точка *M* на рис. 11-18, *в*).

Вторая обмотка *2* называется п о л я р и з у ю щ е й и питается напряжением

$$\dot{U}_{II} = k\dot{U}_р.$$

Напряжение сети подводится к рабочей обмотке через автотрансформатор AH с коэффициентом трансформации $k_н$. К поляризующей обмотке напряжение $U_р$ подводится непосредственно.

Напряжение компенсации $\dot{U}'$ получается с помощью трансреактора TP (рис. 11-18, *а* и *б*). Благодаря сопротивлению r результирующее напряжение на вторичных зажимах трансреактора $\dot{U}' = \dot{E} + \Delta\dot{U}$ смещено относительно вторичной э. д. с. E на угол δ'.

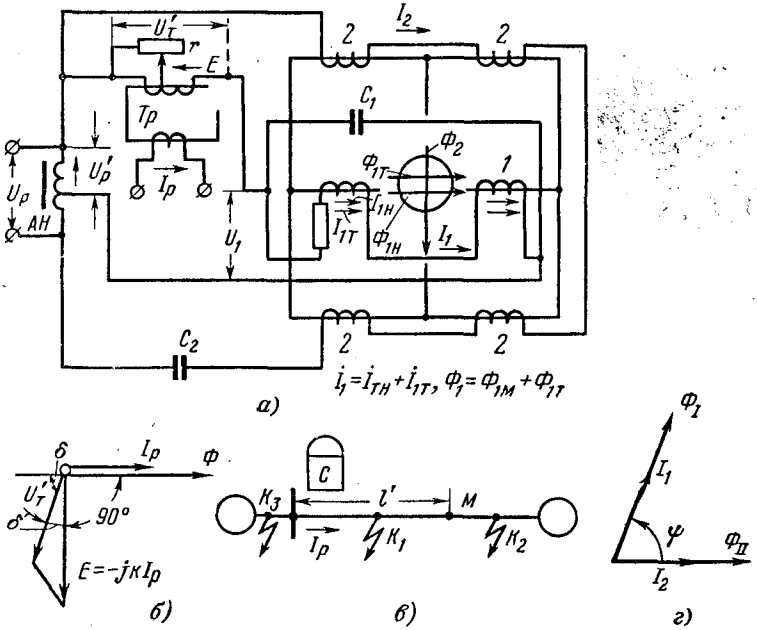


Рис. 11-18. Индукционное направленное реле полного сопротивления.

а — принципиальная схема реле; *б* — векторная диаграмма трансреактора $T_р$; *в* — зона действия реле; *г* — векторная диаграмма токов и магнитных потоков реле.

Величина r подбирается так, чтобы дополнительный угол $\delta = 90° - \delta'$ равнялся углу сопротивления защищаемой линии $\varphi_л$.

При выполнении этого условия напряжение компенсации $\dot{I}_р z'$ будет совпадать по фазе с падением напряжения до места к. з. $\dot{U}_р = \dot{I}_р z_к$.

Принцип действия реле. Напряжения U_I и U_{II} вызывают в обмотках реле токи I_I и I_{II}, которые создают магнитные потоки Φ_I и Φ_{II}, смещенные в пространстве на 90° и сдвинутые по фазе на угол ψ (рис. 11-18). Эти потоки образуют электромагнитный момент

$$M_э = k\Phi_I\Phi_2 \sin\psi.$$

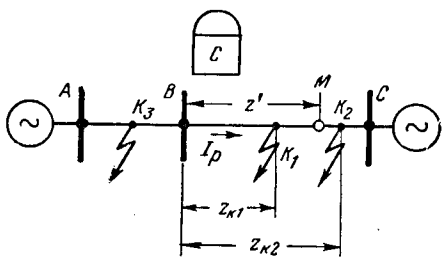
Учитывая, что потоки пропорциональны токам, получаем:

$$M_э = k' I_I I_{II} \sin\psi. \qquad (11\text{-}32)$$

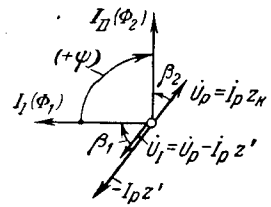
Величина и знак момента, а следовательно, поведение реле будут определяться углом ψ между токами I_I и I_{II} в обмотках реле.

Ток I_{II} в поляризующей обмотке определяется остаточным напряжением $U_р$, и его направление в обмотке *2* не меняется. Поэтому угол ψ полностью зависит от тока I_I в рабочей обмотке, направление и фаза которого в свою очередь определяются знаком и фазой напряжения $\dot{U}_I = \dot{U}_р - \dot{I}_р z'$.

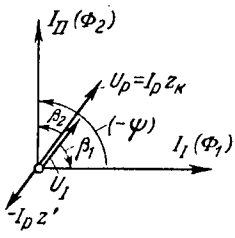
Векторные диаграммы на рис. 11-19 позволяют определить знак угла ψ. За исходные векторы при построении диаграммы приняты $\dot{U}_р$ и $\dot{I}_р$. Ток I_{II} опережает $U_{II} = U_р$ на угол β_2, а ток I_I отстает от U_I на угол β_1. Значения β_1 и β_2 определяются параметрами обмоток *1* и *2* и являются постоянными величинами. Знак угла ψ принимается положительным, когда I_I опережает I_{II}, и отрицательным, если I_I отстает от I_{II}.



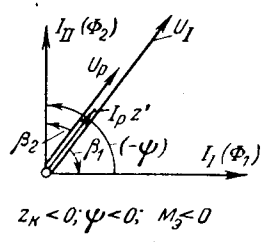
а)



б)



в)



г)

Рис. 11-19. Векторные диаграммы токов и магнитных потоков реле при различных случаях к. з.

а — участок защищаемой сети; *б* — к. з. в пределах зоны защиты (точка K_1); *в* — к. з. за пределами зоны (точка K_2); *г* — к. з. за шинами подстанции *B* (точка K_3).

При к. з. в конце зоны действия реле (точка *M* на рис. 11-19, *а*) сопротивление до точки к. з. $z_к = z'$. Поэтому падение напряжения до точки к. з. и напряжение компенсации равны по величине и фазе. В результате этого $\dot{U}_I = \dot{U}_р - \dot{I}_р z' = 0$, следовательно, ток и магнитный поток рабочей обмотки (I_I и Φ_I) равны нулю и реле не работает.

При к. з. в зоне до точки *M* $z_{к1} < z'$, падение напряжения в сопротивлении $z_{к1} U_р < I_р z'$, поэтому вектор U_I противоположен $U_р$. Как видно из векторной диаграммы (рис. 11-19, *б*), ток I_I и поток Φ_I опережают I_{II} и Φ_2, а угол ψ положителен. В результате этого $M_э > 0$ и реле приходит в действие.

При к. з. за пределами зоны (за точкой M) $z_{к2} > z'$, вследствие чего $U_р > I_р z'_р$, вектор U_I совпадает по фазе с $U_р$. Диаграмма на рис. 11-19, *в* показывает, что ток I_I вследствие изменения фазы напряжения U_I изменяет свое направление на 180°. При этом ток I_I и поток Φ_1 отстают от I_{II} и Φ_2, угол ψ становится отрицательным и реле не действует, так как $M_э < 0$.

При к. з. за шинами подстанции в точке K_3 мощность к. з. и ток $I_р$ меняют свое направление, в результате чего напряжение компенсации $I_р z'$ становится отрицательным. В этом случае $\dot{U}_I = \dot{U}_р + \dot{I}_р z'$ и совпадает по направлению, как и в предыдущем случае, с вектором $\dot{U}_р$. Из диаграммы на рис. 11-19, *г* видно, что ψ имеет отрицательный знак и поэтому реле не работает.

Таким образом, фаза тока в рабочей обмотке зависит от местоположения точки повреждения. Реле работает в пределах зоны, определяемой сопротивлением z'. При переходе к. з. за пределы зоны фаза тока I_I меняет свое направление на 180° и реле прекращает действовать. Реле реагирует на направление мощности к. з., так как при к. з. за шинами B оно не работает.

В рассмотренных случаях при металлических к. з. $\varphi_р = \varphi_л = \varphi'$ и благодаря подобранным параметрам обмоток угол ψ между токами I_I и I_{II} равен 90°. Поэтому реле имеет максимальную чувствительность.

При к. з. через дугу, при нагрузке и качаниях $\varphi_р \neq \varphi_л$ напряжение компенсации и $U_р$ не совпадают по фазе, вследствие чего угол ψ между токами I_I и I_{II} отклоняется на 90°. Это вызывает уменьшение момента $M_э$ и сокращение зоны действия реле.

Таким образом, $z_{с.р}$ зависит от $\varphi_р$ при $\varphi_р = \varphi' z_{с.р} = z'$, а при всех других значениях $\varphi_р$ $z_{с.р} < z'$. Характеристика работы рассмотренного реле изображается в осях r, x окружностью, проходящей через начало координат (рис. 11-7, *б*) с диаметром z' и углом максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч} = \varphi'$.

Уравнение срабатывания реле можно определить аналитическим путем. Для этого магнитный поток Φ_1 рабочей обмотки представляется в виде двух составляющих: одной $\Phi_{1н}$, обусловленной напряжением $k_н \dot{U}_р$, и второй $\Phi_{1т}$, создаваемой напряжением $I_р z'$ (рис. 11-18). Взаимодействие этих потоков с потоком $\Phi_2 \equiv U_р$ поляризующей обмотки создает два момента:

$$M_{12} = k' \Phi_2 \Phi_{1н} \sin \psi_1 = k'_1 U_р^2 \quad \text{и} \quad M_{22} = k'' \Phi_2 \Phi_{12} \sin \psi_2 =$$
$$= k''_2 U_р I_р \cos (\varphi_{м.ч} - \varphi_р).$$

Здесь учтено, что $\psi_2 = \varphi_{м.ч} - \varphi_р$.

Начало срабатывания реле характеризуется равенством $M_{12} + M_{22} = 0$, откуда после подстановки и преобразования находится сопротивление срабатывания реле согласно (11-33).

$$z_{с.р} = \frac{U_р}{I_р} = \frac{k''_2}{k'_1} \cos (\varphi_{м.ч} - \varphi_р). \qquad (11\text{-}33)$$

Выражение (11-33) представляет уравнение окружности, проходящей через начало координат (рис. 11-7, *б*) с диаметром $OB = \frac{k_2''}{k_1'} = z_{с.р.макс}$. Оно также показывает, что $z_{с.р}$ зависит от $\varphi_р$. Реле имеет максимальную чувствительность (наибольшее $z_{с.р}$) при $\varphi_р = \varphi_{м.ч}$, которое зависит от угла сопротивления z'. Величина $\varphi_{м.ч}$ может изменяться с изменением сопротивления r в цепи трансреактора (рис. 11-18).

Регулирование $z_{с.р}$ реле производится с помощью автотрансформатора AH изменением его коэффициента трансформации $k_н$ или изменением витков трансреактора, что непосредственно меняет величину z', т. е. уставку реле.

Мертвая зона. Из выражения (11-32) вытекает, что при $U_р = 0$ U_{II} и Φ_2 равны нулю, в результате чего реле не может работать, так как $M_э = 0$.

Это означает, что при к. з. в начале линии, когда $U_р = 0$ или очень мало, реле не работает, т. е. имеет мертвую зону. Для устранения мертвой зоны предусматривается устройство, называемое «памятью», осуществляемое с помощью конденсатора C_2 (рис. 11-18). При исчезновении $U_р$ во время близкого к. з. конденсатор C_2, заряженный предшествующим напряжением, разряжается и посылает ток в обмотку *2*. Параметры цепи обмотки подбираются так, чтобы ток разряда конденсатора имел колебательный характер с частотой 50 *гц* (рис. 11-20). Затухание тока I_C происходит со временем порядка 2—5 периодов, в течение которых взаимодействие потоков обмоток *1* и *2* создает момент $M_э$, достаточный для действия реле. Конденсатор C_1 (рис. 11-18) служит для создания необходимого сдвига фаз между током и напряжением в обмотке *1* и желаемой величины угла максимальной чувствительности. На рассмотренном принципе ЧЭАЗ выполнялись направленные реле сопротивления типа КРС-131 и КРС-132.

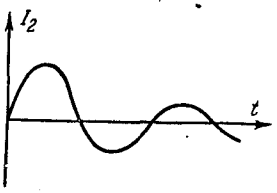


Рис. 11-20. Кривая изменения тока I_2 в обмотке *2* реле на рис. 11-18 при разряде конденсатора C_2.

г) Индукционное направленное реле сопротивления для защиты от двухфазных коротких замыканий (компенсационное реле)

Реле и схема его включения предложены советским специалистом А. М. Бреслером. Конструкция реле (рис. 11-21) выполняется аналогично индукционному реле мощности, но отличается от него способом питания обмоток. Реле имеет две обмотки *1* и *2*, которые питают напряжения U_I и U_{II}. Каждое из этих напряжений представляет собой разность линейного напряжения в месте установки защиты и напряжения компенсации, равного падению напряже-

ния от тока к. з. в заданном сопротивлении защищаемой зоны[1]:

$$\left.\begin{aligned} U_{\text{I}} &= U_{AB} - (\dot{I}_A - \dot{I}_B)\, z'; \\ U_{\text{II}} &= U_{BC} - (\dot{I}_B - \dot{I}_C)\, z'. \end{aligned}\right\} \qquad (11\text{-}34)$$

Реактивная составляющая компенсируемого напряжения получается при помощи трансреакторов *7* и *5*. Их вторичные э. д. с. сдвинуты на 90° относительно первичных токов $\dot{I}_{AB} = \dot{I}_A - \dot{I}_B$ и $\dot{I}_{CB} = \dot{I}_C - \dot{I}_B$ и пропорциональны им, т. е.

$$\dot{E}_1 = -j\dot{I}_{AB}x'; \quad \dot{E}_2 = -j\dot{I}_{CB}x'.$$

Коэффициент пропорциональности x' численно равен реактивной составляющей сопротивления z', пересчитанной на вторичное

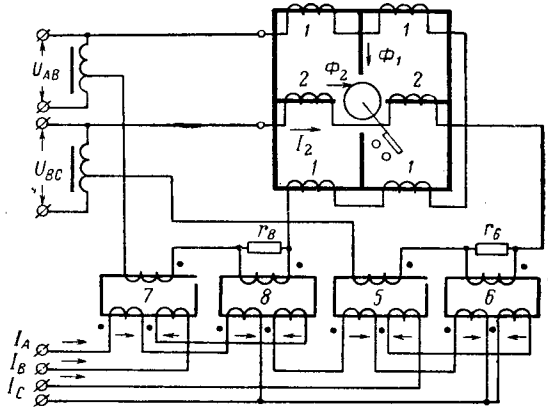


Рис. 11-21. Индукционное реле (системы А. М. Бреслера) для защиты от двухфазных к. з.

напряжение. Активная составляющая компенсирующего напряжения получается как падение напряжения в активных сопротивлениях r_6 и r_8 при прохождении по ним токов, пропорциональных I_{AB} и I_{CB} и получаемых от вспомогательных трансформаторов *8* и *6*.

Под действием напряжений $\dot{U}_{\text{I}}$ и $\dot{U}_{\text{II}}$ создаются магнитные потоки Φ_1 и Φ_2. В результате взаимодействия этих потоков возникает электромагнитный момент

$$M_э = k\Phi_1\Phi_2 \sin\psi. \qquad (11\text{-}35)$$

Соотношение реактивного и активного сопротивлений в обмотках *1* и *2* подбирается одинаковым. Благодаря этому угол сдвига ψ между токами $\dot{I}_{\text{I}}$ и $\dot{I}_{\text{II}}$ (или потоками Φ_1 и Φ_2) оказывается равным сдвигу фаз δ между векторами напряжений U_{I} и U_{II} (рис. 11-22).

[1] Можно считать, что реле питается компенсированными напряжениями U_{I} и U_{II}, соответствующими напряжению в конце зоны действия защиты (точка *M* на рис. 11-18, *а*). Поэтому данное реле часто называется компенсационным.

Учитывая, что $\psi = \delta$ и что магнитные потоки пропорциональны напряжениям, т. е. $\Phi_1 \equiv I_1 \equiv U_1$, а $\Phi_2 \equiv I_2 \equiv U_{II}$, преобразуем (11-35), после чего оно примет вид:

$$M_э = -kU_I U_{II} \sin\delta \qquad (11\text{-}36)$$

или

$$M_э = -k[\dot{U}_{AB} - (\dot{I}_A - \dot{I}_B)z'][\dot{U}_{BC} - (\dot{I}_B - \dot{I}_C)z'] \sin\delta.$$

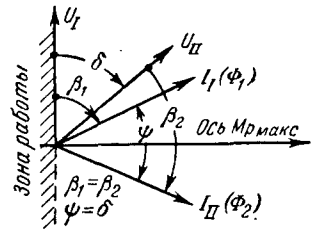


Рис. 11-22. Векторная диаграмма, поясняющая работу реле на рис. 11-21.

Полученное выражение показывает, что знак момента, а следовательно, и поведение реле зависят от угла сдвига фаз δ между векторами напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

Если $\dot{U}_{II}$ опережает $\dot{U}_I$, то угол δ отрицательный, при этом момент $M_э$ положительный и действует на замыкание контактов. Если $\dot{U}_{II}$ отстает от $\dot{U}_I$, то $M_э$ отрицательный и действует на размыкание контактов реле, при этом угол δ положительный.

Таким образом, можно считать, что реле реагирует на порядок чередования питающих его напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$. Построив векторные диаграммы напряжений U_I и U_{II} для трехфазных и двухфазных к. з. при повреждениях в точке K_1 (в зоне защиты, $z_к < z'$), в точке K_2 (вне зоны, $z_к > z'$) и в точке K_3 (за шинами подстанции, $z_к < 0$) (рис. 11-23, *а*), можно определить знак угла δ и какое из двух подведенных к реле напряжений (U_I или U_{II}) является опережающим. В качестве примера на рис. 11-23, *б—д* показаны векторные диаграммы U_I и U_{II} для указанных выше повреждений при двухфазном к. з. Из диаграмм следует, что при к. з. до точки M реле работает, так как при этом U_{II} опережает U_I и не действует при к. з. в точке M и за ней. Подобный анализ работы реле [Л. 13, 23, 45] показывает, что при всех симметричных режимах (трехфазные к. з., нагрузки и качания) U_{II} отстает от U_I, угол δ положителен и реле не действует. При двухфазных к. з. реле работает в пределах зоны, определяемой z'. При $z_к > z'$, а также при направлении мощности к. з. к шинам реле не действует, так как в этих случаях угол δ положителен и U_{II} отстает от U_I.

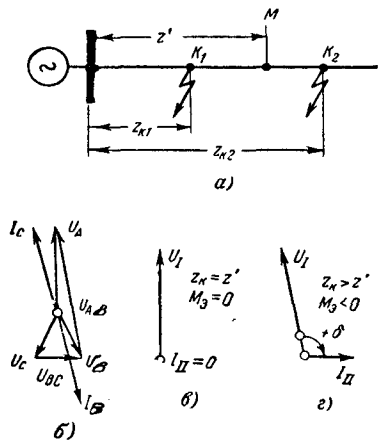


Рис. 11-23. Участок сети и векторные диаграммы к анализу работы реле на рис. 11-21 при двухфазных к. з.

При двухфазных к. з. на землю реле работает в пределах той же зоны, что и при двухфазных замыканиях без земли, обладая направленностью действия. Исследования [Л. 43] показывают, что при близких к. з. реле может не сработать в случае двухфазного к. з. на землю и при определенном сочетании величин z' и тока к. з. Реле реагирует и на однофазные к. з., сохраняя направленность действия. Но в этом случае зона работы реле значительно сокращается, вследствие чего оно не используется для защиты от этого вида повреждений.

Момент реле можно выразить через симметричные составляющие напряжений U_I и U_{II}. В этом случае он получается равным разности квадратов компенсированных напряжений обратной и прямой последовательностей [Л. 13]:

$$M_э = k\,(|\dot{U}_2'|^2 - |\dot{U}_1'|^2) = k\,(|\dot{U}_2 - \dot{I}_2 z'|^2 - |\dot{U}_1 - \dot{I}_1 z'|^2), \qquad (11\text{-}37)$$

где U_1' и U_2' — составляющие прямой и обратной последовательностей напряжений U_I и U_{II}; U_1, U_2, I_1, I_2 — составляющие прямой и обратной последовательностей напряжений $\dot{U}_{AB}$ и $\dot{U}_{BC}$ и токов I_{AB} и I_{BC}.

Как следует из (11-37,) условием работы реле является неравенство $|\dot{U}_2 - \dot{I}_2 z'|^2 > |\dot{U}_1 - \dot{I}_1 z'|^2$, при котором $M_э > 0$. Это выражение показывает, что при всех симметричных режимах реле не работает, так как составляющие U_2 и I_2 в этих режимах равны нулю. Выражение (11-37) облегчает анализ работы реле, позволяя вести его аналитически.

Рассмотренное реле может применяться в качестве направленного дистанционного органа от двухфазных к. з. между любыми фазами. Для такого реле не требуется пусковой орган, так как оно не реагирует на нагрузку. Отечественной промышленностью выпускалось реле типа КРС-121, основанное на описанном принципе.

11-8. ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТОК ТОЧНОЙ РАБОТЫ

Точность работы реле сопротивления характеризуется погрешностью $\Delta z = z_у - z_{с.р}$, которая показывает, насколько действительное $z_{с.р}$ отличается от уставки реле $z_у$.

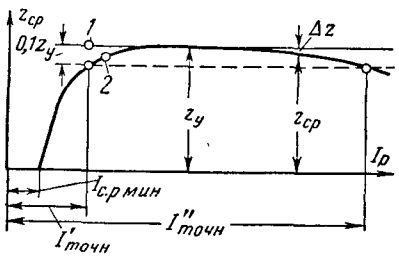


Рис. 11-24. Зависимость $z_{с.р}$ от тока в реле.

1 — идеальная характеристика; *2* — действительная характеристика.

Основными причинами, вызывающими погрешность в работе реле и появление зависимости $z_{с.р}$ от тока, являются: во-первых, наличие механического момента $M_{мех}$ и других факторов, ограничивающих чувствительность конструкций, и, во-вторых, нелинейность магнитопроводов и выпрямителей в цепях реле.

На рис. 11-24 показан характер зависимости $z_{с.р}$ от тока $I_р$ и возникающей при этом погрешности Δz.

При отсутствии механического момента и других факторов, ограничивающих чувствительность реле, характеристика срабатывания не зависит от тока $I_р$ и изображается прямой *1* ($z_{с.р} = z_у$). Действительная характеристика реле представляется кривой *2*.

Рассмотрим ее особенности. При $z_{с.р} = 0$, имеющем место при $U_р = 0$, реле срабатывает только при определенном значении тока $I_{с.р.мин}$, который должен в этом случае преодолеть сопротивление механического момента и других факторов, обусловливающих конечную чувствительность реле.

При малых токах $I_р$, соизмеримых с величиной $I_{с.р.мин}$, погрешности реле особенно велики. Это объясняется большим значением погрешности Δz, обусловленной механическим моментом.

По мере увеличения тока $I_р$ значение погрешности Δz уменьшается и в средней части характеристики погрешность становится настолько мала, что ею можно пренебречь, считая, что $z_{с.р} = z_у$.

При больших значениях $I_р$ начинает проявляться насыщение магнитопроводов и нелинейность выпрямителей, в результате чего погрешность Δz снова нарастает, а $z_{с.р}$ уменьшается.

Из кривой *2* следует, что каждое реле сопротивления может работать с достаточной точностью только в определенном диапазоне токов $I_р$. Принято, что для дистанционных реле погрешность $\Delta z_р$ не должна превышать 10%.

Из этого условия по кривой $z_{с.р} = f(I_р)$ определяются токи точной работы реле $I'_{точн}$ и $I''_{точн}$, при которых погрешность равна 10%, а $z_{с.р} = 0{,}9z_у$.

В современных конструкциях ток точной работы в начальной части характеристики составляет 1—7 *а*.

При выборе уставок реле сопротивления необходимо проверять, что при к. з. в конце зоны действия реле $I_{к.з.мин} \geqslant I'_{точн}$, а $I_{к.з.макс} \leqslant I''_{точн}$.

Если эти условия не будут выполнены, то погрешность реле превзойдет 10%.

11-9. ДИСТАНЦИОННЫЕ ОРГАНЫ ЗАЩИТЫ

а) Требования к схемам включения

Дистанционные органы, выполняемые с помощью реле сопротивления, должны включаться на ток и напряжение сети по таким схемам, при которых сопротивление $z_р$ на зажимах реле пропорционально расстоянию $l_к$ до места повреждения и не зависит от вида к. з.

Для выполнения поставленных условий напряжение $U_р$ должно равняться падению напряжения до точки к. з. $I_{к.з}z_к$, а ток $I_р$ — току $I_{к.з}$, тогда

$$z_р = \frac{U_р}{I_р} = \frac{I_{к.з}z_к}{I_{к.з}} = z_к = z_{уд}l_к.$$

Исходя из этого *дистанционные органы включаются на напряжение и ток петли к. з.* Для обеспечения правильного действия дистанционных органов при двухфазных к. з. нужно установить три органа, реагирующие на повреждения между фазами *AB*, *BC* и *CA*. Применяются схемы и с одним дистанционным органом, но в этом случае его нужно переключать на напряжение и токи соответствующих фаз в зависимости от того, какие из них повреждены.

Схемы включения, обеспечивающие при междуфазных к. з. пропорциональность между $z_р$ и $l_к$, оказываются непригодными в условиях замыканий на землю. Поэтому реле, реагирующие на междуфазные к. з., и реле, предназначенные для защиты от однофазных повреждений, включаются по разным схемам, рассмотренным ниже. Реле, определяющие удаленность места к. з. не по сопротивлению, а по косвенным признакам, как, например, КРС-121, включаются по особым схемам.

б) Включение дистанционных органов, реагирующих на междуфазные к. з.

Включение на междуфазные напряжения и разность фазных токов осуществляется согласно табл. 11-1.

Такой способ включения (рис. 11-25) полностью отвечает поставленным выше условиям, в чем можно убедиться, определив сопротивления на зажимах реле при различных видах междуфазных к. з.

Таблица 11-1

Реле фаз	$I_р$	$U_р$
AB	$\dot{I}_A - \dot{I}_B$	U_{AB}
BC	$\dot{I}_B - \dot{I}_C$	U_{BC}
CA	$\dot{I}_C - \dot{I}_A$	U_{CA}

При трехфазном к. з. (рис. 11-26, *б*) все три дистанционных органа находятся в одинаковых условиях.

К каждому из них подводится междуфазное напряжение, равное $\sqrt{3}U_ф$. Фазное напряжение $U_ф$ равно падению напряжения в проводе фазы от места установки реле до точки к. з.

Отсюда напряжение

$$U_р^{(3)} = \sqrt{3}\, I_к^{(3)} z_{1к} = \sqrt{3}\, I_к^{(3)} z_{1у} l_к,$$

где $I_к^{(3)}$ — ток трехфазного к. з., проходящий по фазе; $z_{1к}$ — сопротивление прямой последовательности фазы от места установки реле до точки K; $l_к$ — расстояние до места повреждения; $z_{1у}$ — удельное сопротивление прямой последовательности фазы на 1 *км*.

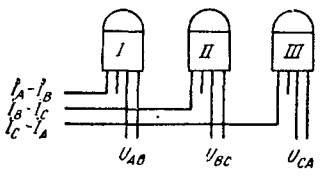


Рис. 11-25. Схема включения дистанционных органов.

Ток в каждом реле равен геометрической разности токов двух фаз, т. е. $I_р = \sqrt{3}\, I_к^{(3)}$, следовательно, сопротивление на зажимах каждого реле

$$z_р^{(3)} = \frac{U_р^{(3)}}{I_р^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}\, I_к^{(3)} z_{1к}}{\sqrt{3}\, I_к^{(3)}} = z_{1к} = z_{1у} l_к.$$

При двухфазном к. з., например, между фазами B и C (рис. 11-26, *в*) только один дистанционный орган, включенный на напряжение между поврежденными фазами B и C, получает напря-

жение, пропорциональное расстоянию $l_к$. Это напряжение равно падению напряжения в петле к. з., т. е. в фазах B и C, поэтому

$$U_р^{(2)} = U_{BC} = 2I_к z_{1к}.$$

Ток $I_р^{(2)} = \dot{I}_B - \dot{I}_C = 2I_к$. Отсюда находим:

$$z_р^{(2)} = \frac{U_р^{(2)}}{I_р^{(2)}} = \frac{U_{BC}}{I_B - I_C} = \frac{2I_к z_{1к}}{2I_к} = z_{1к} = z_{1у} l_к.$$

При к. з. на фазах AB и CA $z_р^{(3)}$ находится аналогично и будет также равняться $z_{1к} = z_{1у} l_к$.

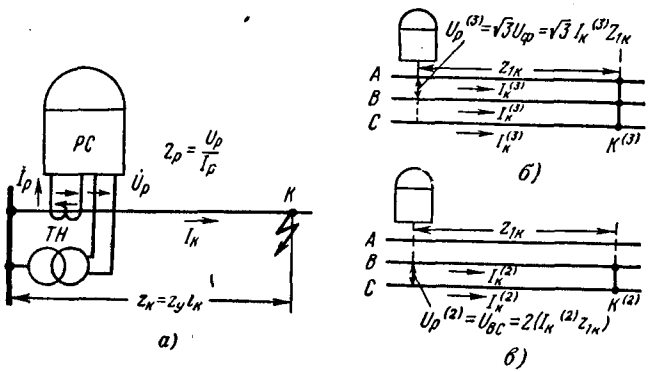


Рис. 11-26. Короткое замыкание на защищаемой линии.

а — схема сети; *б* — токи и напряжения поврежденных фаз при трехфазном к. з.; *в* — при двухфазном к. з.

Пользуясь аналогичным методом, можно показать, что и при двухфазных к. з. на землю

$$z_р^{(1,1)} = z_{1к} = z_{1у} l_к.$$

Таким образом, при всех видах междуфазных к. з. сопротивление на зажимах реле равно сопротивлению прямой последовательности фазы $z_{1к}$. Следовательно,

$$z_р \equiv l_к \quad \text{и} \quad z_р^{(3)} = z_р^{(2)} = z_{1к},$$

как это и требуется по заданным условиям.

Таблица 11-2

Второй способ

Дистанционное реле фаз	$I_р$	$U_р$
AB	I_A	U_{AB}
BC	I_B	U_{BC}
CA	I_C	U_{CA}

Включение на междуфазное напряжение и фазный ток осуществляется согласно табл. 11-2. Анализируя эту схему, можно убедиться, что при трехфазных к. з. $z_р^{(3)} = \sqrt{3}\, z_{1к}$, а при двухфазных — в той же точке $z_р^{(2)} = 2z_{1к}$.

Таким образом, данная схема, удовлетворяя первому из заданных условий $z_р \equiv l_к$, не обеспечивает второго условия, так как $z_р^{(3)} \neq z_р^{(2)}$.

Поэтому схема включения на междуфазное напряжение и фазный ток используется лишь для дистанционных органов третьей зоны, которые обычно совмещаются с пусковыми органами защиты (см. § 11-13). В этом случае нестабильность третьих зон при различных видах к. з. допустима, поскольку третьи зоны являются резервными и работают только при отказе основной защиты.

При обеих схемах включения в случае двухфазного к. з. (рис. 11-26, *в*) из трех дистанционных органов правильно определяет удаленность повреждения только один, включенный на напряжение между поврежденными фазами.

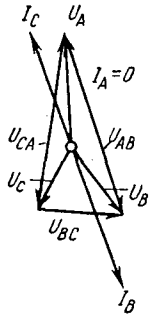


Рис. 11-27. Векторная диаграмма токов и напряжений в месте установки защиты при двухфазном к. з. на фазах *BC*.

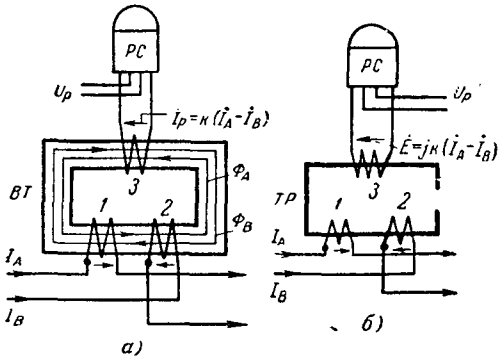


Рис. 11-28. Включение дистанционных органов на разность токов двух фаз.

а — с помощью вспомогательного трансформатора *ВТ*; *б* — с помощью трансреактора *Т*.

Например, при к. з. между *B* и *C* (рис. 11-25, 11-27), сопротивление на реле *II* $z_р = z_{1к}$, а на зажимах реле *I* и *III* $z_р$ получается преувеличенным, так как подводимые к ним напряжения U_{AB} и U_{CA} (рис. 11-27) превышают напряжение U_{BC}, а питающий их ток (без учета нагрузки) в 2 раза меньше, чем ток $I_B - I_C$ в реле *II*. Эти реле ведут себя так, как если бы к. з. произошло дальше действительного места повреждения. Поэтому они не могут вызвать неселективного действия защиты.

Способы включения дистанционных органов на разность токов двух фаз в современных защитах основаны на использовании вспомогательных трансформаторов тока *ВТ* или трансреакторов *ТР* с двумя первичными обмотками *1* и *2* (рис. 11-28). Каждая первичная обмотка включается на ток соответствующей фазы (например, *A* и *B*), так чтобы наводимые ими потоки в сердечнике *ВТ* или *ТР* были направлены встречно и создавали результирующий поток $\Phi_р = \Phi_1 - \Phi_2$, пропорциональный разности токов, питающих первичные обмотки *ВТ* или *ТР*. При этом условии ток вторичных

обмоток будет также пропорционален разности указанных первичных токов.

В защитах, выпускаемых отечественной промышленностью, применяется схема на рис. 11-28, *б*.

в) Включение дистанционных органов, реагирующих на однофазные к. з.

Дистанционные органы, предназначенные для определения удаленности мест однофазных к. з., включаются по так называемой схеме с токовой компенсацией (рис. 11-29, *а*). Схема предусматривает три реле сопротивления, каждое из которых включается согласно табл. 11-3 на напряжение $\dot{U}_\Phi$ фаз A, B и C и ток

$$\dot{I}_р = \dot{I}_\Phi + k3\dot{I}_0,$$

где $\dot{I}_\Phi$ — ток той же фазы, что и напряжение U_Φ; $k3\dot{I}_0$ — ток, пропорциональный току нулевой последовательности.

Коэффициент пропорциональности $k = \frac{z_0 - z_1}{3z_1}$.

При таком значении k сопротивление на зажимах реле при однофазных к. з. $z_{с.р} = \frac{\dot{U}_\Phi}{\dot{I}_\Phi + k3\dot{I}_0}$ получается равным z_1 — сопротивлению прямой последовательности до места к. з.

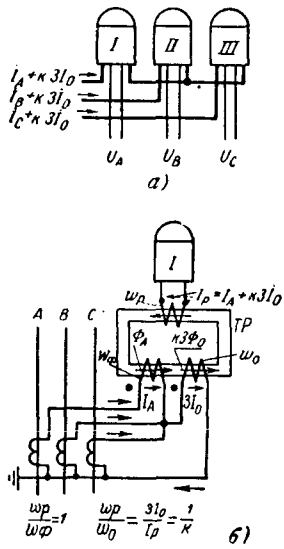


Рис. 11-29. Схема включения дистанционных органов на ток $\dot{I}_\Phi + k3\dot{I}_0$.
а — трехфазная схема включения; *б* — схема для получения тока $\dot{I}_\Phi + k3\dot{I}_0$.

Для доказательства того, что выбранная схема компенсации обеспечивает $z_р = z_1$, рассмотрим однофазное к. з. (рис. 11-30), например на фазе A. Согласно табл. 11-3 сопротивление на зажимах реле фазы A

$$z_р = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A + k3\dot{I}_0}. \qquad (11\text{-}38)$$

Напряжение фазы A в месте установки защиты (в точке P) $\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0$. Каждая составляющая U_1, U_2, U_0 в точке P равна сумме напряжения соответствующей последовательности в точке K и падения напряжения той же последовательности на участке KP. Отсюда

$$\dot{U}_A = (\dot{U}_{1K} + \dot{I}_1 z_1) + (\dot{U}_{2K} + \dot{I}_2 z_2) + (\dot{U}_{0K} + \dot{I}_0 z_0),$$

где $\dot{U}_{1K}$, $\dot{U}_{2K}$, $\dot{U}_{0K}$ — напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке K; $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_0$ — симметричные составляющие тока к. з.; z_1, z_2,

Таблица 11-3

Реле фаз	Напряжение	Ток
A	U_A	$\dot{I}_A + k3\dot{I}_0$
B	U_B	$\dot{I}_B + k3\dot{I}_0$
C	U_C	$\dot{I}_C + k3\dot{I}_0$

z_0 — сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей участка KP.

Учитывая, что на поврежденной фазе $\dot{U}_{1K} + \dot{U}_{2K} + \dot{U}_{0K} = 0$, получаем:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_1 z_1 + \dot{I}_2 z_2 + \dot{I}_0 z_0. \tag{11-39}$$

Прибавляя и отнимая в правой части уравнения (11-39) $I_0 z_1$ и учитывая, что для линий сопротивление $z_1 = z_2$ и что для фазы A сумма

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = \dot{I}_A,$$

получаем:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_A z_1 + \dot{I}_0 (z_0 - z_1);$$

подставляя полученное значение $\dot{U}_A$ в (11-38), получаем:

$$z_p = \frac{z_1 \left[\dot{I}_A + \left(\frac{z_0 - z_1}{3z_1}\right) 3\dot{I}_0\right]}{\dot{I}_A + k3\dot{I}_0}. \tag{11-40}$$

Принимая

$$k = \frac{z_0 - z_1}{3z_1},$$

получаем:

$$z_p = z_1 = z_{1y} l_{p.к}. \tag{11-41}$$

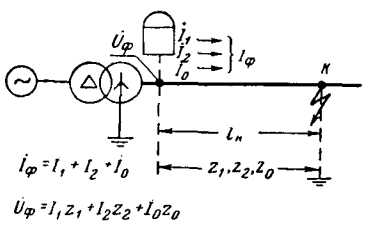


Рис. 11-30. Однофазное к. з.

Выражение (11-41) справедливо для замыкания на землю как одной фазы, так и двух фаз. Таким образом, сопротивление на зажимах реле, включенного по схеме с токовой компенсацией, пропорционально расстоянию до места к. з. $l_к$ и не зависит от вида замыкания на землю и от соотношения токов I_0 и I_Φ.

Поэтому схема с токовой компенсацией полностью отвечает требованиям, предъявляемым к дистанционным органам, и получила всеобщее распространение.

При однофазном к. з. правильно работает только одно реле, включенное на напряжение и ток поврежденной фазы. Два других реле, включенные на ток и напряжение неповрежденных фаз, имеют $z_p > z_1$, что не вызывает неселективного действия.

При включении реле на фазный ток и напряжение без токовой компенсации (рис. 11-30)

$$z_p = z_1 + \frac{I_0}{I_A}(z_0 - z_1).$$

В этом случае $z_p \neq z_1$ и имеет нестабильное значение, зависящее от отношения I_0/I_A.

Для выполнения токовой компенсации часто применяется схема, приведенная на рис. 11-29, *б*. Реле питается током через промежуточный трансформатор или трансреактор TP с двумя первичными обмотками. Одна из них ω_Φ включена

на ток фазы $I_ф$, а вторая w_0 — на ток $3I_0$. Их число витков подбирается так, чтобы отношение $w_ф/w_0 = 1/k$. Результирующий поток первичных обмоток $\dot{Ф}_{рез} = \dot{Ф}_ф + k\dot{Ф}_0 \equiv I_ф + k3I_0$, и поэтому вторичный ток трансформатора или вторичная э. д. с. трансреактора будут пропорциональны току $I_ф + k3I_0$.

Коэффициент k является величиной комплексной, поскольку z_0 и z_1 могут иметь различные углы (соотношения x и r). Поэтому токи $3I_0$ и $k3I_0$ должны иметь соответствующий сдвиг по фазе. Учитывая, однако, что угловой сдвиг между z_0 и z_1 невелик, им без большой погрешности пренебрегают, как это сделано в рассмотренной схеме. Обычно $k < 1$.

г) Условия работы дистанционных органов при двойных замыканиях на землю

В сети с малым током замыкания на землю дистанционные защиты должны реагировать на междуфазные к. з. и их дистанционные органы включаются на междуфазные напряжения и разность фазных токов. Как указывалось, в таких сетях возможны двойные замыкания на землю (рис. 11-31). *Защита в этом случае должна отключать только одно место повреждения.*

Исследование условий работы дистанционных защит при двойных замыканиях на землю показывает, что они не могут обеспечить четкого выполнения этого требования.

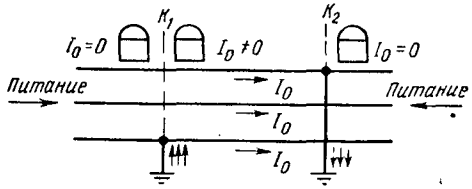


Рис. 11-31. Условия работы дистанционных органов при двойном к. з. на землю.

Наилучшие результаты получаются, если на участке $K_1 - K_2$ (рис. 11-31) между двумя точками повреждения дистанционные органы включены на фазное напряжение по схеме с токовой компенсацией, а на участке между точкой повреждения и источником питания — на линейное напряжение и разность фазных токов. Для этого дистанционные органы нормально и при отсутствии I_0 включены на линейное напряжение и разность фазных токов. При появлении тока нулевой последовательности, всегда возникающего на участке между точками замыкания на землю (K_1 и K_2), дистанционные органы, установленные на этом участке, автоматически переключаются на напряжение фазы и ток $I_ф + k3I_0$.

11-10. УПРОЩЕННЫЕ СХЕМЫ С УМЕНЬШЕННЫМ ЧИСЛОМ ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ

а) Трехсистемные и односистемные схемы включения дистанционных органов

Дистанционные реле относятся к числу сложных реле, в связи с этим были разработаны схемы, позволяющие уменьшить количество дистанционных органов в защите.

Описанные в § 11-9 способы включения дистанционных органов были рассчитаны на три реле. Схемы с тремя органами называются трехсистемными.

С целью упрощения можно применять схемы с одним дистанционным органом (односистемные). В односистемных схемах для правильной работы дистанционных органов их необходимо автоматически переключать на напряжения и токи соответствующих фаз в зависимости от того, на каких из них возникло повреждение. Так, например, в односистемной схеме при двухфазном к. з. на фазах A и B к дистанционному органу должны подводиться напряжение U_{AB} и ток $\dot{I}_A - \dot{I}_B$, при к. з. на B и C — U_{BC} и $\dot{I}_B - \dot{I}_C$.

При двойных замыканиях в разных точках сети с малым током замыкания на землю на участке, где $I_0 = 0$, к реле подводятся те же токи и напряжения, что и в предыдущем случае, а на участке, где $I_0 \neq 0$, реле должно включаться на фазное напряжение $\dot{U}_\Phi$ и ток $\dot{I}_\Phi + k3\dot{I}_0$ согласно табл. 11-3.

Указанные переключения производятся с помощью промежуточных реле, управляемых пусковыми органами защиты.

Для этого каждое пусковое реле должно работать только при повреждении на определенных фазах. Такое свойство пусковых органов называется избирательностью.

На рис. 11-32 показана упрощенная односистемная схема с переключениями в цепях тока и напряжения дистанционного органа защиты (*РС*). Эта схема применяется в защите, предназначенной для сети с малым током замыкания на землю.

Для облегчения работы контактов переключательных реле при больших токах к. з. 50—100 *а* токовые цепи реле *РС* питаются через вспомогательные понизительные трансформаторы тока *ВТ* (рис. 11-32). Каждый из этих трансформаторов имеет две первичные обмотки $ВТ_\Phi$ и $ВТ_0$ и одну вторичную $ВТ_2$. Обмотка $ВТ_\Phi$ питается током I_Φ соответствующей фазы, а обмотка $ВТ_0$ током I_0, получаемым через автотрансформатор $АТ_0$.

Ток первичных обмоток I_Φ и ток I_0 трансформируются во вторичную обмотку $ВТ_2$, в последней появляется ток

$$I_2 = \frac{I_\Phi + k3\dot{I}_0}{n_{ВТ}}.$$

При междуфазных к. з. без земли $I_0 = 0$, в этом случае ток $I_2 = I_\Phi / n_{ВТ}$.

Коэффициент трансформации $n_{ВТ}$ обычно принимается равным 25. В результате трансформации токи, питающие реле *РС*, уменьшаются в 25 раз, что весьма существенно облегчает работу контактов промежуточных реле, производящих переключения в токовых цепях *РС*.

Обмотки $ВТ_{2А}$, $ВТ_{2В}$ и $ВТ_{2С}$ соединены в треугольник, цепь которого проходит через нормально замкнутый контакт токового реле $Т_0$, реагирующего на ток $3I_0$. При междуфазных к. з. реле $Т_0$ не работает и при действии пусковых реле поврежденных фаз к *РС*

подводится разность токов двух поврежденных фаз, получаемых от соответствующих обмоток $ВТ_2$ (для упрощения чертежа схема переключений $СП$ на рис. 11-32 не показана).

При двойном замыкании на землю появляется ток I_0, реле $Т_0$ срабатывает и в зависимости от положения контактов пусковых реле к $РС$ подводится сумма тока поврежденной фазы и тока компенсации $k3I_0$, получаемых от соответствующей обмотки $ВТ_2$.

Переключения в цепях напряжения реле $РС$ (рис. 11-32, *в*) выполняются также с помощью пусковых реле. Они производят необходимые переключения в цепях напряжения дистанционного органа так, чтобы к автотрансформатору $АН$ подводилась разность напряжений поврежденных фаз в случае междуфазного к. з. и напряжение поврежденной фазы при двойных замыканиях на землю. Односистемные схемы получили значительное распространение. Более подробно они рассмотрены в [Л. 13, 23, 44].

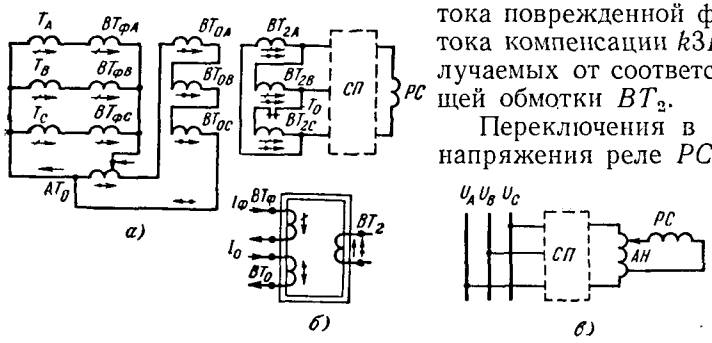


Рис. 11-32. Упрощенная односистемная схема с одним дистанционным органом ($РС$).

а — схема токовых цепей; *б* — вспомогательный трансформатор $ВТ$; *в* — схема цепей напряжения.

б) Использование одного комплекта дистанционных органов для нескольких зон

Наиболее часто один комплект дистанционных органов используется для первой и второй зон. Это позволяет в 2 раза уменьшить число дистанционных органов в защите и поэтому широко применяется на практике.

Схемы с использованием одного комплекта реле сопротивления для двух зон основаны на том, что нормально дистанционные органы включены с уставкой первой зоны; при к. з. за пределами первой зоны уставка реле автоматически изменяется с первой на вторую зону. Изменение уставки осуществляются пусковыми реле после истечения времени, необходимого для действия первой зоны. На рис. 11-33 приведена типовая схема (для одной фазы), осуществляющая автоматическое изменение уставки на дистанционном органе. Нормально к реле сопротивления $РС$ подводится напряжение, соответствующее уставке первой зоны, от автотрансформатора $АН$

через нижний размыкающий контакт *2* промежуточного реле $РП_2$. Это реле непрерывно питается током через размыкающий контакт промежуточного реле $РП_1$, управляемого пусковым органом защиты *ПО*.

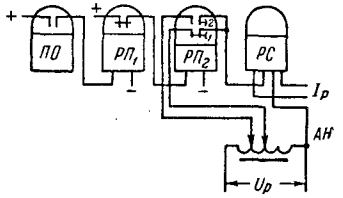


Рис. 11-33. Схема с одним комплектом реле сопротивления для первой и второй зоны.

При к. з. пусковое реле *ПО* приходит в действие и реле $РП_1$ размыкает цепь обмотки реле $РП_2$. Последнее работает (отпадает) с выдержкой времени около 0,15 *сек*, достаточной для действия первой зоны, и переключает реле *РС* на ответвление *АН*, соответствующее уставке второй зоны. Если к. з. было в первой зоне, то *РС* срабатывает до того, как $РП_2$ переключит его уставку. Если к. з. произошло за пределами первой зоны, то после переключения уставки *РС* получит возможность действовать с уставкой второй зоны.

11-11. ПРИЧИНЫ, ИСКАЖАЮЩИЕ РАБОТУ ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ

На работу дистанционных органов оказывают воздействие некоторые факторы, искажающие величины $z_р$ так, что при этом нарушается пропорциональность между $z_р$ и расстоянием $l_к$ до места к. з. Эти искажения необходимо учитывать при выборе уставок во избежание нарушения селективности и недопустимого сокращения зон действия защиты.

а) Влияние переходного сопротивления

Переходное сопротивление в месте к. з. (рис. 11-34) обусловливается главным образом появлением электрической дуги, имеющей активное сопротивление $r_п$. Сопротивление на зажимах реле *РС* при электрической дуге в месте повреждения при двухфазном к. з., как это видно из рис. 11-34, равно:

$$z_р = \frac{U_р}{I_р} = \frac{2I_{кN}z_1 + I_к r_п}{2I_{кN}} = z_1 + \frac{I_к}{I_{кN}}\frac{r_п}{2} = z_{1к} + \Delta z, \qquad (11\text{-}42)$$

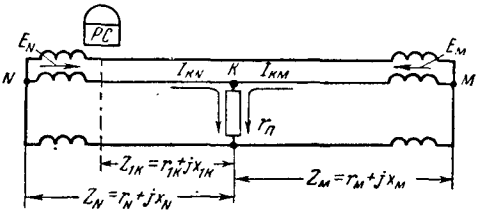


Рис. 11-34. Влияние электрической дуги в месте к. з. на сопротивление $z_р$ ($z_{1К}$, $r_{1К}$, $x_{1К}$ — сопротивление линии между точкой *К* и местом установки защиты).

где $z_{1к}$ — сопротивление прямой последовательности до места к. з.; $r_п$ — сопротивление электрической дуги; $\dot{I}_{кN}$ — ток к. з. от источника питания *N*, проходящий через реле; $\dot{I}_к$ — ток к. з., протекаю-

щий через дугу, равный $\dot{I}_{кN} + \dot{I}_{кM}$; $\Delta z = \dot{k}\frac{r_п}{2}$, при этом $\dot{k} = \frac{\dot{I}_к}{I_{кN}} > 1$.

Из этого выражения вытекает, что реле полного сопротивления воспринимают появление переходного сопротивления как удаление действительного места к. з. на величину Δz.

В результате этого зона действия реле сокращается и возникает возможность отказа защиты в конце расчетной зоны и неселективной работы предыдущих защит. Величина сопротивления дуги не поддается точной оценке.

В начальный момент повреждения длина электрической дуги минимальна, в дальнейшем дуга удлиняется, вследствие чего сопротивление $r_п$ возрастает. Поэтому на защиты с выдержкой времени дуга оказывает большее влияние, чем на защиты, действующие мгновенно.

б) Влияние токов подпитки от промежуточных подстанций

В ряде случаев между местом установки защиты и точкой повреждения оказываются включенными источники питания N, дающие дополнительный ток $I_{кN}$ к месту к. з. (рис. 11-35, *а*). Этот ток не проходит через реле, но, создавая дополнительное падение напряжения в сопротивлении поврежденного участка, увеличивает напряжение на зажимах реле, а вместе с ними и $z_р$.

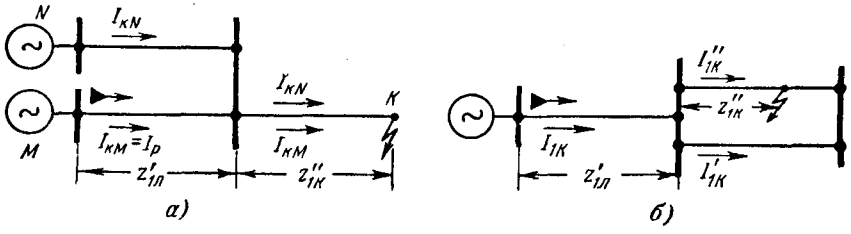


Рис. 11-35. Искажение замеров дистанционных органов.

а — вследствие подпитки токами к. з.; *б* — вследствие разветвления токов к. з.

Напряжение на реле с учетом подпитки равно:

$$U_р = I_{кM} z'_{1л} + (I_{кM} + I_{кN}) z''_{1к}.$$

Ток в реле

$$I_р = I_{кM},$$

отсюда

$$z_р = \frac{U_р}{I_р} = z'_{1л} + \frac{I_{кM} + I_{кN}}{I_{кM}} z''_{1к} = z'_{1л} + k_р z''_{1к}. \qquad (11\text{-}43)$$

Коэффициент $k_р = \frac{I_к}{I_{кM}} > 1$ называется коэффициентом распределения (или подпитки).

При наличии подпитки сопротивление на зажимах реле оказывается большим, чем действительное сопротивление прямой после-

довательности до места к. з., что приводит к сокращению зоны вторых и третьих ступеней защиты. Чем больше ток подпитки $I_{кN}$, тем больше искажается (увеличивается) сопротивление $z_р$.

в) Влияние разветвления токов при сочетании одинарной линии с параллельными

При сочетании одинарной линии с двумя параллельными (рис. 11-35, *б*) линиями реле, установленное на одинарной линии, замеряет преуменьшенное сопротивление при к. з. на одной из параллельных линий. В этом случае

$$U_р = [I_{1к} z'_{1л} + (I_{1к} - I'_{1к}) z''_{1к}]; \quad I_р = I_{1к}.$$

Следовательно,

$$z_р = z'_{1л} + \frac{I_{1к} - I'_{1к}}{I_{1к}} z''_{1к} = z'_{1л} + k_р z''_{1к}, \qquad (11\text{-}44)$$

где $k_р$ — коэффициент разветвления токов, равный

$$\frac{I_{1к} - I'_{1к}}{I_{1к}} < 1.$$

Влияние подпитки и разветвлений должно учитываться при расчете уставок дистанционных защит.

г) Влияние погрешности измерительных трансформаторов

Погрешность трансформаторов тока уменьшает вторичный ток по сравнению с его расчетным значением, что вызывает сокращение зон действия защиты. Угловая погрешность искажает величину угла $\varphi_р$ сопротивления $z_р$ и влияет таким образом на работу направленных реле сопротивления, у которых $z_{с.р} = f(\varphi_р)$. Для ограничения искажений в работе измерительных органов трансформаторы тока, питающие дистанционную защиту, должны проверяться по кривым 10%-ной погрешности и удовлетворять им при максимальном значении тока к. з. в конце первой зоны.

Погрешность трансформаторов напряжения по коэффициенту трансформации невелика. Однако величина вторичного напряжения может заметно искажаться за счет падения напряжения в соединительных проводах, связывающих реле с трансформатором напряжения. Подбором сечения соединительных проводов эти искажения сводятся к минимальному значению. Угловая погрешность трансформаторов напряжения влияет на работу реле так же, как и трансформаторов тока.

11-12. ПУСКОВЫЕ ОРГАНЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

а) Функции и типы пусковых реле и требования к ним

В односистемных дистанционных защитах и в защитах с одним комплектом дистанционных (измерительных) органов на две зоны необходимы пусковые органы, подготавливающие схему к правильной работе при к. з. Пусковые органы в этих защитах выполняют следующие функции:

1. Пускают реле времени второй, третьей и, если есть, четвертой зон.
2. В схемах с одним комплектом измерительных органов, для первой и второй зон, автоматически изменяют сопротивление срабатывания измерительных органов с первой зоны на вторую (см. § 11-10, б).
3. В односистемных схемах подводят при к. з. к измерительным органам токи и напряжения поврежденных фаз (см. § 11-10, а).
4. Действуют в качестве резервной зоны защиты.

В трехсистемных защитах с самостоятельными комплектами измерительных органов для каждой зоны, выполненных с помощью направленных реле сопротивления, специальных пусковых органов не требуется.

В этих схемах никаких переключений в цепях измерительных органов не производится. Измерительные органы отстроены от нагрузки. Пуск реле времени осуществляется измерительными органами соответствующей зоны. В качестве резервной зоны служит дополнительный комплект измерительных органов.

В защитах, использующих для определения зоны реле реактивного сопротивления (такие защиты широко применялись раньше в СССР), самостоятельный пусковой орган является обязательным. Реле реактивного сопротивления реагируют на нагрузку и поэтому нуждаются в органе, разрешающем их работу только при к. з.

Пусковые органы должны удовлетворять трем основным требованиям. Они должны обладать достаточной чувствительностью при к. з., иметь надежную отстройку от максимальной нагрузки и по возможности не действовать при качаниях. Выполнение этих требований является трудной в техническом отношении задачей.

В качестве пусковых реле дистанционной защиты применяются главным образом токовые реле и реле полного сопротивления. Оба типа пусковых реле должны быть отстроены от нагрузки, что ограничивает чувствительность защиты при к. з., особенно на длинных и сильно загруженных линиях. В связи с этим нашли применение реле сопротивления со смещенной круговой, эллиптической и овальной характеристиками, а также особые блокирующие реле (называемые иногда «шорами» или фазоограничителями). Блокирующие реле применяются в сочетании с пусковыми реле и позволяют ограничить их действие при перегрузках, что дает возможность по-

высить чувствительность защиты при к. з. Токовые реле и реле сопротивления реагируют на качания и не полностью отвечают требованиям к пусковым реле. Поэтому защиты с подобными пусковыми реле дополняются блокировками от качаний.

Наиболее рациональной характеристикой пускового реле сопротивления является характеристика, показанная на рис. 11-7, *е* в виде заштрихованного четырехугольника *OABC*, обеспечивающая надежное действие защиты с учетом сопротивления дуги в пределах выбранной зоны действия (участок линии *OA*). *Для обеспечения надежного действия при к. з. характеристика срабатывания реле должна охватывать заштрихованную площадь OKBC* на рис. 11-6, *д*. При такой характеристике реле не действует при $z_р > z_{к.з}$ и поэтому возможность ложной работы защиты при перегрузках и качаниях сводится к минимуму.

б) Токовые пусковые реле

Токовые пусковые реле, включенные на фазные токи. Токовые реле при большой кратности токов к. з. обладают четкой избирательностью как при двухфазных, так и однофазных повреждениях, потому что в обоих случаях они действуют только на тех фазах, где протекает ток к. з.

В защитах от междуфазных к. з. пусковые токовые реле достаточно устанавливать на двух фазах, что позволяет обеспечить их действие при всех видах междуфазных повреждений и необходимую избирательность в односистемных и двухсистемных схемах дистанционных защит.

Главный недостаток токового пуска состоит в том, что он реагирует на токи нагрузки и качаний так же, как и на к. з.

Ток срабатывания пусковых реле приходится отстраивать от тока максимальной нагрузки. Поэтому в сетях 110 *кв* и выше и особенно на длинных электропередачах с большой нагрузкой токовый пуск оказывается недостаточно чувствительным.

Токовые пусковые реле проще остальных пусковых устройств, поэтому их следует применять во всех случаях, когда они обеспечивают надежную чувствительность и отстройку от максимальной нагрузки. Наибольшее применение токовый пуск находит в дистанционных защитах сети 35 *кв*.

Токовые реле обратной последовательности. В некоторых схемах дистанционных защит в качестве пускового органа применяется токовое реле, включенное через фильтр обратной последовательности.

Двухфазные к. з. сопровождаются появлением тока обратной последовательности, и реле надежно действует. При трехфазных к. з. $I_2 = 0$, но практически все трехфазные к. з. возникают как однофазные или двухфазные повреждения, переходящие затем в трехфазные. Поэтому чтобы обеспечить пуск защиты от реле обратной последовательности при трехфазных к. з., предусматривается

особая схема, фиксирующая (запоминающая) кратковременное или длительное появление I_2 в первый момент возникновения повреждения. Эта схема рассмотрена в § 13-4 (рис. 13-4 и 13-5).

Преимуществом пуска I_2 является недействие при симметричных перегрузках и качаниях, а также высокая чувствительность при к. з., поскольку $I_{с.р}$ реле обратной последовательности отстраивается только от $I_{нб}$ фильтра, имеющего небольшую величину. Недостатком реле I_2 является действие при качаниях и нагрузке, если они сопровождаются появлением несимметрии (I_2 и U_2).

в) Пусковые реле сопротивления

Схемы включения. В качестве пусковых могут использоваться реле полного сопротивления ненаправленные и направленные с круговыми и эллиптическими характеристиками, которые могут включаться на междуфазные напряжения и разность одноименных фаз токов согласно табл. 11-1 или на междуфазные напряжения и ток одной фазы по табл. 11-2.

Первая схема (табл. 11-1) обеспечивает стабильность зоны действия при всех видах к. з. (см. § 11-19, б), что очень важно, когда пусковые реле выполняют функции дистанционного органа третьей зоны защиты. Однако эта схема не обеспечивает избирательности поврежденных фаз. При двухфазных к. з. (рис. 11-36, *а*) все три реле питаются током к. з. и имеют пониженное напряжение, поэтому при близких к. з. они могут сработать все одновременно, что не позволяет выявлять поврежденные фазы по действию пусковых реле.

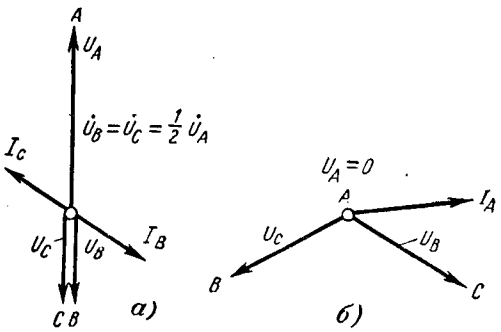


Рис. 11-36. Векторные диаграммы при к. з.
а — двухфазном; *б* — однофазном.

С учетом этого первая схема включения должна применяться как лучшая с точки зрения стабильности зон во всех дистанционных защитах, не требующих избирательного пуска.

Вторая схема (см. § 11-19, б, табл. 11-2) не обеспечивает стабильности зоны действия реле при разных видах к. з., но позволяет с некоторыми дополнениями обеспечить избирательность и поэтому применяется в тех защитах, где это свойство необходимо (например, в односистемных схемах).

Сама схема включения не дает достаточно четкой избирательности при двухфазных к. з. Так, например (рис. 11-36), при к. з. на фазах *B* и *C* должно работать реле, включенное на напряжение

U_{BC} и ток I_B. Однако при близких к. з. может также подействовать и реле, включенное на U_{CA} и I_C, поскольку $U_{CA} = 1{,}5U_{ф}$ (рис. 11-36, *а*), т. е. меньше нормального, равного $1{,}73U_{ф}$, а ток $I_C = I_{к.з}$. Для обеспечения четкой избирательности может вводиться взаимная блокировка между пусковыми реле (рис. 11-37).

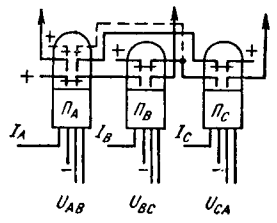


Рис. 11-37. Схема взаимной циклической блокировки пусковых реле сопротивления.

Контакты пусковых реле соединяются попарно, например $П_A$ и $П_B$, $П_B$ и $П_C$, $П_C$ и $П_A$, как показано на рис. 11-37. При такой схеме в случае двухфазного к. з. цепь пуска создается только одним реле, включенным на напряжение петли к. з. Так, при к. з. между фазами *B* и *C* сработает реле $П_B$, включенное на U_{BC} и ток I_B, и заблокирует действие реле $П_C$, которое питается током к. з., протекающим по фазе *C*, не позволяя ему сработать.

Однако при циклической блокировке защита не будет пускаться при трехфазном к. з., когда срабатывают три реле. Поэтому предусматривается, что одно из трех реле, например $П_C$, блокируется реле $П_B$ только при условии, что не работает реле $П_A$.

Благодаря этому реле $П_C$ будет работать при трехфазном к. з. и блокироваться при двухфазном к. з. на фазах *BC*. Во время двухфазного к. з. может сработать и третье реле сопротивления, включенное на ток неповрежденной фазы (например, при к. з. на *B* и *C* реле, питающееся током *A*), поскольку напряжение на этом реле также понижается (рис. 11-36). Для устранения этой опасности необходимо выбирать уставки реле так, чтобы они не действовали при токах нагрузки, если питающее реле напряжение снизится до $1{,}5\ U_{ф}$.

Ненаправленные пусковые реле сопротивления. Сопротивление срабатывания $z_{с.р}$ ненаправленных реле с круговой характеристикой *1* (рис. 11-38) одинаково при всех значениях $\varphi_р$.

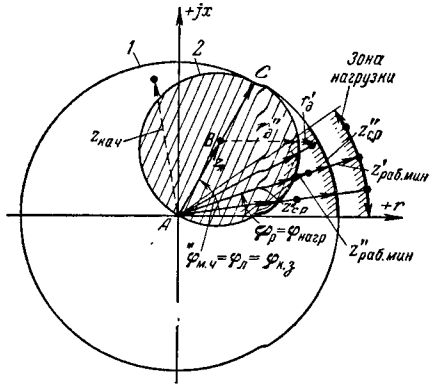


Рис. 11-38. Сравнение характеристик срабатывания направленного и ненаправленного реле сопротивления. Жирной линией и штриховкой отмечена зона расположения $z_{с.р}$ при $\varphi_р = \varphi_{нагр}$; *AB* — сопротивление защищаемой линии.

Благодаря этому реле с равной чувствительностью реагирует на нагрузку, качания и к. з., не учитывая углового различия вектора $z_р$ при этих режимах. Эта особенность реле ограничивает его применение в сетях высокого напряжения (110, 220 *кв* и больше).

Для исключения действия пускового реле в нормальном режиме и при перегрузках его сопротивление срабатывания $z''_{с.р}$ выбирается меньше минимального значения сопротивления $z'_{раб.мин}$, воз-

никающего на зажимах реле в рабочем режиме (рис. 11-38), т. е.

$$z''_{с.р} < z'_{раб.\ мин} = \frac{U_{раб.мин}}{I_{раб.макс}},$$

где $U_{раб.мин}$ — минимальное рабочее напряжение; $I_{раб.макс}$ — наибольший ток нагрузки.

Чем больше нагрузка, тем меньше чувствительность пускового реле при к. з. Поэтому на длинных линиях с большими нагрузками, где сопротивления на зажимах реле при повреждениях в конце линии и при максимальной нагрузке близки друг к другу по величине, реле с круговой характеристикой с центром в начале координат оказывается недостаточно чувствительным при к. з.

Характеристика ненаправленного реле весьма неудовлетворительна и по условиям качаний. Рабочая область реле охватывает все четыре квадранта комплексной плоскости. Реле действует во время качаний при всех значениях $z_{р.кач} < z_{с.р}$ независимо от угла $\varphi_р$.

Так как на длинных линиях пусковые реле имеют относительно большие сопротивления $z_{с.р}$, то реле на этих линиях оказываются очень восприимчивыми к качаниям. Таким образом, можно сделать вывод, что *ненаправленные реле не могут служить для защиты длинных и сильно нагруженных линий как по условиям чувствительности при к. з., так и по условиям отстройки от качаний.*

Ненаправленные реле применяются в качестве пусковых органов в сетях 35 *кв* и на недлинных и мало загруженных линиях в сети 110 *кв*.

По сравнению с токовыми пусковыми реле ненаправленное реле сопротивления отличается большей чувствительностью к к. з., так как оно реагирует не только на увеличение тока, но и на снижение напряжения.

Пусковые направленные реле сопротивления с круговой характеристикой. Характеристика *2* направленного реле (рис. 11-38) значительно лучше удовлетворяет требованиям, предъявляемым к пусковым реле, чем ненаправленное реле с характеристикой *1*. Это объясняется тем, что величина $z''_{с.р}$ направленного реле зависит от угла $\varphi_р$, а рабочая зона характеристики относительно невелика и расположена в основном в первом квадранте комплексной плоскости. Благодаря этому реле обладает при к. з. большей чувствительностью, чем при нагрузке, и в меньшей степени реагирует на качания.

Действительно, при металлических к. з. угол $\varphi_р$ сопротивления на зажимах реле $z_{р.к}$ равен углу сопротивления линии и составляет 65—80°, т. е. близок к $\varphi_{м.ч}$ реле. Поэтому при к. з. реле работает с наибольшей чувствительностью и зоной действия $z_{с.р} = z_{с.р.макс}$ (вектор AC).

В режиме нагрузки с передачей большой активной мощности по защищаемой линии угол сопротивления $z''_{раб.мин}$ меньше, чем при к. з., он колеблется в пределах 10—40°. При этих углах $z_{с.р}$ реле

уменьшается на 20—50% по отношению к $z_{с.р.макс}$, что следует из чертежа и уравнения срабатывания реле

$$z_{с.р} = z_{с.р.макс} \cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_р).$$

Такое загрубление реле при $\varphi_р = \varphi_{нагр}$ позволяет допускать большие нагрузки на линии по сравнению с ненаправленным реле. Это наглядно показано на рис. 11-38, где совмещены характеристики направленного и ненаправленного реле сопротивления *1* и *2*, обладающие одинаковой чувствительностью при к. з. (вектор AC).

При качаниях направленное реле сопротивления может действовать, только когда вектор $z_р = z_{кач}$ попадает в рабочую зону реле, которая в основном ограничена первым квадрантом. Если $z_{кач}$ находится за пределами первого квадранта, то работа реле невозможна. Таким образом, направленное реле отстроено от качаний значительно лучше, чем ненаправленное.

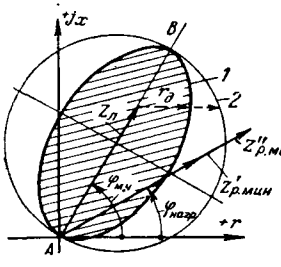


Рис. 11-39. Эллиптическая характеристика срабатывания и ее сравнение с круговой.

Недостатком направленного реле является мертвая зона по напряжению, так как реле не работает при $U_р = 0$ или значениях, близких к нему. Этот недостаток при двухфазных к. з. устраняется применением подпитки реле напряжением третьей фазы.

Для устранения мертвой зоны при трехфазных к. з. устанавливается токовая отсечка или производится смещение характеристики реле в сторону третьего квадранта, поскольку третья зона защиты работает последнее допустимо, с выдержкой времени.

При к. з. через сопротивление дуги $r_д$ направленное реле допускает меньшее сопротивление, чем ненаправленное, что видно из рис. 11-38 ($r''_д < r'_д$). Однако, как показывает опыт, чувствительность направленных реле оказывается достаточной для безотказного отключения повреждений с переходным сопротивлением.

Направленные реле с круговой характеристикой получили широкое применение в качестве пусковых органов в сетях 110—220—330—500 *кв*. Их применение особенно целесообразно на длинных и сильно загруженных линиях электропередачи.

Пусковые направленные реле с овальной и эллиптической характеристикой. Характеристика реле *1* показана на рис. 11-39, с ней совмещена для сравнения характеристика *2* направленного реле, имеющая вид окружности.

Обе характеристики имеют одинаковую зону действия (отрезок AB) при к. з. $\varphi_р = \varphi_{м.ч}$.

Но при $\varphi_р \neq \varphi_{м.ч}$ *реле с эллиптической характеристикой имеют меньшую область действия, чем реле с круговой характеристикой.* Поэтому они несколько лучше отстраиваются от нагрузки и имеют меньшую возможность срабатывания при качаниях.

Реле с эллиптической характеристикой допускают значительно меньшее переходное сопротивление $r_д$ в месте к. з., чем реле с круговой характеристикой. Это является недостатком эллиптической характеристики, который нужно учитывать при выборе малой оси эллипса. Реле имеет мертвую зону при двухфазных и трехфазных к. з., которая устраняется так же, как и у реле с круговой характеристикой.

г) Реле сопротивления с блокировкой, ограничивающей действие защиты при перегрузке

Еще большее улучшение характеристики пускового реле можно получить, применяя комбинированный пуск из направленного реле сопротивления и блокирующего реле сопротивления смешанного типа (рис. 11-40). Характеристика *2* реле смешанного типа выражается уравнением

$$z_{с.р} = \frac{k}{\cos(\varphi_р - \delta)}$$

и представляет собой прямую линию под углом $90° + \delta$ к оси r. Величина k в уравнении реле является проекцией векторов $z_{с.р}$ на перпендикуляр AM и имеет постоянное значение. На рис. 11-40 зона действия этого реле заштрихована. Блокирующее реле отсекает часть характеристики *1* реле сопротивления, не нужную для работы защиты при к. з. Благодаря этому вероятность неправильной работы при качаниях и перегрузке сводится к минимуму. Сочетанием направленного реле сопротивления и двух блокирующих реле, отсекающих правую и левую часть характеристики *1*, можно достигнуть дальнейшего улучшения характеристики пускового устройства.

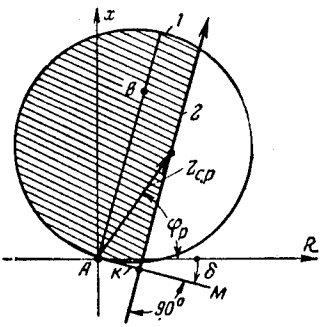


Рис. 11-40. Характеристика комбинированного пускового органа, состоящего из направленного реле сопротивления *1* и блокирующего реле сопротивления *2*.

В качестве блокирующего реле можно использовать обычные реле мощности с углом внутреннего сдвига 60 и 30°.

11-13. СХЕМЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

а) Классификация схем

Схемы дистанционных защит можно классифицировать по их назначению, типам дистанционных органов и принципам построения. По назначению схемы подразделяются на схемы защит от междуфазных к. з., от замыканий на землю и от всех видов повреждений. По типу дистанционных органов различаются схемы с дистанционными реле полного и реактивного

сопротивления. По виду характеристики схемы подразделяются на двухступенчатые и трехступенчатые, и, наконец, по способам построения схемы можно разделить в зависимости от числа дистанционных органов в каждой зоне защиты на три группы: трехсистемные (с тремя дистанционными органами на зону), двухсистемные (с двумя дистанционными органами) и односистемные (с одним дистанционным органом на зону).

В Советском Союзе применяются главным образом схемы с дистанционными органами полного сопротивления для защиты от междуфазных к. з. Дистанционные защиты от замыканий на землю в СССР не применяются, поскольку от этого вида повреждения в сети 110 *кв* и выше успешно используются более простые токовые направленные защиты нулевой последовательности со ступенчатой характеристикой.

Реактансные защиты вследствие сложности их схем и отсутствия существенных преимуществ распространения в СССР не получили.

б) Общие принципы выполнения схем дистанционных защит

Дистанционная защита может применяться в качестве основной защиты или резервной. В первом случае она должна выполняться трехступенчатой, обеспечивая посредством первой и второй зоны защиту линии с минимальными выдержками времени и с помощью третьей зоны — резервирование защиты следующего участка. Во втором случае защита выполняется трехступенчатой, если резервная защита должна дублировать основную защиту, и по упрощенному варианту с двумя или одной ступенью, если ее задача сводится к резервированию защиты следующего участка и основной защиты своей линии без соблюдения требования быстродействия.

В качестве дистанционных (измерительных) органов в современных схемах защит используются главным образом направленные реле с характеристикой в виде окружности или эллипса, проходящих через начало координат.

Перспективными являются реле с характеристикой в виде четырехугольника, изображенной на рис. 11-7, *е*. Как было показано в § 11-12, эти характеристики обеспечивают наибольшую чувствительность при к. з. и лучшую отстройку от токов нагрузки и качаний.

Ненаправленные дистанционные органы с круговой характеристикой в сочетании с органами направления мощности применяются в односистемных схемах для защиты сетей 35 *кв*. В целях упрощения для первой и второй зон, как правило, используется один комплект дистанционных органов с переключением уставки с первой на вторую зону (см. § 11-10, б).

В схемах дистанционных защит, установленных на участках сети, где возможны качания, при которых защита может сработать неправильно, предусматривается специальное блокирующее устройство (см. § 13-2), исключающее действие защиты в этом режиме.

Все реле сопротивления могут неправильно работать при исчезновении напряжения, вызванном неисправностями во вторичных цепях трансформаторов напряжения. Поэтому в схемах защиты предусматривается *блокировка* (см. § 6-4), *снимающая оперативный* ток с защиты в случае неисправности в цепях напряжения. При токовых пусковых органах блокировка не ставится, поскольку токовые пусковые органы не позволяют работать защите в нормальном режиме. В этом случае достаточно иметь сигнал об исчезновении напряжения в цепях защиты.

В Советском Союзе распространены трехсистемные и односистемные схемы. Трехсистемные защиты отличаются от односистемных большей простотой и четкостью схемы, большей надежностью и бы-

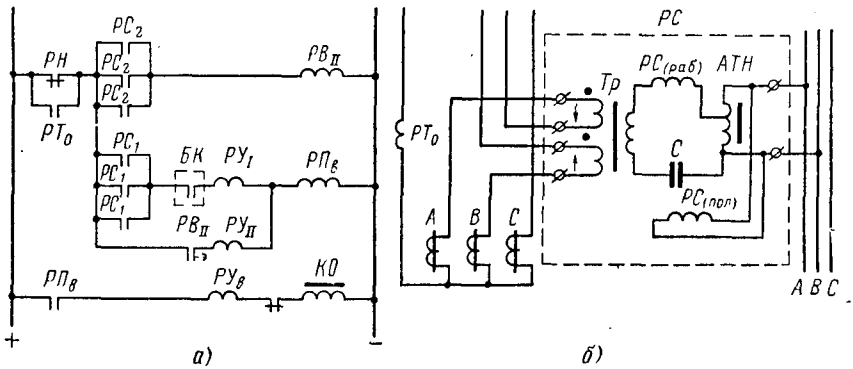


Рис. 11-41. Трехсистемная двухступенчатая дистанционная защита.

а — схема оперативных цепей; *б* — схема цепей переменного тока одного реле.

стротой действия вследствие отсутствия в них переключений в цепях тока и напряжения.

Трехсистемные схемы. В качестве примера, иллюстрирующего принцип выполнения трехсистемных защит, на рис. 11-41 приведена схема двухступенчатой дистанционной защиты. Схема имеет три направленных омметра первой зоны $РС_1$ и три таких же омметра второй зоны $РС_2$.

Омметры жестко включены на междуфазные напряжения и разность токов соответствующих фаз.

Поскольку защита выполняется без третьей зоны, а ее дистанционные реле обладают направленностью, отстроены от нагрузки и не требуют никаких переключений в своих цепях, пусковые реле и реле направления мощности становятся излишними и поэтому эти органы в рассматриваемой схеме отсутствуют. Схема оперативных цепей защиты (рис. 11-41, *а*) очень проста. При к. з. в пределах первой зоны дистанционные реле $РС_1$ соответствующих фаз приходят в действие и замыкают цепь выходного промежуточного реле $РП_в$, последнее срабатывает, подавая импульс на отключение выключателя.

При к. з. во второй зоне действуют дистанционные органы $РС_2$, пуская реле времени $РВ_{II}$. По истечении установленной на нем выдержки времени контакты $РВ_{II}$ замыкаются и замыкают цепь реле $РП_в$. При действии защиты выпадают флажки соответствующих указательных реле: $РУ_I$ или $РУ_{II}$ и $РУ_в$.

Во избежание неправильного действия защиты при обрыве в цепях напряжения, питающих омметры, в схеме предусмотрена блокировка при помощи реле

РН. При повреждении в цепях напряжения реле *РН* выводит защиту из действия, снимая с нее плюс. Реле *РН* реагирует и на к. з. с землей в первичной сети; чтобы сохранить защиту в действии при подобных повреждениях, установлено реле $РТ_0$, питающееся током нулевой последовательности. При замыканиях на землю реле $РТ_0$ шунтирует контакты реле *РН*, сохраняя, таким образом, плюс на защите (см. гл. 6).

Блокировка защиты при качаниях осуществляется контактами *БК*, замыкающимися только при к. з. Схема цепей переменного тока защиты приведена на рис. 11-41, *б*. На схеме показан один дистанционный орган типа КРС-131, включенный на $\dot{U}_р = \dot{U}_{AB}$ и $\dot{I}_р = \dot{I}_A - \dot{I}_B$; остальные включаются аналогично.

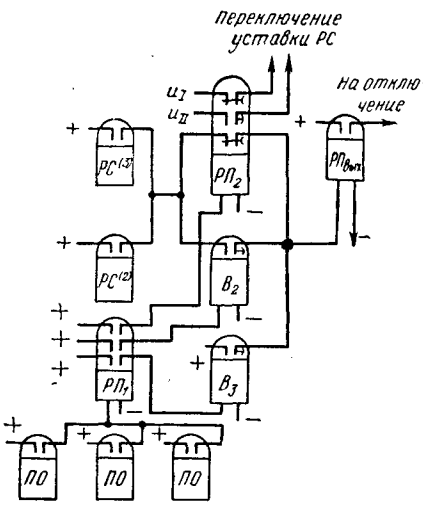


Рис. 11-42. Упрощенная схема двухсистемной защиты типа ПЗ-158. Блокировки от качаний и исчезновения напряжения не показаны.

В [Л. 81] рассмотрена защита ПЗ-2, предназначенная для сетей 110—330 *кв*. Защита состоит из двухступенчатой защиты ДЗ-2, к которой добавлена третья ступень, выполненная с помощью трех направленных реле сопротивления КРС-1. Защита имеет три направленных дистанционных органа, построенных на схемах сравнения на выпрямленном токе.

Двухсистемные схемы (рис. 1-42). В Советском Союзе была разработана и широко применялась двухсистемная схема дистанционной защиты типа ПЗ-158 и ПЗ-159. В этой схеме один дистанционный орган $РС^{(3)}$ (КРС-131) служил для определения удаленности к. з. при трехфазных к. з. и второй $РС^{(2)}$ типа КРС-121 для действия при двухфазных к. з. Цепи тока и напряжения подводились к обоим реле жестко без переключений.

В качестве пусковых реле *ПО* и дистанционного органа третьей зоны использовались направленные реле сопротивления КРС-131. Защита имела блокировку от качаний и блокировку от исчезновения напряжения. Упрощенная схема защиты приведена на рис. 11-42.

Односистемные защиты. Завод ЧЭАЗ выпускает односистемную защиту типа ПЗ-1 с реле мощности и сопротивления на выпрямленных токах. Защита предназначена для сети 35 *кв*. Она имеет токовые пусковые реле, один дистанционный орган, выполненный по схеме сравнения, на выпрямленном токе и орган направления мощности на кольцевой фазочувствительной схеме. Ток и напряжение к дистанционному органу и органу направления мощности подводятся с помощью промежуточных реле, управляемых токовыми пусковыми реле защиты. Защита имеет три ступени времени.

Схема защиты подробно рассматривается в [Л. 81 и 97].

11-14. СХЕМЫ ЗАЩИТ НА ПОЛУПРОВОДНИКАХ

а) Преимущества бесконтактных схем

Любая защита состоит из реагирующих (измерительных) органов *ИО* и логической части *ЛЧ*, на выходе которой устанавливается выходное реле $Р_{вых}$, посылающее команду на отключение выключателя (рис. 11-43).

В защитах на полупроводниках с помощью последних выполняются как реагирующие элементы, так и логическая часть, в результате чего схема защиты получается бесконтактной.

Бесконтактные схемы, выполненные на надежных элементах, обладают большей надежностью и требуют меньшего ухода, чем многоконтактные схемы с электромеханическими реле. Этими принципиальными преимуществами бесконтактных схем объясняется имеющаяся тенденция к их внедрению в релейной защите.

Устройство основных реагирующих органов на полупроводниках (реле тока, мощности, сопротивления) было разобрано выше. Теперь кратко рассмотрим общие вопросы по выполнению логической части схем с помощью полупроводниковых элементов.

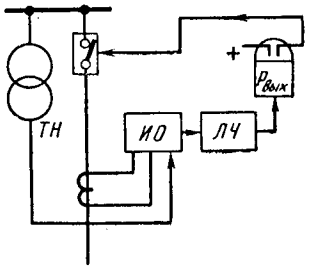


Рис. 11-43. Структурная схема релейной защиты.

б) Логические элементы и выполняемые ими операции в схемах защиты

Логическая часть защиты воспринимает сигналы основных органов, реагирующих на состояние сети, и по определенной предусмотренной схемой программе в зависимости от характера и сочетания поступивших сигналов производит операции, обеспечивая действие или недействие защиты.

Логическую часть сложных защит можно подразделить на несколько составных элементов, выполняющих отдельные простейшие операции. На вход такого простейшего логического элемента *ЛЭ*, условно изображенного на рис. 11-44, подаются сигналы, которые при определенном сочетании вызывают появление выходного сигнала. Под сигналами в бесконтактных схемах на полупроводниках подразумевается появление или изменение напряжения на зажимах логических элементов. Если логический элемент не работает, то напряжение на его выходе $U_{вых}$ равно нулю или меньше заданного значения $U_{с.р}$. При действии элемента $U_{вых} \neq 0$ или больше $U_{с.р}$. Обычно каждый сигнал обозначается определенной буквой и ему приписываются два условных цифровых значения: 0 и 1. Нуль означает отсутствие сигнала, а единица — его появление.

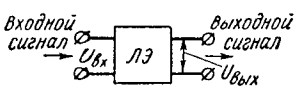


Рис. 11-44. Логический элемент.

Такое обозначение используется для условной записи логических функций, характеризующих зависимость выходного сигнала от входных [Л. 82—87]. Для облегчения проектирования разработана теория проектирования и анализа сложных логических схем,

основанная на использовании математических дисциплин, в частности алгебры логики.

Логические схемы релейной защиты относительно просты и пока не требовали применения подобных методов анализа. Однако наименование основных логических операций и формы их записи были заимствованы из алгебры логики и стали применяться при рассмотрении бесконтактных схем защиты.

В схемах релейной защиты используются в основном три простейших логических операции, условно названные (как и в алгебре логики) ИЛИ, И, НЕ.

Каждая из этих операций может выполняться с помощью контактных и бесконтактных элементов.

Схема, осуществляющая операцию ИЛИ, показана на рис. 11-45. Сигналы на входе обозначены *А*, *В* и *С*, а выходной сигнал — буквой *Х*. Сигнал *Х* на выходе схемы *ИЛИ* возникает при появлении хотя бы одного входного сигнала: или *А*, или *В*, или *С*.

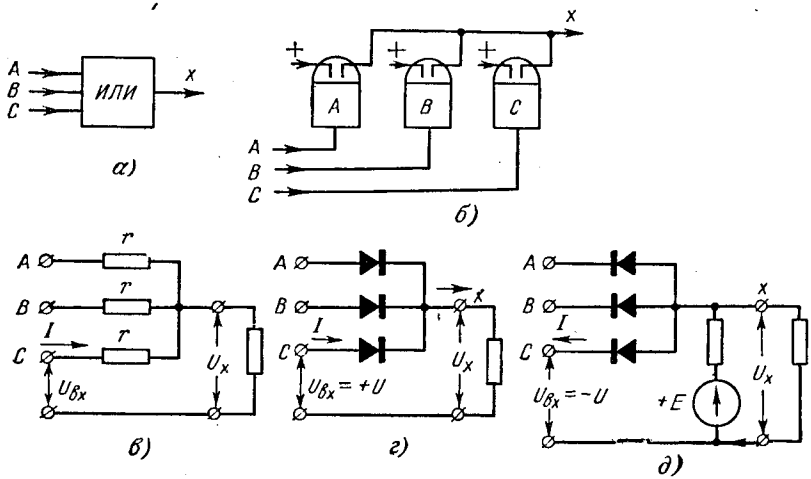


Рис. 11-45. Логическая схема *ИЛИ*.

а — условное изображение; *б* — контактная схема; *в* — на активных сопротивлениях; *г* и *д* — на полупроводниковых диодах.

На рис. 11-45, *б* приведена контактная схема, выполняющая операцию *ИЛИ*. Контакты электромеханических реле *А*, *В* и *С* соединяются в этом случае параллельно. При срабатывании любого из них появляется выходной сигнал, поступающий на следующий элемент схемы. В защите эта операция очень распространена. Например, по схеме *ИЛИ* выполняется пуск любой защиты (рис. 11-45, *б*). В этом случае реле *А*, *В*, *С* являются пусковыми.

Бесконтактная схема *ИЛИ* применяется в аналогичных случаях и может выполняться с помощью активных сопротивлений, диодов или триодов. Схема *ИЛИ* на активных сопротив-

лениях r показана на рис. 11-45, *в*. При отсутствии напряжения $U_{вх}$, или, иначе говоря, входных сигналов на зажимах A, B и C сопротивлений r, напряжение $U_X = 0$. Это означает, что выходного сигнала нет.

При подаче напряжения $U_{вх}$ хотя бы на один входной зажим A, или B, или C появляется напряжение $U_X = U_{вх} - Ir$, т. е. возникает выходной сигнал.

Схема с диодами (рис. 11-45, *г*) работает аналогично. При отсутствии входных сигналов выходной сигнал U_X также отсутствует. В случае появления положительного сигнала (напряжения) на одном из диодов A, или B, или C последний открывается и на его выходе в точке X возникает положительный сигнал $U_X = U_{вх} - I_д r_д$, где $I_д$ и $r_д$ — ток и сопротивление открытого диода.

На рис. 11-45, *д* приведена схема *ИЛИ* на диодах, применяемая в тех случаях, когда в точке X нормально дежурит положительное напряжение $+E$. Подобные условия имеют место, если элемент *ИЛИ* подает сигнал на триод усилителя. При подаче отрицательного напряжения $U_{вх}$ на один из зажимов A, или B, или C соответствующий диод открывается и на выходе схемы (на зажиме X) появляется отрицательное напряжение $U_X = U_{вх} - I_д r_д$. Во всех рассмотренных схемах в сопротивлении элемента *ИЛИ* (r или $r_д$) теряется часть энергии, подводимой к входу элемента. За счет этого мощность выходного сигнала получается меньше входного, происходит ослабление сигнала.

Схемы на триодах не рассматриваются, так как они применяются редко.

В алгебре логики операция *ИЛИ* называется также логической суммой и обозначается знаком «+» или $\vee$. Она записывается в общем виде уравнением: $A + B + C = X$, где «+» читается как ИЛИ. Условное изображение элемента *ИЛИ*, применяемое в структурных схемах, приведено на рис. 11-45, *а*.

Схемы, выполняющие операцию И (рис. 11-46). Сигнал X на выходе этой схемы возникает только при одновременном появлении сигналов на всех входах схемы (A и B на рис. 11-46). Подобная опе-

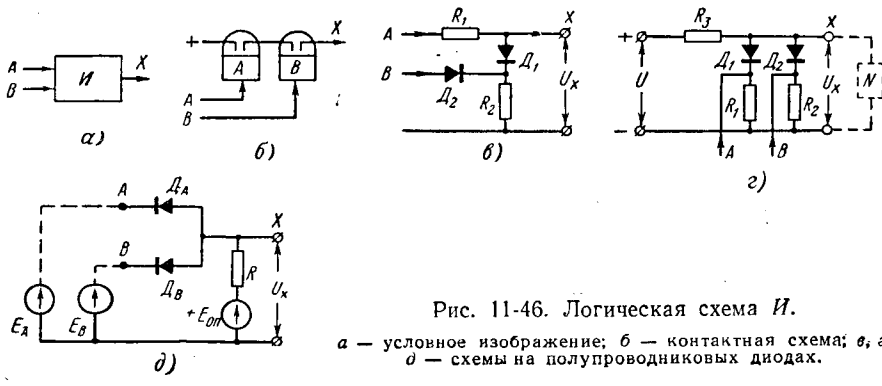


Рис. 11-46. Логическая схема *И*.

а — условное изображение; *б* — контактная схема; *в*, *г*, *д* — схемы на полупроводниковых диодах.

рация имеет место, например, в схеме максимальной направленной защиты, которая посылает импульс на реле времени, если сработает токовое реле *И* реле мощности, или в схеме дистанционной защиты, которая приходит в действие, если сработает пусковой орган защиты *И* дистанционный, и т. д.

В контактных схемах операция *И* выполняется последовательным соединением контактов реле *А* и *В* (рис. 11-46, *б*).

Схема *И* с двумя входными сигналами *А* и *В*, построенная на диодах, показана на рис. 11-46, *в*. Нормально сигналы *А* и *В* отсутствуют. При появлении сигнала *А* в виде положительного напряжения U диод $Д_1$ открывается и по сопротивлениям R_1, R_2 проходит ток.

Потенциал точки *Х* равен падению напряжения на R_2, его величина мала и недостаточна для приведения в действие элемента, подключенного к выходу схемы *Х*.

При появлении только сигнала *В* диод $Д_1$ закрыт и не пропускает сигнал *В* в точку *Х*. Если же сигналы *А* и *В* появятся одновременно, то сигнал *В* закроет диод $Д_1$, высокий положительный потенциал от сигнала *А* попадет в точку *Х* и поступит на элемент, подключенный к выходу схемы.

Аналогично работает второй вариант схемы *И*, изображенной на рис. 11-46, *г*. При отсутствии сигналов *А* и *В* диоды $Д_1$ и $Д_2$ открыты. Выходное напряжение U_X равно падению напряжения в R_1 и R_2, оно близко к нулю и недостаточно для действия элемента, подсоединенного к выходу схемы. При появлении одного из сигналов (*А* или *В*) напряжение U_X не меняется. Если же появятся два положительных сигнала *А* и *В*, то оба диода закроются и на выходе схемы появится напряжение $U_X = U$, достаточное для действия элемента *N*.

В третьем варианте (рис. 11-46, *д*) напряжение U_X на выходе схемы (в точке *Х*) появляется только при условии, что на все входные зажимы схемы *А* и *В* поданы напряжения положительного знака: E_A и $E_B > E_{оп}$. При появлении только одного сигнала, например E_A, диод $Д_B$, не имеющий сигнала, под действием $E_{оп}$ шунтирует выходные зажимы $X - 0$, поэтому напряжение $U_X = 0$ и выходной сигнал отсутствует.

Условное изображение схемы *И* показано на рис. 11-46, *а*. В алгебре логики операция *И* рассматривается как логическое умножение, обозначаемое знаком $\times$ или $\wedge$.

Условная запись этой операции имеет вид: $A \times B = X$, где знак умножения $\times$ читается как *И*.

Схема, выполняющая операцию *НЕ* (рис. 11-47). При отсутствии входного сигнала *А* на выходе схемы имеется сигнал *Х*, при появлении входного сигнала *А* сигнал на выходе схемы исчезает. Сигнал *Х* будет, если не будет сигнала *А*.

Примером операции *НЕ* может служить схема блокировки защиты от исчезновения напряжения (рис. 11-47, *б*). Нормально через замкнутые контакты реле *Н* на защиту подается плюс. В случае

обрыва цепи напряжения (появляется сигнал A) реле H срабатывает, его контакты размыкаются и снимают плюс с защиты.

Аналогичная операция в бесконтактных схемах имеет много вариантов исполнения. На рис. 11-47, *в* показана одна из схем *НЕ*, выполняемая с помощью триода T. Нормально на базу подано положительное смещение. Триод T закрыт. На выходе схемы X поддерживается отрицательное напряжение, поступающее через R_2. При подаче на вход схемы A отрицательного сигнала триод открывается и шунтирует выход схемы. Напряжение в точке X падает до нуля (если принять, что сопротивление открытого триода $R = 0$). Условное изображение схемы *НЕ* показано на рис. 11-47.

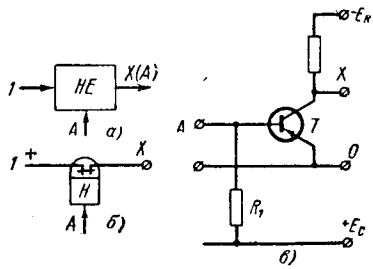


Рис. 11-47. Логическая схема *НЕ*.

а — условное изображение; *б* — контактная схема; *в* — схема на триоде.

В алгебре логики операция *НЕ* называется логическим отрицанием или инверсией и записывается в виде уравнения $X = \bar{A}$.

Элемент *НЕ* преобразует поступающий на вход сигнал на обратный по величине и знаку. Например, если на входе, т. е. на базе триода, сигнал отсутствует и положительным смещением триод заперт, то напряжение на выходе триода эмиттер—коллектор отлично от нуля, а зажим X, имеет отрицательный знак. Если же на вход подан отрицательный потенциал $U_A \geqslant E_C$, то триод открыт, напряжение эмиттер-коллектор равно нулю и зажим имеет положительный потенциал, т. е. обратный входному. Это свойство элемента *НЕ*, выполненного на триоде, называют инвертированием сигнала, а сам элемент *НЕ* — инвертором. Такое название нельзя считать точным, так как в электротехнике инвертором называют устройство, преобразующее постоянный ток в переменный.

в) Дополнительные элементы логических схем

Кроме основных логических элементов *ИЛИ*, *И*, *НЕ* имеются дополнительные элементы. В качестве дополнительных элементов логических схем применяются: усилители сигналов; элементы замедления на срабатывание и возврат (осуществляющие функции реле времени и промежуточных реле замедленного действия); релейные элементы, реагирующие на появление сигнала; элементы памяти.

Усилители служат для увеличения мощности выходных сигналов до значения, необходимого для надежного действия элементов схемы, реагирующих на этот сигнал. Усилители применяются на выходе схем сравнения измерительных органов для обеспечения

надежной работы реагирующего элемента и на выходе логических схем (ИЛИ и И) в активных сопротивлениях, в которых, как указывалось выше, теряется значительная мощность приходящих сигналов.

В логических схемах обычно используются однокаскадные усилители с нормально открытым или закрытым транзистором. Для

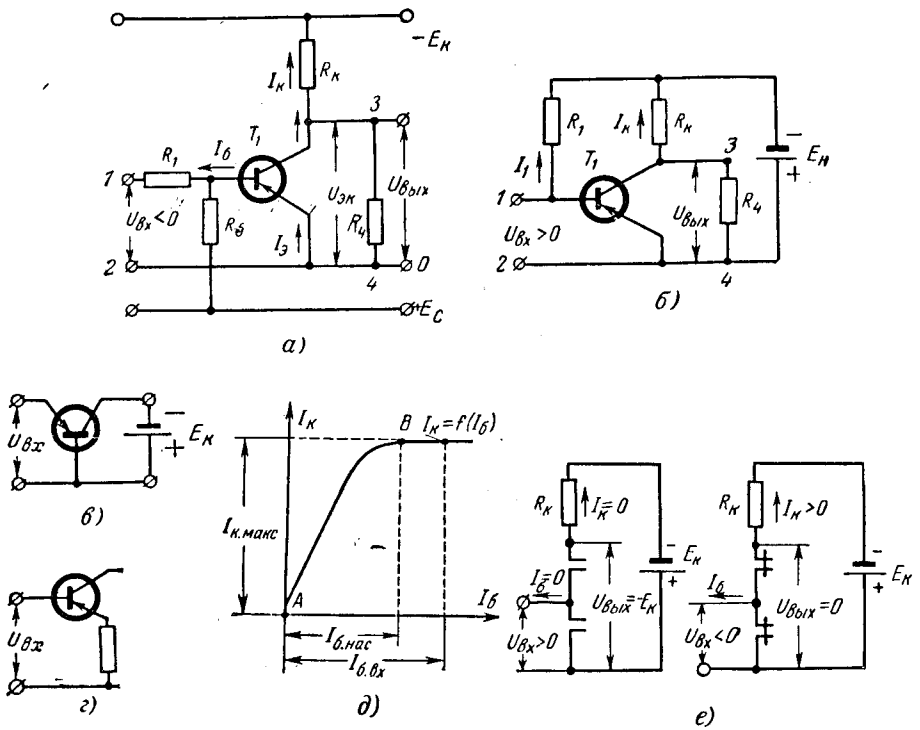


Рис. 11-48. Однокаскадный усилитель мощности.

а — с нормально открытым триодом типа *p-n-p*; *б* — с нормально закрытым триодом типа *p-n-p*; *в* — схема включения триода по схеме с общим эмиттером; *г* — с общим коллектором; *д* — характеристика триода $I_к = f(I_б)$; *е* — схема работы триода в ключевом режиме.

усиления сигнала в измерительных органах в большинстве случаев применяются двух- и трехкаскадные усилители.

Однокаскадный усилитель с нормально закрытым транзистором T_1 показан на рис. 11-48, *а*. Транзистор T_1 включен по схеме с общим эмиттером [1], так как эта схема по сравнению со схемами с общей базой и общим коллектором (рис. 11-48, *в* и *г*) обеспечивает наибольший коэффициент усиления по мощности.

[1] В этой схеме эмиттер непосредственно связан как с входным *2*, так и с выходным зажимом *4* триода, т. е. является общим выводом схемы. Потенциал общего вывода условно принимается равным нулю.

На входные зажимы *1* и *2* (база — эмиттер) подается положительное относительно эмиттера напряжение смещения $+E_c$ и управляющий сигнал $U_{вх}$, противоположный по отношению к E_c полярности (рис. 11-48, *а*). Результирующее напряжение база — эмиттер

$$U_б = E_c - U_{вх}. \qquad (11\text{-}45)$$

Коллектор транзистора с проводимостью *p-n-p* должен получать отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал — $E_к$, напряжение между коллектором и эмиттером $U_{э.к}$ является выходным напряжением усилителя и, как видно из схемы, равно:

$$U_{э.к} = U_{вых} = E_к - I_к R_к. \qquad (11\text{-}46)$$

При $U_{вх} = 0$ на базу подается положительное смещение E_c, запирающее триод. В этом случае ток коллектора, питающий нагрузку, $I_к = 0$, а коллекторное напряжение $U_к = -E_к$ (при этом потенциал точки *3* имеет отрицательный знак).

При появлении входного сигнала $U_{вх} > E_c$ напряжение на базе (база — эмиттер) согласно (11-45) становится отрицательным, триод T_1 открывается, в нагрузке $R_к$ появляется ток коллектора $I_к$, выходное напряжение согласно (11-46) уменьшается и в пределе при полном открытии триода становится равным нулю, если пренебречь очень малым внутренним сопротивлением открытого триода. Величина коллекторного тока $I_к$ будет меняться с изменением тока базы $I_б$ (или напряжения базы $U_б$) (рис. 11-48, *д*).

Эта характеристика показывает, что при $I_б = I_{б.нас}$ ток $I_к$ достигает максимального значения ($I_{к.макс} = E_к/R_к$) и при дальнейшем росте $I_б$ не изменяется. Точке *B* соответствует (рис. 11-48, *д*) полное открытие триода. Этот режим называется режимом «насыщения».

Начальной точке кривой *A* соответствует полное закрытие триода. Этот режим работы триода называется режимом «отсечки». В промежутке между точками *A* и *B* триод работает в режиме усиления. Усиление тока, осуществляемое усилителем, характеризуется коэффициентом усиления тока $\beta = I_к/I_б$. Величина β в зависимости от типа триода лежит в пределах от 10 до 100. Усиление по мощности определяется отношением выходной мощности $P_{вых} = I_к^2 R_к$ к входной $P_{вх} = I_б^2 R_б$; с учетом, что $I_к = \beta I_б$, получим коэффициент усиления по мощности:

$$k_м = \frac{P_{вых}}{P_{вх}} = \beta^2 \frac{R_к}{R_б}.$$

Различают два режима работы усилителя: режим линейного усиления, при котором триод работает на участке *AB* кривой $I_к = f(I_б)$, и ключевой режим, когда триод нормально закрыт, а при появлении входного сигнала $U_{вх}$, которому соответствует $I_б > I_{б.нас}$, скачком переходит в режим насыщения и полностью открывается (рис. 11-48, *д*).

В этом режиме триод работает как ключ или контактное реле, замыкающее и размыкающее цепь нагрузки (рис. 11-48, *е*). Поэтому такой режим работы усилителя называется ключевым или релейным. В схемах релейной защиты усилители обычно работают в ключевом режиме. Параметры усилителя, работающего в ключевом режиме, подбираются так, чтобы при появлении входного сигнала $U_{вх}$ (рис. 11-48, *д*) триод полностью открывался и давал на выходе ток $I_{к.макс}$.

Усилитель с нормально открытым триодом показан на рис. 11-48, *б*. Нормально при отсутствии входного сигнала ($U_{вх} = 0$) триод T_1 открыт отрицательным напряжением (током), поданным через сопротивление R_1 на базу триода. Сопротивление триода в этом режиме равно нулю, и поэтому нагрузка $R_н$, подключенная на выходные зажимы *3* и *4*, зашунтирована.

При появлении положительного сигнала, достаточного для закрытия триода, последний закрывается, нагрузка дешунтируется и на ней появляется напряжение $U_{вых} = \frac{E_к R_н}{R_к + R_н}$ и ток $I_н = U_{вых}/R_н$.

Двухкаскадные усилители. Принцип выполнения и работа двухкаскадного усилителя были рассмотрены в § 2.

Триггер [1]. В бесконтактных схемах релейной защиты находят применение двухкаскадные усилители с положительной обратной связью, работающие в релейном режиме. Такие схемы, называемые триггерами, переходят из состояния недействия ($U_{вых} = 0$) в состояние работы ($U_{вых} = U$) мгновенно (скачкообразно), если входное напряжение достигает определенного значения: $U_{вх} \geqslant U_{с.р}$. При снижении $U_{вх}$ до $U_{воз}$ выходное напряжение $U_{вых}$ мгновенно падает до нуля и схема возвращается в исходное состояние.

Такая схема работает как обычное электромеханическое реле. Наряду с подобными самовозвращающимися схемами, называемыми схемами с одним устойчивым состоянием, применяются триггерные схемы с двумя устойчивыми состояниями, действующие так же, как и предыдущая схема. Она мгновенно переходит в новое состояние при появлении $U_{вх} \geqslant U_{с.р}$, но остается в новом положении как угодно долго, пока не появится новый сигнал, возвращающий ее в первоначальное состояние. Подобные схемы позволяют фиксировать появление сигнала, «запомнить» его.

Имеется и третья разновидность — это схема с одним устойчивым состоянием, возвращающаяся в начальное положение через определенное время $t_{воз}$. Такие схемы используются в качестве элемента с замедленным возвратом, фиксирующего на некоторое время появление сигнала.

На рис. 11-49, *а* и *б* приведены схема и характеристика работы триггера с одним устойчивым состоянием и самовозвратом, выпол-

[1] Триггер — (trigger), английское слово, означающее в переводе спусковое устройство, курок (ружья); образно характеризует принцип действия схемы.

няющего функции бесконтактного реле, т. е. работающего как обычное реле. При $U_{вх} = 0$ триод T_1 закрыт, а T_2 открыт. $U_{вых}$ на зажимах mn мало ($U'_э$). Через общее для обоих триодов эмиттерное сопротивление R_7 подается ток к эмиттеру T_2. Ток $I_{э2}$ создает падение напряжения $U_э = I_{э2}R_7U'_э$.

Принимая внутреннее сопротивление открытого триода равным нулю, можно считать, что выходное напряжение триггера $U_{вых} = U'_э$. Это напряжение мало и соответствует отсутствию выходного сигнала. Напряжение $U'_э$ через цепь сопротивлений R_6, R_1, R_2 приложено между эмиттером и базой триода T_1, запирая последний. Если входной сигнал $U_{вх} \geqslant U_{с.р}$ (точка *2* на рис. 11-49, *б*), то триод T_1 начинает открываться, при этом отрицательный потенциал, подаваемый через сопротивление R_3 на коллектор T_1 и на базу T_2,

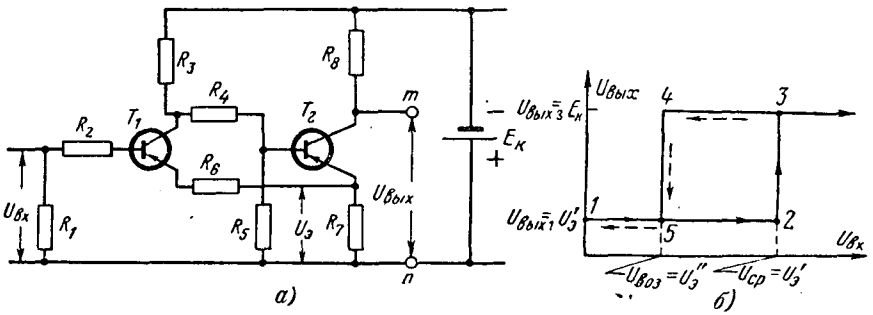


Рис. 11-49. Двухкаскадный усилитель, работающий в релейном режиме (триггер).
а — схема; *б* — диаграмма работы.

начинает уменьшаться. Вследствие этого триод T_2 начинает закрываться, ток эмиттера $I_{э2}$ уменьшается, что влечет за собой уменьшение $U_э$, определяющее смещение на базе T_1. Это способствует открытию триода T_1 и закрытию триода T_2 из-за снижения отрицательного потенциала на базе последнего. Процесс протекает лавинообразно и завершается полным открытием T_1 и закрытием T_2.

В результате закрытия T_2 $U_{вых}$ скачком увеличивается до $E_к$ (точка *3* на рис. 11-49, *б*). Триггер сработал. Дальнейшее увеличение $U_{вх} > U_{с.р}$ не изменит $U_{вых}$, так как оно достигло своего предельного значения $E_к$. При уменьшении $U_{вх}$, подводимого к базе T_1 до $U_{воз} \approx U''_э = I_{э1}R_7$, потенциал базы T_1 становится положительным и триод T_1 начинает закрываться. В результате этого потенциал на базе T_2 начинает уменьшаться, вызывая открытие T_2. Как и в предыдущем случае, процесс нарастает лавинообразно, завершаясь закрытием T_1 и открытием T_2. Выходное напряжение $U_{вых}$ скачкообразно падает до $U'_э$ и схема возвращается в начальное состояние.

Лавинообразный процесс закрытия и открытия триодов происходит практически мгновенно, т. е. скачком, как это требуется от устройства, работающего в релейном режиме.

Характеристика триггера на рис. 11-49, *б* является типовой характеристикой бесконтактного реле. При увеличении входного напряжения от нуля до $U_{с.р} = U'_э$ выходное напряжение скачком изменяется от $U_{вых1}$ до предельного значения $U_{вых3} = E_к$ и реле срабатывает. Напряжение, при котором происходит скачкообразное увеличение выходного напряжения, называется напряжением срабатывания бесконтактного реле. При уменьшении входного напряжения от $U_{с.р}$ до $U_{воз} = U''_э$ выходное напряжение скачком падает от $U_{вых3}$ до $U_{вых1}$ (точка *5*); это означает, что бесконтактное реле вернулось в начальное положение. Соответствующее этому входное напряжение $U''_э$ называется напряжением возврата бесконтактного реле.

г) Логические схемы на типовых элементах

По условию производства, конструирования и эксплуатации целесообразна типизация логических схем и выполнение их на унифицированных типовых элементах. В этом направлении ведутся разработки, в частности для промышленной автоматики предложена серия логических элементов [Л. 54, 82] системы ЛОГИКА. Эти серии могут использоваться и в устройствах релейной защиты. В качестве основного типового элемента в серии Т системы ЛОГИКА принят элемент, построенный на сочетании двух логических схем *ИЛИ* и *НЕ*. С учетом, что схема *НЕ* осуществляет инверсию сигнала, такой типовой элемент называется также «ИЛИ с инверсией».

Схема *ИЛИ* выполнена на активных сопротивлениях R, а схема *НЕ* — на полупроводниковом триоде типа *p-n-p*. Все остальные элементы логических схем выполняются в виде различных сочетаний этого типового элемента.

Схема элемента *ИЛИ — НЕ* приведена на рис. 11-50,*а*. Здесь показано два элемента *ИЛИ — НЕ 1* и *2*. На вход *А*, *В*, *С* элемента *1* подается сигнал отрицательного знака по отношению к общей точке схемы *0* ($U_{вх} < 0$). При отсутствии сигнала $U_{вх} = 0$, на базу триода T_1 подано положительное напряжение смещения $+E_{см}$, триод T_1 заперт и на его выходе имеется напряжение $U_{вых} = U_к = -E_к$.

При появлении отрицательного сигнала $U_{вх} > E_{см}$ триод T_1 открывается и $U_{вых} = 0$. Такой элемент *ИЛИ — НЕ* обладает важной особенностью. При подаче на его вход сигнала $U_{вх}$, условно принимаемого равным 1, выходной сигнал отсутствует, $U_{вых} = 0$, а при входном сигнале $U_{вх} = 0$ выходной сигнал отличен от нуля (или условно $U_{вых} = 1$). Эта особенность должна учитываться при образовании логических схем *ИЛИ*, *И*, *НЕ* путем сочетания типовых элементов «*ИЛИ с инверсией*».

Так, для осуществления логической операции *ИЛИ* необходимо соединить последовательно два элемента *ИЛИ — НЕ* (элемент *1* и элемент *2* на рис. 11-50). Тогда при подаче на зажимы *А*, или *В*, или *С* элемента *1* отрицательного сигнала

— $U_{вх}$ триод T_1 открывается, а триод T_2 закрывается, в результате чего на выходе элемента *2* появляется сигнал $U_{вых} = E_к$. При $U_{вх} = 0$ сигнал на выходе элемента *1* равен 1, а на выходе элемента *2* равен 0. Таким образом, рассмотренное сочетание двух элементов *ИЛИ — НЕ* действует как логическая схема *ИЛИ*, при этом нали-

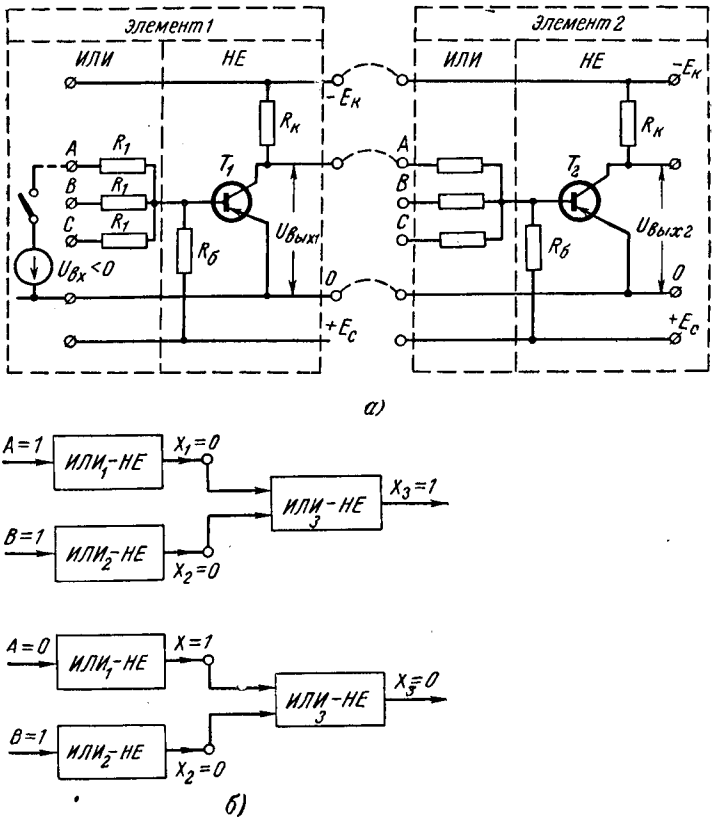


Рис. 11-50. Логические схемы на типовых элементах *ИЛИ — НЕ*.

а — схема *ИЛИ* с усилением сигнала; *б* — варианты логических схем на элементах *ИЛИ — НЕ*.

чие триодов позволяет усилить сигнал элемента *ИЛИ*, компенсируя ослабление входного сигнала в сопротивлениях R схемы.

Логическая операция *И* для двух сигналов *A* и *B* осуществляется путем соединения элементов *ИЛИ — НЕ* по схеме 11-50, *б*. В этой схеме каждый элемент *1* и *2* преобразует входные сигналы, равные 1, в сигнал, равный 0, а элемент *3* преобразует 0 на выходе в сигнал, равный 1. Выходы триодов элементов *1* и *2* соединены параллельно, поэтому входной сигнал на элементе *3*

равен 0 только при условии, что выходные сигналы элемента *1* и элемента *2* равны 1. В этом случае на выходе элемента *3* появится сигнал, равный 1. Если же хотя бы на одном из элементов *1* или *2* сигнал равен 0, то сигнал на входе элемента *3* равен 1, а на выходе элемента *3* — 0.

Элементы серии Т системы ЛОГИКА следует рассматривать как пример типовых элементов. Окончательных общепринятых типовых элементов пока еще не создано.

Элементы выдержки времени. В качестве элемента выдержки времени в схемах на полупроводниках применяются конденсаторные реле времени, в которых для создания выдержки времени $t_р$ используется продолжительность заряда (или разряда) конденсатора C, включенного последовательно с активным сопротивлением R.

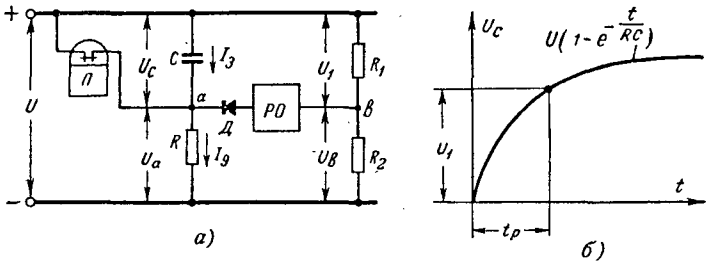


Рис. 11-51. Принципиальная схема конденсаторного реле времени.
а — схема реле; *б* — зависимость $U_C = f(t)$.

Принцип устройства реле времени, основанного на заряде конденсатора, показан на рис. 11-51. Реле состоит из зарядной цепи RC, делителя напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 и реагирующего органа (нуль-индикатора) *РО*, включенного между точками *а* и *b* через диод *Д*. Нормально конденсатор зашунтирован пусковым устройством *П*, напряжение $U_C = 0$, при этом потенциал точки *а* больше потенциала точки *в* ($U_a > U_в$), поэтому диод *Д* заперт и ток в *РО* отсутствует.

При появлении сигнала на входе реле времени пусковое устройство *П* срабатывает и дешунтирует конденсатор C, после чего он начинает заряжаться током $I_З$, протекающим по контуру RC. При этом напряжение U_C растет по экспоненциальному закону:

$$U_C = U\left(1 - e^{\frac{t}{\tau}}\right), \qquad (11\text{-}47)$$

где τ — постоянная времени, равная RC.

Графически зависимость $U_C = f(t)$ показана на рис. 11-51, *б*. По мере заряда конденсатора потенциал в точке *а* приближается к потенциалу точки *в*. Когда U_C достигнет напряжения на сопротивлении R_1 делителя напряжения (U_1 на рис. 11-51, *б*), потенциалы точек *а* и *в* уравниваются, а затем U_a станет меньше $U_в$, тогда диод *Д*

откроется и реагирующий орган сработает. Время, в течение которого конденсатор C заряжается до напряжения точки $в$ делителя, является выдержкой времени реле ($t_р$), а $U_C = U_в = U_{с.р}$.

Аналитически значение $t_р$ можно получить из (11-47):

$$t_р = RC \ln \frac{U}{U - U_{с.р}}. \qquad (11\text{-}48)$$

Из (11-48) и рис. 11-51, *б* следует, что $t_р$ зависит от C, R, $U_{с.р}$ и U. Выдержка времени реле обычно регулируется изменением R, что меняет скорость нарастания U_C. При прекращении входного сигнала пусковое устройство $П$ вновь шунтирует конденсатор C, он разряжается и нуль-индикатор прекращает свою работу (реле времени возвращается). Разряд продолжается в течение сотых долей секунды, после чего реле вновь готово к действию.

Основная трудность выполнения конденсаторного реле времени состоит в обеспечении его точности. Погрешность реле времени, применяемых в релейной защите, должна удовлетворять условию $\Delta t \leqslant 0{,}1 \div 0{,}2$ *сек*.

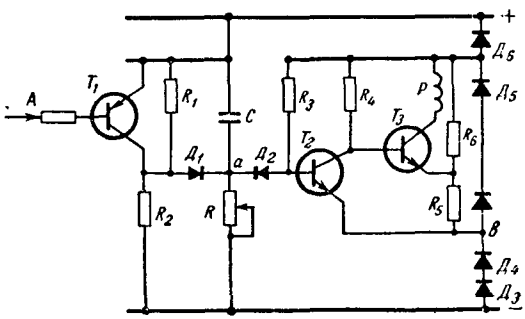


Рис. 11-52. Схема реле времени с нуль-индикатором на полупроводниках (триод T_1 типа p-n-p, триоды T_2 и T_3 — n-p-n).

Для получения требуемой точности необходимо:

1) обеспечить стабильность емкости и утечки конденсатора C, сопротивления R, питающего напряжения U и напряжения срабатывания $U_{с.р}$;

2) иметь отношение $U_{с.р}/U \leqslant 0{,}63$, при этом реле работает на крутой части характеристики $U_C = f(t)$ и колебания $U_{с.р}$ весьма незначительно влияют на изменение $t_р$;

3) исключить влияние подпитки конденсатора C в процессе его заряда через побочные цепи, кроме цепи RC.

На рассмотренном принципе разработано большое количество вариантов схем исполнения реле времени. В виде примера реле времени, применяемого в схемах защиты, приведена конструкция реле, разработанного ВНИИЭ (рис. 11-52).

Реле состоит из пускового устройства, выполненного с помощью транзистора (триода) T_1 типа p-n-p, зарядного контура RC, делителя напряжения $Д_3$—$Д_6$ и реагирующего нуль-индикатора, выполненного посредством триодов T_2 и T_3 типа n-p-n. Точки $а$ и b соответствуют тем же точкам на схеме рис. 11-51.

Нормально триод T_1 и диод $Д_1$ открыты и шунтируют емкость C. На базу триода T_2 подается положительное по отношению эмиттера смещение через сопротивление R_3 и он открывается током базы, замыкающимся по этому сопротивлению. При этом на базу T_3 через открытый триод T_2 подается отрицательный по

отношению к эмиттеру потенциал, вследствие чего триод T_3 закрывается и ток в реле P отсутствует. Диод $Д_2$ закрыт, так как на него подано напряжение обратного знака. При поступлении сигнала A на вход реле времени триод T_1 закрывается и емкость C начинает заряжаться. Диоды $Д_1$ и $Д_2$ закрыты, поэтому процесс заряда зависит только от параметров контура RC. Когда потенциалы точек a и b сравняются, диод $Д_2$ откроется и подаст напряжение точки a к базе триода T_2. Параметры цепей подобраны так, что потенциал точки a получается ниже потенциала точки b, поэтому триод T_2 закрывается.

В результате этого база триода T_3 получает положительный потенциал через сопротивление R_4. Триод T_3 открывается, и в реле P появляется ток коллектора, под действием которого оно срабатывает. При снятии сигнала A конденсатор разряжается за 0,02 *сек*. Напряжение, питающее схему реле времени, стабилизируется с помощью опорных диодов $Д_3$—$Д_6$.

Данное реле имеет выдержку времени до 9 *сек*. Погрешность реле не более $\pm$0,15 *сек* при изменении температуры от 25 до +50° С.

д) Примеры схем бесконтактных релейных защит на полупроводниках

В качестве примера бесконтактной защиты на полупроводниках, разработанной ВНИИэлектропривод на типовых элементах «ЛОГИКА», в приложении приводится схема максимальной защиты, выпускаемая ЧЭАЗ для линий 6—10 *кв*. Ниже приводится более сложная схема одноступенчатой трехсистемной дистанционной защиты, разработанная ВНИИЭ [Л. 56]. Эта защита предназначена для использования в качестве резервной от междуфазных к. з. на линиях 110—220 *кв*.

Структурная схема защиты представлена на рис. 11-53. Защита состоит из дистанционного органа *1*, выполненного с помощью трех направленных реле сопротивления с эллиптической характеристикой; пускового органа *2*, реагирующего на I_2 и I_0; логической схемы *3*, осуществляемой с помощью элементов *ИЛИ*, *И* и усилителей *У*; конденсаторного реле времени *4* и исполнительного органа *5*. Все элементы схемы выполнены на полупроводниках, кроме исполнительного органа, в качестве которого используется электромеханическое реле типа РП-7.

Реле сопротивления PC действуют на элемент *ИЛИ*, выполненный на трех диодах по схеме рис. 11-45. Для увеличения мощности выход схемы $ИЛИ_1$ заведен на усилитель $У_1$.

Пусковое реле в данной защите не является обязательным, поскольку дистанционный орган защиты отстроен от нагрузки. Пусковой орган предусмотрен для исключения неправильной работы защиты при нарушениях в питающих ее цепях напряжения и отстройки от нагрузки и качаний в симметричном режиме. Выходной сигнал пускового реле I_2 и I_0 воздействует на элемент временной памяти *ВП*, который как бы запоминает полученный сигнал и продолжает его передавать в течение 0,1 *сек* после прекращения действия реле I_2 и I_0. Такая работа *ВП* равносильна замедлению возврата пускового реле и необходима для надежного действия последнего при трехфазных к. з., когда токи несимметрии I_2 и I_0 возникают кратковременно, лишь в начале к. з., в течение 0,01—0,03 *сек*.

Защита приходит в действие, если на элемент *И* поступает входной сигнал от пускового органа (через элемент $ИЛИ_2$) и от дистанционного органа одновременно. Возникающий при этом выходной сигнал на элементе *И* усиливается усилителем $У_2$ и подается на реле времени *В*. По истечении заданной выдержки времени t_3 реле времени срабатывает и посылает сигнал на исполнительный орган, который с помощью поляризованного реле РП-7 дает команду на отключение выключателя линии.

Для обеспечения действия защиты при симметричных трехфазных к. з., когда импульс, подаваемый пусковым органом (реагирующим на первоначальную несимметрию), прекращается значительно раньше, чем срабатывает реле времени защиты, предусмотрена обратная связь с выхода усилителя $У_2$. Одновременно с пода-

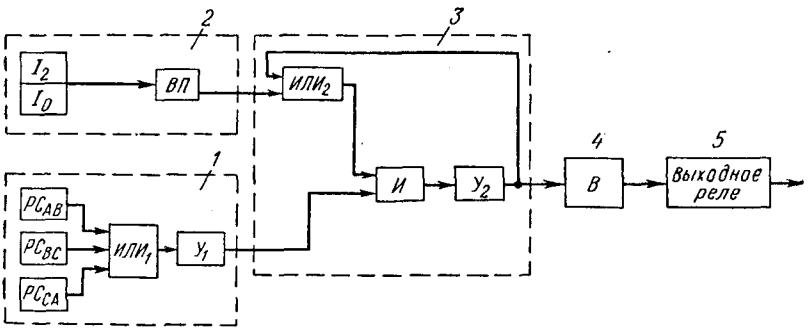


Рис. 11-53. Структурная схема одноступенчатой дистанционной защиты на полупроводниках.

чей сигнала на реле времени по цепи обратной связи подается сигнал на элемент $ИЛИ_2$. Благодаря этому при трехфазных к. з. после прекращения сигнала от пускового органа элемент $ИЛИ_2$ будет продолжать посылку сигнала на элемент *И* за счет обратной связи. Таким образом, создается своеобразная цепь самоудерживания от дистанционных органов схемы, обеспечивающая действие защиты при кратковременном срабатывании пускового органа.

Полные схемы элементов защит показаны на рис. 11-54 и 11-55.

Пусковой орган (рис. 11-54) реагирует на I_2 и I_0, которые получаются от фильтра обратной последовательности $Ф_2$ и трансформатора T_0 и выпрямляются мостами B_1 и B_2. На стороне выпрямленного тока мосты соединены параллельно. Для сглаживания выпрямленного напряжения предусмотрен конденсатор C_3. Напряжение между точками *1* и *2* (рис. 11-54) определяется величиной большого тока (I_2 или I_0).

Реагирующим элементом пускового органа, обладающим временной памятью, являются триоды T_3 и T_4.

Параметры сопротивлений (R_{12} — R_{10} и R_{14} — R_{11}) подобраны таким образом, что потенциал эмиттера триода T_3 при отсутствии I_2 и I_0 получается выше потенциала базы, вследствие чего триод T_3 закрыт. При этом на базу T_4 подается положительный потенциал (через R_{15}). Триод T_4 открыт и напряжение на выходных зажимах органа *II-7* равно нулю, так как они зашунтированы открытым триодом T_4.

При появлении I_2 или I_0 выпрямленный ток I замыкается по сопротивлению R_{10} и на его зажимах появляется напряжение $U = IR_{10}$, пропорциональное этим токам. При определенном значении I_2 или I_0 потенциал точки *2* повышается настолько, что диод $Д_6$ закрывается, вызывая увеличение потенциала в точке *3*.

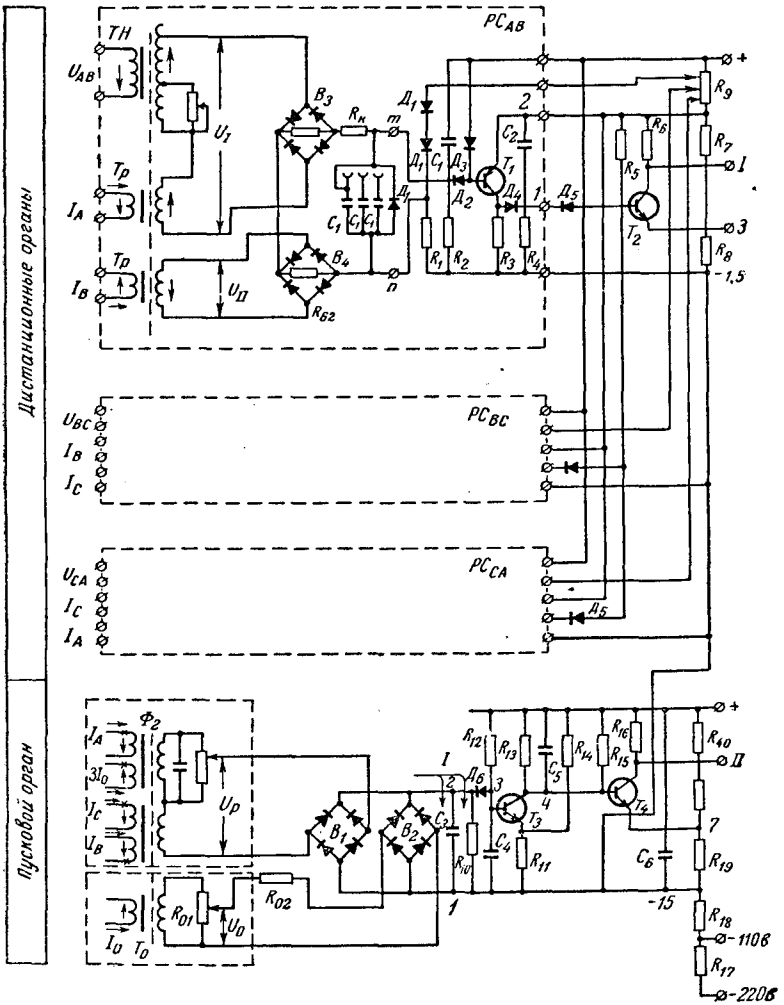


Рис. 11-54. Схема пускового и дистанционного органов защиты (напряжения: $\dot{U}_I = \dot{U}_{AB} - k\dot{I}_{AB}$; $\dot{U}_{II} = k\dot{U}_{AB}$; $U_р = kI_2$; $U_0 = kI_0$).

В результате этого триод $Т_3$ открывается, а триод $Т_4$ вследствие понижения потенциала в точке *4* закрывается, размыкая цепь между *II* и *7*. На выходе пускового органа (точки *II* и *7*) появляется напряжение, означающее, что он сработал.

При исчезновении I_2 и I_0 триод $Т_3$ снова закрывается. Но благодаря памяти, осуществленной с помощью заряженного конденсатора C_5, $Т_4$ открывается не сразу, а только через 0,01 *сек*, пока не разрядится C_5. Эта емкость была заряжена при предшествующем открытии триода $Т_3$ током, протекавшим по цепи C_5 — R_{11}.

Потенциал точки *4*, от которого зависит состояние триода T_4, по мере разряда емкости C_5 повышается.

По окончании разряда, продолжающегося 0,01 *сек*, потенциалы точек *4* и *7* (базы и эмиттера) становятся равными, триод T_4 открывается и выходное напряжение (сигнал) на зажимах *11-7* исчезнет. Таким образом, с помощью конденсатора C_5 осуществляется временное запоминание появления I_2 или I_0. Регулирование уставки срабатывания реле производится изменением напряжения, снимаемого с фильтров I_2 и I_0.

Дистанционный орган. В качестве реле сопротивлений *РС* (рис. 11-54) применяются реле, рассмотренные в § 11-6. Они включаются на междуфазное напряжение и разность фазных токов по табл. 11-1.

Реле *РС* состоит из промежуточного трансформатора напряжения *ТН* и трансреакторов *ТР*, с помощью которых получаются напряжения U_I и U_{II}. Эти напряжения выпрямляются выпрямителями B_3 и B_4, а затем сравниваются посред-

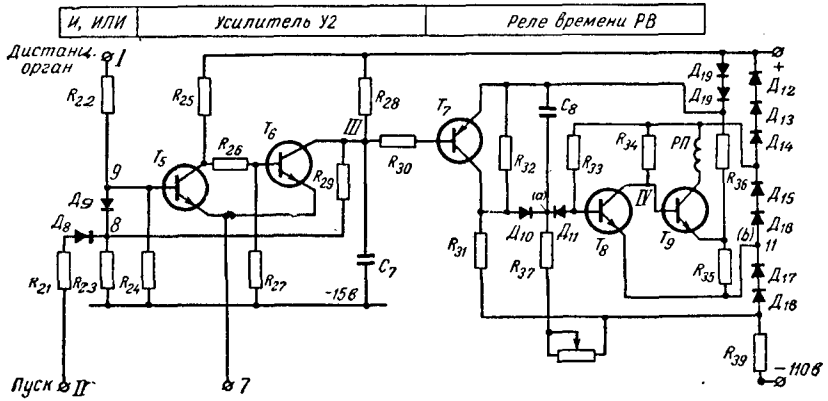


Рис. 11-55. Логическая часть схемы одноступенчатой дистанционной защиты.

ством схемы сравнения, построенной на балансе напряжения. На выходных зажимах *m* и *n* получается напряжение $\dot{U}_{mn} = |\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}|$, подводимое к нуль-индикатору.

Нуль-индикатор является двухкаскадным усилителем на триодах T_1 (типа *p-n-p*) и T_2 (типа *n-p-n*).

Триод T_2 является общим для всех трех реле *РС*. Для этого выходной зажим *1* триода T_1 каждого реле связан с базой T_2 через диод $Д_5$ по схеме *ИЛИ*.

При отсутствии напряжения на зажимах *m* и *n* или при его отрицательном знаке триод T_1 открыт, на диоды $Д_5$ подается обратное напряжение и они закрываются. База триода T_2 имеет по отношению к эмиттеру положительный потенциал (через R_5), поэтому триод T_2 открыт и напряжение на выходных зажимах *1—3* равно нулю.

При появлении положительного напряжения на выходе схемы сравнения (зажимы *m* и *n*) триод T_1 закрывается. Конденсатор C_2 начинает заряжаться, и когда потенциал точки *7* станет равным потенциалу в точке *3*, диод $Д_5$ откроется, в результате чего потенциал базы T_2 станет ниже потенциала эмиттера и триод T_2 откроется. На выходных зажимах *1—3* появляется напряжение, воздействующее на логическую часть защиты.

Конденсаторы C_1 служат для регулирования величины малой оси эллиптической характеристики срабатывания реле. Конденсатор C_2 создает замедление срабатывания реле на 0,1 *сек*.

Логическая схема защиты изображена на рис. 11-55. Она состоит из логических элементов *ИЛИ*$_2$ и *И* (R_{21}, R_{22}, R_{23}, R_{29}, $Д_8$, $Д_9$), усилителя $У_2$, реле времени *РВ* и выходного реле *РП*.

К зажиму *I* схемы подается сигнал от дистанционного органа, а к зажиму *II* — от пускового. Сопротивления R_{21} и R_{29} образуют элемент *ИЛИ*$_2$, выходом которого является точка *8*. При появлении сигнала *II* от пускового органа *ИЛИ* от обратной связи через сопротивление R_{29} в точке *8* появляется напряжение.

Точка *9* является выходом элемента *И*$_1$ и одновременно входом усилителя $У_2$, состоящего из двух триодов T_5 и T_6. Элемент *И* образуется с помощью диода $Д_9$ и сопротивления R_{22}, по которому поступает сигнал *I* от дистанционного органа, и точки *8*, с которой приходит сигнал *II* от пускового реле.

Если пусковой и дистанционные органы защиты не действуют, то сигналы *I* и *II* отсутствуют. При этом потенциал базы триода T_5 (точка *9*) ниже, чем у его эмиттера (точка *7*), вследствие чего T_5 закрыт. Закрыт также и диод $Д_9$, поскольку на него подано обратное напряжение. Усилитель $У_2$ и реле времени не работают. В случае появления сигнала *II* потенциал точки *9* (от которого зависит работа T_5) не меняется, так как диод $Д_9$ закрыт и не пропускает сигнал *II*. При появлении сигнала *I* потенциал зажима *1* повышается, но при этом открывается диод $Д_9$, в результате чего потенциал точки *9* остается ниже точки *7* и триод T_5 не работает.

При действии пускового и дистанционного органов сигналы *I* и *II* появляются одновременно. Сигнал *II* держит диод $Д_9$ запертым, и благодаря этому под влиянием сигнала *I* потенциал точки *9* повышается.

Таким образом, на выходе элемента *И* появляется сигнал, в результате которого триод T_5 открывается, а T_6 закрывается. Это вызывает повышение потенциала, т. е. появление сигнала на выходном зажиме *III* усилителя $У_2$.

При появлении сигнала *III* триод T_7 закрывается и дешунтирует конденсатор C_8, чем осуществляется пуск реле времени. Последнее работает так же, как и схема на рис. 11-52.

Нуль-индикатор реле времени состоит из триодов T_8 и T_9. При срабатывании реле времени (т. е. открытии триода T_9) под действием коллекторного тока триода T_9 приходит в действие выходное реле *РП*, которое подает импульс на отключение.

Сигнал *III* по цепи обратной связи R_{29} поддерживает повышенный потенциал в точке *8*, не позволяющий работать диоду $Д_9$. Таким образом поддерживается работа $У_2$ и реле времени при трехфазных к. з., сопровождающихся кратковременным появлением сигнала *II*.

Рассмотренная защита имеет в 4 раза меньшие габариты по сравнению с аналогичной одноступенчатой дистанционной защитой с реле типа КРС-131. Потребление цепей напряжения защиты равно 3 *ва*, а токовых цепей составляет 1 *ва* при токе 5 *а*. Для устранения мертвой зоны предусматривается смещение характеристики реле сопротивления в *III* квадранте примерно на 10%. Угол $\varphi_{м.ч}$ имеет две уставки: 60 и 80°.

11-15. ВЫБОР УСТАВОК ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Ниже рассматривается выбор характеристик трехступенчатой защиты на примере участка сети, показанного на рис. 11-56 [Л. 81]. Выбираются уставки защиты *A*, уставки защит *B* и *C* принимаются заданными. Для большей наглядности характеристики согласуемых между собой дистанционных защит $t_з = f(z)$ обычно изображаются графически на диаграмме в осях *t*, *z* (рис. 11-56, *б*). По оси *z* откладываются первичные сопротивления прямой последовательности z_1 рассматриваемых участков сети.

При выборе сопротивлений срабатывания дистанционных органов необходимо учитывать погрешности, вызывающие отклонение $z_{с.р}$ от принятой уставки $z_у$, считаем, что $z_{с.р} = z_у \pm \Delta z$. На величину Δz влияют погрешности реле, измерительных трансформаторов и неточность настройки реле на заданную уставку $z_у$.

Помимо того возможна погрешность в определении сопротивлений участков сети, что учитывается дополнительным запасом.

Первая зона защиты. Выдержка времени первой зоны определяется собственным временем действия реле и составляет $t_1 = 0{,}02 \div 0{,}15$ *сек*.

Сопротивление первой зоны z_{1A} *выбирается из условия, чтобы дистанционный орган этой зоны не мог сработать за пределами защищаемой линии ЛI* (рис. 11-56).

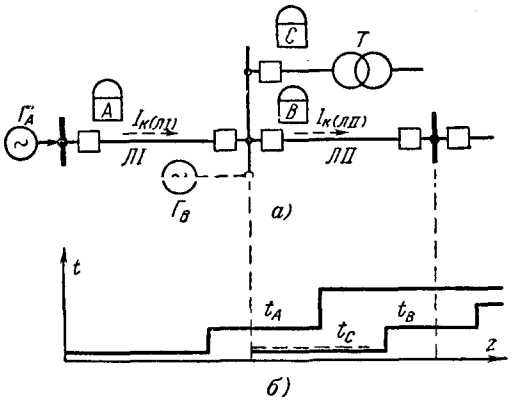


Рис. 11-56. Участок сети, защищаемый защитой A (*а*), и изображение характеристик выдержек времени дистанционных защит в осях z, t (*б*).

Выполнение этого условия необходимо для обеспечения селективности, поскольку первая зона работает без выдержки времени.

Поэтому z_{1A} выбирается меньше сопротивления защищаемой линии $z_{1Л}$ так, чтобы при максимальной положительной погрешности $+\Delta z$ выполнялось условие $(z_{1A} + \Delta z) < z_{1Л}$ (рис. 11-57).

В соответствии с этим z_{1A} рассчитывается по выражению

$$z_{1A} = k_1 z_{1Л}, \qquad (11\text{-}49)$$

где $z_{1Л}$ — сопротивление прямой последовательности защищаемой линии *ЛI*; k_1 — коэффициент, учитывающий с некоторым запасом погрешности Δz, могущие вызвать увеличение $z_{с.р}$. Величина k_1 зависит от точности реле, для реле КРС $k_1 = 0{,}85$.

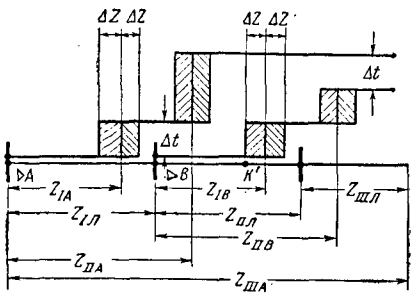


Рис. 11-57. Согласование характеристик дистанционных защит A и B двух смежных линий (рис. 11-56).

Погрешность трансформаторов тока приводит к сокращению зоны действия защиты. Поэтому трансформаторы тока, питающие дистанционную защиту, следует выбирать по кривым 10%-ной погрешности при максимальном токе к. з. в конце первой зоны.

Вторая зона. Вторая зона защиты должна надежно охватывать защищаемую линию *ЛI*, поэтому она должна выходить за пределы защищаемой линии.

Для обеспечения селективности протяженность и выдержку времени второй зоны отстраивают от быстродействующих защит транс-

форматоров и линий, отходящих от шин противоположной подстанции (рис. 11-57). Выдержка времени выбирается равной:

$$t_{IIA} = t_{IB} + \Delta t, \tag{11-50}$$

где t_{IB} — максимальное время быстродействующих защит следующего участка ($t_{IB} \approx 0{,}1$ *сек*).

Ступень Δt зависит от погрешности реле времени второй зоны и времени отключения выключателя и колеблется от 0,3 до 0,5 *сек*; отсюда $t_{IIA} = 0{,}4 \div 0{,}6$ *сек*.

При выбранном значении t_{IIA} *протяженность второй зоны не должна выходить за пределы зон быстродействующих защит линий и трансформаторов, питающихся от подстанции* B.

Для согласования с линейными защитами вторая зона должна быть отстроена от самой короткой первой зоны на следующем участке (z_{IB}).

С учетом возможного сокращения первой зоны защиты B на Δz (рис. 11-57) вторая зона защиты A должна быть отстроена от точки K' аналогично тому, как отстраивалась первая зона этой же защиты от конца линии (т. е. от точки B). Сопротивление от защиты A до K' равно $z_{1л} + k_I z_{IB}$, отсюда

$$z_{IIA} = k_{II}(z_{1л} + k_I z_{IB}), \tag{11-51}$$

где k_I — коэффициент, учитывающий сокращение z_{IB} на Δz, принимается равным 0,85—0,9; k_{II} — коэффициент, учитывающий возможное увеличение z_{IIA} в результате погрешностей дистанционного органа второй зоны защиты A, принимается равным 0,85.

При нескольких источниках питания (Γ_A и Γ_B на 11-56, *а*) z_{IIA} *выбирается с учетом токораспределения по выражению*

$$z_{IIA} = k_{II}(z_{1л} + k_т k_I z_{IB}), \tag{11-52}$$

где $k_т$ — коэффициент токораспределения, равный отношению тока к. з. $I_{к(ЛIII)}$, проходящему по линии *ЛIII*, к току к. з. $I_{к(ЛI)}$, текущему по линии *ЛI*:

$$k_т = \frac{I_{к(ЛIII)}}{I_{к(ЛI)}}. \tag{11-53}$$

Коэффициент $k_т$ должен выбираться при таком реальном режиме, когда $I_{к(ЛI)}$ имеет максимальное значение, а $I_{к(ЛIII)}$ — минимальное.

Для отстройки от к. з. за трансформаторами T подстанции B с учетом токораспределения вторая зона должна удовлетворять условию

$$z_{IIA} = k_{II}[z_{1(ЛI)} + (1 - \Delta n_т)^2 k_т z_{1т}], \tag{11-54}$$

где $z_{1т}$ — сопротивление наиболее мощного трансформатора на подстанции B;

$$k_т = \frac{I_{к(т)}}{I_{к(ЛI)}};$$

$\Delta n_т$ — отклонение коэффициента трансформации трансформатора от номинального; k_{II} — то же, что в выражении (11-51).

За окончательную величину z_{IIA} принимается меньшее из двух значений (11-52) и (11-54).

Выбранное z_{IIA} проверяется по условию надежного действия (чувствительности) при к. з. на шинах подстанции *B*. Согласно ПУЭ

$$k_ч = \frac{z_{IIA}}{z_{1(Л)}} \geqslant 1{,}25.$$

Для линий с сопротивлением 5—20 *ом* следует стремиться, чтобы $k_ч = 1{,}5 \div 2$, так как при малом $k_ч$ защиты на линиях с небольшим сопротивлением могут отказывать при к. з. через сопротивление дуги.

Если вторая зона ненадежно охватывает защищаемую линию, т. е. $k_ч < 1{,}25$, *то ее можно отстраивать не от первой, а от конца второй зоны защиты B.* При этом время действия второй зоны защиты *A* должно отстраиваться от времени второй зоны защиты *B*: $t_{IIB} = t_{IIB} + \Delta t$, а величина z_{IIA} должна выбираться по выражению (11-52), в котором вместо z_{IB} нужно подставить z_{IIB}.

Третья зона. *Третья зона должна резервировать защиты присоединений, отходящих от шин подстанции B.* Уставки срабатывания этой зоны выбираются, как правило, по условию отстройки от нагрузки, а выдержка времени — по условию селективности. Третья зона осуществляется пусковыми реле дистанционной защиты, в качестве которых используются токовые реле или реле сопротивления.

Ток срабатывания токовых пусковых реле выбирается так же, как и у максимальной защиты, по выражению

$$I_{с.з} = \frac{k_н k_з I_{раб.макс}}{k_в}, \qquad (11\text{-}54а)$$

где $k_н = 1{,}1$ — коэффициент запаса; $k_з$ — коэффициент, учитывающий увеличение тока за счет самозапуска заторможенных электродвигателей; $I_{раб.макс}$ — максимальный ток нагрузки с учетом ее увеличения, обусловленного отключением соответствующего участка прилегающей сети (например, параллельной линии или второй линии, питающей подстанцию, и т. д.); $k_в$ — коэффициент возврата.

Если необходимо обеспечить избирательность поврежденных фаз (например, в защите ПЗ-152 и ДЗ-1), то $I_{с.з}$ должно удовлетворять также второму условию

$$I_{с.з} = k_н I^{(2)}_{неп.ф}, \qquad (11\text{-}55)$$

где $k_н = 1{,}2$; $I^{(2)}_{неп.ф}$ — максимальное значение тока в неповрежденной фазе при двухфазном к. з. на защищаемой линии.

Чувствительность пускового органа проверяется при к. з. в конце защищаемой линии и в конце зоны резервирования по минимальному значению $I_{к.з}$. Согласно ПУЭ $k_ч = I_{к.мин}/I_{с.з}$ в первом случае должен быть не меньше 1,5, а во втором — 1,2.

Сопротивление $z_{с.з} = z_{III}$ ненаправленного реле сопротивления *выбирается из условия отстройки от минимального значения рабочего сопротивления $z_{раб.мин}$, появляющегося на зажимах реле после отключения внешнего к. з.*

Наименьшее значение $z_{раб.мин}$ имеет место при максимальном токе нагрузке в фазе $I_{раб.макс}$ и пониженном уровне рабочего напряжения $U_{раб.мин}$, обычно принимаемого на 5—10% меньше номинального:

$$z_{раб.мин} = \frac{U_{раб.мин}}{k_з I_{раб.макс}\sqrt{3}}. \qquad (11\text{-}56)$$

Здесь под $U_{раб.мин}$ подразумевается линейное напряжение.

Для обеспечения надежного возврата пускового органа в наихудших условиях $z_{с.з}$ находится из уравнения:

$$z_{с.з} = \frac{z_{раб.мин}}{k_{зап} k_{воз}}, \qquad (11\text{-}57)$$

где $k_{зап}$ — коэффициент, учитывающий погрешности реле, принимается равным 1,1 ÷ 1,2; $k_{воз}$ — коэффициент возврата реле; $k_з$ — коэффициент, учитывающей самозапуск двигателей.

Полученное $z_{с.з}$ является максимальным допустимым значением по условию возврата реле и расчетным значением $z_{III\,А}$.

При необходимости обеспечить избирательность поврежденных фаз (например, в защите ПЗ-153) $z_{с.з}$ отстраивается также от минимального значения сопротивления в неповрежденной фазе $z^{(2)}_{неп.ф}$ при двухфазном к. з.

В этом случае, кроме условия (11-57), необходимо выполнить второе условие:

$$z_{с.з} = k_н z^{(2)}_{неп.ф.мин}, \qquad (11\text{-}58)$$

где $k_н = 0{,}85 \div 0{,}9$.

Чувствительность пускового реле проверяется при к. з. в конце защищаемой линии и в конце зоны резервирования и оценивается коэффициентом

$$k_ч = \frac{z_{III\,А}}{z_{к.макс}},$$

где $z_{к.макс}$ — наибольшее сопротивление на зажимах реле при к. з. в расчетной точке.

Согласно ПУЭ при к. з. в конце второго участка допускается $k_ч \geqslant 1{,}2$.

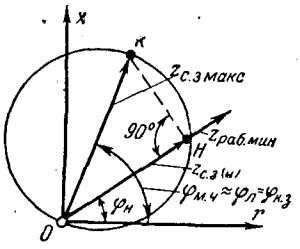


Рис. 11-58. Выбор $z_{с.з}$ направленного реле сопротивления.

Сопротивление срабатывания пускового направленного реле сопротивления выбирается, как и у ненаправленных реле, из условия отстройки от нагрузки по формуле (11-57). Поскольку $z_{с.р}$ направленного реле сопротивления зависит от $\varphi_р$, найденное сопротивление срабатывания $z_{с.з(н)}$ должно иметь место при $\varphi_р = \varphi_н$, соответствующем нагрузочному режиму работы линии.

При к. з. $\varphi_р = \varphi_л = \varphi_{м.ч}$, и поэтому реле работает с максимальной чувствительностью, т. е. с $z_{с.з.макс}$ (рис. 11-58).

Значение $z_{с.з.макс}$, допустимое по условиям нагрузки $z_{с.з(н)}$, можно найти из уравнения срабатывания направленного реле сопротивления:

$$z_{с.з} = z_{с.з.макс} \cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_р).$$

Подставив в него найденные из (11-57) величины $z_{с.з(н)}$ и $\varphi_н$ вместо $z_{с.з}$ и $\varphi_р$, получим:

$$z_{с.з.макс} = \frac{z_{с.з(н)}}{\cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_н)} = \frac{z_{раб.мин}}{k_{зап}\, k_{воз} \cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_н)}. \quad (11\text{-}59)$$

Найденное значение $z_{III} = z_{с.з.макс}$ является диаметром окружности характеристики срабатывания реле и уставкой z_{III}, удовлетворяющей условию отстройки от максимальной нагрузки защищаемой линии.

Чувствительность пускового реле определяется по выражению

$$k_ч = \frac{z_{с.з.макс}}{z_{к.макс}},$$

где $z_{к.макс}$ — наибольшее сопротивление на зажимах реле при к. з. в конце второго участка, резервируемого данной защитой.

В некоторых случаях для уменьшения t_{III} сопротивление срабатывания z_{IIIA} можно согласовывать с концом зоны z_{IIB} следующего участка, если при этом обеспечивается достаточное резервирование присоединений, отходящих от шин подстанции B. Тогда $t_{IIIA} = t_{IIA} + \Delta t$, при этом под t_{IIA} подразумевается наибольшая выдержка времени резервируемых защит.

Условие отстройки от $z_{раб.мин}$ при выборе z_{III} сохраняется и в этом случае.

Вторичные величины сопротивлений срабатывания. Для пересчета полученных первичных сопротивлений на вторичную сторону необходимо вычислить вторичные значения напряжения и тока, соответствующие первичным значениям $U_{р.п}$ и $I_{р.п}$:

$$U_{р.в} = \frac{U_{р.п}}{n_н} \text{ и } I_{р.в} = \frac{I_{р.п}}{n_т}.$$

Исходя из этого, находят вторичное сопротивление срабатывания на зажимах реле:

$$z_{с.р} = \frac{U_{р.в}}{I_{р.в}} = z_{с.з}\frac{n_т}{n_н}. \quad (11\text{-}60)$$

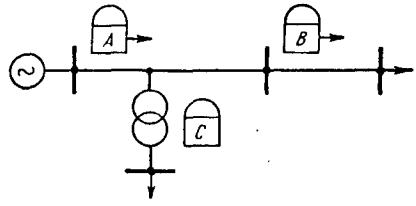


Рис. 11-59. Схема, поясняющая выбор уставок дистанционной защиты на линиях с ответвлениями.

Подставляя в (11-60) вместо $z_{с.з}$ значения z_I, z_{II} и z_{III}, находят значения вторичных сопротивлений срабатывания.

Все реле сопротивления должны работать в диапазоне токов к. з., лежащем между токами точной работы реле, с тем чтобы погрешность реле не превышала 10%. Для проверки выполнения этого условия по техническим данным на реле определяются значения тока точной работы при выбранных уставках. Эти значения токов сопоставляются с максимальными и минимальными величинами $I_{к.з.}$, имеющими место в конце данной зоны.

Особенность выбора уставок срабатывания первой и второй зон на линиях с ответвлениями. На линиях с ответвлениями, питающими понизительные подстанции (рис. 11-59), первая и вторая зоны отстраиваются от к. з. за трансформатором ответвления.

Такое ограничение их действия позволяет обеспечить селективность дистанционной защиты с максимальными защитами трансформатора ответвления и питающейся от него сети без увеличения выдержки времени t_{I} и t_{II} первой и второй зон защиты.

Отстройка z_{II} производится по формуле (11-54), где вместо $z_{1(A1)}$ подставляется сопротивление линии от места установки защиты A до трансформатора ответвления.

Отстройка ведется для наиболее тяжелого случая, когда линия отключена с противоположной стороны ($k_{\text{т}} = 1$).

В нормальном режиме работы линии за счет подпитки места к. з. со стороны подстанции B запас отстройки от к. з. за трансформатором повышается.

Выдержка времени t_{II} выбирается по условию (11-50). При этом допускается неселективное действие первой зоны защиты A, имеющей $t_{\text{I}} = 0$, при к. з. в трансформаторе ответвления. Эта неселективность устраняется с помощью АПВ на линии. Вторая зона при повреждении в трансформаторе действует селективно, поскольку t_{II} отстраивается от быстродействующих защит линий и трансформаторов.

Чувствительность третьей зоны защиты должна проверяться по к.з. за трансформатором ответвления, а выдержка времени t_{III} должна быть отстроена от времени действия максимальной защиты этого трансформатора.

11-16. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Выполнение защит на дистанционном принципе имеет целый ряд существенных преимуществ, способствовавших широкому применению этих защит в электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения.

Главными достоинствами дистанционного принципа являются:

1. Селективность действия в сетях любой конфигурации с любым числом источников питания.

2. Малые выдержки времени в начале защищаемого участка, которые обеспечиваются первой зоной, охватывающей до 85—90% защищаемой линии, что необходимо по условиям устойчивости, требующим быстрого отключения повреждений вблизи шин электростанции и мощных узловых подстанций.

3. Значительно большая чувствительность при к. з. и лучшая отстройка от нагрузки и качаний по сравнению с токовыми максимальными защитами.

К числу недостатков дистанционных защит следует отнести:

1. Сложность защиты как в части схемы, так и в части входящих в ее состав реле. Дистанционные защиты с электромеханическими реле являются самыми многорелейными и многоконтактными защитами.

Бесконтактные защиты на полупроводниковых приборах отличаются сложностью логической части схемы и большим количеством элементов в ней.

2. Невозможность обеспечения мгновенного отключения к. з. в пределах всей защищаемой линии. Поэтому они не могут служить основными защитами на тех участках сети, где необходимо выполнение этого требования.

3. Реагируют на качания и нагрузку. Необходимость отстройки от последней существенно ограничивает чувствительность защиты

и понижает ее эффективность в качестве резервной защиты смежных участков, а возможность действия при качаниях вынуждает усложнять защиту применением блокировки.

4. Возможность ложной работы при неисправностях в цепях напряжения, что уменьшает их надежность и вызывает необходимость применения соответствующей блокировки.

За последние годы много сделано для упрощения и усовершенствования дистанционных защит, большие успехи в этой области достигнуты отечественной техникой.

В качестве реальных путей дальнейшего усовершенствования дистанционных защит можно указать на следующие возможности:

1. Сочетание дистанционной защиты с высокочастотной блокировкой (см. гл. 12) или передачей отключающих импульсов на противоположный конец линии, что позволяет обеспечить быстродействие защиты в пределах всей защищаемой линии.

2. Внедрение дистанционных защит на полупроводниковых элементах, способствующее повышению надежности защиты за счет устранения многоконтактности их схем и улучшения параметров реагирующих органов.

3. Применение упрощенных схем дистанционной защиты при использовании ее для резервирования основных защит и защит смежных участков.

Несмотря на отмеченные недостатки, дистанционная защита является пока наиболее совершенной резервной защитой от междуфазных к. з. и достаточно быстродействующей защитой для высоковольтных сетей 110 и 220 *кв*, где она с успехом используется в качестве основной защиты на линиях средней и большой длины.

Глава двенадцатая

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗАЩИТЫ

12-1. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗАЩИТ

Высокочастотные (в. ч.) защиты являются быстродействующими и предназначаются для линий средней и большой длины. Они применяются в тех случаях, когда по условиям устойчивости или другим причинам требуется быстрое двустороннее отключение к. з. в любой точке защищаемой линии.

Удовлетворяющие этому же требованию продольные дифференциальные защиты непригодны для длинных линий вследствие высокой стоимости соединительного кабеля и недопустимого увеличения его сопротивления.

Высокочастотные защиты состоят из двух комплектов, расположенных по концам защищаемой линии. Особенность этих защит заключается в том, что для их селективного действия при внешних

к. з. необходима связь между комплектами защиты, осуществляемая посредством токов высокой частоты, которые передаются по проводам защищаемой линии.

По принципу своего действия в. ч. защиты не реагируют на к. з. вне защищаемой линии и поэтому, так же как и дифференциальные защиты, не имеют выдержки времени. В настоящее время применяются два вида в. ч. защит:

а) направленные защиты с высокочастотной блокировкой (т. е. с блокировкой токами высокой частоты), основанные на сравнении направлений мощности к. з. по концам защищаемой линии;

б) дифференциально-фазные в. ч. защиты, основанные на сравнении фаз токов по концам линии.

12-2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ БЛОКИРОВКОЙ

Направленная в. ч. защита реагирует на направление (или знак) мощности к. з. по концам защищаемой линии. Как видно из рис. 12-1, *а*, при к. з. на защищаемой линии (в точке K_1) мощности к. з. на обоих концах поврежденного участка AB имеют одинаковый знак и направление от шин в линию.

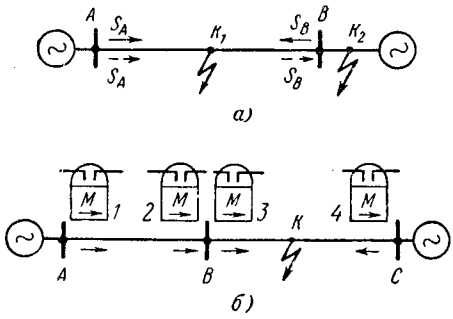


Рис. 12-1. Направление мощности по концам линии при к. з.

а — на линии (K_1) и за ее пределами (K_2); *б* — сравнение направления мощности по концам линии с помощью реле направления мощности *М*.

В случае же внешнего к. з. (точка K_2) направление и знаки мощности по концам защищаемой линии оказываются различными. На ближайшем к месту повреждения конце линии мощность к. з. $S_в$ отрицательна и направлена к шинам, а на удаленном — положительна и направлена от шин в линию.

Из этого следует, что, *сравнивая направления мощности по концам линии, можно определить, где возникло повреждение*: на линии или за ее пределами.

Такое сравнение осуществляется при помощи реле мощности *М* (рис. 12-1, *б*), которые устанавливаются на обоих концах линии и включаются так, чтобы при к. з. на защищаемой линии они разрешали действие защит на отключение.

Поэтому при к. з. в точке *К* (рис. 12-1, *б*) подействуют на отключение только защиты *3* и *4*, установленные на поврежденной линии *ВС*. На неповрежденной линии *АВ* реле мощности защиты *1* замыкает свои контакты, разрешая ей действовать на отключение. Однако на приемном конце линии *АВ* реле мощности защиты *2* под

влиянием мощности к. з., направленной к шинам, размыкает свои контакты, чем запрещает действие на отключение своей защиты и одновременно блокирует действие защиты *1* посылкой блокирующего сигнала тока высокой частоты по проводам этой же линии. Блокирующий ток посылается специальными генераторами токов высокой частоты *ГВЧ* (рис. 12-2), управляемыми реле мощности *М*, и принимается специальными приемниками токов высокой частоты *ПВЧ*, настроенными на ту же частоту, что и генераторы. Приняв высокочастотный сигнал, приемники выпрямляют полученный ток и подают его в обмотку блокирующего реле *Б*, которое размыкает цепь отключения своей защиты, не позволяя ей действовать на отключение.

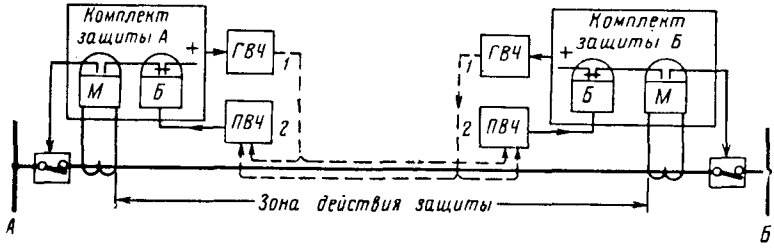


Рис. 12-2. Принцип действия направленной защиты с высокочастотной блокировкой.

М — реле мощности; *Б* — блокирующее реле; *ГВЧ* — генератор токов высокой частоты; *ПВЧ* — приемник токов высокой частоты.

При к. з. на защищаемой линии блокирующий сигнал высокой частоты отсутствует, так как реле мощности, срабатывая, не позволяют действовать передатчикам высокой частоты. В этом случае контакты блокирующих реле остаются замкнутыми, разрешая реле мощности действовать на отключение.

Таким образом, блокирующий ток высокой частоты появляется в линии только при внешних к. з., обеспечивая селективную работу защиты. Зона действия защиты ограничивается трансформаторами тока, питающими реле мощности.

На рассмотренном принципе выполняются защиты, сравнивающие направления мощностей в фазах или мощности нулевой или обратной последовательности. Реле мощности в двух последних случаях включаются через соответствующие фильтры на токи и напряжения нулевой или обратной последовательности.

Из принципа действия направленной высокочастотной защиты следует, что каждый из комплектов содержит релейную часть, реагирующую на направление мощности к. з., и в. ч. часть, генерирующую и принимающую токи высокой частоты.

12-3. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЧАСТЬ ЗАЩИТЫ

а) Канал токов высокой частоты

Высокочастотным (в. ч.) каналом называют путь, по которому замыкаются токи высокой частоты, используемые для блокировки защиты.

На рис. 12-3 показан в. ч. канал по схеме фаза — земля, при которой ток высокой частоты передается по одному из проводов

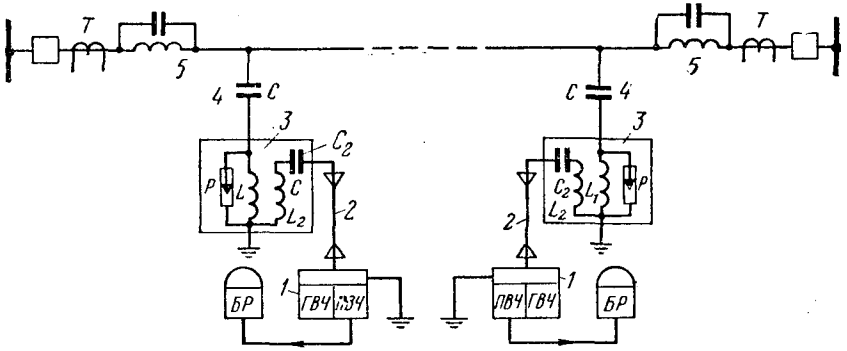


Рис. 12-3. Принципиальная схема высокочастотного канала.

линии и возвращается по земле. На каждом конце линии устанавливается в. ч. пост *1*, состоящий из передатчика *ГВЧ*, генерирующего токи высокой частоты, и принимающего их приемника *ПВЧ*. Выходная цепь в. ч. поста подключается одним зажимом к земле, а вторым — к линии электропередачи через кабель *2*, фильтр присоединения *3* и конденсатор связи *4*. По концам провода линии, используемого для передачи токов высокой частоты, устанавливаются заградители *5*, запирающие выход токами высокой частоты за пределы линии.



Рис. 12-4. К определению затухания в элементах высокочастотного канала [см. формулу (12-1)].

Второй способ передачи высокочастотных сигналов по схеме «фаза — фаза» с использованием двух проводов линии требует больше аппаратуры и в Советском Союзе не применяется.

Часть энергии, генерируемой передатчиком, теряется в элементах канала, т. е. в кабеле, фильтрах присоединения, конденсаторах связи, проводах линии высокого напряжения, и уходит через заградители. Поэтому в. ч. передатчик должен с некоторым запасом перекрывать потери в канале, обеспечивая достаточный уровень мощности в. ч. сигнала, поступающего на приемник противоположного конца.

Потери энергии, происходящие при передаче в. ч. сигнала (рис. 12-4), называются затуханием и условно характери-

зуются величиной

$$b = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{вх}}{P_{вых}}, \qquad (12\text{-}1)$$

где $P_{вх}$ — мощность на входе рассматриваемого элемента канала (в начале элемента); $P_{вых}$ — мощность, получаемая на его выходе (в конце элемента).

За единицу затухания принимается *непер* (*неп*). Затухание каналов в. ч. защиты в зависимости от протяженности линии высокого напряжения колеблется от 1 до 2 *неп*.

б) Высокочастотный пост

Для в. ч. защит линий 110 и 220 *кв* отечественной промышленностью выпускаются в. ч. посты типа ПВЗК [Л. 58] на электронных лампах и посты на полупроводниках. Для линий 330—500 *кв*, имеющих большее затухание и более высокий уровень помех, выпускаются посты с повышенной мощностью типа ПВЗД на электронных лампах, разработаны посты на полупроводниках типа ПВЗП [Л. 55, 57]. Каждый в. ч. пост (рис. 12-5) состоит из передатчика и приемника.

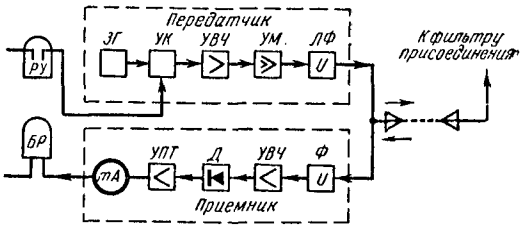


Рис. 12-5. Блок-схема высокочастотного поста.

Задающий генератор передатчика *ЗГ* является источником тока высокой частоты. Он (рис. 12-6) выполнен по индуктивной трехточечной схеме с кварцевым резонатором, обеспечивающим стабилизацию частоты (на рис. 12-6 не показан), и находится в режиме непрерывной работы. Мощность задающего генератора очень мала, поэтому устанавливается промежуточный

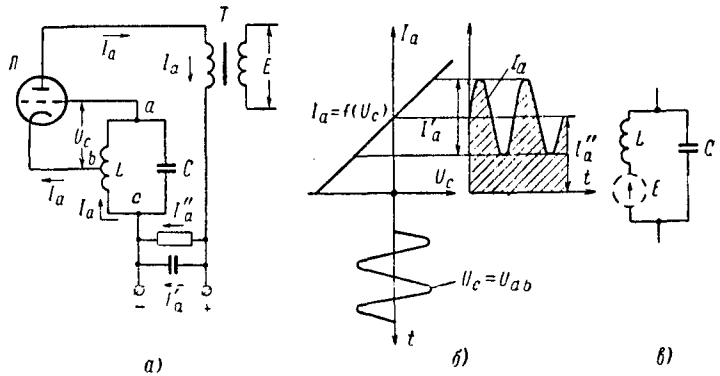


Рис. 12-6. Принципиальная схема задающего генератора (*а*) и зависимость его анодного тока от напряжения на сетке (*б*).

каскад *УВЧ*, являющийся усилителем напряжения, и усилитель мощности *УМ*. Линейный фильтр *ЛФ* служит для повышения входного сопротивления на частотах, отличных от рабочей частоты данного канала.

Пуск передатчика осуществляется подачей плюса постоянного тока на аноды и экранные сетки ламп усилителя мощности, а останов — подачей минуса на пентодную сетку лампы генератора. Управление передатчиком производится от релейной части защиты (реле *РУ*). Входной сигнал, получаемый приемником, усиливается с помощью *УВЧ*, выпрямляется детектором *Д* и затем после усиления усилителем постоянного тока *УПТ* поступает в блокирующее реле *БР* релейной части защиты.

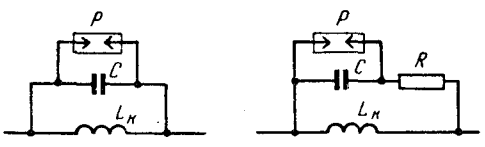
Передатчик поста с повышенной мощностью в отличие от показанного на рис. 12-5 имеет дополнительный блок усиления.

Все приемопередатчики рассчитаны на работу в диапазоне частот от 40 до 300 *кгц*. Генератор и приемник настраиваются на одну частоту.

Передатчики ПВЗК и ПВЗП имеют выходную мощность около 10 *вт* при частоте 100 *кгц* и около 3—5 *вт* при частоте 300 *кгц*. У передатчика ПВЗД отдаваемая мощность не менее 60 *вт*.

в) Элементы высокочастотного канала

Конденсатор связи *4* (рис. 12-3) предназначен для присоединения поста к линии высокого напряжения. Сопротивление конденсатора $x_C = \frac{1}{2\pi f C}$ зависит от частоты f проходящего через него тока. Для токов промышленной частоты 50 *гц* оно велико (порядка 1 200 000 *ом*), и поэтому ток утечки весьма мал. При высоких частотах $f \geqslant 50$ *кгц* сопротивление x_C резко уменьшается. Отечественная промышленность выпускает бумажно-масляные конденсаторы типа СМР-55/$\sqrt{3}$-0,044. Они изготовляются в виде элементов, рассчитанных на рабочее напряжение фазы 32 *кв* и имеющих емкость $C = 18\,500$ *пф*. На линиях 110 *кв* устанавливаются два таких элемента, соединяемых последовательно, на линиях 220 *кв* — четыре. Для линий 500 *кв* выпускаются конденсаторы типа СМР $\frac{133}{\sqrt{3}}$-0,0186; на таких линиях устанавливаются четыре элемента.



а) *б*)

Рис. 12-7. Высокочастотный заградитель.

а — резонансный (одночастотный); *б* — широкополосный.

Высокочастотный кабель *2*. В качестве в. ч. кабеля используется кабель типа ФКБ, который является одножильным кордельным кабелем со свинцовой оболочкой и броней из стальной ленты. Входное сопротивление кабеля близко к 100 *ом*, затухание 0,2 *неп* на 1 *км* при частоте 100 *кгц*.

Фильтр присоединения *3* (рис. 12-3) согласовывает (уравнивает) входное сопротивление кабеля с входным сопротивлением линии, соединяет нижнюю обкладку конденсатора связи с землей, образуя, таким образом, замкнутый контур для токов высокой частоты, и компенсирует емкость конденсатора связи, что позволяет уменьшить до минимума сопротивление конденсатора для токов высокой частоты.

Фильтр присоединения представляет собой воздушный трансформатор с отпайками, позволяющими менять самоиндукцию его обмоток и взаимную индукцию между ними. В цепи обмотки L_1 включен конденсатор связи C, а в цепи обмотки L_2 — конденсатор C_2 фильтра. Фильтр присоединения свободно пропускает токи только в определенном рабочем диапазоне частот. При этих частотах затухание фильтра относительно мало (порядка 0,15—0,25 *неп*), а за пределами рабочих частот резко возрастает. Фильтр присоединения ОФП-4, выпускаемый отечественной промышленностью, выполняется на три диапазона, охватывающие частоты 50—300 *кгц*. Для линий 500 *кв* выпускается фильтр ОКФП-500, рассчитанный на работу с конденсатором емкостью 525 *пф*.

Параллельно обмотке L_1 фильтра включается разрядник P. При пробое конденсатора связи при перекрытии его изоляции разрядник срабатывает и создает надежный путь для отвода в землю токов к. з.

З а г р а д и т е л ь *5* преграждает выход токов высокой частоты за пределы линии. Сопротивление заградителя $z_{заг}$ зависит от частоты f. Для токов высокой частоты, передаваемых по данному каналу, $z_{заг}$ велико, а для токов промышленной частоты (50 *гц*) оно очень мало.

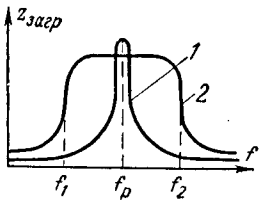


Рис. 12-8. Резонансные характеристики заградителей.

1 — резонансного; *2* — широкополосного.

Заградитель представляет собой резонансный контур (рис. 12-7, *а*), настроенный на определенную частоту — частоту в. ч. поста; он состоит из силовой индуктивной катушки $L_к$ и элемента настройки, выполненного в виде регулируемой емкости C.

Величина C подбирается так, чтобы контур заградителя был настроен в резонанс (тока) на заданную частоту $f_р$, т. е. чтобы $\omega L_к = 1/\omega C$. Такой заградитель называется р е з о н а н с н ы м или о д н о ч а с т о т н ы м. При резонансной частоте сопротивление контура имеет максимальное значение (рис. 12-8) и носит активный характер.

Резонансное сопротивление заградителя должно быть не меньше 1 000 *ом*. Для защиты конденсатора C от грозовых и коммутационных перенапряжений устанавливается разрядник P. Силовая катушка заградителя рассчитывается на прохождение рабочих токов нагрузки и тока к. з.

Выпускаемые отечественной промышленностью заградители КЗ-500 рассчитаны на рабочий ток 700 *а* с пределами настройки 50—300 *кгц*.

Кроме резонансных, применяются ш и р о к о п о л о с н ы е заградители (рис. 12-7, *б*), запирающие токи в некотором довольно широком диапазоне частот $f_1 — f_2$. Такие заградители нужны для каналов, по которым одновременно передается несколько сигналов с разными частотами.

12-4. НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ БЛОКИРОВКОЙ

а) Основные элементы защиты

Упрощенная схема, поясняющая принцип выполнения и действия направленных в. ч. защит, показана на рис. 12-9. Защита состоит из трех основных элементов: пускового органа, органа направления мощности и блокирующего реле $Б$.

П у с к о в о й о р г а н защиты выполняется при помощи двух комплектов реле, один из которых (реле $П_2$) пускает передатчик высокочастотного поста, а второй (реле $П_1$) управляет цепью отключения защиты. Для пуска защиты при междуфазных к. з. применяются токовые реле, включенные на ток фазы, а в случае недостаточной их чувствительности — реле сопротивления. Пуск защит в комплектах от замыканий на землю обычно осуществляется посредством реле, реагирующих на ток нулевой последовательности. В некоторых схемах для пуска защит используется реле тока и напряжения обратной последовательности.

О р г а н н а п р а в л е н и я м о щ н о с т и $М$ осуществляется посредством обычных реле мощности.

В защитах, реагирующих на междуфазные к. з., к реле мощности подводятся ток и напряжение сети по известным схемам (в большинстве случаев по 90-градусной).

В комплектах от замыканий на землю реле мощности включается на ток и напряжение нулевой последовательности. В защитах от несимметричных к. з. реле мощности питается током и напряжением обратной последовательности.

Реле мощности замыкает свои контакты при мощности к. з., направленной от шин в линию; срабатывая, оно останавливает передатчик (при помощи реле *ПР*), подает ток в рабочую обмотку блокирующего реле *Б* и замыкает цепь отключения защиты. При направлении мощности к шинам реле *М* не действует и разрешает пуск передатчика. Реле мощности, реагирующие на S_0 и S_2, действуют при обратных направлениях мощности.

Блокирующее реле *Б* управляется током высокой частоты. При наличии высокочастотного сигнала блокирующее реле

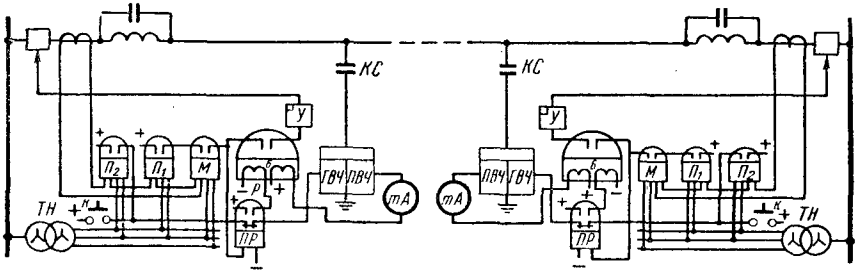


Рис. 12-9. Упрощенная схема направленной защиты с высокочастотной блокировкой.

размыкает цепь отключения, не позволяя защите действовать. В качестве блокирующего реле обычно используется поляризованное реле с двумя обмотками — рабочей и тормозной. Рабочая обмотка получает питание при срабатывании реле мощности и действует на замыкание контактов поляризованного реле. Тормозная обмотка питается выпрямленным током высокой частоты, получаемым из анодной цепи приемника, и действует на размыкание контактов реле. При одновременном питании рабочей и тормозной обмоток реле не действует, так как тормозной момент преобладает над рабочим.

б) Работа защиты в различных режимах

При внешнем к. з. на обоих концах линии срабатывают пусковые реле $П_1$ и $П_2$. Они пускают передатчики и подают плюс к контактам реле мощности *М*. На питающем конце линии, где мощность к. з. направлена от шин в линию, реле мощности срабатывает, останавливает передатчик своего комплекта, подает плюс к контактам блокирующего реле *Б* и ток в его рабочую обмотку, подготавливая, таким образом, защиту к действию. Однако цепь отключения защиты остается разомкнутой контактами блокирующего

реле, в тормозную обмотку которого поступает блокирующий ток с противоположного конца линии. На противоположном (ближнем к месту повреждения) конце линии мощность к. з. направлена к шинам, поэтому реле мощности на этом конце линии не действует, разрешая реле $П_2$ запустить передатчик, который посылает блокирующий ток высокой частоты. Этот ток, принятый и выпрямленный приемниками обоих постов, поступает в тормозные обмотки блокирующих реле *Б* и не позволяет им действовать. Благодаря этому предотвращается срабатывание защиты на питающем конце линии и дополнительно осуществляется блокировка защиты на приемном конце линии, цепь отключения которой уже разомкнута контактами реле мощности. Таким образом, при внешнем к. з. блокирующий высокочастотный импульс посылается только с того конца линии, где контакты реле мощности разомкнуты, что и обеспечивает селективность защиты.

При к. з. в зоне и двустороннем питании места повреждения мощность к. з. на обоих концах линии направлена от шин в линию. В обоих комплектах защиты срабатывают пусковые реле $П_1$ и $П_2$ и реле мощности *М*. Реле мощности размыкают при помощи промежуточного реле *ПР* цепь пуска в. ч. поста. Вследствие бездействия обоих передатчиков ток высокой частоты отсутствует и блокирующие реле срабатывают, разрешая защите произвести отключение линии.

При качаниях, обычно сопровождающихся возрастанием тока и снижением напряжения, пусковые реле тока и сопротивления могут приходить в действие. Поэтому поведение защиты в этих условиях будет зависеть от поведения реле мощности, которое зависит от положения точки электрического центра качаний. Если последний окажется в пределах защищаемой линии (см. § 13-2), то знаки мощности по ее концам будут положительными (т. е. направленными от шин в линию). В этом случае защита подействует неправильно и отключит линию. На всех остальных участках сети, где электрический центр расположен вне линии, направления мощности по их концам будут различными и защита будет блокироваться, как и в условиях внешних к. з.

Для предотвращения неправильных отключений применяется специальная блокировка, запрещающая работать защите при качаниях (см. § 13-3).

Пусковые реле, реагирующие на составляющие нулевой или обратной последовательностей, при качаниях, возникающих в симметричном режиме, не действуют, поэтому для таких защит блокировок от качаний не требуется.

в) Особенности пускового органа защиты

Из принципа действия защиты и работы схемы следует, что непременным условием правильной работы защиты при внешних к. з. является пуск высокочастотного передатчика на ближнем

к месту к. з. (т. е. приемном) конце линии. При несогласованной чувствительности пусковых реле на противоположных концах линии это условие может быть нарушено. Так, например, если при внешнем к. з. реле $П_2$ (рис. 12-9), пускающее в. ч. передатчик на приемном конце линии, не сработает из-за недостаточной чувствительности, а реле $П_1$, пускающее защиту на питающей стороне линии, окажется более чувствительным и подействует, то защита на питающем конце неправильно отключит линию из-за отсутствия блокирующего сигнала.

Для исключения этого пусковой орган выполняется из двух комплектов пусковых реле: одного — *$П_2$ для пуска высокочастотной части и второго — $П_1$ в цепи отключения.* При этом реле $П_2$ должно быть в 1,5—2 раза чувствительнее реле $П_1$ на своем и противоположном концах линии. Такой принцип пуска предусмотрен в схеме, показанной на рис. 12-9.

Имеется и второй способ, при котором пусковой орган состоит из одного комплекта, управляющего как высокочастотной, так и релейной частями защиты. *В этом случае пусковые реле на каждом конце линии пускают в. ч. пост своего комплекта и одновременно осуществляют пуск поста на противоположной стороне линии.* Такой принцип пуска получил название дистанционного; схема его выполнения рассматривается в § 12-5.

При дистанционном пуске несогласованность в чувствительности пусковых реле на любом конце линии не представляет опасности, так как при работе одного пускового реле запускаются оба поста и блокирующий импульс с приемного конца линии будет, таким образом, обеспечен, даже если установленное там пусковое реле не подействует.

Уставки пусковых реле. Оба пусковых комплекта реле $П_1$ и $П_2$ должны быть отстроены от максимальной нагрузки (если они на нее реагируют) и надежно действовать при к. з. на противоположном конце защищаемой линии. Токовые реле отстраиваются от нагрузки по формуле

$$I_{с.з} = \frac{k_{зап}}{k_{воз}} I_{н.макс}, \qquad (12\text{-}2)$$

а реле сопротивления — по формуле

$$z_{с.з} = \frac{1}{k_{зап} k_{воз}} z_{раб.мин}, \qquad (12\text{-}3)$$

при $\varphi_р = \varphi_{нагр}$. В обоих случаях $k_{зап} > 1$.

Исходя из этого уставка пусковых реле $П_2$, пускающих в. ч. передатчик, выбирается по выражению (12-2) или (12-3), а уставки пусковых реле $П_1$, управляющих цепью отключения, принимаются в 1,5—2 раза грубее уставок на $П_2$ по соображениям, приведенным выше.

Чувствительность реле, управляющих отключением, проверяется по к. з. на противоположном конце линии, коэффициент чувствительности должен быть в наихудшем случае не меньше 1,5—2.

По принципу своего действия защита не реагирует на перегрузки, поскольку в этом режиме мощности по концам линии имеют разные направления, так же как и при внешнем к. з. Поэтому при недостаточной чувствительности можно не считаться с маловероятными или кратковременными перегрузками (например, токами самозапуска и т. п.) и отстраивать реле $П_2$ от нормальной нагрузки. При этом пусковые реле $П_1$, управляющие цепью отключения, должны быть отстроены от максимальной нагрузки.

Реле, питающиеся от фильтра тока или напряжения нулевой и обратной последовательностей, на нагрузку не реагируют, но их необходимо отстраивать от небаланса, возможного в условиях нагрузки. Величину небаланса оценивают на основании данных опыта и проверяют непосредственным измерением при включении защиты.

г) Контроль исправности высокочастотного канала и приемопередатчиков

Нарушение высокочастотного канала или неисправности в постах, в частности повреждение электронных ламп, приводят к неправильной работе защиты при внешних к. з. В связи с этим в схеме защиты предусматривается устройство контроля за исправностью высокочастотной аппаратуры. Для этой цели установлены кнопка $К$ и миллиамперметр mA (рис. 12-9). Периодически дежурный персонал, нажимая кнопку $К$, пускает передатчик и по показанию миллиамперметров, установленных в выходной цепи приемников, проверяет величину тока приема на обоих концах линии. Цепь от кнопки $К$ заводится через контакты реле $ПР$, с тем чтобы проверка не препятствовала правильной работе защиты, если во время ее проведения возникает внешнее к. з. За последнее время разработаны и применяются автоматические устройства для проверки исправности канала с пуском от часов в определенное время суток.

12-5. РАЗНОВИДНОСТИ НАПРАВЛЕННЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗАЩИТ И ИХ СХЕМЫ

а) Направленная защита с высокочастотной блокировкой

Защита состоит из д в у х комплектов: одного от междуфазных к. з., сравнивающего направление мощности в фазах, и второго от замыканий на землю, реагирующего на знак мощности нулевой последовательности. Каждый комплект выполняется по схеме, приведенной на рис. 12-9. В комплекте от междуфазных к. з. в качестве органа мощности $М$ служат реле мощности, включенные на ток фазы и соответствующее напряжение (по принятым схемам), а в качестве пусковых реле $П_1$ и $П_2$ используется реле, реагирующие на ток или сопротивление фазы.

Комплект от замыканий на землю выполняется при помощи реле мощности, включенного на мощность нулевой последовательности. Пусковыми реле служат токовые реле, реагирующие на ток нулевой последовательности.

При к. з. на землю предусматривается блокировка междуфазного комплекта для предупреждения неправильного действия его под влиянием токов в неповрежденных фазах. Комплект от междуфазных к. з. должен иметь блокировку от качаний, а в защитах с пуском от реле сопротивлений — и блокировку от неисправностей в цепях напряжения.

Несмотря на простоту принципа действия, полные схемы подобных защит получаются достаточно многорелейными и сложными. При этом нужно учитывать, что по своему принципу действия направленная защита с в. ч. блокировкой не реагирует на к. з. за пределами защищаемой линии, поэтому ее приходится дополнять резервными защитами, что еще больше усложняет исполнение защиты. В большинстве случаев в качестве резервной защиты используются дистанционная защита от междуфазных к. з. и ступенчатая защита нулевой последовательности от замыканий на землю.

б) Дистанционная защита в сочетании с высокочастотной блокировкой

Дистанционная защита имеет органы направления мощности (самостоятельные или в сочетании с дистанционными) и пусковые реле.

Используя эти элементы и добавляя к ним блокирующее реле и высокочастотную часть, можно получить комбинированную защиту, выполняющую функции основной и резервной защит, с меньшим числом реле, чем в предыдущем варианте. Блокирующее реле в схеме комбинированной защиты шунтирует реле времени второй зоны, разрешая защите действовать без выдержки времени, при к. з. на защищаемой линии.

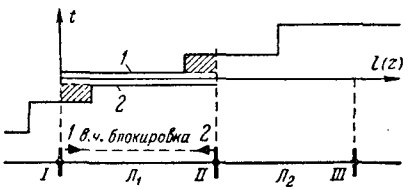


Рис. 12-10. Характеристика дистанционной защиты с высокочастотной блокировкой.

Такая комбинированная защита при помощи в. ч. блокировки обеспечивает мгновенное двустороннее отключение к. з. в пределах защищаемой линии. Комплект же дистанционной защиты позволяет отключать к. з. на шинах, резервировать защиты следующего участка, а также служит резервом при к. з. на защищаемой линии в случае отказа в. ч. блокировки или ее отсутствия.

Характеристика дистанционной защиты с в. ч. блокировкой приведена на рис. 12-10, штриховкой отмечено ускорение, достигаемое с помощью в. ч. блокировки.

Общий принцип исполнения таких схем можно уяснить из рис. 12-11.

Пусковые реле $РП_1$ и $РП_2$ и орган направления мощности $РМ$ (или направленный дистанционный орган) дистанционной защиты управляют работой в. ч. поста (генератора и приемника) и блокирующего реле $РБ$, как показано на схеме. При к. з. на защищаемой линии, когда в. ч. генераторы с обеих сторон линии остановлены, блокирующее реле $РБ$ шунтирует контакты реле времени $РВ_{II}$ второй (или третьей) зоны дистанционной защиты и она срабатывает без выдержки времени. При внешнем к. з. блокирующее реле не действует и защита работает как дистанционная, резервируя следующий участок сети с помощью второй и третьей зон.

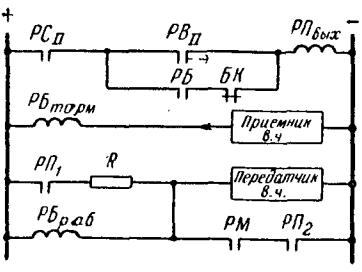


Рис. 12-11. Принципиальная схема дистанционной защиты в сочетании с высокочастотной блокировкой (для одной фазы).

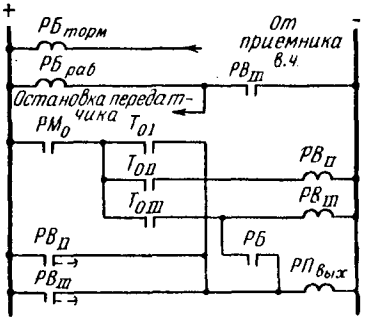


Рис. 12-12. Принципиальная схема направленной защиты нулевой последовательности в сочетании с высокочастотной блокировкой.

Для предупреждения неправильной работы при качаниях цепь блокирующего реле заведена через контакты блокировки от качаний $БК$ дистанционной защиты.

По рассмотренной схеме выполняется сочетание дистанционной защиты ПЗ-158 и ПЗ-2 с в. ч. блокировкой. В качестве чувствительного пускового реле $РП_1$, пускающего в. ч. генератор, используются пусковые реле блокировки от качаний, реагирующие на появление I_2 и I_0 или U_2 и U_0. Органом, контролирующим направление мощности ($РМ$), служат направленные дистанционные реле третьей зоны. Одновременно эти реле выполняют функции второго (более грубого) пускового реле $РП_2$, пускающего блокирующее реле $РБ$ и замыкающего цепь останова в. ч. генератора.

Для осуществления в. ч. блокировки панель дистанционной защиты дополняется приставкой, которая содержит блокирующее реле $РБ$.

Поскольку дистанционная защита используется в Советском Союзе только как защита от междуфазных к. з., необходимо предусматривать аналогичное сочетание резервной защиты нулевой последовательности с в. ч. блокировкой. Полная схема подобной защиты дана на рис. 12-12. Жирными линиями показаны дополнения, обусловленные в. ч. блокировкой.

Преимущество комбинированного исполнения направленной в. ч. защиты с резервной заключается в уменьшении числа реле, на что уже указывалось выше. Недостатком совмещения резервной и основной защит является отсутствие взаимного резервирования между ними, имеющее место при раздельном исполнении.

в) Фильтровая направленная защита с высокочастотной блокировкой

В фильтровых защитах орган направления мощности и орган пуска реагируют на составляющие обратной последовательности. Такое исполнение защиты дает ряд преимуществ.

Фильтровые защиты получаются односистемными (с одним реагирующим органом на три фазы), они не реагируют на нагрузку и качания в симметричных режимах и обладают высокой чувствительностью. В СССР разработаны фильтровые защиты от несимметричных к. з. и от всех видов повреждений.

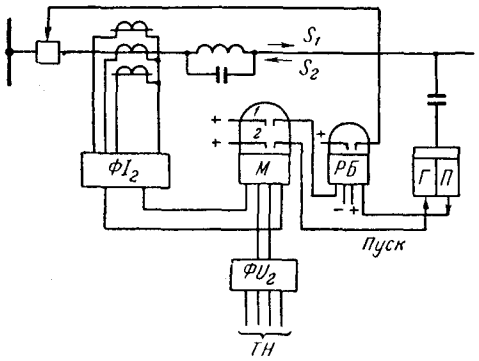


Рис. 12-13. Фильтровая направленная высокочастотная защита с двусторонним реле мощности.

Фильтровые защиты от несимметричных повреждений отличаются особой простотой. Они могут выполняться с одним реле мощности, совмещающим в себе функции органа мощности и органа пуска. На рис. 12-13 представлена схема с реле мощности *М* двустороннего действия. Реле *М* включено на ток и напряжение обратной последовательности через соответствующие фильтры. Вторым элементом схемы является блокирующее реле *РБ*, действующее, как и в предыдущих схемах. При внешнем к. з. реле мощности на приемном конце линии замыкает контакты *2* и пускает в. ч. генератор, который посылает блокирующий импульс на питающий конец линии, где реле мощности *М* замыкает контакт *1*.

Вследствие наличия тормозного тока блокирующее реле *РБ* не позволяет защите питающего конца сработать на отключение.

При к. з. в зоне реле мощности на обоих концах линии замыкают контакты *1*, в. ч. генераторы бездействуют и реле *РБ* срабатывает на отключение с обеих сторон линии.

При симметричных к. з. защита не действует, что является органическим недостатком данной схемы, ограничивающим ее применение. Для устранения этого дефекта защиту можно дополнить относительно простым комплектом от трехфазных к. з.

Фильтровая защита от всех видов к. з. Эта защита охватывает все виды повреждений и является полноценной защитой. Но ее схема получается значительно сложнее, чем защита от несимметричных повреждений.

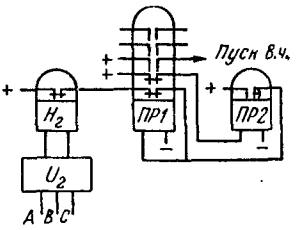


Рис. 12-14. Принципиальная схема пускового органа фильтровой высокочастотной защиты.

Защита от всех видов к. з. основана на следующих принципах [Л. 23]:

1. В качестве органа направления мощности используется одно реле, включенное на мощность обратной последовательности, которое при трехфазных к. з. переключается пусковым органом на фазный ток и линейное напряжение.

2. Пуск релейной и в. ч. части защиты осуществляется одним реле, при всех видах к. з. Это реле реагирует на появление U_2 или I_2. Чтобы обеспечить действие защиты при трехфазных к. з., пусковой орган фиксирует (запоминает) на некоторое время появление кратковременной несимметрии, возникающей в начале трехфазного повреждения. Схема пускового органа с фиксацией кратковременного действия пускового реле H_2 приведена на рис. 12-14.

Нормально обмотка промежуточного реле *ПР1* обтекается током, цепь которого проходит через замкнутые контакты реле H_2 и *ПР1*. При срабатывании реле H_2 цепь тока, питающего обмотку реле *ПР1*, прерывается и реле отпадает, производя пуск защиты. Одновременно реле *ПР1* размыкает цепь своей обмотки и вследствие этого не может возвратиться в исходное положение до тех пор, пока в его обмотку не будет подан ток контактами реле *ПР2*. Как видно из схемы (рис. 12-14), нормально реле *ПР2* питается током и находится в подтянутом состоянии. При действии *ПР1* ток в реле прерывается и оно отпадает с выдержкой времени порядка 0,3—0,5 *сек*, при этом контакт *ПР2* замыкается и подает ток в реле *ПР1*, возвращая его в нормальное положение. Благодаря особенностям схемы пуска *ПР1* оно отзывается на любое кратковременное действие реле H_2, фиксируя появление U_2 в начальный момент трехфазного к. з. на время (0,3—0,5 *сек*), достаточное для действия защиты.

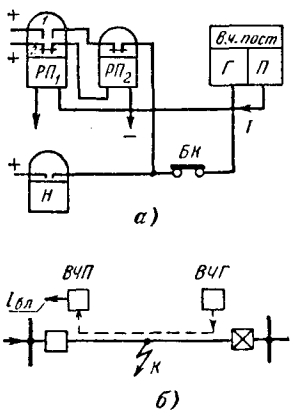


Рис. 12-15. Дистанционный пуск передатчика на противоположном конце линии.

а — схема; *б* — возможность отказа защиты при одностороннем питании.

При двухфазных и однофазных повреждениях U_2 появляется на все время к. з., действие схемы в этом случае понятно из чертежа (рис. 12-14).

3. Дистанционный пуск генератора в. ч. При действии пускового реле на одном конце линии с помощью специальной схемы (рис. 12-15, *а*) производится дистанционный пуск генератора высокой частоты на противоположной стороне. Дистанционный пуск осуществляется с помощью промежуточного реле $РП_1$, включенного на ток I приемника высокой частоты $П$, и второго вспомогательного реле $РП_2$ для возврата схемы. При пуске генератора на противоположном конце линии приемник данной стороны принимает высокочастотный сигнал и дает ток в реле $РП_1$. Последнее срабатывает и контактом I пускает генератор $Г$ на данном конце линии. При этом реле $РП_1$ получает питание от этого же генератора и поэтому само по себе не может возвратиться в исходное положение. Для возврата реле $РП_1$ и прекращения пуска генератора служит реле $РП_2$. Оно срабатывает (отпадает) при действии реле $РП_1$ и размыкает с замедлением порядка 0,4 *сек* цепь пуска генератора.

Дистанционный пуск может привести к отказу защиты, при одностороннем питании поврежденной линии (рис. 12-15, *б*), если к. з. на приемном конце линии *B* отключается раньше, чем на питающем *A*, или если линия в момент повреждения находилась под напряжением. В этих случаях генератор в. ч. на приемном (отключенном) конце линии, запущенный дистанционно, посылает импульс в. ч., блокирующий защиту на питающем конце, *не давая ей работать. Для исключения* этого недостатка цепь пуска генератора заведена через блок-контакты *БК* выключателя (рис. 12-15, *а*). При отключении выключателя блок-контакты размыкаются и возможность пуска в. ч. генератора исключается.

На указанных принципах выполнена защита типа ПЗ-164.

12-6. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЗАЩИТА

а) Принцип действия

Дифференциально-фазная высокочастотная защита основана на сравнении фаз тока по концам защищаемой линии.

Считая положительными токи, направленные от шин в линию, находим, что при внешних к. з. в точке K_1 (рис. 12-16, *а*) токи I_m и I_n по концам защищаемой линии имеют различные знаки и, следовательно, их можно считать сдвинутыми по фазе на 180°. В случае же к. з. на защищаемой линии (рис. 12-16, *б*) токи на ее концах имеют одинаковые знаки и их можно принять совпадающими по фазе, если пренебречь сдвигом векторов э. д. с. $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$ по концам электропередачи и различием углов полных сопротивлений z_m и z_n.

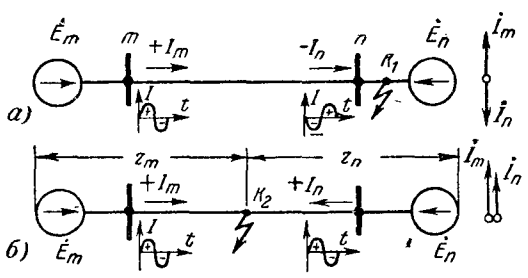


Рис. 12-16. Принцип действия дифференциально-фазной высокочастотной защиты.

Таким образом, *сравнивая фазы токов по концам линии, можно установить местоположение к. з.* В обычных схемах дифференциаль-

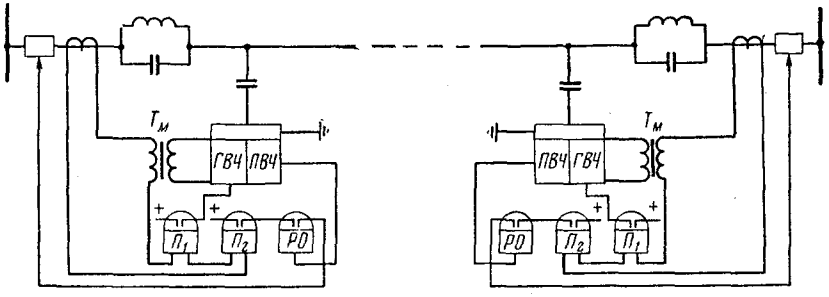


Рис. 12-17. Упрощенная принципиальная схема дифференциально-фазной высокочастотной защиты.

ных защит сравнение фаз токов осуществляется в дифференциальных реле путем непосредственного сравнения токов, проходящих в начале и конце линии; в дифференциально-фазной в. ч. защите сравнение фаз осуществляется косвенным путем посредством токов высокой частоты.

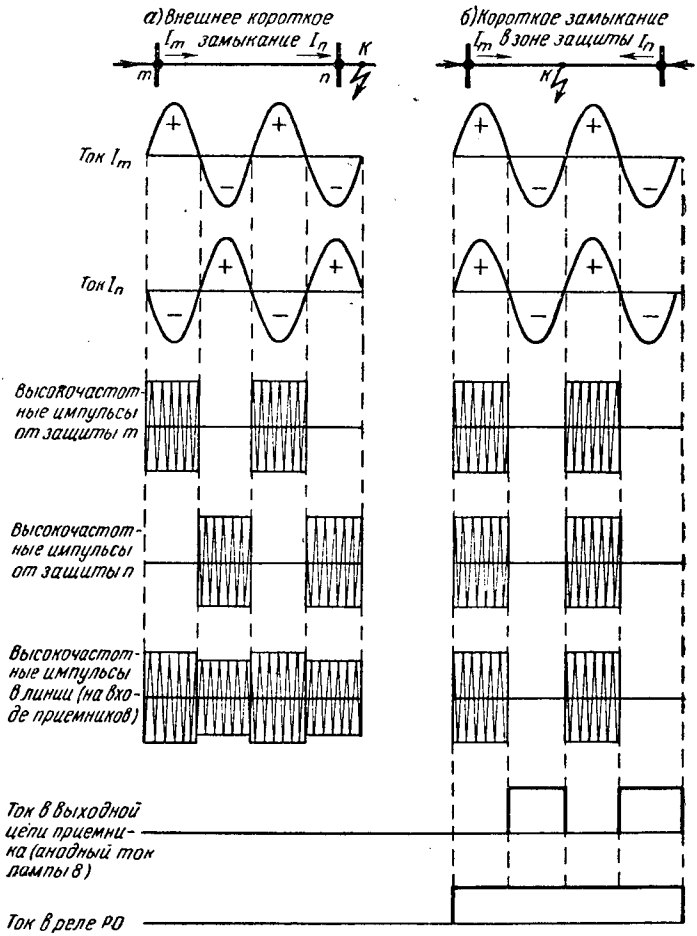


Рис. 12-18. Диаграмма токов в дифференциально-фазной высокочастотной защите.

Упрощенная схема, иллюстрирующая работу дифференциально-фазной защиты, и диаграмма, поясняющая принцип ее действия, приведены на рис. 12-17 и 12-18.

Защита состоит из приемопередатчика, включающего в себя в. ч. генератор *ГВЧ*, приемник *ПВЧ*, реле отключения *РО*, питающегося током приемника, и двух пусковых реле $П_1$ и $П_2$, одно из

которых пускает *ГВЧ*, а второе контролирует цепь отключения защиты. Токи высокой частоты передаются по каналу, образованному проводом линии высокого напряжения и землей.

Особенность защиты заключается в том, что в. ч. генератор управляется (манипулируется) непосредственно токами промышленной частоты при помощи специального трансформатора $T_м$. Генератор включен так, что при положительной полуволне промышленного тока он работает, посылая в линию ток высокой частоты, а при отрицательной — запирается и ток высокой частоты прекращается. В то же время приемник выполнен таким образом, что при наличии токов высокой частоты, поступающих в его входной контур, выходной ток, питающий реле *РО*, равен нулю, а при отсутствии в. ч. сигнала появляется выходной ток, который поступает в реле *РО*. Таким образом, генератор высокой частоты работает только в течение положительных полупериодов тока промышленной частоты, а приемник — при отсутствии в. ч. сигналов.

При внешнем к. з. (рис. 12-18, *а*), когда фазы первичных токов по концам линии противоположны, генератор на конце линии *т* работает в течение первого полупериода промышленного тока, а на конце *п* — в течение следующего полупериода. Ток высокой частоты протекает по линии непрерывно и питает приемники на обеих сторонах линии. В результате этого выходной ток в цепи приемника и реле *РО* отсутствует, и реле (защита) не работает.

При к. з. в зоне (рис. 12-18, *б*) генераторы на обоих концах линии работают одновременно, поскольку фазы токов по концам линии совпадают. Высокочастотный ток, поступающий при этом в приемники, будет иметь прерывистый характер с интервалами времени, равными полупериоду промышленного тока. В этом случае приемник работает в промежутки времени, когда ток высокой частоты отсутствует, и заперт (не работает) во время его прохождения. В выходной цепи приемника появляется прерывистый ток, который сглаживается специальным устройством и подается в реле *РО*. Последнее срабатывает и отключает линию.

Таким образом, сдвиг фаз между токами, проходящими по обоим концам линии, определяется по характеру в. ч. сигналов (сплошные или прерывистые), *на которые при помощи приемника реагирует реле РО.*

По принципу своего действия дифференциально-фазная защита не реагирует на нагрузку и качания, так как в этих режимах токи на обоих концах линии имеют разные знаки.

б) Основные органы дифференциально-фазной защиты и особенности их выполнения

Дифференциально-фазная защита состоит (рис. 12-17) из трех основных элементов: пускового органа $П_1$ и $П_2$, пускающего передатчик и разрешающего действовать защите при к. з.;

органа манипуляции, управляющего (с помощью $T_м$) передатчиком токов высокой частоты в зависимости от знака сравниваемых токов, и органа сравнения фаз токов, действующего на отключение при совпадении фаз токов, проходящих по концам линии.

Дифференциально-фазная защита не реагирует на нагрузку, поэтому пусковой орган в схемах этой защиты не является обязательным. Однако при его отсутствии любое нарушение непрерывной циркуляции токов высокой частоты будет приводить к срабатыванию реле *РО* и ложному отключению линии. Поэтому во всех схемах дифференциально-фазной защиты применяются пусковые реле, отстроенные от токов нагрузки.

К особенностям выполнения органов защиты относятся:

1) одновременный пуск в. ч. передатчиков на обоих концах защищаемой линии.

При удаленных внешних к. з., когда пусковые реле, пускающие в. ч. передатчик, работают на пределе своей чувствительности, возможна работа пускового органа только с одной стороны линии. Тогда ток высокой частоты будет прерывистым и защита подействует ложно. Для исключения этого пусковой орган защиты выполняется из двух комплектов: одного — чувствительного, пускающего высокочастотный передатчик, и второго — более грубого (в 1,5—2 раза), управляющего цепью отключения.

2) Нарушение непрерывности высокочастотного сигнала при внешних к. з. и качаниях может возникнуть также вследствие неодновременного действия реле, пускающих передатчики, установленных на противоположных концах линии. Поэтому пуск в. ч. передатчиков при внешних к. з. должен осуществляться несколько раньше, чем срабатывает реле *РО*, замыкающее цепь отключения защиты, а останов их должен происходить несколько позже возврата пусковых реле, управляющих цепью отключения [1].

3) Выполнение дифференциально-фазных защит, сравнивающих токи в каждой фазе, получается весьма сложным и дорогим.

Защита значительно упрощается и становится более надежной, если вместо токов фаз сравнивать их симметричные составляющие, получаемые от фильтров, преобразующих трехфазную систему токов в однофазную. В качестве фильтра в защитах этого типа используются комбинированные фильтры, на выходе которых получается ток $\dot{I}_ф$, пропорциональный $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ или $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$.

Подобные фильтры обеспечивают действие защиты при всех видах к. з.

В случае симметричных к. з. ток фильтра обусловливается составляющей I_1, а при несимметричных к. з. — составляющими I_1 и I_2 или I_1 и I_0.

---

[1] При к. з. в зоне передатчик на отключившемся конце линии должен немедленно останавливаться для предупреждения блокировки защиты противоположной стороны.

в) Искажение фаз сравниваемых токов (фазовые погрешности)

При рассмотрении принципа действия защиты предполагалось, что при внешних к. з. токи I_m и I_n по концам защищаемой линии сдвинуты по фазе на угол $\psi = 180$, а при к. з. в зоне — совпадают по фазе, т. е. $\psi = 0$ (рис. 12-16 и 12-18).

В действительности из-за погрешности трансформаторов тока и ряда других причин (отмечаемых дальше) фазы вторичных токов искажаются, и поэтому сдвиг фаз ψ между токами на обоих концах линии отличается от указанных выше значений. При больших искажениях фаз токов I_m и I_n возможны неправильные действия защиты при внешних к. з. и отказ в работе — при к. з. в зоне. В связи с этим *параметры защиты выбираются так, чтобы она блокировалась в условиях внешнего к. з. при* $\psi = 180 - \beta$ *и работала при к. з., в зоне при* $\psi > 0$. *Предельное значение угла* β, *при котором защита должна блокироваться,* называется углом блокировки защиты (см. рис. 12-26). Для уменьшения искажений фаз I_m и I_n трансформаторы тока, питающие дифференциально-фазную защиту, должны выбираться по 10%-ным характеристикам, при этом угловая погрешность каждого трансформатора тока не будет превышать 7%.

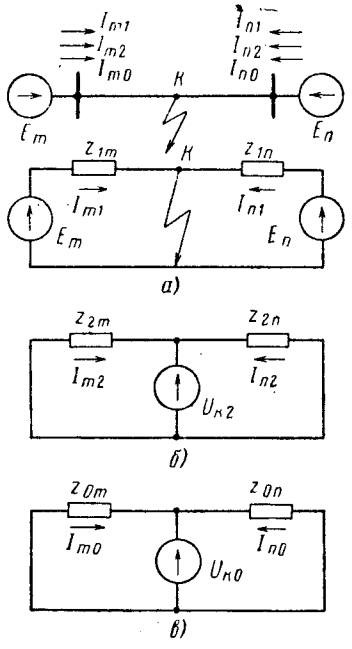


Рис. 12-19. Схемы замещения симметричных составляющих.

а — прямой; *б* — обратной и *в* — нулевой последовательностей.

При к. з. в зоне кроме погрешности трансформаторов тока, искажающих фазы токов, имеется расхождение фаз первичных токов I_m и I_n вследствие *различия фаз между э. д. с.* $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$ эквивалентных генераторов (рис. 12-19, *а*); *разницы углов полных сопротивлений* z_m и z_n в схемах замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 12-19, *а, б, в*) и *наложения токов нагрузки на токи к. з.*

Токи прямой последовательности (рис. 12-19, *а*) $I_{m1} = \dot{E}_m/z_{1m}$, а $I_{n1} = \dfrac{\dot{E}_n}{z_{1n}}$. Их фазы зависят от фаз э. д. с. $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$. С учетом их различия, а также влияния нагрузки и несовпадения углов z_{1m} и z_{1n} сдвиг фаз ψ_1 между I_{1m} и I_{1n} отличается от нуля — $\psi_1 \neq 0$.

Фазы токов обратной и нулевой последовательности на обоих концах линии определяются одним и тем же напря-

жением в месте к. з. ($\dot{U}_{к2}$ или $\dot{U}_{к0}$), расхождение фаз $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$ на эти составляющие не влияет.

Искажение, обусловленное различием углов сопротивлений, не велико, поэтому практически токи I_{2m} и I_{2n}, а также I_{0m} и I_{0n} можно считать совпадающими по фазе.

Таким образом, *сдвиг фаз между сравниваемыми токами* $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ или $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$ *на каждом конце линии определяется в основном различием фаз токов прямой последовательности* I_{1m} и I_{1n}. Учитывая это, коэффициент k выбирается возможно большим с тем, чтобы при несимметричных к. з. влияние тока I_1 на фазу суммарного тока было наименьшим. Искажение фаз токов I_m и I_n при внешних к. з. рассмотрено в § 12-8.

12-7. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЗАЩИТА ТИПА ДФЗ-2

Защита типа ДФЗ-2 [Л. 55, 57] предназначена для линий 110 и 220 *кв* в качестве основной быстродействующей защиты от всех видов к. з. Принцип действия защиты основан на сравнении фаз токов $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ по концам защищаемой линии. Схема защиты построена аналогично принципиальной схеме, приведенной на рис. 12-17. Защита имеет три органа: пусковой, манипуляции и сравнения фаз.

Пусковой орган состоит из двух комплектов — один, более чувствительный пускает в. ч. пост, а второй управляет цепью отключения и реле сравнения *РО*. Оба комплекта приходят в действие только при появлении токов обратной и нулевой последовательностей, благодаря этому они не реагируют на нагрузку и обладают высокой чувствительностью.

Для обеспечения действия защиты при трехфазных к. з. пусковой орган выполнен по схеме, позволяющей фиксировать кратковременную несимметрию, возникающую в первый момент трехфазного к. з. Фиксация осуществляется по схеме, аналогичной применяемой в фильтровой защите (рис. 12-14). Орган манипуляции подключается на токи линии через комбинированный фильтр $Ф_м$, на выходе которого появляется напряжение $U_м = k'(\dot{I}_1 + k\dot{I}_2)$, управляющее работой генератора высокой частоты.

Релейная часть может работать совместно с в. ч. постом типа ПВЗК — на электронных лампах или с постом ПВЗП — на полупроводниках [Л. 55, 57].

Ниже более подробно рассматриваются устройства отдельных элементов защиты и ее схема (рис. 12-20—12-22).

Пусковой орган защиты. Комплект, пускающий в. ч. пост, состоит из двух реле *ПР1* и *РТ1* и промежуточных реле *КР1* и *КР2* (рис. 12-21), осуществляющих фиксацию появления I_2 и I_0. Комплект, управляющий релейной частью защиты, выполняется с помощью трех реле *ПР2*, *РТ2*, *П3* и промежуточных реле *КР4* и *КР3*, служащих для осуществления схемы фиксации.

Реле *ПР1* и *ПР2* являются основными пусковыми реле, действующими при всех видах к. з. Они питаются выпрямленным током от фильтра тока обратной и нулевой последовательностей (рис. 12-21).

Реле *РТ1*, *РТ2* и *П3* являются дополнительными и предназначены для действия при трехфазных к. з. На длинных линиях в качестве *П3* применяется направленное реле сопротивления типа КРС-131. На средних и коротких линиях используется реле минимального напряжения, если оно обеспечивает необходимую чувствительность.

Реле *РТ1* и *РТ2* являются токовыми типа РТ-40, включенными на ток одноименной фазы.

Пуск в. ч. генератора производится от контактов реле *КР1*, которое приводится в действие пусковым реле *ПР1* или *РТ1*. Обмотка *КР1* в нормальных условиях обтекается током, а контакты в цепи пуска генератора разомкнуты (рис. 12-20). При появлении несимметрии (т. е. токов I_2 и I_0) реле *ПР1* размыкает цепь обмотки *КР1*, реле *КР1* отпадает и пускает генератор, подавая на него плюс. Одновременно вторым контактом реле *КР1* размыкает цепь своей обмотки, исключая этим возможность возврата реле при исчезновении кратковременной несимметрии и фиксируя, таким образом, ее появление.

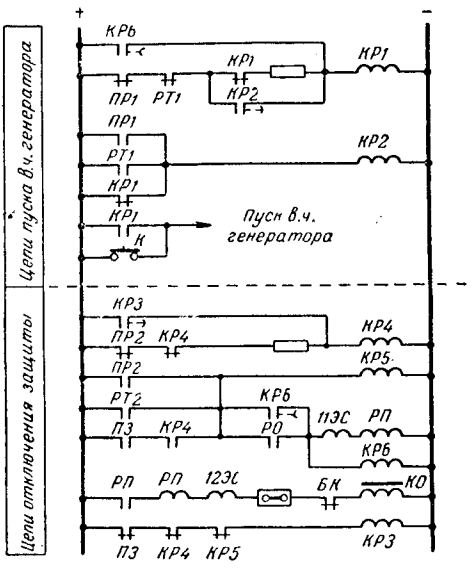


Рис. 12-20. Схема цепей постоянного тока дифференциально-фазной высокочастотной защиты ДФЗ-2. Контакты реле показаны в рабочем положении.

Возврат реле *КР1* и прекращение работы высокочастотного генератора происходят при помощи реле *КР2*. Это реле срабатывает через 0,5—0,6 *сек* после разрыва тока, нормально проходящего по его обмотке через контакт *КР1*, а при к. з. — через контакты *ПР1* или *РТ1*. При срабатывании реле *КР2* замыкает цепь обмотки реле *КР1*, восстанавливая в ней ток, под влиянием которого реле *КР1* возвращается, прекращая пуск генератора.

Таким образом, пуск высокочастотного генератора осуществляется мгновенно при работе реле ПР1, а прекращение его действия происходит с замедлением через 0,5—0,6 сек после возврата ПР1 и РТ1.

При повреждении в зоне действия защиты прекращение работы передатчика в. ч. производится одновременно с подачей импульса на отключение выключателя от реле *КР6*.

Реле *КР6* исключает задержку отключения поврежденной линии при «каскадном» действии защиты. При отсутствии реле *КР6* передатчик на конце линии, отключившемся быстрее, продолжал бы работать, посылая из-за прекращения манипуляции сплошной импульс высокой частоты, в результате чего защита на противоположном (еще не отключившемся) конце линии была бы заблокирована.

Пусковое реле *РТ1* предназначено для исключения одностороннего пуска высокочастотных постов при трехфазном к. з. вне зоны защиты, возможного под влиянием токов небаланса в фильтре, питающем реле *ПР1* и *ПР2*.

Реле *РТ1*, срабатывая при трехфазных к. з. на обоих концах линии, обеспечивают двусторонний пуск передатчика.

Пуск цепи отключения защиты при несимметричных к. з. производится реле *ПР2*. Оно срабатывает при появлении несимметрии и своим нормально открытым контактом пускает реле *КР5*, а нормально закрытым — приводит в действие *КР4*, которое подводит плюс к контактам реле *РО*. При симметричных к. з. пуск защиты осуществляется совместным действием реле *ПР2* и *П3*. В этом случае реле *ПР2* срабатывает кратковре-

менно и разрывает цепь обмотки реле *КР4*, приводя его в действие. Одновременно срабатывает вспомогательное пусковое реле *ПЗ*, действующее в течение всего времени, пока длится трехфазное к. з. Цепь пуска защиты образуется через соединенные последовательно контакты реле *КР4* и *ПЗ*. *Такая схема исключает пуск защиты при симметричных перегрузках,* так как в этом случае не действуют реле *ПР2* и *КР4*, и *кратковременных несимметриях, не сопровождающихся короткими замыканиями,* поскольку при этом не работает реле *ПЗ*. Возврат реле *КР4*, срабатывающего при действии *ПР2*, осуществляется при помощи реле *КР3*, которое замыкает контакт через 0,25 *сек* после срабатывания реле *КР4*, разрывающего ток в его обмотках.

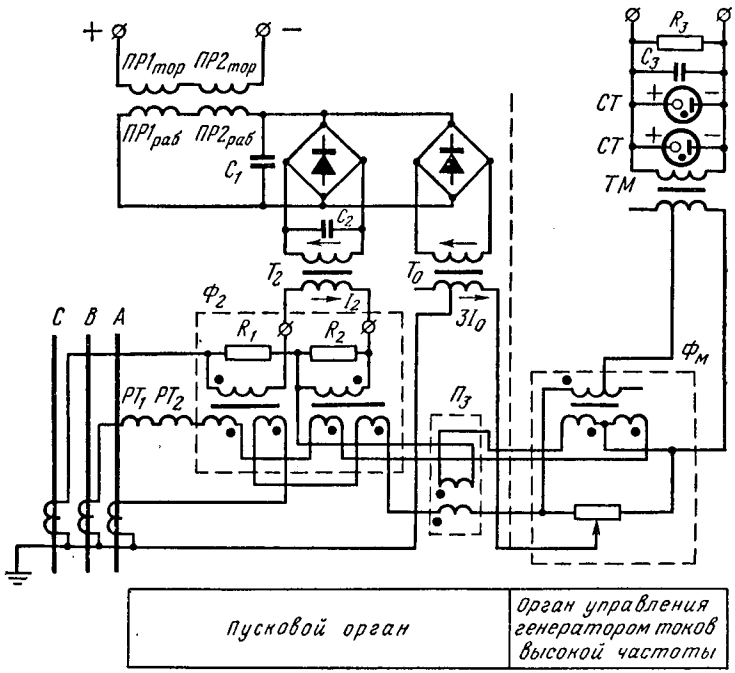


Рис. 12-21. Схема цепей переменного тока дифференциально-фазной высокочастотной защиты ДФЗ-2.

Таким образом, цепь отключения при трехфазных к. з. замыкается только на 0,25 *сек*, чего, однако, достаточно для действия защиты при повреждении линии. При несимметричных к. з. цепь обмотки *КР5* остается замкнутой контактами *ПР2*, пока продолжается к. з.

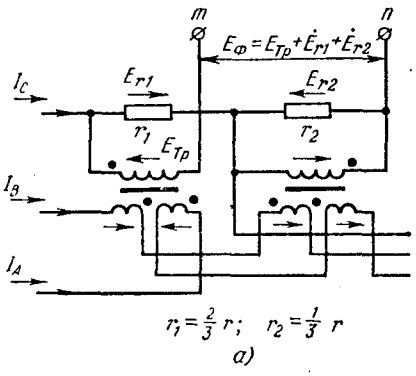
Кроме реле *КР4*, цепью пуска реле *КР3* управляют реле *П3* и *КР5*. Контакты реле *КР5* введены в эту цепь для устранения пульсирующей работы реле *КР3* и *КР4* в случае несимметричного к. з., продолжительность которого превышает время действия реле *КР3*, а контакт реле *П3* служит для блокировки защиты при нарушении цепи напряжения, питающей защиту.

При обрыве цепи напряжения пусковое реле *П3* срабатывает, в результате чего пуск защиты становится возможным не только при к. з., но и при кратковременной несимметрии без к. з., что может вызвать неправильное действие защиты в случае неисправности в. ч. канала.

Предусмотренная в схеме блокировка устраняет эту опасность. Срабатывая, реле *П3* пускает реле *КР3*, которое с выдержкой времени шунтирует контакты пускового реле *ПР2*, не позволяя работать реле *КР4*, а следовательно, и защите при

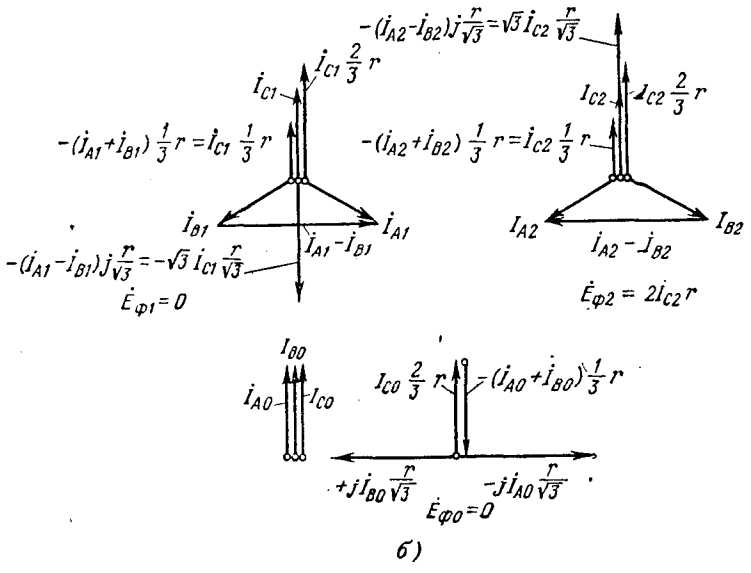
появлении несимметрии. Однако в результате такой блокировки защита не сможет действовать при трехфазных к. з. в зоне в случае повреждения ее цепей напряжения.

Этот недостаток частично устраняется при помощи реле *РТ2*, включенного, так же как и реле *РТ1*, на ток фазы. Реле *РТ2* приходит в действие при трехфазных к. з., осуществляя пуск защиты помимо контактов *П3* и *КР4*. Для отстройки от нагрузки уставка на реле *РТ2* берется грубой, поэтому *РТ2* работает только при к. з. с большим током.



а)

Цепи переменного тока. Пусковые токовые реле *ПР1* и *ПР2* (рис. 12-21) выполняются при помощи поляризованных реле, питаемых токами I_2 и $3I_0$ через выпрямитель. Реле такой конструкции не имеют вибрации контактов и обладают незначительным потреблением. Последнее облегчает выполнение фильтра $Ф_2$, от которого питаются реле.



б)

Рис. 12-22. Схема и векторные диаграммы пускового фильтра токов обратной последовательности.

С целью повышения чувствительности пускового органа при однофазных к. з. реле *ПР1* и *ПР2* питаются, кроме тока I_2, током I_0.

Фильтр $Ф_2$ (рис. 12-22) состоит из активных сопротивлений r_1 и r_2 и трансформаторного реактора, выполненного так же, как и в фильтре защиты *РДЛ* (см. § 10-7). Сопротивление r_1 питается током I_C, реактор — разностью токов $I_A - I_B$ и сопротивление r_2 — суммой токов $\dot{I}_A + \dot{I}_B$. Напряжение $\dot{E}_ф$ на вы-

оде фильтра (зажимы *mn*) равно:

$$\dot{E}_{\Phi} = \dot{E}_{r1} + \dot{E}_{\text{тр}} + \dot{E}_{r2}$$

ии

$$\dot{E}_{\Phi} = \dot{I}_C r_1 - (\dot{I}_A - \dot{I}_B) j x_m - (\dot{I}_A + \dot{I}_B) r_2. \qquad (12\text{-}4)$$

Сопротивления r_1, x_m и r_2 подобраны так, чтобы E_{Φ} равнялось нулю при питании фильтра токами прямой и нулевой последовательностей, для этого принимается:

$$r_1 = \frac{2}{3} r; \quad r_2 = \frac{1}{3} r; \quad x_m = \frac{r}{\sqrt{3}}.$$

Векторные диаграммы фильтра Φ_2 при питании его токами I_1, I_2 и I_0 и соответствующие E_{Φ}, полученные на основе (12-4), показаны на рис. 12-22, *б*.

Пусковые реле имеют две обмотки (рис. 12-21). Рабочие обмотки $ПР1_{раб}$ и $ПР2_{раб}$ действуют на замыкание контактов, а тормозные $ПР1_{тор}$ и $ПР2_{тор}$ служат для улучшения возврата реле.

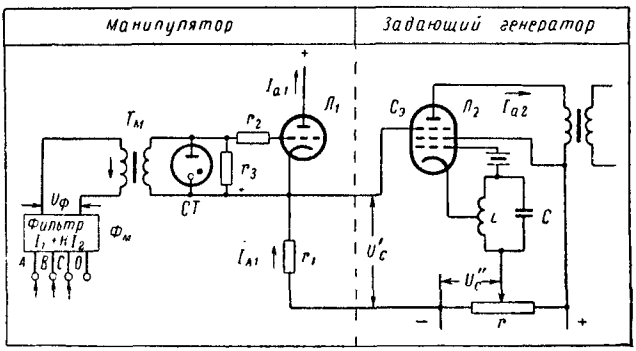


Рис. 12-23. Принципиальная схема органа манипуляции.

Пусковой орган, выполненный по рассмотренной схеме, имеет следующие особенности:

а) *При несимметричных к. з. защита пускается на все время, пока длится к. з., а при симметричных вводится только на время, достаточное для ее действия.*

При кратковременных несимметриях, не сопровождающихся к. з., передатчики пускаются на 0,6 *сек*, цепь же отключения остается разомкнутой контактами реле *ПЗ*, чем исключается неправильное действие защиты.

б) *Пуск передатчика всегда продолжается дольше, чем время включения реле РО.* Благодаря этому при внешних к. з. цепь отключения защиты размыкается после прекращения блокирующего тока высокой частоты, что повышает надежность защиты при внешних к. з.

в) *Защита готова к повторному действию при несимметричных к. з. в любой момент, а при трехфазных — через 0,2 сек после прекращения первого к. з.*, так как контакт реле *КРЗ* размыкается только через 0,2 *сек* после восстановления тока в обмотке реле *КРЗ*.

г) Во время неполнофазного режима пусковые органы защиты могут прийти в действие, если токи I_2 и I_0 превысят уставку реле *ПР1* и *ПР2*. Однако защита блокируется, как при внешнем к. з.

В случае возникновения в этом режиме к. з. на защищаемой линии реле *РО* работает и защита подействует на отключение.

Орган управления, или манипуляции (рис. 12-23 и 12-25), состоит из комбинированного фильтра $\Phi_м$, трансформатора $T_м$ и электронной лампы $Л_1$, непосредственно управляющей лампой $Л_2$ задающего генератора телемонередатчика *ПВЗК*.

Фильтр $Ф_м$ не пропускает токов нулевой последовательности. Напряжение на его выходных зажимах $\dot{U}_ф \equiv \dot{I}_1 + k\dot{I}_2$. При помощи трансформатора $Т_м$ оно подается на сетку лампы $Л_1$ и управляет ее работой. При отрицательной полуволне напряжения $U_ф$ лампа $Л_1$ заперта. При положительной полуволне лампа $Л_1$ открывается и в ней появляется анодный ток I_{a1}. Проходя по сопротивлению r_1, ток I_{a1} создает в нем падение напряжения $U'_c = I_{a1}r_1$, которое подводится к защитной сетке $С_3$ лампы $Л_2$ задающего генератора. Нормально на сетку $С_3$ этой лампы подано напряжение U''_c, создающее на сетке отрицательное смещение по отношению к катоду лампы. Напряжение U''_c запирает анодную цепь лампы $Л_2$, не нарушая колебаний в цепи самовозбуждения генератора, образующейся между катодом и экранной сеткой $С_э$. Напряжение U'_c противоположно по знаку напряжению U''_c и немного превосходит его по величине. Поэтому при появлении U'_c

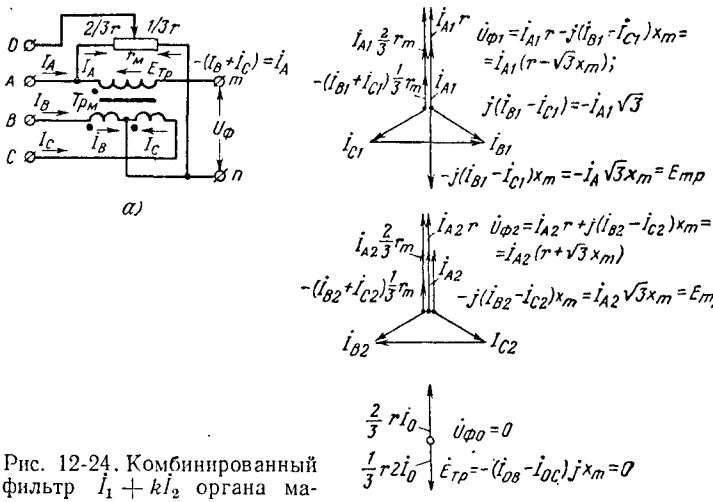


Рис. 12-24. Комбинированный фильтр $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ органа манипуляции.

на защитной сетке лампы $Л_2$ возникает небольшой положительный по отношению к катоду потенциал $U_c = U'_c - U''_c$. Лампа $Л_2$ открывается, в ней появляется анодный ток I_{a2}, и передатчик посылает в. ч. сигнал в линию. При появлении отрицательной полуволны напряжения $U_ф$ в. ч. сигнал прекращается.

Таким образом, *передатчик работает, когда лампа $Л_1$ открыта, и останавливается, когда она закрыта. В соответствии с этим импульсы токов высокой частоты появляются в течение положительной полуволны напряжения $U_м$ и тока $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ и исчезают во время отрицательной полуволны этого тока.*

Для ограничения напряжения на сетке лампы $Л_1$ при больших кратностях тока к. з. в схеме предусмотрены стабилизаторы (стабиливольты) *СТ* (рис. 12-21 и 12-23).

Схема фильтра $Ф_м$ показана на рис. 12-24. Она состоит из трансформаторного реактора $ТР_м$, питающегося разностью токов $\dot{I}_B - \dot{I}_C$, и активного сопротивления $r_м$, по левой части которого проходит ток $\dot{I}_A$, а по правой — сумма токов $\dot{I}_B + \dot{I}_C$.

На вторичных зажимах трансреактора образуется э. д. с. $E_{тр} = -jx_м(\dot{I}_B - \dot{I}_C)$, отстающая на 90° от вектора $\dot{I}_B - \dot{I}_C$. Величина $x_м$ может регулироваться ответвлениями вторичной обмотки и должна удовлетворять условию $x_м < r_м/\sqrt{3}$.

На зажимах левой части сопротивления создается напряжение $\dot{E}_{II} = \dot{I}_A \frac{2}{3} r_m$, а на правой $\dot{E}_I = -(\dot{I}_B + \dot{I}_C) \frac{1}{3} r_m$.

Результирующее напряжение $\dot{U}_{ф1}$ на выходе фильтра равно геометрической сумме векторов напряжений на зажимах его элементов, т. е.

$$\dot{U}_ф = \dot{E}_{тр} + \dot{E}_{II} + \dot{E}_I = \dot{E}_{тр} + \dot{I}_A \frac{2}{3} r_m - (\dot{I}_B + \dot{I}_C) \frac{1}{3} r_m.$$

Векторные диаграммы напряжений на элементах фильтра и его выходе при прохождении токов прямой, обратной и нулевой последовательностей и соответствующие им $U_ф$ показаны на рис. 12-24, *б*.

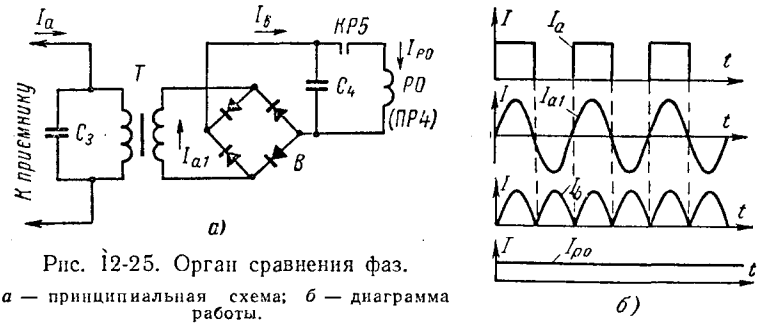


Рис. 12-25. Орган сравнения фаз.

а — принципиальная схема; *б* — диаграмма работы.

Из диаграммы следует, что токи нулевой последовательности не создают напряжения на выходе, в то время как $U_{ф1}$ и $U_{ф2}$ отличны от нуля, поэтому результирующее напряжение

$$\dot{U}_ф = \dot{U}_{ф1} + \dot{U}_{ф2} = \dot{I}_{A1}(r - \sqrt{3}x_m) + \dot{I}_{A2}(r + \sqrt{3}x_m) = k'(\dot{I}_{A1} + k\dot{I}_{A2}), \quad (12\text{-}5)$$

где

$$k = \frac{r + \sqrt{3}x_m}{r - \sqrt{3}x_m}.$$

Таким образом, $U_ф$ пропорционально $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$. Конструкцией предусматриваются три значения k: 4, 6 и 8. При $k = 8$ передатчик начинает работать при токе на входе фильтра $I_1 = 2$ *а* или $I_2 = 0{,}25$ *а*.

Орган сравнения фаз. Как указывалось, реле *РО* (обозначенное на рис. 12-25 *ПР4*) питается анодным током приемника и реагирует на разность фаз токов по концам линии в зависимости от характера в. ч. сигнала. В защите ДФЗ-2 в качестве реле *ПР4* применено поляризованное реле, включаемое по схеме, показанной на рис. 12-25, *а*.

Анодный ток приемника I_2 при к. з. в зоне имеет прерывистый характер, изображенный на рис. 12-25, *б*. Если бы реле *ПР4* питалось непосредственно анодным током, то его контакты замыкались бы ненадежно. Поэтому питание реле *ПР4* осуществляется по особой схеме, преобразующей прерывистый анодный ток приемника в постоянный. Схема состоит из трансформатора *Т*, выпрямителя *В* и конденсаторов $C_э$ и C_4. Для уяснения процесса преобразования представим, что кривая анодного тока разложена на гармоники с частотами, кратными 50 *гц*. Токи высших гармоник ($f > 50$ *гц*) замыкаются главным образом через конденсатор $C_э$, а токи основной частоты ($f = 50$ *гц*) — через индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора *Т*, имеющей для токов основной гармоники меньшее сопротивление, чем конденсатор $C_э$. Вторичный ток трансформатора TI_{a1}

выпрямляется выпрямителем B, сглаживается конденсатором C_4 и питает обмотку реле *ПР4* в том случае, если контакты промежуточного реле *КР5* замкнуты. Последнее срабатывает только при действии пусковых реле защиты при к. з. (см. рис. 12-20).

Величина тока в реле зависит от продолжительности импульсов высокой частоты. С уменьшением интервалов между импульсами тока высокой частоты уменьшается ток I_{PO}, поступающий в реле *ПР4* (*РО*). При токе $I_{PO} \geqslant I_{с.р}$ реле *ПР4* приходит в действие. Так как продолжительность перерыва между импульсами высокой частоты зависит от сдвига фаз ψ между токами I_m и I_n по концам линии, то, следовательно, *величина тока* I_{PO} *зависит от угла* ψ. *Эта зависимость* $I_{PO} = f(\psi)$, *называемая фазной характеристикой, изображена на рис. 12-26.* Угол блокировки защиты β регулируется уставкой *ПР4* в пределах $\pm 45 \div 60°$.

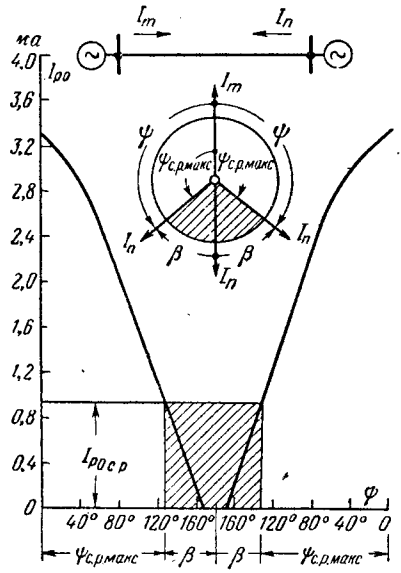


Рис. 12-26. Фазные характеристики дифференциально-фазной высокочастотной защиты. Заштрихована зона блокировки.

Действие защиты при различных режимах. При внешнем несимметричном к. з. на обоих концах линии срабатывают реле *ПР1* и *ПР2*, приводящие в действие в. ч. посты и разрешающие работать реле *РО* (рис. 12-20). Приемники постов принимают непрерывный ток высокой частоты. Поэтому в реле *РО* отсутствует ток и его контакты в цепи отключения остаются разомкнутыми.

Внешнее симметричное к. з. На обоих концах линии срабатывают пусковые реле *П3* и кратковременно реле *ПР1* и *ПР2*. Через контакты *КР3* и *КР1* подготавливается цепь отключения. Защита не действует на отключение, так как токи высокой частоты генерируются непрерывно и в реле *РО* отсутствует ток. Цепь отключения разрывается контактом реле *КР4* через 0,2 *сек*, после чего защита готова к повторному действию. Пуск в. ч. постов продолжается 0,5—0,6 *сек*.

Короткое замыкание в зоне защиты. При двустороннем питании токи к. з. проходят к месту повреждения с обоих концов линии. Под влиянием этих токов срабатывают пусковые органы и действуют органы управления защит, которые пускают и останавливают передатчики высокой частоты на обоих концах линии одновременно, так как токи $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ на выходе фильтров манипуляции совпадают по фазе. В линии возникает прерывистый ток высокой частоты, обусловливающий появление тока в реле *РО* после замыкания цепи его обмотки контактами реле *КР5*. Реле *РО* срабатывают на обоих концах линии и посылают импульсы на отключение выключателей.

При одностороннем питании линии ток повреждения проходит только с одного конца линии, связанного с источником питания. Под действием этого тока защита на питающем конце надежно пускается при всех к. з., но поведение защиты будет зависеть от приемного конца, где проходит только ток нагрузки. В случае несимметричного к. з. под влиянием напряжения обратной последовательности, возникающего в месте к. з., по обоим концам линии будет проходить ток I_2, замыкающийся на приемном конце через нагрузку. Под действием этих токов в линии появится прерывистый сигнал высокой частоты и защита сработает на отключение.

В случае симметричного трехфазного к. з. ток несимметрии появится только в первый момент. Пусковые реле *ПР1* сработают кратковременно и пустят пере-

датчики на обоих концах линии на время, определяемое замедлением реле *КР2* и *КР3*. Передатчик на питающем конце, управляемый током к. з., будет посылать прерывистый ток высокой частоты. Передатчик же на приемном конце будет работать непрерывно, посылая сплошной сигнал, так как на этом конце линии напряжение будет равно нулю, вследствие чего ток в линии и манипуляция генераторной лампой отсутствуют. *В результате этого защита откажет в действии. Короткое замыкание в этом случае должно отключаться резервной защитой линии.*

Разработана и находится в опытной эксплуатации дифференциально-фазная защита на полупроводниках типа ДФЗП [Л. 56].

12-8. ВЫБОР УСТАВОК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЗАЩИТЫ

Уставки на пусковых реле. Выбор уставок ведется на основе следующих общих положений:

1. Для обеспечения селективности при внешних к. з. (см. § 12-6), *пусковые реле, управляющие цепью отключения, должны иметь более грубую уставку, чем (пусковые) реле, управляющие пуском в. ч. постов на противоположном конце линии.* Чувствительность пусковых реле в цепи отключения принимается с обеих сторон линии одинаковой, аналогично выбираются равными уставки на реле, пускающих в. ч. пост.

2. Во избежание действия защиты в режимах нагрузки пусковые реле, реагирующие на нее (*РТ1*, *РТ2* и *ПЗ*), отстраиваются от нагрузки с учетом $k_{воз}$.

3. Пусковые реле, включенные через фильтры симметричных составляющих (реле *ПР1* и *ПР2*), отстраиваются от токов небаланса при внешних трехфазных к. з.

Ток срабатывания *РТ1* (пускающего в. ч. пост) ($I_{с.з.РТ1}$) отстраивается от нагрузки и определяется по выражению

$$I_{с.з\,РТ1} = \frac{k_н\, I_{наг.макс}}{k_{воз}}, \qquad (12\text{-}6)$$

где $I_{наг.макс}$ принимается равным максимальной нагрузке в нормальном режиме; при этом допускается, что в аварийных режимах реле *РТ1* может сработать, поскольку это не может вызвать ложного действия защиты.

Ток срабатывания *РТ2*, осуществляющего пуск цепи отключения, ($I_{с.з РТ2}$), выбирается больше $I_{с.з РТ1}$ на противоположном конце линии и отстраивается от $I_{наг.макс}$ в аварийном режиме.

По первому условию

$$I_{с.з\,РТ2} = (1{,}5 \div 2)\, I_{с.з\,РТ1}. \qquad (12\text{-}7)$$

По второму условию $I_{с.з РТ2}$ определяется по выражению (12-6), в котором $I_{наг.макс}$ принимается максимально возможным в аварийном режиме.

За окончательное значение $I_{с.з РТ2}$ принимается большее из двух величин.

Ток срабатывания *ПР1* (пускающего в. ч. пост) отстраивается от $I_{нб}$ при внешних трехфазных к. з., когда $I_к^{(3)} = I_{с.з РТ1}$. При указанном значении $I_к^{(3)}$ будут работать реле *РТ1*, обеспечивая двусторонний пуск передатчиков, поэтому ложное действие реле *РТ1* от небаланса в этих условиях не опасно:

$$I_{с.з\,ПР1} = k_н\, I_{нб}. \qquad (12\text{-}7а)$$

Ток срабатывания *ПР2* (управляющего цепью отключения) выбирается из условия

$$I_{\text{с.з}\,ПР2} = 2I_{\text{с.з}\,ПР1}.$$

Чувствительность пуска цепей отключения защиты проверяется по минимальному значению I_2 при двухфазном и однофазном к. з. на противоположном конце линии. Коэффициент

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{2\,\text{мин}}}{I_{\text{с.з}\,ПР2}} \geqslant 2.$$

В случае недостаточной чувствительности при однофазных к. з. вводится элемент, реагирующий на I_0.

Величина тока в реле *ПР2* при минимальном значении расчетного тока $3I_0$ при однофазном к. з. и выбранной уставке на элементах I_2 и I_0 находится по кривым, приводимым в технических данных на ДФЗ-2.

Сопротивление срабатывания *ПЗ* находится из условия надежного охвата защищаемой линии и отстройки от токов нагрузки.

По первому условию $z_{\text{с.з}} = (1{,}5 \div 2)\, z_{\text{л}}$ при $\varphi_{\text{р}} = \varphi_{\text{к}}$. По второму условию

$$z_{\text{с.з}} = \frac{k_{\text{н}} z_{\text{р аб. мин}}}{k_{\text{воз}}} \text{ при } \varphi_{\text{р}} = \varphi_{\text{н}}.$$

Ток срабатывания реле *РО* (*РП4*). От величины этого тока зависит величина угла блокировки β, что видно из рис. 12-26. *Угол* β, *и следовательно, и ток срабатывания РО, должны быть такими, чтобы защита не действовала при внешних к. з. и надежно работала при повреждении в зоне, при имеющих место искажениях фаз.*

При внешних к. з. в результате фазовых погрешностей сдвиг фаз ψ между токами I_m и I_n отличается от 180° на угол β. Это искажение фаз вызывается:

1) угловыми погрешностями трансформаторов тока $\Delta\varphi_{\text{т.т}}$;

2) появлением сдвига фаз первичных токов по концам защищаемой линии $\Delta\varphi_C$ вследствие наложения на ток сквозного к. з. емкостных токов линии, эта погрешность учитывается только на длинных линиях 330 *кв* и выше (см. § 14-1, б);

3) угловыми погрешностями органа манипуляции комплектов защит $\Delta\varphi_{\text{м}}$;

4) конечной скоростью распространения токов в. ч. с одного конца линии на другой. Время прохождения в. ч. сигнала с одного конца линии на другой $\Delta t = \frac{l}{v} = \frac{l}{3 \cdot 10^5}$ *сек*, где l — длина линии, *км*; v — скорость распространения электромагнитных волн (в. ч. сигнала), приближенно принимается равной скорости света $3 \cdot 10^5$ *км/сек*.

За время Δt фаза первичного тока, например на конце m, изменяется на $\Delta\varphi$ градусов. Продолжительность одного периода первичного тока (с частотой $f = 50$ *гц*) $T = 1/50 = 0{,}02$ *сек*. С учетом этого

$$\Delta\varphi = \frac{360°}{0{,}02\ \text{сек}}\, \Delta t = 18 \cdot 10^2 \Delta t.$$

Подставив в это выражение значение Δt, получим, что за время передачи импульса в. ч. на расстояние l фаза первичного тока

изменится на $\Delta\varphi = 18 \cdot 10^2 \frac{l}{3 \cdot 10^5} = 0{,}06 \cdot l$, *град*. На линии с $l =$ $= 100$ *км* фаза первичного тока искажается на угол $\Delta\varphi = 6°$. С учетом сказанного полная фазовая погрешность, или отклонение угла сдвига фаз ψ от 180°, при внешних к. з. равна сумме перечисленных выше погрешностей:

$$\beta = \Delta\varphi_{т.т} + \Delta\varphi_C + \Delta\varphi_м + 0{,}06\, l. \qquad (12\text{-}8)$$

Расчет и опыт эксплуатации показывают, что суммарное значение погрешностей достигает 40—55° в зависимости от длины и напряжения линии. С учетом необходимого запаса угол блокировки β принимается равным 45—66°. Соответствующий этому предельно допустимый сдвиг фаз между токами $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ угол $\psi = 180° - \beta_б$. Такое отличие сдвига фаз ψ от 180° приводит к нарушению непрерывности в. ч. сигнала, как показано на рис. 12-27, и появлению тока $I_{РО}$ в реле *РО* (реле *ПР4* в ДФЗ-2), под действием этого тока защита может сработать неправильно. Для исключения неправильной работы защиты при внешних к. з. необходимо выполнить условие

$$I_{РО\,с.р} > I_{РО\,макс} \text{ и } \psi \geqslant 180 - \beta, \qquad (12\text{-}8а)$$

где $I_{РО\,макс}$ — максимальный ток в реле *РО*, а ψ — максимальный допустимый угол сдвига фаз между $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ при внешних к. з.

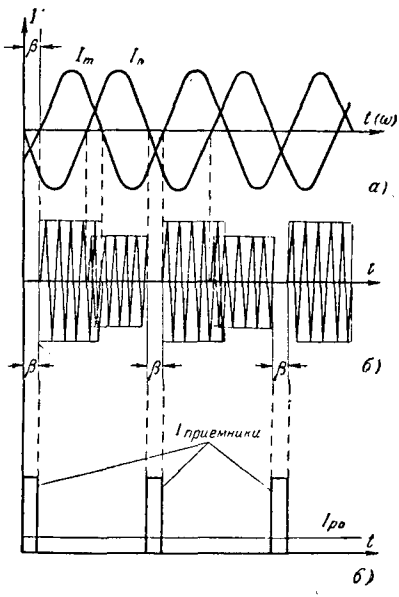


Рис. 12-27. Нарушение непрерывности высокочастотного сигнала из-за искажения фаз токов.

а — первичные токи по концам линии; *б* — высокочастотные импульсы в линии; *в* — ток в реле *РО*.

Задавшись значением β, ток срабатывания, удовлетворяющий (12-8а), находим графически по кривой $I_{РО} = f(\psi)$ (рис. 12-26). Найденное значение $I_{с.рРО}$ и соответствующее ему значение β должны обеспечивать *надежную работу при к. з. в зоне,* для чего необходимо, чтобы сдвиг фаз между $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ угол $\psi \leqslant 180 - \beta$.

В защите ДФЗ-2 предусмотрено три уставки срабатывания на реле *ПР4*, которым соответствуют три значения (уставки) угла блокировки β: ± 45; ± 52 и $\pm 60°$. Поэтому практически выбор $I_{РО\,с.р}$ сводится к выбору β с учетом расчетных значений угловых погрешностей.

Коэффициент k **фильтра манипуляции** в выражении $\dot{U}_м = k'(\dot{I}_{1A} + k\dot{I}_{2A})$ определяет величину и фазу напряжения на

выходе комбинированного фильтра манипуляции. Коэффициент k должен быть таким, чтобы при несимметричных к. з. слагаемое kI_2 существенно превосходило I_1. При выполнении этого условия напряжения на выходе фильтра будут определяться током I_2, фазы которых при повреждении в зоне совпадают на обоих концах линии (§ 12-7). Исходя из этого условием для выбора k является неравенство $kI_2 \geqslant k_{зап}I_1$; коэффициент запаса $k_{зап}$ принимается равным 1,5. Отсюда

$$k = 1{,}5\frac{I_1}{I_2}. \quad (12\text{-}9)$$

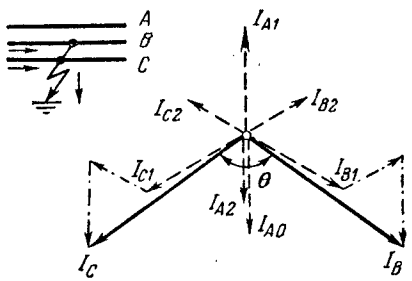


Рис. 12-28. Векторная диаграмма при двухфазном к. з. на землю.

Анализ показывает, что отношение I_1/I_2 имеет наибольшее значение при двухфазных к. з. на землю на противоположном конце линии. Наиболее неблагоприятным (при схеме питания фильтра, показанной на рис. 12-24) является замыкание на землю фаз B и С. В этом случае токи прямой и обратной последовательностей фазы A, через которые выражается $U_ф$, сдвинуты на 180° (рис. 12-28).

По расчетному значению I_1/I_2 согласно (12-9) находят минимальную величину коэффициента k. Рекомендуются значения k порядка 6—8. По условию селективности при внешних замыканиях коэффициенты k должны приниматься одинаковыми на обоих концах линии.

12-9. ОЦЕНКА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗАЩИТ

Принцип действия в.ч. защит, направленных и дифференциально-фазных, надежен и прост. В настоящее время эти защиты являются единственными защитами, обеспечивающими мгновенное и двустороннее отключение к. з. на линиях большой протяженности. Общим недостатком всех в. ч. защит являются более высокая стоимость и сложность по сравнению с другими видами защит.

Высокочастотные защиты получили широкое распространение как основные защиты в сетях 110—500 *кв*. Они позволяют обеспечить быстрое и селективное отключение к. з. при любой конфигурации сети и являются наиболее чувствительными. Учитывая, что в. ч. защиты относятся к числу сложных, их следует применять только в тех случаях, когда более простые виды защит оказываются непригодными.

В Советском Союзе наиболее широкое распространение получила дифференциально-фазная защита. Дифференциально-фазная в. ч. защита имеет существенное преимущество: она не реагирует на качания. Это преимущество приобретает важное значение с внедрением быстродействующих и несинхронных АПВ, сочетание кото-

рых с защитами, реагирующими на качания, вызывает серьезные затруднения. Помимо того, дифференциально-фазная защита типа ДФЗ-2, применяемая в СССР, отличается достаточно простой схемой и высокой чувствительностью пускового органа.

Глава тринадцатая

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НЕПРАВИЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ

13-1. ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ РЕЛЕ ПРИ КАЧАНИЯХ

Явления, называемые качаниями, возникают при нарушении синхронной работы генераторов электрической системы. Качания сопровождаются возрастанием тока и снижением напряжения в сети, на эти изменения тока и напряжения защиты реагируют так же, как и на симметричное к. з.

Представление о характере изменения тока и напряжения при качаниях дает рассмотрение простейшей электрической системы (рис. 13-1, *а*), состоящей из двух генераторов: $Г_A$ и $Г_B$, связанных между собой линией электропередачи. В нормальных условиях угловые скорости ω_A и ω_B, с которыми вращаются векторы э. д. с. $\dot{E}_A$ и $\dot{E}_B$, одинаковы. При нарушении синхронизма скорости вращения роторов генераторов $Г_A$ и $Г_B$, а также скорость вращения векторов их э. д. с. становятся различными.

Если предположить, что скорость вращения ротора генератора $Г_A$ стала большей, чем генератора $Г_B$, то и электрическая скорость $\omega_A > \omega_B$.

В результате этого вектор $\dot{E}_A$ (рис. 13-1, *б*) будет вращаться относительно вектора $\dot{E}_B$ с угловой скоростью скольжения $\omega_s = \omega_A - \omega_B$, а разница э. д. с. $\Delta\dot{E} = \dot{E}_A - \dot{E}_B$ будет менять свою величину в зависимости от значения угла δ.

Полагая, что по величине $|\dot{E}_A| = |\dot{E}_B| = \dot{E}$, из векторной диаграммы, изображенной на рис. 13-1, *б*, находим:

$$\Delta E = 2E \sin\frac{\delta}{2}, \qquad (13\text{-}1)$$

где угол δ — функция времени и скольжения ω_s.

При ω_s = пост. угол $\delta = \omega_s t$; с учетом этого

$$\Delta\dot{E} = 2E \sin\frac{\omega_s}{2} t. \qquad (13\text{-}2)$$

Полученное выражение показывает, что действующее значение ΔE меняется по закону синуса и достигает максимальной величины при $\delta = 180°$ (рис. 13-1, *в*), а минимальной — при $\delta = 0$.

Ток качания. Под влиянием э. д. с. $\Delta\dot{E}$ в сети, соединяющей генераторы Γ_A и Γ_B, появляется ток качания:

$$I_{\text{кач}} = \frac{\Delta\dot{E}}{z_{AB}}. \tag{13-2а}$$

Сопротивление $z_{AB} = \sqrt{x_{AB}^2 + r_{AB}^2}$ является эквивалентным сопротивлением цепи, по которой замыкается ток $I_{\text{кач}}$.

Пренебрегая активным сопротивлением r_{AB}, можно считать, что ток $I_{\text{кач}}$ отстает от э. д. с. $\Delta\dot{E}$ на 90°.

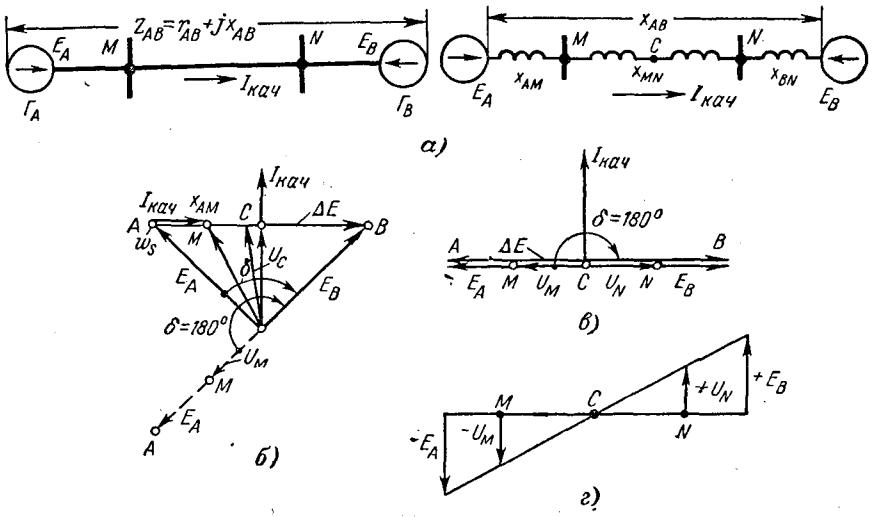


Рис. 13-1. Векторные диаграммы токов и напряжений при качаниях.

а — простейшая электрическая система и схема ее замещения; *б* и *в* — векторные диаграммы при различных значениях угла; *г* — распределение напряжения в системе при δ = 180°.

С учетом (13-1), (13-2) и (13-2а)

$$I_{\text{кач}} = \frac{2E}{x_{AB}} \sin\frac{\delta}{2}. \tag{13-3}$$

Из (13-3) следует, что действующее значение тока качания $I_{\text{кач}}$ меняется с такой же периодичностью, как и $\Delta\dot{E}$. Характер изменения $I_{\text{кач}}$ по времени показан на рис. 13-2, *а*. *Максимальное значение* $I_{\text{кач}}$ *достигается при* δ = 180°, *т. е. когда э. д. с. генераторов* Γ_A *и* Γ_B *противоположны по фазе,*

$$I_{\text{кач. макс}} = \frac{2E}{x_{AB}}. \tag{13-3а}$$

При δ = 0, *когда э. д. с. генераторов совпадают по фазе,* $I_{\text{кач}}$ *снижается до нуля.*

Однако в действительности при $\delta = 0$ ток $I_{кач}$ будет отличен от нуля, так как обычно $E_A \neq E_B$. Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе поведения защиты при качаниях.

Напряжение в какой-либо точке M сети при качаниях (рис. 13-1, *а*) равно: $\dot{U}_M = \dot{E}_A - \dot{I}_{кач} x_{AM}$; здесь $\dot{I}_{кач} x_{AM}$ — падение напряжения на участке AM.

Вектор падения напряжения $I_{кач} x_{AM}$ совпадает по фазе с вектором $\Delta\dot{E}$ (вектор AB на рис. 13-1, *б*) и составляет его часть. Следовательно, на диаграмме на рис. 13-1, *в* конец вектора напряжения U_M будет лежать на отрезке AB. В каждый момент времени или, иначе говоря, при каждом значении угла δ действующее напряжение в различных точках сети будет различным. Наименьшее значение оно имеет в точке C, в которой вектор напряжения U_C перпендикулярен вектору $\Delta\dot{E}$. Эта точка называется электрическим центром системы или электрическим центром качаний. Она находится в середине сопротивления z_{AB}* при условии, что э. д. с. $|\dot{E}_A| = |\dot{E}_B|$, а сопротивление на всех участках сети однородно. По мере удаления (вправо и влево) от электрического центра системы (точки C) напряжение $U_м$ нарастает.

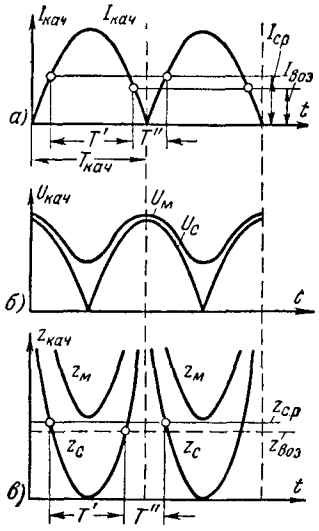


Рис. 13-2. Характер изменения электрических величин на зажимах реле при качаниях.

а — тока; *б* — напряжения; *в* — сопротивления.

С изменением угла δ изменяются и напряжения во всех точках сети. При $\delta = 0$ напряжение во всех точках сети одинаково и имеет максимальное значение $U_{макс} = E$. С увеличением δ напряжение в сети снижается, имея наименьшую величину в электрическом центре (в точке C). При $\delta = 180°$ напряжение в электрическом центре системы падает до нуля, в остальных же точках системы оно отлично от нуля и равно $U_M = I_{кач} z_{CM}$ (рис. 13-1, *г*).

На рис. 13-2, *б* показан характер изменения напряжения в точках M и C сети в функции угла δ.

Кривые изменения сопротивления для тех же точек сети

$$z_M = \frac{U_M}{I_{кач}} \quad \text{и} \quad z_C = \frac{U_C}{I_{кач}}$$

приведены на рис. 13-2, *в*.

---

* При вычислении z_{AB} для определения электрического центра, а также токов и напряжения при качаниях сопротивления генераторов замещаются сверхпереходным реактивным сопротивлением x''_d.

13-2. ПОВЕДЕНИЕ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ

Поведение пусковых реле тока, напряжения и сопротивления. Характер изменения $I_{кач}$, $U_{кач}$ и $z_{кач}$ таков, что защиты, реагирующие на указанные величины, могут приходить в действие. Действительно, сопоставляя уставки срабатывания соответствующих защит с кривыми изменения $I_{кач}$, $U_{кач}$, $z_{кач}$ (рис. 13-2, *а*, *б* и *в*), легко убедиться в том, что реагирующие на ток, напряжение и сопротивление реле приходят в действие при качаниях.

Особенно неблагоприятные условия для защит, реагирующих на U и z, возникают в электрическом центре качаний и в близлежащих от него точках из-за резкого понижения напряжения на этом участке сети.

Период качаний $T_{кач}$ зависит от степени расхождения скоростей синхронных генераторов. Чем больше разница $\omega_A - \omega_B$, тем меньше период качаний $T_{кач}$.

Как видно из кривых на рис. 13-2, защиты действуют только в течение части периода качаний T'. Так, например, токовые реле срабатывают при $I_{кач} \geqslant I_{с.р}$ и возвращаются при снижении $I_{кач}$ до величины $I_{воз}$. Аналогично ведут себя реле напряжения и реле сопротивления.

Защиты, действующие мгновенно, могут сработать при любом значении периода качаний при условии, что у токовых реле $I_{с.р} < I_{кач.макс}$, а у реле напряжения и сопротивления $U_{с.р}$ и $z_{с.р}$ соответственно больше, чем $U_{кач.мин}$ и $z_{кач.мин}$. Защиты, имеющие выдержку времени, действуют при качаниях только при условии, что период качаний превышает время работы защиты. Однако защиты с выдержкой времени могут подействовать и при очень малых периодах качаний, если время возврата реле $t_{воз}$ оказывается больше времени T'' (рис. 13-2, *а*). В этом случае реле не успевает вернуться за время спада качаний и, удерживаясь в сработанном состоянии, может подействовать через несколько циклов качаний, когда истечет время его действия. При качаниях в системе продолжительность периода качаний не остается постоянной. В связи с появившимся возмущением скорость вращения ротора машины начинает изменяться; например, увеличиваясь, она достигает некоторого предела, после чего начинает убывать и затем снова повышается, колеблясь вокруг значения синхронной скорости. Соответственно меняется и период качаний.

Различают два случая качаний: синхронные и асинхронные. В первом случае появившееся нарушение синхронной работы не сопровождается нарушением устойчивости (асинхронным ходом) генераторов. При этом разница электрических скоростей генераторов $\omega_s = \omega_A - \omega_B$ быстро уменьшается, приближаясь к нулю, а угол δ в процессе качаний не достигает 180°.

Во втором случае происходит нарушение устойчивой работы генераторов. Роторы вышедших из синхронизма машин и их э. д. с.

провертываются относительно друг друга, а угол δ превосходит 180°. Для таких качаний характерны нарастание скольжения ω_s и уменьшение периода $T_{кач}$. Напряжение и ток достигают при этом своих предельных значений. Исследования, проведенные за последнее время, показывают, что при определенных условиях и в этом случае генераторы могут втянуться в синхронизм. Однако этот процесс имеет достаточно длительный характер. Происходящее при этом колебание напряжения отражается на работе потребителей. Поэтому в этих условиях необходимо принимать меры, вручную и автоматически способствующие быстрому восстановлению синхронизма. *Опыт показывает, что защиты с выдержкой времени 1,5—2 сек, как правило, не успевают срабатывать во время качаний.* При асинхронных качаниях их период уменьшается до очень малых значений, порядка 0,3—0,2 *сек*. В этих случаях неправильное

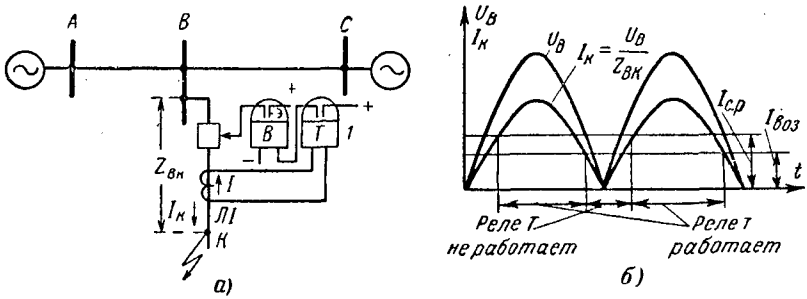


Рис. 13-3. Отказ в действии защиты при к. з., сопровождаемом качаниями.

действие защит с выдержкой времени возможно только при медленном возврате пусковых реле или реле времени. Однако первые периоды асинхронных качаний, а также последние периоды при затухании качаний во время втягивания в синхронизм (ресинхронизации) могут иметь продолжительность, достаточную для срабатывания защиты с большой выдержкой времени. Это особенно вероятно при медленном процессе нарушения статической устойчивости и подтверждается опытом эксплуатации (были случаи работы защиты с $t = 3 \div 4$ *сек*).

Поведение направленной высокочастотной защиты. Неправильно работают при качаниях и органы направления мощности в. ч. защит. Из диаграммы на рис. 13-1, *в* и *г* видно, что при изменении угла δ от 0 до 360° угол сдвига между токами в линии и напряжением в данной точке сети (например, *М*) будет принимать ряд значений от 0 до 180° и от 180 до 360°.

При δ = 180° напряжения по обеим сторонам точки *С* электрического центра качаний находятся в противофазе (рис. 13-1, *в* и *г*).

В результате этого мощность по концам линии *MN*, на которой расположен электрический центр качаний, будет иметь положительный знак и, следозательно, направленная высокочастотная защита,

основанная на сравнении мощностей по концам линии, будет действовать так же, как и при к. з. в ее зоне, т. е. на отключении линии.

Отказ защиты при качаниях. Во время качаний возможна не только неправильная работа защиты, но и ее отказ в действии при к. з. Типичная схема, при которой возможен подобный случай, изображена на рис. 13-3, *а*.

Если при к. з. на линии *ЛI* нарушится синхронная работа электростанций *А* и *С* и возникнут качания, то напряжение U_B на подстанции *В*, от которой питается поврежденная линия, будет пульсировать с частотой, определяемой периодом качаний $T_{кач}$. Вместе с напряжением U_B будет колебаться и ток к. з. в *ЛI* $I_к = U_B/z_{Bк}$ (рис. 13-3, *б*). Если период качаний $T_{кач}$ окажется меньше выдержки времени защиты *1*, а минимальный ток $I_{к.мин} < I_{воз}$ защиты, то последняя не сможет подействовать на отключение. Чем ближе к электрическому центру качаний расположена подстанция *В*, тем больше вероятность отказа защиты.

Для предотвращения подобного отказа защиты на линиях, где возможно резкое уменьшение тока к. з. при качаниях, следует применять мгновенно действующую защиту.

13-3. МЕРЫ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ НЕПРАВИЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ

Как следует из сказанного, при качаниях возникают условия для неправильных хаотических действий защиты, которые приводят к тяжелым авариям. Весьма важным требованием, предъявляемым к защите, является недействие ее при качаниях. Некоторые защиты, например дифференциальные, не реагируют на качания по своему принципу действия. Большинство же защит воспринимает качания как симметричное к. з., и поэтому требуются специальные меры, предотвращающие возможность их ложной работы. В качестве таких мер используются три средства.

Первое из них, наиболее простое, состоит в том, что параметры срабатывания пусковых реле защиты выбираются с таким расчетом, чтобы они не действовали при качаниях. С этой целью у токовых защит ток срабатывания выбирается больше максимального тока качания $I_{с.з} > I_{кач}$, а у дистанционных защит $z_{с.з}$ должно быть меньше минимальной величины сопротивления, возможной в данной точке сети при качаниях. Последнее условие можно выполнить, если электрический центр лежит за пределами зоны действия защиты. Практически этот путь предотвращения ложной работы защиты при качаниях применим только для токовых отсечек и иногда для первых зон дистанционных защит. В качестве второго способа служит отстройка от качаний при помощи выдержки времени порядка 1—2 *сек*. Это мероприятие применимо в тех случаях, когда указанное замедление защит допустимо по условиям устойчивости и бесперебойного питания потребителей.

И, наконец, третьим способом предотвращения ложной работы защит при качаниях является применение блокировок, выводящих защиту из действия при возникновении качаний.

Блокирующие устройства должны удовлетворять двум основным требованиям: 1) выводить защиту из действия при качаниях, возникших как в нормальном режиме, так и при к. з., и 2) не должны препятствовать работе защиты, если во время качаний на защищаемом ею участке возникает к. з.

В СССР разработаны два типа блокирующих устройств: одно отличает к. з. от качаний по появлению несимметрии тока или напряжения сети, а второе — по скорости изменения тока, напряжения или сопротивления в месте установки защиты.

13-4. УСТРОЙСТВО БЛОКИРОВКИ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ, РЕАГИРУЮЩЕЕ НА ТОК ИЛИ НАПРЯЖЕНИЕ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Устройство, изображенное на рис. 13-4, отличает качания от к. з. по появлению тока или напряжения обратной последовательности в сети. Для этой цели используется реле H_2, включенное через фильтр тока или напряжения обратной последовательности. При качаниях токи и напряжения симметричны и не содержат составляющих обратной последовательности. Следовательно, в этом случае реле обратной последовательности не будет действовать.

При двухфазных и однофазных к. з. токи и напряжения несимметричны и содержат значительную составляющую обратной последовательности, под действием которых реле H_2 приходит в действие.

При трехфазных к. з. токи и напряжения симметричны, и поэтому U_2 и $I_2 = 0$. Однако исследования и практика эксплуатации показывают, что в начальный момент трехфазного к. з. из-за неодновременного замыкания трех фаз появляется ток и напряжение обратной последовательности.

Трехфазные повреждения обычно начинаются с замыкания одной или двух фаз и затем переходят в трехфазное. Такое положение имеет место даже при включении на трехфазную закоротку за счет разновременности замыкания контактов выключателя. Кроме того, исследования показывают, что и при одновременном замыкании трех фаз кратковременно появляется ток в реле обратной последовательности за счет переходных процессов в фильтрах, обусловленных, во-первых, внезапным изменением тока или напряжения в первичной цепи и, во-вторых, появлением апериодической составляющей в токе и напряжении при к. з. В результате отмеченных причин в начальный момент трехфазного к. з. на выходе фильтра появляются напряжение и ток обратной последовательности; они быстро затухают, однако продолжительность их появления достаточна для действия пускового реле H_2. Из сказанного следует, что

к. з. в отличие от качаний всегда сопровождаются длительным или кратковременным появлением U_2 и I_2.

Принцип действия блокировки с реле обратной последовательности состоит в том, что она разрешает работать защите при появлении тока или напряжения обратной последовательности и не позволяет ей производить отключение, если несимметрия U_2 и I_2 отсутствует.

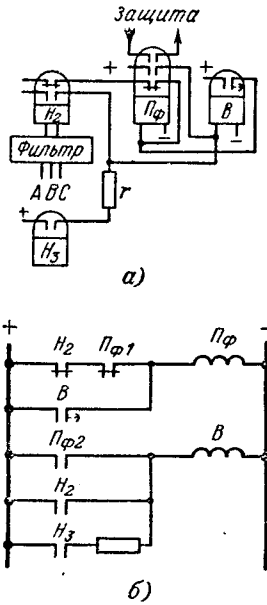


Рис. 13-4. Схема устройства блокировки защиты при качаниях с быстрым возвратом. Контакты реле показаны в состоянии готовности к действию.

Такая блокировка работает как пусковой орган, пускающий защиту только при к. з. и не действующий при нагрузке и качаниях. Для действия при трехфазных к. з. схема блокировки выполняется с фиксацией кратковременной несимметрии. Имеются два варианта схем, различающихся по способу их возврата в начальное состояние после к. з.: с быстрым возвратом после отключения к. з. и с возвратом через определенное время после прекращения к. з.

Блокирующее устройство с быстрым возвратом (рис. 13-4) состоит из пускового реле H_2, реагирующего на напряжение (или ток) обратной последовательности; промежуточного реле $П_ф$, фиксирующего срабатывание H_2 и замыкающего при своем действии цепь отключения блокируемой защиты; реле времени $В$, осуществляющего возврат реле $П_ф$, и реле понижения напряжения H_3, включенного на линейное напряжение и предназначенного для действия при трехфазных к. з.

Для обеспечения надежного действия блокирующего устройства при симметричных трехфазных к. з. пусковое реле H_2 должно быть особо быстродействующим, чтобы реагировать на появление кратковременной несимметрии, а промежуточное реле $П_ф$ должно срабатывать даже и в том случае, когда реле H_2 действует кратковременно.

Чтобы достигнуть быстродействия, пусковое реле H_2 работает на размыкание контактов. Необходимая быстрота действия реле $П_ф$ получается при помощи особой схемы его пуска, позволяющей фиксировать появление кратковременной несимметрии. Для этой цели обмотка реле $П_ф$ непрерывно питается током через замкнутые контакты реле H_2 и $П_ф$. Таким образом, при нормальном режиме сети реле $П_ф$ находится в сработанном состоянии и держит контакты в положениях, показанных на рис. 13-4. При появлении несимметрии (длительной или кратковременной) реле H_2 срабатывает и прерывает ток в обмотке реле $П_ф$. Последнее отпадает

и размыкает контактом $П_{ф1}$ цепь своей обмотки, благодаря чему реле $П_ф$ остается в отпавшем состоянии независимо от положения контактов пускового реле $Н_2$. Отпав, реле $П_ф$ замыкает цепь защиты и пускает реле времени $В$, которое с выдержкой времени, достаточной для срабатывания защиты, замыкает свои контакты и подает ток в обмотку реле $П_ф$.

Реле $П_ф$ срабатывает и вновь размыкает цепь защиты, запрещая ей действовать.

Если к моменту срабатывания реле $П_ф$ к. з. не прекратилось, то реле времени $В$ удерживается в сработанном состоянии контактами реле $Н_2$ или $Н_3$ в зависимости от вида к. з. Благодаря этому промежуточное реле $П_ф$ не может подействовать вновь и цепь отключения защиты остается разомкнутой, чем предотвращается возможность ложной работы защиты при качаниях, возникающих во время к. з.

Полный возврат блокировки и готовность ее к повторному действию наступают после возврата реле $Н_2$ и $Н_3$, т. е. немедленно после прекращения к. з.

Реле $Н_3$ может работать и при качаниях. Чтобы исключить при этом пуск реле времени $В$, в цепи, замыкаемой контактами реле $Н_3$, включено сопротивление r. Его величина выбрана такой, чтобы ограничить ток в реле времени до величины, достаточной для удержания его в сработанном состоянии, но недостаточной для его пуска.

Рассмотренная блокировка не исключает неправильной работы защиты в следующих случаях:

а) при качаниях, возникших в первый момент к. з., пока контакты реле $П_ф$ еще не разомкнули цепь отключения защиты;

б) при появлении во время качаний несимметрии, вызванной включением или отключением выключателя или какой-либо иной причиной. В результате этой несимметрии блокировка замыкает цепь защиты и последняя может сработать от качаний;

в) при несинхронном включении линии от АПВ, так как в этом случае защита вводится в действие от появившейся в момент включения несимметрии и может сработать от качаний, возникших после включения;

г) при удаленных трехфазных к. з., при которых реле напряжения $Н_3$ может не действовать, в то время как реле $Н_2$ оказывается чувствительным и срабатывает. В этом случае при отключении к. з. возможен повторный запуск блокировки от кратковременного появления несимметрии, что может повлечь за собой неправильное действие защиты под влиянием возникших качаний.

Напряжение срабатывания реле $Н_2$ выбирается из условия его надежного действия при несимметричных к. з. в пределах защищаемого участка. Напряжение срабатывания реле $Н_3$ берется максимально возможным по условию возврата реле при минимальном уровне рабочего напряжения

$$U_{с.р} = \frac{k_{зап}}{k_{воз}} U_{раб.\,мин}.$$

Блокирующее устройство с возвратом через определенное время t (рис. 13-5, *а* и *б*). Пусковое реле H_2 реагирует на появление несимметрии. Как и в предыдущей схеме, оно выполняется с помощью реле напряжения или тока обратной последовательности. Для фиксации кратковременной несимметрии при трехфазных к. з. служит промежуточное реле $П_ф$, находящееся в нормальных условиях под током. При срабатывании пускового реле H_2 в реле $П_ф$ исчезает ток, якорь реле $П_ф$ отпадает и оно срабатывает, производя следующие операции: замыкает контакт $П_{ф1}$, разрешая работать защите, размыкает контакт $П_{ф2}$, предотвращая возврат реле $П_ф$ при возврате H_2; замыкает контакт $П_{ф3}$, пуская реле времени $В$. Реле $В$ приходит в действие, его мгновенный контакт $В_1$ замыкается, обеспечивая самоудерживание реле $В$, второй мгновенный контакт $В_2$ размыкается, прерывая прохождение тока в обмотке реле $П_в$. Якорь реле $П_в$ с выдержкой времени порядка 0,2—0,3 *сек* отпадает, при этом контакт реле $П_в$ замыкается, восстанавливая ток в реле $П_ф$. Якорь последнего притягивается и блокирует соответствующие цепи защиты. Поскольку контакт $П_в$ шунтирует контакт пускового реле H_2, то блокировка не может подействовать до возврата реле $П_в$. *Возврат реле* $П_в$ *происходит после прекращения работы реле времени, осуществляемого с помощью контакта* $В_3$, *который замыкается по истечении установленной на нем выдержки времени* t_3. Это время принимается больше времени действия резервных защит сети для предотвращения действия блокировки в момент отключения к. з. от возникающей при этом несимметрии.

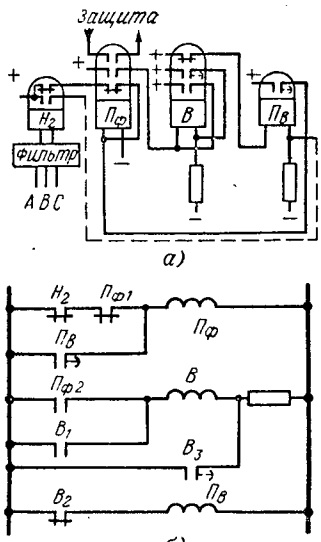


Рис. 13-5. Принципиальная схема устройства блокировки защиты при качаниях с возвратом через определенное время. Контакты реле показаны в состоянии готовности к действию.

Недостатком схемы с возвратом через заданное время $t_в$ является то, что она выводит из действия защиту на несколько секунд после любой несимметрии в сети (включение и отключение выключателя, действия разрядника и т. п.). Если в этот момент на защищаемой линии возникает повреждение, то блокируемая защита не сможет подействовать. Появление отмеченного недостатка может привести к тяжелой аварии, поэтому следует отдавать предпочтение схеме с немедленным возвратом (рис. 13-4). Цепь, показанная пунктиром на схеме рис. 13-5, предусмотрена для предотвращения многократного запуска блокировки при появлении U_2 из-за обрыва вторичных цепей трансформатора напряжения, питающего фильтр напряжения обратной последовательности. На рассмотренном прин-

ципе изготовляются блокировки от качания типов КРБ-123 и КРБ-126. Первая реагирует на появление U_2 и I_0, а вторая — на I_2 и I_0.

Блокировка при качаниях типа КРБ-126 (рис. 13-6). Блокировка разрешает работать защите при к. з. и выводит ее из действия при качаниях и в нормальном режиме. Пусковой орган блокирующего устройства *1РТ* реагирует на

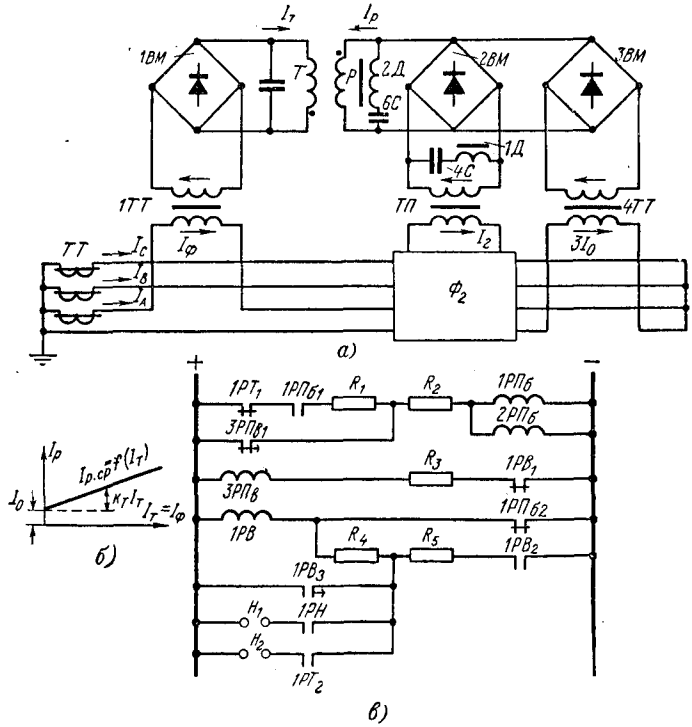


Рис. 13-6. Принципиальная схема блокировки при качаниях типа КРБ-126. Контакты показаны при отсутствии тока в реле.

ток обратной последовательности I_2 и дополнительно, для повышения чувствительности при к. з. на землю, на ток $3I_0$. Ток I_2 получается с помощью фильтра обратной последовательности Φ_2, на выход которого включен понизительный трансформатор *ТП*. Ток $3I_0$ получается от трансформатора тока *4ТТ*, который включен в рассечку нулевого провода трансформаторов тока.

Токи I_2 и $3I_0$ выпрямляются выпрямителями *2ВМ* и *3ВМ*, суммируются и подаются в обмотку *Р* исполнительного реле пускового органа *1РТ*. В качестве исполнительного реле служит поляризованное реле с двумя обмотками: рабочей *Р* и тормозной *Т*. Тормозная обмотка *Т* питается выпрямленным током одной из фаз I_Φ и действует на размыкание контактов реле *1РТ*. Рабочая обмотка *Р* (питаемая током I_2 и $3I_0$) действует на замыкание контактов.

Ток срабатывания реле *1РТ* (рис. 13-6, *б*) зависит от величины тормозного тока $I_т = I_\Phi$ и выражается уравнением $I_{с.р} = I_0 + k_т I_т$, где $k_т$ — коэффициент торможения, зависящий от соотношения витков рабочей и тормозной обмоток; I_0 — ток срабатывания реле при отсутствии торможения.

Торможение предусмотрено для предотвращения ложной работы пускового органа блокировки во время качаний. Качания являются симметричным режимом, и поэтому, как уже отмечалось, составляющие I_2 и I_0 в первичных токах качаний отсутствуют. Однако при больших токах качаний трансформаторы тока работают со значительными погрешностями, в результате чего вторичные токи качаний искажаются по величине и фазе и становятся несимметричными. В них появляется составляющая обратной последовательности I_2. В результате этого, а также вследствие погрешности самого фильтра в реле появляется ток небаланса $I_{нб}$, под действием которого оно может сработать. Торможение с помощью тока фазы $I_ф$ загрубляет реле и исключает возможность его действия от $I_{нб}$ в симметричных режимах. При к. з. токи I_2 и I_0 достаточно велики, поэтому несмотря на наличие торможения реле надежно работает.

Чувствительность пускового органа и коэффициент торможения $k_т$ регулируются изменением витков обмоток трансформаторов *1ТТ*, *ТП* и *4ТТ*. Емкость *6С* и дроссель *2Д* сглаживают кривую выпрямленного тока. Емкость *4С* и дроссель *1Д* являются фильтром, отсасывающим токи высших гармоник (главным образом 5-й), которые могут вызвать появление токов небаланса в реле, так как соотношение сопротивлений плеч фильтра $Ф_2$ подобраны для частоты 50 *гц*. Трансформаторы *ПТ* и *4ТТ* предназначены для уменьшения величин токов I_2 и I_0 до значений, безопасных для выпрямителей.

Схема оперативных цепей приведена на рис. 13-6, *в*, она выполнена аналогично схеме на рис. 13-4 и 13-5. В качестве реле, фиксирующего появление несимметрии (реле $П_ф$ в схемах на рис. 13-5 и 13-6), служат реле $1РП_б$ и $2РП_б$. Нормально, при отсутствии к. з., когда I_2 и $I_0 = 0$, контакты пускового реле *1РТ* замкнуты и, как видно из схемы на рис. 13-6, *б*, обмотки реле $1РП_б$ и $2РП_б$ питаются током. При появлении к. з. возникает I_2, а при к. з. на землю и I_0. Пусковое реле *1РТ* срабатывает, размыкая контактом $1РТ_1$ ток в обмотках $1РП_б$ и $2РП_б$, в результате чего якоря обоих реле отпадают. При этом контакт реле $1РП_б$ размыкает цепь питания своей обмотки, фиксируя тем самым появление тока I_2 и I_0, до тех пор пока не сработает реле $3РП_в$, восстанавливающее ток в обмотках реле $1РП_б$ и $2РП_б$. Другие контакты реле $1РП_б$ ($1РП_{б2}$, $1РП_{б3}$, $1РП_{б4}$) замыкают блокируемые цепи защиты (например, первую, вторую зону защиты или всю защиту в целом), разрешая им работать. Реле $1РП_б$, отпадая, пускает реле времени *1РВ*. Последнее замыкает мгновенный контакт $1РВ_1$, обеспечивая самоудерживание реле, и размыкает второй мгновенно действующий контакт $1РВ_2$, который разрывает цепь тока промежуточного реле $3РП_в$. Реле $3РП_в$ отпадает с замедлением 0,2—0,3 *сек* и шунтирует контакты *1РТ* и $1РП_б$, замыкая цепь реле $1РП_б$ и $2РП_б$. В обоих реле появляется ток, они срабатывают и выводят защиту из действия (контакты $1РП_{б2-3-4}$ размыкаются). Поскольку контакты *1РТ* зашунтированы контактами $3РП_в$, то защита остается заблокированной. Она не сможет подействовать, если *1РТ* сработает снова. По истечении времени $t_з$, установленного на реле времени *1РВ*, его контакт $1РВ_3$ замкнется, зашунтирует обмотку *1РВ* и реле *1РВ* прекратит свою работу, при этом оно возвратится в начальное состояние и разомкнет контакты. После возврата *1РВ*, реле $3РП_в$ сработает, разомкнет цепь, шунтирующую контакты $1РП_б$ и *1РТ*, после чего блокировка снова будет готова к действию.

Для осуществления схемы блокировки с быстрым возвратом используются контакты реле *1РТ* и реле минимального напряжения *1РН*, шунтирующие обмотку реле времени $1РВ_б$, при прекращении к. з. Реле *1РН* включено на линейное напряжение и срабатывает при появлении трехфазного к. з. Вместо контакта реле *1РТ* для шунтирования реле времени можно использовать пусковые реле блокируемой защиты.

Выбор уставок пусковых реле блокировки, выполненных по рис. 13-4 и 13-5. Реле напряжения или тока H_2 должно быть отстроено от максимальных небалансов, возникающих на выходе фильтра, при симметричных режимах и должно надежно работать при двухфазных и однофазных к. з. в конце зоны блокируемой ступени защиты (например, если блокируется только первая зона дистан-

ционной защиты, то при к. з. в конце этой зоны). По первому условию

$$U_{2с.р} = k_{зап} U_{нб.ф} \quad \text{или} \quad I_{2с.р} = k_{зап} I_{нб.ф}, \tag{13-4}$$

где $U_{нб.ф}$ — напряжение небаланса при максимальном значении рабочего напряжения, а $I_{нб.ф}$ — ток небаланса при максимальном значении токов качания ($I_{кач}$ достигает максимума при $\delta = 180°$).

По второму условию

$$U_{2с.р} = \frac{U_{2мин}}{k_ч n_н} \quad \text{или} \quad I_{2с.р} = \frac{I_{2мин}}{k_ч n_т}, \tag{13-5}$$

где $U_{2мин}$ и $I_{2мин}$ — минимальное напряжение и ток обратной последовательности при к. з. в конце зоны блокируемой защиты; $k_ч$ — коэффициент чувствительности, равный 1,5.

При недостаточной чувствительности реле обратной последовательности применяется комбинированный пуск от U_2 и I_0 или блокировка с токовым пуском I_2. В этой схеме предусмотрено торможение от тока в фазе. Оно используется, если токи качания и создаваемые ими небалансы очень велики. Торможение загрубляет реле и повышает, таким образом, отстройку его от $I_{нб.ф}$.

Напряжение срабатывания реле $Н_3$ выбирается максимально возможным по условию возврата при минимальном уровне рабочего напряжения:

$$U_{с.з} = \frac{k_{зап}}{k_{воз}} U_{раб.мин}. \tag{13-6}$$

Выбор установок блокировки от качаний с пусковыми реле, реагирующими на I_2 и I_0 и имеющими торможение (блокировка типа КРБ-126), приведен в [Л. 81].

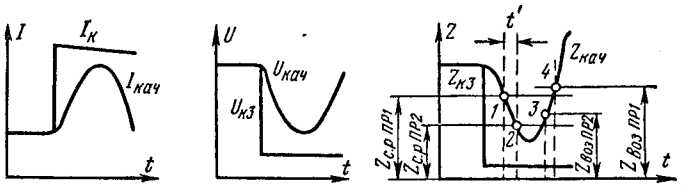
13-5. УСТРОЙСТВО БЛОКИРОВКИ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ, РЕАГИРУЮЩЕЕ НА СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ ИЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Скорости изменения электрических величин при к. з. и качаниях различны. В первом случае ток, напряжение и сопротивление изменяются почти м г н о в е н н о от своей нормальной величины до значения при к. з. (рис. 13-7).

При качаниях те же величины меняются п о с т е п е н н о. Это различие и положено в основу схемы блокировки, изображенной на рис. 13-8. Устройство блокировки выполняется при помощи двух пусковых реле: $ПР_1$ и $ПР_2$. Оба реле реагируют на ток, напряжение или сопротивление, но имеют разные уставки срабатывания. Реле $ПР_1$ чувствительнее реле $ПР_2$. Предположим, что в нашем случае используются реле сопротивления. При появлении качаний сопротивление на зажимах пусковых реле начнет плавно снижаться (рис. 13-7, *в*). Первым срабатывает более чувствительное реле $ПР_1$, а затем через время t' — более грубое реле $ПР_2$. Благодаря этому цепь катушки промежуточного реле $П$ кратковременно замыкается (на время t') и оно успевает подействовать. Сработав, реле $П$ бло-

кирует защиту и самоудерживается до тех пор, пока более чувствительное пусковое реле $ПР_1$ не разомкнет свои контакты.

При к. з. пусковые реле $ПР_1$ и $ПР_2$ срабатывают одновременно. Поэтому реле $П$, осуществляющее блокировку защиты, не успевает подействовать.



а) *б)* *в)*

Рис. 13-7. Сравнение характера изменения электрических величин при к. з. и качаниях.

а — токи; *б* — напряжения; *в* — сопротивления.

Чем меньше период качаний, тем меньше интервал времени t' между срабатываниями реле $ПР_1$ и $ПР_2$ (рис. 13-7, *в*). Если время t' окажется меньше времени действия реле $П$, то последнее не срабатывает и защита не будет заблокирована.

Для повышения надежности действия блокировки необходимо повышать быстроту действия промежуточного реле $П$ и увеличивать разницу в уставках пусковых реле.

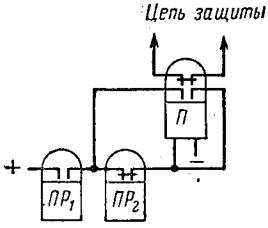


Рис. 13-8. Принцип действия устройства блокировки защиты при качаниях, реагирующего на скорость изменения тока, напряжения или сопротивления.

Исходя из этого условия соотношение между уставками реле $ПР_1$ и $ПР_2$ должно быть не меньше 1,6—2. В большинстве случаев используются устройства, реагирующие на скорость изменения z.

Уставка срабатывания реле $ПР_1$ ($z_{с.р1}$) выбирается такой, чтобы реле не действовало в нормальном режиме с учетом коэффициента возврата реле, т. е. $z_{с.р1} = \frac{k_{зап}}{k_{воз}} z_{раб.мин}$.

В качестве реле $ПР_1$ может использоваться пусковое реле блокируемой защиты. Сопротивление срабатывания реле $ПР_2$ выбирается равным $z_{с.р2} = z_{с.р1}/1{,}6 \div 2$.

Применение рассмотренного принципа затруднено на длинных и сильно нагруженных линиях из-за того, что по условию отстройки от нагрузки $z_{с.р1}$ относительно мало, а $z_{с.р2}$ для недействия блокировки при к. з. должно иметь достаточно большое значение.

В СССР блокировка, реагирующая на скорость изменения электрических величин, применяется редко. В качестве типовой используется схема, реагирующая на появление несимметрии, поскольку она оказывается пригодной как на коротких, так и на длинных линиях.

Глава четырнадцатая

ЗАЩИТА ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ЗАЩИТА ЛИНИЙ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

14-1. ЗАЩИТА ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

а) Особенности линий электропередачи сверхвысокого напряжения

Сети напряжением 500 *кв* и выше, сооружаемые для передачи больших мощностей на далекие расстояния, условно называются сетями сверхвысокого напряжения. В СССР построены электропередачи 500 *кв* длиной 900—1 200 *км* с пропускной способностью

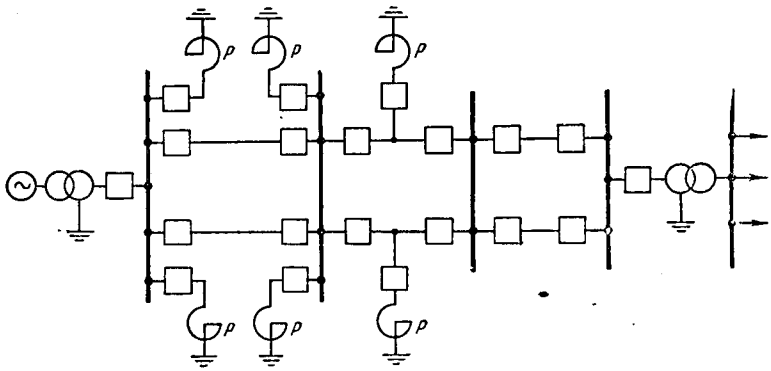


Рис. 14-1. Схема двухцепной электропередачи сверхвысокого напряжения.

порядка 1 500 *Мвт* [Л. 59]. Для передачи бóльших нагрузок на еще бóльшие расстояния проектируются и сооружаются линии и подстанции 750 *кв*.

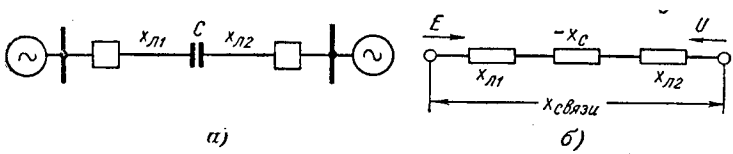


Рис. 14-2. Продольная емкостная компенсация электропередачи сверхвысокого напряжения.

а — схема включения конденсаторов; *б* — схема замещения.

Подобные передачи имеют ряд специфических особенностей:

1. В связи с большим значением токов нагрузки (1 000—2 000 *а*) сечение проводов получается очень большим, поэтому по конструктивным соображениям, а также с целью уменьшения индуктивного сопротивления передачи ее фазы выполняются расщепленными обычно на три параллельно идущих провода.

2. На дальних передачах устанавливаются реакторы P (рис. 14-1) для компенсации большого емкостного тока линий.

3. Для повышения пропускной способности передачи иногда применяется продольная емкостная компенсация (рис. 14-2). Конденсаторы C, включенные последовательно в фазы линии, уменьшают (компенсируют) индуктивное сопротивление цепи.

б) Особенности релейной защиты

Рассмотренные особенности линий электропередачи 500 *кв* оказывают существенное влияние на требования, предъявляемые к релейной защите, и условия ее работы:

1. Линии электропередачи 500 *кв* работают с малым запасом по статической и динамической устойчивости, так как по экономическим соображениям они проектируются с максимально возможной нагрузкой.

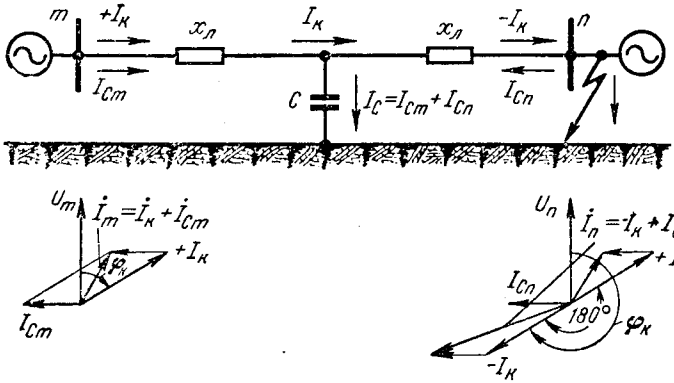


Рис. 14-3. Схема замещения электропередачи с учетом емкостной проводимости и векторные диаграммы токов при внешнем к. з.

Поэтому, как правило, к. з. в любой точке такой линии необходимо отключать со временем не более чем 0,1—0,12 *сек*. С учетом, что современные выключатели действуют с временем порядка 0,08 *сек*, собственное время релейной защиты не должно превышать 0,02—0,04 *сек*. Таким образом, *на передачах сверхвысокого напряжения к релейной защите предъявляются особенно высокие требования в части быстроты действия*.

2. Благодаря большой длине линий и высокой загрузке токи $I_р$ и сопротивления $z_р$ в нормальных режимах и при к. з. во многих случаях оказываются соизмеримыми, что усложняет выполнение защиты и требует применения устройств с повышенной чувствительностью.

3. Вследствие большого значения емкостной проводимости ωC линии электропередачи 500 *кв* и высокого уровня рабочего напря-

жения $U_л$ емкостные токи $I_C = U_л \omega C$ на линиях 500 *кв* значительно превосходят аналогичные токи в сетях 110 и 220 *кв*.

Ток I_C одного километра линии при номинальном напряжении составляет: в сети 500 *кв* — 1—1,2 *а*, в сети 220 *кв* — 0,34 *а*, а в сети 110 *кв* — 0,2 *а*.

В результате этого *емкостные токи на передачах 500 кв оказывают в некоторых случаях заметное влияние на работу релейной защиты.*

При анализе и расчетах распределенную емкость фазы линии обычно заменяют сосредоточенной емкостью C по Т- или П-образной схеме. Как следует из рис. 14-3, ток на одном конце линии равен геометрической сумме, а на другом — геометрической разности тока I_C и сквозного тока $I_к$, так $I_m = I_к + I_{Cm}$, а $I_n = I_{Cn} - I_к$. Таким образом, ток I_C искажает величину и фазу тока, проходящего по линии. Чем больше I_C и меньше $I_к$, тем сильнее искажающее влияние емкостных токов.

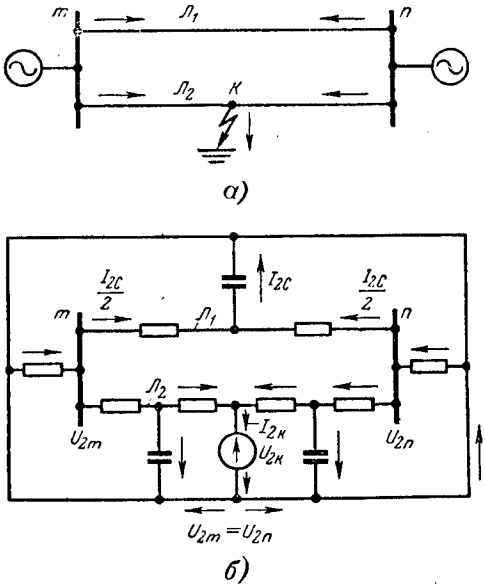


Рис. 14-4. Распределение токов по параллельным линиям при несимметричном коротком замыкании в точке K с учетом емкостной проводимости линий.
а — схема электропередачи; *б* — схема замещения для обратной последовательности.

Указанное искажение фаз токов в линии оказывает влияние на работу дифференциально-фазной и направленной высокочастотных защит.

Характерный случай недопустимого влияния тока I_C на поведение дифференциально-фазной защиты типа ДФЗ показан на рис. 14-4.

Защита ДФЗ-2 сравнивает фазы токов $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$, при этом составляющая kI_2 преобладает.

На рис. 14-4 представлено распределение токов I_2 по параллельным линиям при несимметричном к. з. в точке K. Если при этом напряжение U_2 на шинах m и n окажется одинаковым, то в неповрежденной линии $Л_1$ будет проходить только емкостный ток (сквозной ток $I_2 = 0$). На обоих концах линии емкостный ток равен $I_{2C}/2$ и имеет одинаковую фазу. Это значит, что фазы токов на концах неповрежденной линии будут такими же, как и при к. з. на ней. Благодаря этому дифференциально-фазная защита на неповрежденной линии $Л_1$ будет действовать под влиянием емкостного тока неправильно.

Искажающее влияние емкостной проводимости на токи к. з. устраняется применением устройства, компенсирующего ток I_C во вторичном токе трансформаторов тока, питающих защиту. При наличии компенсации ток, питающий защиту, будет равен току к. з. Такая компенсация получила применение в дифференциально-фазных защитах линий 500 *кв*.

4. На линиях 500 *кв* при появлении и отключении к. з., а также при оперативных переключениях возникают электромагнитные переходные процессы, обусловленные наличием индуктивного сопротивления шунтирующих реакторов, емкости продольной компенсации и распределенных постоянных L и C длинных линий. Переходные процессы сопровождаются появлением токов высших и низших частот. Фильтры симметричных составляющих и некоторые другие элементы в схемах защит настроены на работу при токах 50 *гц*.

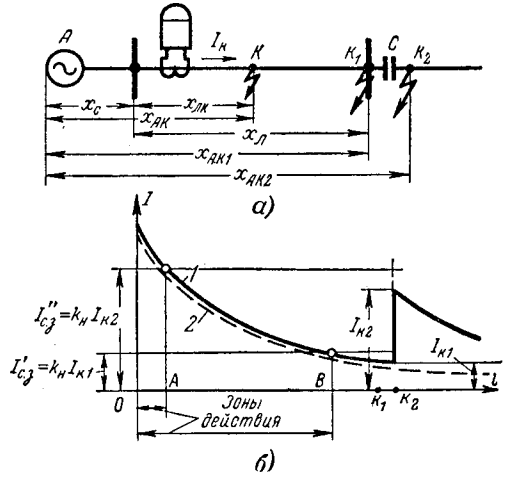


Рис. 14-5. Влияние устройства продольной емкостной компенсации (УПК) на работу токовой отсечки.

а — участок сети с УПК; *б* — характер изменения тока к. з. и зона действия отсечки при наличии и отсутствии УПК (кривые *1* и *2*).

Появление составляющих другой частоты нарушает правильное действие этих устройств и может вызвать ложную работу защиты. Нежелательное влияние токов с частотой, отличной от 50 *гц*, устраняется применением частотных фильтров, пропускающих в защиту только токи основной частоты.

5. Емкость C устройства продольной компенсации (УПК) *уменьшает реактивное сопротивление линий электропередачи и оказывает вследствие этого влияние на величину и фазу токов и сопротивлений, на которые реагируют токовые, дистанционные и направленные защиты.*

Особенности условий работы некоторых защит на линиях с УПК рассмотрены ниже.

Токовые отсечки. Ток к. з., на который реагирует отсечка,

$$I_к = \frac{E}{x_{АК}},$$

где $x_{АК}$ — реактивное сопротивление сети от источника питания до точки к. з. K (рис. 14-5, *а*).

При к. з. до УПК сопротивление $x_{АК1} = x_C + x_{ЛК}$, оно растет при удалении точки к. з. $К$, в связи с чем ток $I_к$ (рис. 14-5, *б*) уменьшается.

В случае к. з. за УПК $x_{АК2} = x_C + x_{ЛК} - x_{УПК}$. Таким образом, при перемещении места к. з. из $К_1$ в $К_2$ ток к. з. увеличивается скачком от $I_{к1}$ до $I_{к2}$, так как из-за компенсирующего действия емкости $С$ УПК $x_{АК2} < x_{АК1}$.

По мере дальнейшего перемещения точки $К_2$ ток $I_к$ снова уменьшается за счет роста $x_{ЛК}$.

Характер изменения тока в зависимости от расстояния до места к. з. на линии с УПК изображен на рис. 14-5, *б* кривой *1*. Для сравнения пунктиром показана та же зависимость при отсутствии УПК (кривая *2*).

Ток срабатывания мгновенной отсечки выбирается так, чтобы она не действовала за пределами защищаемой линии.

Из приведенных кривых *1* и *2* видно, что при наличии УПК $I''_{с.з} > I'_{с.з}$, а зона действия отсечки соответственно меньше, чем при отсутствии УПК ($ОА < ОВ$).

Таким образом, *продольная компенсация существенно снижает эффективность токовой отсечки и ограничивает возможность ее применения.*

Аналогично влияет УПК и на токовые отсечки нулевой последовательности, но в меньшей степени, поскольку x_0 линии в 2—3 раза больше x_1, а x_0 и x_1 УПК одинаковы, поэтому емкостное сопротивление $x_{УПК}$ в меньшей степени снижает суммарное индуктивное сопротивление x_0 сети и линии от места установки защиты до точки к. з.

Дистанционная защита. На рис. 14-6 показан характер изменения сопротивления $z_р = z_{АК}$ при удалении точки к. з. $К$ от места установки дистанционной защиты $Р_1$. При к. з. до УПК (участок линии $АС$ на рис. 14-6, *а* и *б*) $z_р = z_{АК1} = r_у l_{АК1} + jx_у l_{АК1}$, где $r_у$ и $x_у$ — удельные сопротивления 1 *км* линии, а $l_{АК1}$ — расстояние до точки $К_1$. На этом участке сопротивление $z_р$ растет пропорционально расстоянию до места к. з. При переходе точки к. з. за УПК (из $К_1$ в $К_2$) величина $z_р = r_у l_{АК2} + j\ (x_у l_{АК2} - x_{УПК})$ резко уменьшается, поскольку $x_{УПК}$ компенсирует определенную часть индуктивности линии. При дальнейшем удалении точки $К$ (за точку $К_2$) $z_р$ снова нарастает, но закон пропорциональности между $z_р$ и $l_к$, положенный в основу принципа действия дистанционных защит, оказывается нарушенным (см. рис. 14-6, *б* и *в*).

Таким образом, далекое к. з., происшедшее на смежной линии BD, воспринимается защитой $Р_1$ как близкое к. з., расположенное на защищаемой линии АВ, в результате защита может срабатывать неправильно с выдержкой времени первой зоны. Помимо искажения величины $z_р$, $x_{УПК}$ может исказить знак реактивной составляющей $z_р$, что приводит к нарушению направленности действия защиты. Такие условия возникают тогда, когда емкостное сопротивление УПК преобладает над индуктивным сопротивлением линии, от места установки защиты до места включения продольной компенсации.

Например, для защиты P_1 при $x_{УПК} > x_{AC} = x_y l_{AC} = x_л$ сопротивление $z_{К2}$ в случае повреждения в точке K_2 и за ней имеет емкостный характер, т. е. его индуктивная составляющая имеет отрицательный знак, поэтому вектор $z_р = z_{К2}$ расположен в IV квадранте,

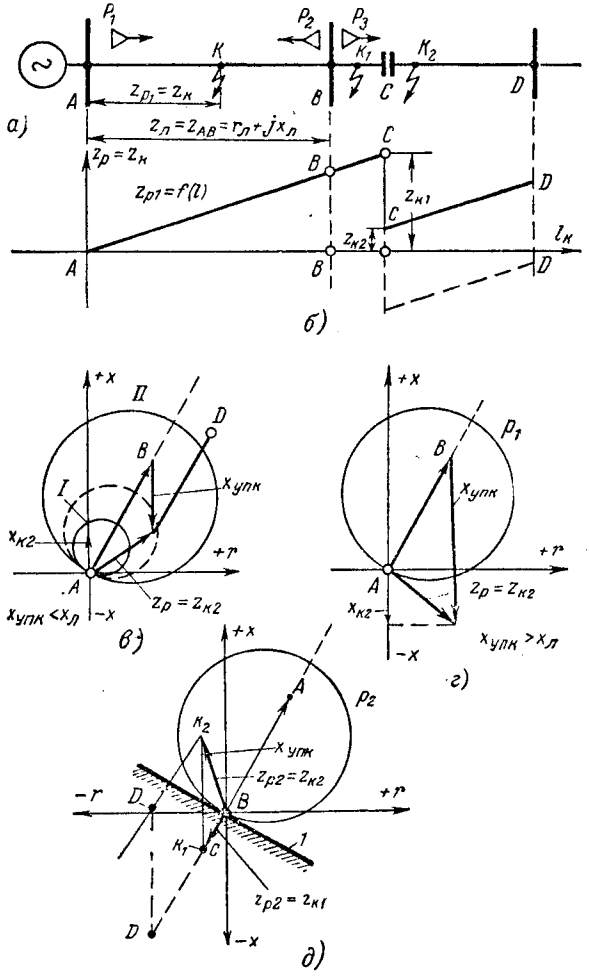


Рис. 14-6. Влияние емкости УПК на работу дистанционной защиты.

(см. рис. 14-6, *г*). Это означает, что реле P_1 не будет действовать, оно воспринимает это к. з. как повреждение до шин A.

Интересно отметить, что и реле P_3, находящееся у места к. з. (при повреждении в K_2), отказывает в действии по той же причине, так как $x_{УПК} > x_{BC}$. В то же время реле P_2 придет в действие, хотя по своему принципу оно не должно работать. При индуктив-

ном сопротивлении участка BK_2 на $z_{р2}$ реле P_2 имеет отрицательный знак и располагается в III квадранте (рис. 14-6, *д*), если же реактивное сопротивление BK_2 станет емкостным, то вектор $z_{р2}$ попадает во II квадрант, в часть, охваченную характеристикой реле, и оно неправильно срабатывает. При к. з. в K_1 сопротивление на зажимах P_2: $z_{р2} = -z_{BK1} = -BC$.

Из всего сказанного следует, что *наличие УПК весьма существенно влияет на поведение дистанционных защит, искажая величину и знак $z_р$ и приводит к неправильным действиям этих защит*. Применение дистанционных защит в сети с УПК возможно при условии ограничения их зон действия и при относительно небольшом значении $x_{УПК}$. Например, если $x_{УПК} < x_{AB}$, то первая зона защиты P_1 должна быть отстроена от z_{K2}, как представлено на рис. 14-6, *в* (окружность *I*), вторая зона (окружность *II*) должна охватывать остальную часть линии, не вошедшую в первую зону. Защиту P_2 можно применять только с выдержкой времени, поскольку она теряет направленность при к. з. за УПК. Защита P_3, как правило, не эффективна с учетом ее отказа в работе при к. з. за УПК.

Направленная защита (токовая). Наличие продольной компенсации может вызывать отказ и неправильное действие реле направления мощности в направленных защитах. Например, реле мощности, расположенное в P_2 (рис. 14-6, *а*), может неправильно работать при к. з. в точке K_2 за УПК (см. характеристику реле *1* на рис. 14-6, *д*).

в) Выполнение защит на электропередачах 500 *кв*

Отмеченные выше особенности дальних передач и условий работы защиты потребовали разработки специальных устройств, позволяющих обеспечить повышенное быстродействие, высокую чувствительность и правильную работу органов защиты в нормальных и аварийных режимах электрических сетей 500 *кв*, с учетом влияний емкостной проводимости, продольной и поперечной компенсаций.

Принципы защиты дальних передач. Основная защита на дальних электропередачах должна обеспечивать отключение к. з. без выдержки времени в пределах всей защищаемой линии. Из известных в настоящее время защит этому требованию удовлетворяют дифференциально-фазные и направленные высокочастотные защиты, а также дистанционные с высокочастотной блокировкой. В Советском Союзе в качестве основной защиты на этих линиях применяется дифференциально-фазная защита ДФЗ-501, разработанная с учетом особенностей дальних передач. В качестве резервных защит используются ступенчатые направленные защиты нулевой последовательности и дистанционные защиты.

Дифференциально-фазная защита типа ДФЗ-501. Защита выполнена на тех же принципах, что и ДФЗ-2. Она основана на сравнении фаз токов $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ и состоит из трех органов: пускового, манипуляции и сравнения фаз. Исполнение ее

органов имеет некоторые особенности, обеспечивающие правильную работу защиты в специфических условиях дальних передач сверхвысокого напряжения.

Особенности пускового органа. 1. Проведенные сравнения показали, что на дальних передачах более чувствительным является пуск по U_2. Поэтому в дифференциально-фазной защите для длинных линий типа ДФЗ-501 пусковой орган защиты выполнен с помощью реле напряжения обратной последовательности.

Как было показано (§ 12-6, б), обязательным условием правильной работы защиты при внешних к. з. является работа в. ч. постов на обоих концах линии.

При включении пусковых реле на напряжение обратной последовательности в месте установки защиты (U_{2m} и U_{2n}) это условие выполняется не во всех случаях, так как напряжение U_2 уменьшается при удалении от точки к. з. (рис. 14-7). Вследствие этого имеется возможность срабатывания пусковых реле защиты только на одном конце линии, ближнем к месту к. з. (рис. 14-7), что приводит к ложному действию.

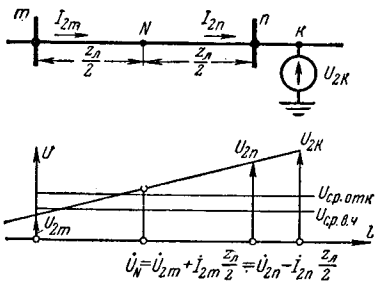


Рис. 14-7. Изменение напряжений обратной последовательности вдоль линии при внешнем к. з.

Для устранения этого недостатка и обеспечения правильной работы защиты к пусковым реле на обоих концах линии должны подводиться равные напряжения U_2. Это достигается включением пусковых реле на компенсированное напряжение обратной последовательности:

$$\dot{U}_{2р} = \dot{U}_2 - \dot{I}_2 z_{2к}, \qquad (14\text{-}1)$$

где $\dot{U}_2$ и $\dot{I}_2$ — напряжение и ток обратной последовательности в месте установки защиты; $z_{2к}$ — сопротивление компенсации.

Сопротивление $z_{2к}$ выбирается так, чтобы напряжение $U_{2р}$ при внешнем к. з. соответствовало напряжению в середине защищаемой линии (точка N на рис. 14-7). Исходя из этого, $z_{2к}$ принимается равным половине полного сопротивления линии $z_л$ ($z_{2к} = z_л/2$). При таком включении пусковые реле на обоих концах линии получают одно и то же напряжение U_2. Это обеспечивает одинаковые условия их работы и пуск высокочастотных постов на обеих сторонах линии при внешних к. з.

Компенсация напряжения U_2 осуществляется с помощью трансреактора $ТК$, включенного в рассечку каждой фазы вторичной цепи трансформатора напряжения, питающего фильтр $Ф_2$ (рис. 14-8). Вторичная э. д. с. трансреактора $ТК$ $E_к = I_ф z_{2к}$, где $z_{2к}$ — сопротивление, обусловленное взаимоиндукцией между обмотками $ТК$, соответствующее сопротивлению компенсации.

Результирующее напряжение каждой фазы, подводимое к фильтру обратной последовательности Φ_2, равно:

$$\dot{U}_{\text{рез.ф}} = \dot{U}_{\text{ф}} - z_{2\text{к}}\dot{I}_{\text{ф}}.$$

На выходе фильтра Φ_2 получается составляющая обратной последовательности этого напряжения, т. е. компенсированное напряжение $\dot{U}_{2\text{р}} = \dot{U}_{2\text{ф}} - z_{2\text{к}}\dot{I}_{2\text{ф}}$, как это требуется по выражению (14-1).

2. В соответствии с предъявляемыми требованиями защита ДФЗ-501 отличается повышенной быстротой действия. В связи с этим возникла необходимость ускорения пуска передатчиков, генерирующих токи в. ч.

Для этой цели помимо обычного пуска от контактов пускового реле $ПР_1$ (рис. 14-8) предусмотрен б е с к о н т а к т н ы й п у с к, осуществляемый с помощью выпрямленного напряжения $U_{\text{р}}$, питающего пусковые реле защиты $ПР_1$ и $ПР_2$, которые подводятся к лампе $Л_1$, управляющей работой передатчика.

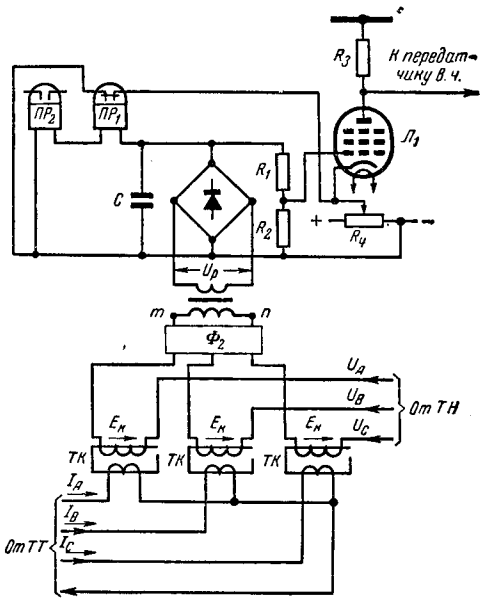


Рис. 14-8. Пусковой орган ДФЗ-500, реагирующий на компенсированное напряжение $\dot{U}_{2\text{р}} = \dot{U}_2 - \dot{I}_2 z_{2\text{к}}$ с контактным и бесконтактным пуском в. ч. передатчика.

В нормальных условиях $U_{\text{р}} = 0$, лампа $Л_1$ открыта, к передатчику подается минус и он не работает.

При появлении напряжения $U_{\text{р}}$ потенциал сетки лампы $Л_1$ по отношению к ее катоду становится о т р и ц а т е л ь н ы м и лампа закрывается. В результате этого к передатчику через сопротивление подводится плюс и передатчик начинает работать. Контактный пуск производится при срабатывании реле $ПР_1$. Оно размыкает контакты и снимает минус с катода, при этом на катод $Л_1$ подается положительное смещение с потенциометра R_4, лампа $Л_1$ закрывается и передатчик приходит в действие.

Бесконтактный пуск передатчика часто называется б е з ы н е р ц и о н н ы м; как видно из схемы, он действует быстрее, чем контактный пуск.

3. При обрыве одной или двух фаз цепей напряжения, питающего фильтр Φ_2, вторичное напряжение становится несимметричным, в нем появляется U_2, могущее вызвать работу реле $ПР_1$ и $ПР_2$. При этом происходит о д н о с т о р о н н и й пуск защиты, вызывающий ее ложное действие. Для предупреждения этого в схеме

защиты предусматривается блокировка, выводящая защиту из действия при обрыве цепей напряжения.

Особенности органа манипуляции. Орган манипуляции ДФЗ-501 состоит из комбинированного фильтра $\Phi_м$, выполненного так же, как и в ДФЗ-2, и дополнительного устройства компенсации *УК* (рис. 14-9), устраняющего влияние емкостных токов прямой и обратной последовательностей защищаемой линии на величину и фазу напряжения $U_м \equiv \equiv (\dot{I}_1 + k\dot{I}_2)$, получаемого от фильтра $\Phi_м$.

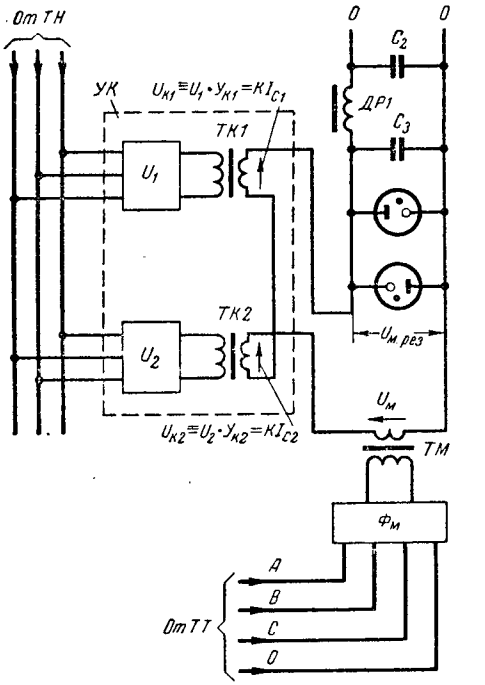


Рис. 14-9. Орган манипуляции ДФЗ-500.

Компенсирующее устройство представляет собой фильтры напряжения прямой и обратной последовательностей U_1 и U_2, питающие трансформаторы *ТК1* и *ТК2* соответственно. На выходе трансформаторов получаются напряжения $U_{к1}$ и $U_{к2}$, пропорциональные прямой и обратной последовательности емкостных токов линии (I_{C1} и I_{C2}): $U_{к1} \equiv I_{C1}$, $U_{к2} \equiv I_{C2}$.

Как видно из рис. 14-9, эти напряжения включаются в выходную цепь трансформатора манипуляции *ТМ*, питаемого фильтром $\Phi_м$, и уничтожают (компенсируют) емкостные составляющие напряжения $U_м$, обусловленные емкостными токами I_{C1} и I_{C2}.

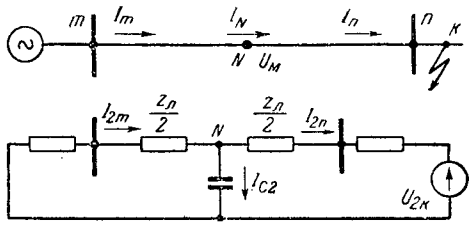
На рис. 14-10 приведены векторные диаграммы токов обратной последовательности на обоих концах линии, поясняющие компенсацию емкостных токов обратной последовательности I_{C2}. Векторные диаграммы построены без учета активных составляющих сопротивлений сети.

Диаграммы показывают, что в результате компенсации сравниваемые вторичные токи на обоих концах линии при внешних к. з. получаются равными по величине и сдвинутыми по фазе на 180°. С помощью аналогичных диаграмм можно пояснить компенсацию емкостных токов прямой последовательности.

Для устранения влияния токов с частотой, отличной от 50 *гц*, возникающих при неустановившихся режимах в сетях 500 *кв*, преду-

смотрен специальный частотный фильтр. Фильтр состоит из дросселя *ДР1* и емкостей C_3 и C_2 (рис. 14-9), включенных на выходе органа манипуляции. Фильтр пропускает только токи с частотой 50 *гц*.

Защита ДФЗ-501 получила широкое распространение в СССР в качестве основной на линиях 500 *кв* [Л. 59, 60].



14-2. ЗАЩИТА ЛИНИЙ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

а) Линии с ответвлениями

За последнее время широкое распространение получают линии с ответвлениями, к которым подключаются подстанции, имеющие или не имеющие источников питания, как показано на рис. 14-11. Подключение таких подстанций к магистральным линиям может выполняться с выключателями на стороне высшего напряжения (рис. 14-11, *а*) или по упрощенным схемам — без выключателей (рис. 14-11, *б*).

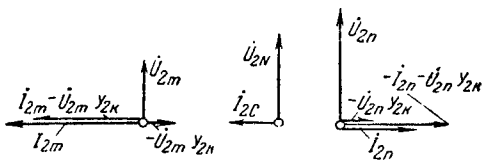


Рис. 14-10. Влияние емкостных токов обратной последовательности и их компенсация (условия компенсации I_{2C}: $\dot{I}_{2m} = -\dot{U}_{2m}\,Y_{2K} = -(\dot{I}_{2n} + \dot{U}_{2n}\,Y_{2K}) = \dot{I}_N$ с учетом, что $\dot{I}_{2m} = \dot{I}_{2n} + \dot{I}_{2C}$ и $\dot{U}_{2m} + \dot{U}_{2n} = 2\dot{U}_N$ $Y_{2K} = \frac{I_{2C}}{2\dot{U}_N} = \frac{1}{2x_C}$, где Y_{2K} — проводимость компенсации).

В последнем случае возможны следующие варианты выполнения защиты и отключения трансформаторов, подключенных на ответвлениях, в случае их повреждения:

1. Защита трансформаторов осуществляется защитами магистральной линии на выключателях *А* и *В*. В этом случае трансформатор *Т* подключается к линии наглухо (рис. 14-11, *б*).

2. Защита трансформатора на ответвлении выполняется с помощью плавких предохранителей *П* (рис. 14-11, *в*).

3. На трансформаторе ответвления устанавливается релейная защита *С* от внутренних повреждений, которая действует на включение специального автоматического разъединителя *К*, называемого короткозамыкателем (рис. 14-11, *г*). При повреждении в трансформаторе короткозамыкатель *К* включается и устраивает к. з. (однофазное или двухфазное), на которое реагирует защита магистральной линии, отключающая выключатели *А* и *В*. После отключения линии работает автоматический отделитель *О*, отключающий поврежденный трансформатор, и затем магистральная линия *Л1* включается в работу с помощью *АПВ*.

Таким образом, в рассмотренном варианте на трансформаторе устанавливаются отделитель и короткозамыкатель.

4. Как и в предыдущем случае, на трансформаторе устанавливается защита *С*. При повреждении в трансформаторе она срабатывает и посылает по специальным каналам (проводным или высокочастотным по линиям электропередачи) импульс на отключение выключателей *А* и *В* линии (рис. 14-11, *д*).

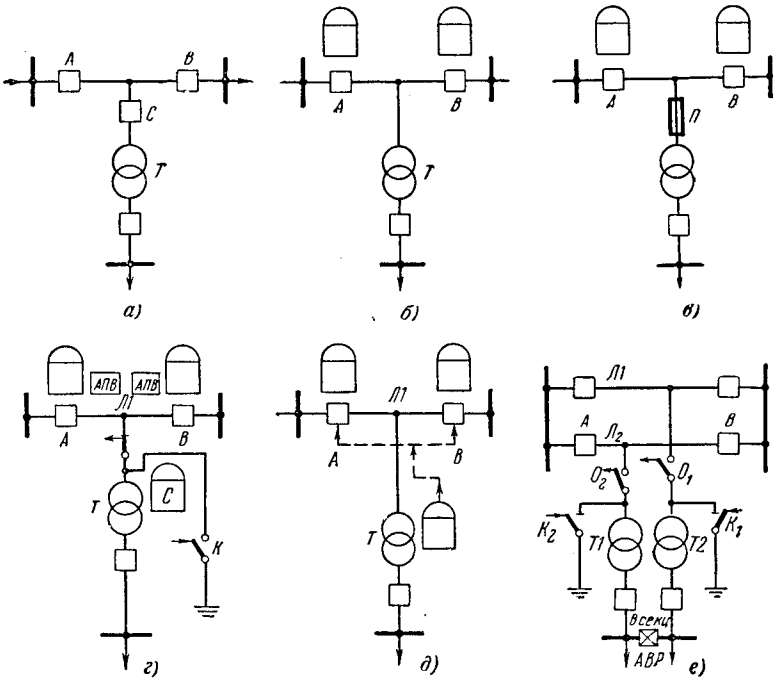


Рис. 14-11. Схемы линий с ответвлениями.

Этот способ требует дорогостоящих каналов связи. Но он позволяет быстрее отключать поврежденный трансформатор и упрощает силовую часть трансформатора.

Наибольшее распространение на практике получили первые три варианта.

Подключение ответвлениями применяется как на одинарных, так и на параллельных линиях. В последнем случае трансформаторы, подключенные к разным линиям, работают раздельно на стороне низшего напряжения (рис. 14-11, *е*). При отключении одной из линий или трансформатора с помощью *АВР* включается секционный выключатель $В_{секц}$ и питание потребителей секции, потерявшей напряжение, восстанавливается от второго трансформатора.

Выполнение релейной защиты линий с маломощными трансформаторами на ответвлениях обычно не вызывает затруднения.

Осуществление же защиты линий с ответвлениями, имеющими мощные трансформаторы, и особенно при наличии со стороны ответвления источников питания наталкивается на некоторые трудности в части обеспечения селективности, быстроты действия и чувствительности. Однако подключение подстанций с помощью ответвлений дает значительное удешевление их сооружения, позволяет экономить оборудование и аппаратуру, ускоряет строительство подстанций и удешевляет их эксплуатацию. Поэтому разработку вопросов защиты линий с ответвлениями следует считать важной и нужной задачей.

Рассмотрим применение основных видов защит на линиях с ответвлением.

б) Токовые и дистанционные защиты со ступенчатой характеристикой

Токовые ступенчатые защиты, реагирующие на ток фазы. На линиях с ответвлениями такие защиты устанавливаются на питающих концах линии (рис. 14-12). Для обеспечения селективности ток срабатывания быстродействующей ступени защиты (отсечка с $t = 0$) отстраивается не только от к. з. за пределами защищаемой линии (точки K_1 и K_2), но и от к. з. в K_3 за трансформатором отпайки (рис. 14-12) по выражению

$$I_{с.з} = (1{,}2 \div 1{,}3)\, I_{К3макс}, \qquad (14\text{-}2)$$

где $I_{К3макс}$ — ток при к. з. в K_3; этот ток имеет максимальное значение при отключении линии на противоположном конце. При большой мощности трансформатора ответвления ток $I_{к.з.макс}$ может оказаться больше, чем ток при к. з. в K_2 или K_1, что приведет к уменьшению зоны отсечки.

Неселективное действие первой ступени защиты при к. з. в трансформаторе ответвления исправляется с помощью *АПВ* следующим образом. При к. з. в трансформаторе линия и трансформатор отключаются одновременно. Затем после автоматического отключения отделителя (рис. 14-11, *г*, *е*) линия включается от *АПВ*. Селективность второй и третьей ступени защит *А* и *В* линии при к. з. на ответвлении обеспечивается согласованием выдержек времени этих ступеней с защитами $M_т$ трансформатора ответвления. Третья зона защиты линий должна резервировать отказ выключателя *С* и максимальной защиты трансформатора $M_т$ ответвления. При маломощных трансформаторах это требование часто оказывается трудно осуществимым.

При наличии источников питания на ответвлении защиты линий следует выполнять направленными, что облегчает выполнение условий селективности при к. з. за пределами линии.

Токовые защиты нулевой последовательности. По условию селективности вторая и третья зоны защиты линии должны согласовываться с защитами трансформатора ответвления по времени, а

первая зона защиты должна отстраиваться от к. з. за трансформатором, если при этом в линии AB появляются токи нулевой последовательности. При соединении обмоток трансформатора по схеме $\lambda/\triangle$ в случае замыкания на землю в сети треугольника токи I_0 в линии отсутствуют и поэтому наличие ответвления не влияет на чувствительность первой ступени линейных защит A и B.

На чувствительность линейных защит нулевой последовательности (A и B) оказывает влияние состояние нейтрали H трансформаторов, подключенных к ответвлению (рис. 14-12). Если нейтраль H не заземлена, то ток $3I_{0к}$, проходящий в месте к. з. (в точке K_4), распределяется между концами линии (A и B) обратно пропорционально сопротивлениям нулевой последовательности обеих ветвей.

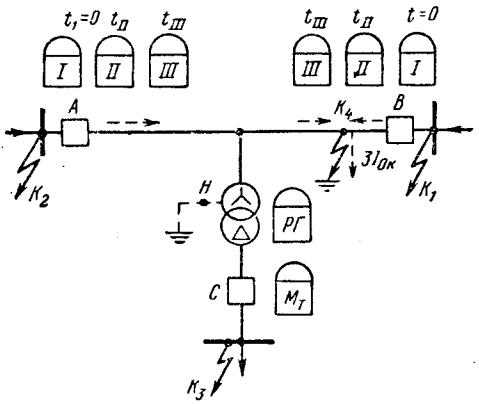


Рис. 14-12. Токовые и дистанционные защиты на линиях с ответвлениями.

При заземлении нейтрали H и к. з. в K_4 часть тока $3I_{0к}$ замыкается через нейтраль ответвления, вследствие чего токи $3I_{0A}$ и $3I_{0B}$ на концах линии уменьшаются. Степень уменьшения зависит от соотношения параметров сети, линии и трансформатора ответвления. *Для повышения чувствительности защиты на линиях с ответвлениями трансформатор ответвления желательно не заземлять.*

Дистанционная защита. По соображениям селективности первая зона защиты отстраивается от к. з. за трансформатором ответвления (точка K_3 на рис. 14-12), а вторая и третья — согласуются по времени с соответствующими защитами трансформатора ответвления (см. § 11-18).

в) Дифференциальные защиты

Поперечная направленная дифференциальная защита может устанавливаться на параллельных линиях с ответвлениями, но при этом необходимо учитывать два обстоятельства:

1. Наличие ответвлений нарушает равенство токов в параллельных линиях $Л_1$ и $Л_2$ в нормальном режиме, $I_1 \neq I_2$ (рис. 14-13, *а*), поэтому в реле появляется ток

$$I_р = I_1 - I_2 = I_{отв1} - I_{отв2}. \qquad (14\text{-}3)$$

2. При к. з. за трансформатором ответвления защита приходит в действие, стремясь отключить линию с поврежденным ответвлением, что следует из токораспределения на рис. 14-13, *б*.

Для предупреждения неправильного действия поперечной дифференциальной защиты в нормальном режиме ее ток срабатывания отстраивается от тока небаланса, обусловленного нагрузкой ответвлений:

$$I_{с.з} = k_{зап}(I_{отв1} - I_{отв2}). \quad (14\text{-}4)$$

Для исключения работы защиты во втором случае, при к. з. на ответвлении, необходимо выполнить условие:

$$I_{с.з} = k_{зап}(I_{1(K_3)} - I_{2(K_3)}), \quad (14\text{-}5)$$

где $I_{1(K_3)}$ и $I_{2(K_3)}$ — токи к. з., проходящие по $Л_1$ и $Л_2$ в месте установки защиты при к. з. в K_3 за одним из трансформаторов ответвления.

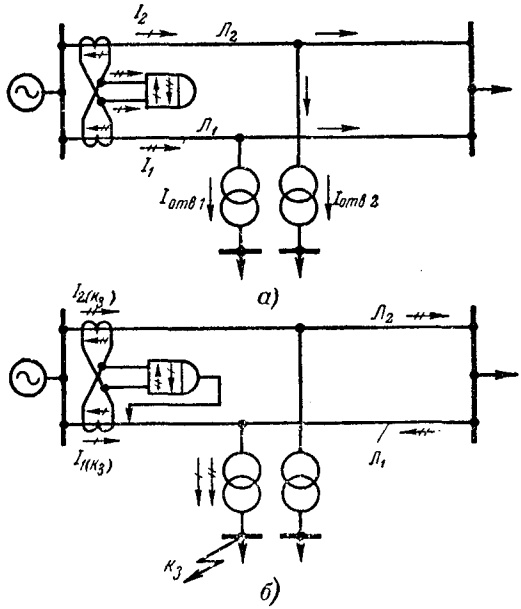


Рис. 14-13. Направленная поперечная дифференциальная защита параллельных линий с ответвлениями.

При наличии источников питания на ответвлениях появляется возможность неправильной работы поперечной дифференциальной защиты при к. з. вне параллельных линий, в чем можно убедиться из рассмотрения токораспределения в $Л_1$ и $Л_2$. Исключение этого недостатка возможно только отстройкой тока срабатывания защиты.

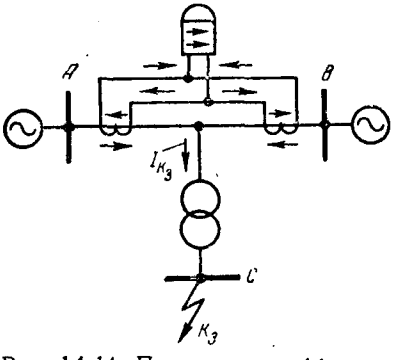


Рис. 14-14. Продольная дифференциальная защита на линии с ответвлением.

Продольная дифференциальная защита. На линиях с ответвлением эта защита может неправильно действовать при к. з. за трансформатором ответвления (в точке K_3).

Как следует из рис. 14-14, токи по концам защищаемой линии в этом случае направлены от шин в линию (к месту к. з.), так же как и при к. з. на линии. Для исключения неправильной работы защиты ток срабатывания дифференциальных реле должен быть больше тока в них при к. з. в K_3, т. е. $I_{с.з} > I_{K_3}$. Это условие можно выполнить только при маломощном трансформаторе ответвления, когда ток к. з. I_{K_3} имеет

небольшую величину. Поэтому продольная дифференциальная защита типа ДЗЛ в большинстве случаев оказывается неприменимой на линиях с ответвлениями. Для линий с ответвлениями необходима особая схема защиты, реагирующая на геометрическую сумму токов на концах линии и в ответвлении. Такие защиты еще находятся в стадии разработки.

г) Высокочастотные защиты [Л. 91]

Дифференциально-фазная защита. На линиях с ответвлением дифференциально-фазная защита, основанная на сравнении фаз токов I_A и I_B по концам линии (рис. 14-15, *а*), действует неправильно при к. з. в точке K_3 за трансформатором ответвления.

В этом случае токи по концам линии I_A и I_B совпадают по фазе, поэтому высокочастотные импульсы имеют прерывистый характер (рис. 14-15, *б*) и защита работает, так же как и при повреждении на защищаемой линии.

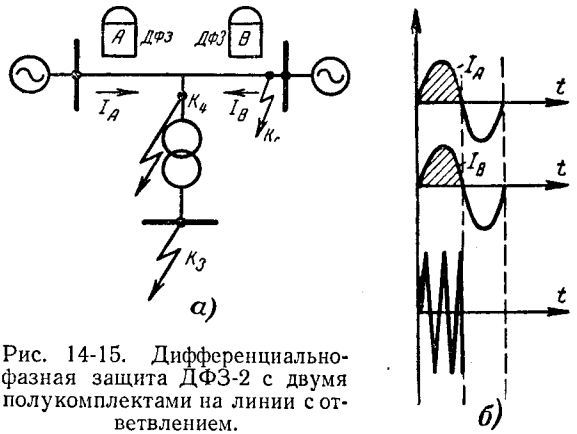


Рис. 14-15. Дифференциально-фазная защита ДФЗ-2 с двумя полукомплектами на линии с ответвлением.

Неправильное действие защиты в рассматриваемом случае можно предотвратить двумя способами: 1) отстройкой пусковых реле, управляющих цепью отключения защиты, от к. з. за трансформатором ответвления или применением блокирующих реле, также отстроенных от к. з. за трансформатором [Л. 64] и 2) установкой дополнительного неполного комплекта дифференциально-фазной защиты на ответвлении.

В первом случае при к. з. за трансформатором ответвления пусковые реле в цепи отключения защиты, установленной на обоих концах линии, не будут срабатывать и поэтому защита не сможет подействовать на отключение.

Отстройка пусковых реле от к. з. за трансформатором ведется в режиме, когда линия отключена на противоположной стороне,

так как в этом случае токи к. з. и их симметричные составляющие в рассматриваемом комплекте защиты будут наибольшими.

Данный способ применим при условии, что коэффициент чувствительности пусковых реле при к. з. на ответвлении (точка K_4) и на противоположной стороне линии (точка K_2) будет достаточным для надежной работы защиты (т. е. если $k_ч \geqslant 2$).

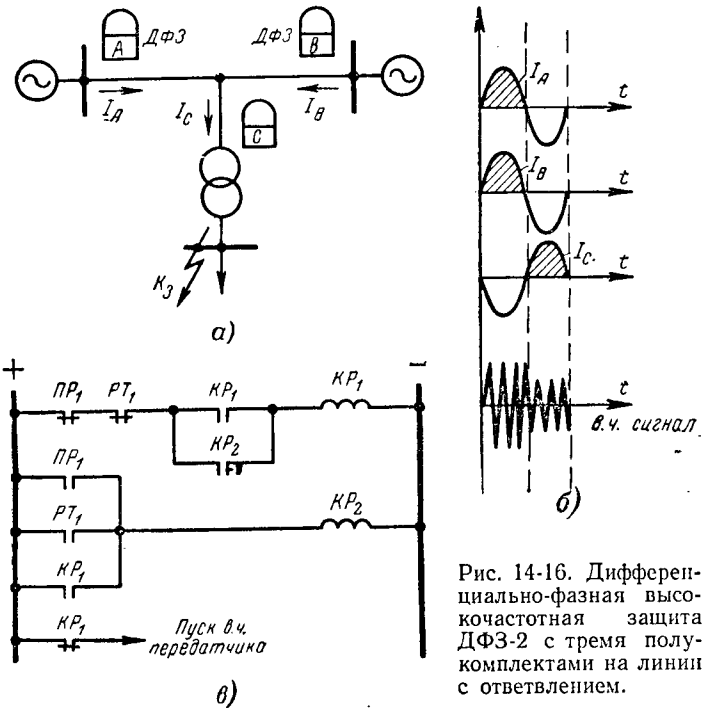


Рис. 14-16. Дифференциально-фазная высокочастотная защита ДФЗ-2 с тремя полукомплектами на линии с ответвлением.

Второй способ применяется, если отстройка пусковых органов защиты по условиям ее чувствительности невозможна.

В этом случае на ответвлении устанавливается дополнительный неполный комплект *C* дифференциально-фазной защиты (рис. 14-16), используемый для блокирования комплектов *A* и *B*, при повреждениях за трансформатором ответвления, установленных на концах линии. Этот комплект *C* состоит из высокочастотного передатчика, пускающих его пусковых реле (рис. 14-16, *в*) и блока манипуляции, управляющего работой передатчика (см. рис. 12-21).

При к. з. за трансформатором ответвления ток в ответвлении I_C сдвинут по фазе на 180° относительно токов I_A и I_B на концах линии (рис. 14-16, *а*).

В этих условиях передатчики на концах линии работают в положительные полупериоды токов I_A и I_B, а передатчик на ответвлении — в отрицательный полупериод этих токов. Ток высокой частоты генерируется непрерывно, как и при внешнем к. з., защита ДФЗ не работает (рис. 14-16, *б*).

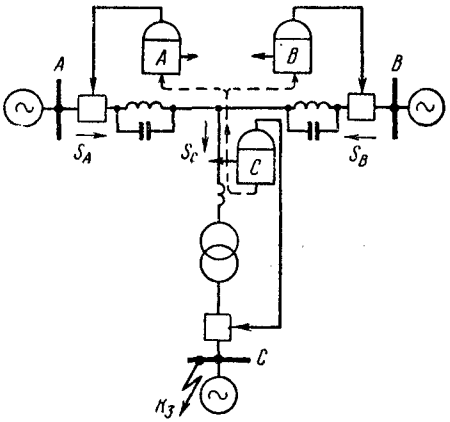


Рис. 14-17. Направленная высокочастотная защита на линии с ответвлением.

В случае наличия источников питания со стороны ответвления на последнем устанавливается полный комплект дифференциально-фазной защиты.

Рассмотрев распределение токов по концам линии и на ответвлении, нетрудно убедиться, что дифференциально-фазная защита, состоящая из трех полных комплектов, будет работать правильно при всех случаях повреждений.

Направленные защиты с высокочастотной блокировкой. Для обеспечения правильной работы защиты в общем случае (при наличии питания со стороны ответвления) необходимо устанавливать комплекты защиты с трех сторон линии *A*, *B* и *C* (рис. 14-17).

При к. з. за трансформатором ответвления в точке K_3 мощность к. з. S_C на ответвлении направлена к шинам (рис. 14-17), комплект *C* пускает в. ч. передатчик, который посылает блокирующие импульсы, запрещающие работать комплектам *A* и *B*. При к. з. на линии последняя будет отключаться с трех сторон комплектами защиты *A*, *B* и *C*.

При отсутствии источников питания со стороны ответвления на последнем достаточно установить только в. ч. передатчик и пускающие его пусковые реле (рис. 14-18), с тем чтобы комплект *C* блокировал защиты *A* и *B* при к. з. за ответвлением в точке K_3.

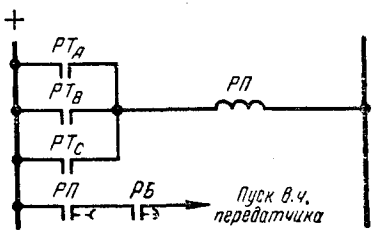


Рис. 14-18. Схема полукомплекта высокочастотной защиты, устанавливаемого на ответвлении без источника питания.

Комплект *C* можно не ставить, если пусковые реле защит *A* и *B* можно отстроить от к. з. в точке K_3 без ущерба для чувствительности защиты при повреждении на защищаемой линии.

Глава пятнадцатая

ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ

15-1. ПОВРЕЖДЕНИЯ И НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ, ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ ГЕНЕРАТОРОВ

а) Виды повреждений генераторов

Большинство повреждений генератора вызывается нарушением изоляции обмоток статора и ротора. Эти нарушения обычно происходят вследствие старения изоляции, ее увлажнения, наличия в ней дефектов, а также в результате повышения напряжения, перенапряжений, механических повреждений, например, из-за вибрации стержней обмоток и стали магнитопровода. Поэтому в принципе повреждения возможны в любой части обмоток.

Повреждение в статоре. В статоре возникают междуфазные (двухфазные и трехфазные) к. з., замыкание одной фазы на корпус (на землю), замыкание между витками обмотки одной фазы. Наиболее часто происходят междуфазные к. з. и замыкания на корпус.

Междуфазные к. з. сопровождаются прохождением в месте повреждения очень больших токов (десятки тысяч ампер) и образованием электрической дуги, вызывающей выгорание изоляции и токоведущих частей обмоток, а иногда и стали магнитопровода статора.

Замыкание обмотки статора на корпус является замыканием на землю, так как корпус статора связан с землей. При этом ток повреждения проходит в землю всегда через сталь магнитопровода статора, выжигая ее. Повреждение стали требует длительного и сложного ремонта.

Замыкание витков одной фазы происходит относительно редко; оно переходит либо в замыкание на землю, либо в замыкание между фазами.

Повреждения в роторе. Обмотка ротора генератора находится под невысоким напряжением (300—500 *в*), и поэтому ее изоляция имеет значительно больший запас прочности, чем изоляция статорной обмотки. Однако из-за тяжелых механических условий работы обмотки ротора, вызываемых большой скоростью вращения (1 500—3 000 *об/мин*), относительно часто наблюдаются случаи повреждения изоляции и замыкания обмотки ротора на корпус (т. е. на землю) в одной или двух точках.

Замыкание на корпус в одной точке обмотки ротора неопасно, так как ток в месте замыкания практически равен нулю и нормальная работа генератора не нарушается. Но при этом повышается вероятность возникновения опасного для генератора аварийного режима в случае появления второго замыкания на корпус в другой точке цепи возбуждения.

При двойных замыканиях часть витков обмотки ротора оказывается зашунтированной (см. рис. 15-34); сопротивле-

ние цепи ротора при этом уменьшается и в ней появляется повышенный ток. Этот ток перегревает обмотки ротора и питающего ее возбудителя, вызывает дальнейшие разрушения в месте повреждения и может вызвать горение изоляции ротора.

Кроме того, из-за нарушения симметрии магнитного потока, обусловленного замыканием части витков обмотки ротора, возникает сильная механическая вибрация, опасная для генератора. Особенно большая и опасная вибрация появляется при двойном замыкании на землю на гидрогенераторах и синхронных компенсаторах (СК), имеющих явнополюсные роторы. Поэтому на гидрогенераторах и крупных СК целесообразно устанавливать защиту, сигнализирующую первое замыкание на землю в роторе. При срабатывании этой защиты гидрогенератор останавливают для устранения повреждения. Для турбогенераторов двойное замыкание менее опасно, и поэтому турбогенераторы допускается оставлять в работе при первом замыкании в роторе. Специальной защиты от этого вида повреждения можно не ставить. Замыкание на землю в роторе обнаруживается при измерении его изоляции, проводимом периодически на работающем генераторе.

На турбогенераторах при первом замыкании обмотки ротора на корпус устанавливается защита от двойного замыкания на землю.

б) Ненормальные режимы

Ненормальными режимами генератора считаются: опасное увеличение тока в статоре или роторе сверх номинального значения (сверхтоки), несимметричная нагрузка фаз статора, опасное повышение напряжения на статоре.

Рассмотрим кратко причины и характер ненормальных режимов.

Повышенные токи (сверхтоки) в генераторе возникают при внешних к. з. или перегрузках.

При внешних к. з. в генераторе, питающем место повреждения, появляется ток к. з. $I_к > I_{ном.г}$. Нормально такие к. з. ликвидируются защитой поврежденного элемента и не опасны для генератора.

Однако в случае отказа защиты или выключателя этого элемента ток к. з. в генераторе будет проходить длительно, нагревая его обмотки. Повышенный нагрев может привести к повреждению последних. Предупредить подобное повреждение можно только путем отключения генератора.

Для этой цели *на генераторе должны предусматриваться защиты, реагирующие на внешние к. з. и резервирующие отказ защиты или выключателей смежных элементов.*

Перегрузка генератора обычно возникает в результате отключения или отделения части параллельно работающих генераторов системы; кратковременных толчков нагрузки, вызванных технологией производственных процессов у потребителей; самозапуска двигателей; форсировки возбуждения генератора; на-

рушения синхронизма; потери возбуждения у генератора и тому подобных причин.

Перегрузка, т. е. увеличение тока нагрузки в обмотках генератора с в е р х номинального значения $I_г > I_{ном}$, так же как и внешнее к. з., ведет к перегреву обмоток и может привести к порче изоляции, если ее температура превзойдет некоторое предельное значение $T^{\circ}_{доп.макс}$, опасное для изоляции.

При прохождении тока перегрузки температура изоляции достигает предельного значения через некоторое время $t_{доп}$, зависящее от величины тока $I_г$. Характер этой зависимости $t_{доп} = f(I_г/I_{ном})$ показан на рис. 15-1.

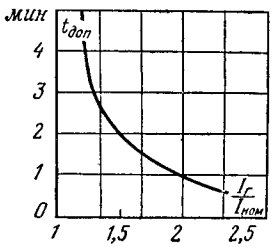


Рис. 15-1. Зависимость допустимой длительности перегрузки $t_{доп}$ от кратности тока генератора $I_г$ к номинальному току $I_{ном}$.

Допустимое время $t_{доп}$ для генераторов с косвенным охлаждением определяется по формуле: $t_{доп} = \frac{150}{k^2 - 1}$, где k — кратность тока перегрузки к номинальному.

Для ограничения габаритов, снижения стоимости и уменьшения затрат дефицитных материалов мощные генераторы выполняются с повышенной плотностью тока в обмотках статора и ротора, пониженными термическими запасами и более интенсивной (форсированной) системой охлаждения.

В качестве последней принята система непосредственного охлаждения обмоток, осуществляемая подачей охлаждающей среды (водорода, воды, масла) во внутреннюю полость проводников обмоток статора и ротора. Охлаждающая среда циркулирует по специальным каналам внутри проводников обмоток.

Отечественные заводы выпускают генераторы:

ТВФ — с непосредственным охлаждением ротора водородом;
ТГВ — с непосредственным охлаждением водородом ротора и статора;
ТВВ — с непосредственным охлаждением статора водой и ротора водородом;
ТВМ — с непосредственным охлаждением статора маслом, а ротора водой.

Допустимое время перегрузки мощных генераторов зависит от типа охлаждения, соответствующие данные для обмоток статора приведены в табл. 15-1 и для обмоток ротора — в табл. 15-2 [Л. 100].

Как следует из таблиц, перегрузка статора до 30% на генераторах с непосредственным охлаждением и до 50% на генераторах с косвенным охлаждением допускается в течение 2 *мин* и более, поэтому при таких перегрузках не требуется немедленного автоматического отключения генератора.

Во многих случаях перегрузки, обусловленные форсировкой возбуждения, качаниями, кратковременными толчками нагрузки у потребителя и т. п., ликвидируются сами по себе до истечения предельного времени $t_{доп}$. При авариях в системе с дефицитом

генераторной мощности предусматривается автоматическая разгрузка путем отключения части потребителей при снижении частоты, а также автоматический и ручной ввод резерва активных и реактивных мощностей. Такими путями предупреждается и ликвидируется длительная перегрузка генераторов при недостатке генераторной мощности.

Таблица 15-1

Продолжительность перегрузки, *мин*	Кратность перегрузки статора $\frac{I_{ст}}{I_{ст.\ ном}}$		
	с косвенным охлаждением обмоток	с непосредственным охлаждением обмоток	
		водой	водородом
60	1,1	1,1	—
15	1,15	1,15	—
10	—	—	1,1
6	1,2	1,2	1,15
5	1,25	1,25	—
4	1,3	1,3	1,2
3	1,4	1,35	1,25
2	1,5	1,4	1,3
1	2,0	1,5	1,5

Отключение генераторов при перегрузках допускается только в тех случаях, когда принятые меры по их разгрузке не дают результата, а допустимое время перегрузки истекло.

С учетом сказанного защита от перегрузки генераторов на электростанциях с дежурным персоналом устанавливается с действием на сигнал. На автоматизированных электростанциях защита от перегрузки выполняется с действием на отключение или разгрузку генераторов по истечении допустимого времени перегрузки. Аналогичное исполнение защиты желательно иметь и на мощных генераторах, так как на этих генераторах при перегрузках, превышающих 30%, $t_{доп}$ достаточно мало и поэтому дежурный персонал не успеет произвести своевременную разгрузку их.

Таблица 15-2

Продолжительность перегрузки ротора с непосредственным охлаждением, *мин*	Кратность перегрузки ротора $\frac{I_{рот}}{I_{рот.\ ном}}$
60	1,05
10	1,1
6	1,15
4	1,2
1	1,5
0,3	2

Примечание. На генераторах с косвенным охлаждением при одновременных перегрузках ротора и статора статор нагревается быстрее. Поэтому данные о перегрузочной способности ротора этих генераторов не приводятся.

Несимметрия токов в фазах генераторов возникает при двухфазных и однофазных к. з. вне генератора, при обрывах одной или двух фаз цепи, связывающей генератор с нагрузкой, и при неполнофазном режиме работы в сети. Несимметрия токов приводит к дополнительному нагреванию ротора и механической вибрации машины.

Несимметрия сопровождается появлением в обмотке статора токов обратной последовательности I_2, эти токи имеют обратное чередование фаз и создают магнитное поле, вращающееся в сторону, противоположную вращению ротора. В результате этого поток, созданный токами I_2, пересекает корпус ротора с двойной скоростью. Он индуктирует в металлических частях ротора (в бочке ротора) значительные вих-

ревые токи, имеющие двойную частоту, и создает дополнительный, пульсирующий с двойной частотой электромагнитный момент. Вихревые токи вызывают повышенный нагрев ротора, а пульсирующий момент — вибрацию вращающейся части машины.

Несимметрия токов особенно опасна для крупных современных турбо- и гидрогенераторов ТВФ, ТВВ, ТГВ, ТВМ, выполняемых, как указывалось выше, с пониженным тепловым запасом. С учетом термических и механических характеристик отечественных генераторов допускается их длительная работа с неравенством (несимметрией) токов по фазам, не превышающим 10% для турбогенераторов и 20% для гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, при условии, что ток в фазах не превосходит номинального значения.

При указанной несимметрии ток I_2 составляет около 5 и 10% $I_{\text{ном.г}}$ соответственно, эти значения являются максимальными длительно допустимыми токами $I_{2\text{доп}}$, и их можно рассматривать как номинальные токи обратной последовательности генератора.

Ток $I_2 > I_{2.\text{макс.длит.доп}}$ вызывает опасный дополнительный нагрев ротора и может допускаться лишь в течение ограниченного времени $t_{\text{доп}}$.

Величина допустимого времени $t_{\text{доп}}$ определяется предельной температурой $T_{\text{пред}}$, допустимой для изоляции обмотки ротора и отдельных, наиболее подверженных нагреву элементов ротора: бандажных колец, зубцов, металлических пазовых клиньев.

Непосредственно нагрев ротора происходит от тепла, выделенного вихревыми токами $I_{\text{в.т}}$, возникающими в корпусе ротора, но так как последние индуктируются токами статора I_2 и ему пропорциональны $I_{\text{в.т}} = kI_2$, то количество тепла, выделенное вихревыми токами,

$$Q = k'I^2_{\text{в.т}}t = k''I^2_2t.$$

При адиабатическом процессе нагрева (без отдачи в окружающую среду) предельные температуры $T_{\text{пред}}$ достигаются при определенном, постоянном для данного типа генератора количестве тепла $Q_{\text{пред}}$. Характеризуя эту величину постоянной A, получаем уравнение нагрева ротора через ток I_2:

$$I^2_{*2}t_{\text{доп}} = A, \tag{15-1}$$

откуда

$$t_{\text{доп}} = \frac{A}{I^2_{*2}}, \tag{15-1а}$$

где I_{*2} — кратность среднего за время $t_{\text{доп}}$ действующего значения тока I_2; A — тепловая постоянная, зависящая от типа генератора.

В общем случае ток I_2 не постоянен и может изменяться в течение времени $t_{\text{доп}}$. Под средним током I_2 понимается действующее значение тока I_2, сохраняющего постоянную величину в течение времени $t_{\text{доп}}$ и выделяющего за это время такое же количество тепла, что и действительный изменяющийся во времени ток $I_{2(t)}$.

Величина среднеквадратичного тока находится интегрированием (суммированием) токов $I^2_{2(t)}$ в пределах времени $t_{доп}$, делением полученного интеграла на время $t_{доп}$ и извлечением квадратного корня из среднего значения I^2_2:

$$I_{*2} = \sqrt{\frac{1}{t_{доп}} \int_0^{t_{доп}} I^2_{2(t)}\, dt}, \qquad (15\text{-}2)$$

где $I_{2(t)}$ — мгновенное значение действительного тока I_2 в относительных единицах.

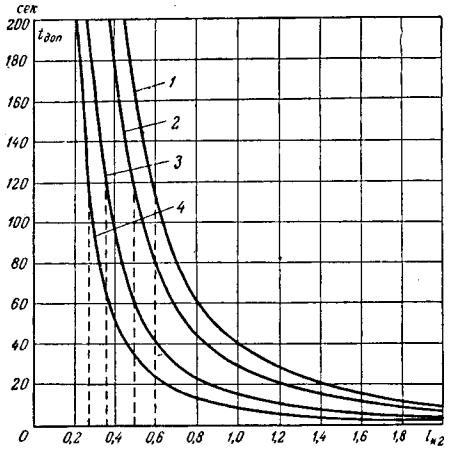


Рис. 15-2. Кривые зависимости $t_{доп} = f(I_{*2})$.

1 — для гидрогенераторов ($A = 40$); *2* — для турбогенераторов ТВ2 ($A = 29$); *3* — для турбогенераторов ТВФ ($A = 15$); *4* — для турбогенераторов ТГВ-300 ($A = 8{,}5$).

Выражение (15-1а) является тепловой характеристикой ротора генератора, определяющей допустимую продолжительность несимметричных режимов в зависимости от величины тока I_2: $t_{доп} = f(I_2)$.

Это выражение является приближенным. При малых токах нагрев ротора происходит медленно и сопровождается отдачей тепла в окружающую среду (т. е. не адиабатически), в результате чего действительное $t_{доп}$ больше расчетного.

При прохождении больших токов возникает опасность выделения повышенного количества тепла в переходном сопротивлении соприкасающихся поверхностей стали ротора (зубцов, клиньев и др.). Последнее может приводить к более быстрому нагреву этих поверхностей до опасной температуры, чем это дается расчетной формулой (15-1а).

Таблица 15-3

Продолжительность несимметричного режима, *сек*	Допустимый ток I_2 в долях номинального для турбогенераторов	
	ТВФ	ТВВ и ТГВ
2	2,6	2,0
3	2,3	1,6
4	1,9	1,4
5	1,7	1,25
10	1,2	0,9
20	0,9	—

Тепловые характеристики для генераторов разного типа и разной мощности приведены на рис. 15-2 и в табл. 15-3. Постоянная A принята по данным заводов. Для генераторов с косвенным водородным охлаждением $A = 30$, для генераторов ТВФ $A = 15$, для генераторов ТГВ, ТВВ и ТВМ $A = 11 \div 8$. Для турбогенераторов 500 *Мвт* $A = 5$.

Из характеристик на рис. 15-2 видно, что для мощных генераторов с косвенным охлаждением при $I_{*2} > 0{,}3 I_{ном\,г}$, время $t_{доп}$

относительно мало (меньше 2 *мин*) и поэтому при подобных перегрузках требуются автоматические устройства, защищающие генераторы при несимметричных режимах.

У генераторов меньшей мощности, 30—60 *Мвт*, с косвенным охлаждением и бо́льшими запасами по нагреву роторов (кривые *1* и *2*) допустимое время значительно больше и автоматическое отключение для них требуется при токах $I_2 > 0{,}5I_{\text{ном.г}}$.

Повышение напряжения возникает на генераторах при внезапном сбросе нагрузки, так как при этом исчезает магнитный поток реакции статора и увеличивается скорость вращения разгрузившейся машины.

На турбогенераторах повышение напряжения не достигает опасных значений и ликвидируется автоматическими регуляторами скорости и возбуждения или в случае отсутствия последнего — ручным регулированием возбуждения.

При увеличении скорости вращения до 110% на турбогенераторах срабатывает «автомат безопасности», полностью закрывающий доступ пара в турбину, что исключает чрезмерное увеличение скорости и опасное повышение напряжения. На гидрогенераторах регуляторы скорости действуют медленнее, чем на турбогенераторах, в результате этого при сбросе нагрузки скорость вращения агрегата резко увеличивается и может превысить номинальную на 40—60%, а напряжение генератора вследствие этого может возрасти до 150% номинального и больше. Поэтому на гидрогенераторах наряду с автоматическим устройством развозбуждения предусматривается защита от повышения напряжения, действующая на снятие возбуждения или отключение генератора.

в) Общие требования к защите генераторов

На генераторах устанавливаются защиты от внутренних повреждений и опасных ненормальных режимов, т. е. таких режимов, которые могут вызывать повреждение генератора.

При ненормальных режимах работы генератора, не требующих немедленного отключения, защита, как правило, должна действовать на сигнал, по которому дежурный обязан принять меры к устранению ненормального режима без отключения генератора.

Автоматическое отключение генератора допускается только в тех случаях, когда возникший ненормальный режим нельзя устранить, а его дальнейшее протекание ведет к повреждению генератора.

Для предотвращения развития повреждения, возникшего в генераторе, защиты от внутренних повреждений должны отделить генератор от сети, отключив главный выключатель, и прекратить ток в обмотке ротора отключением автомата гашения поля (рис. 15-3). С отключением выключателя прекращается ток повреждения $I_к'$, поступающий в поврежденный генератор из сети (рис. 15-3). Однако через место повреждения продолжает проходить ток $I_к''$, поддержи-

ваемый э. д. с. генератора E. Отключением АГП *1* разрывается цепь тока ротора $I_р$. В результате этого исчезает поток ротора и вместе с ним исчезает создаваемая им в фазах генератора э. д. с. Одновременно блок-контакт АГП *2* воздействует на отключение АГП возбудителя, контакт которого *3* вводит сопротивление $R_{АГП}$ в цепь возбуждения возбудителя. Кроме того, в генераторах с воздушным охлаждением для тушения пожара изоляции в камеру генератора пускается от руки пар или вода либо автоматически углекислота CO_2 от защит, действующих при внутренних повреждениях. На генераторах с водородным охлаждением специальных мер по тушению пожара в генераторе не применяется, поскольку водород не поддерживает горения. На генераторах, охлаждаемых маслом, необходимы устройства для тушения пожара, но такие устройства находятся еще в стадии разработки.

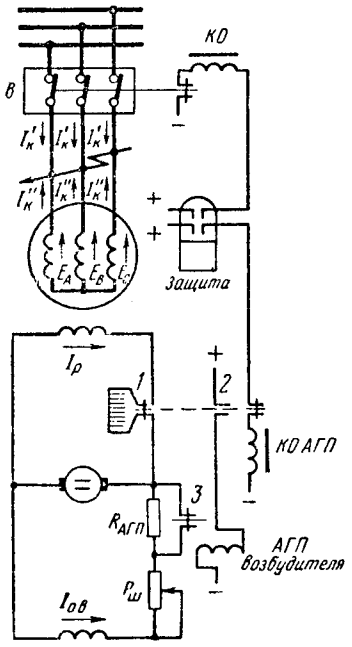


Рис. 15-3. Схема автоматического гашения поля генератора.

Защиты от внешних коротких замыканий должны отключать генераторный выключатель для прекращения тока к. з., посылаемого генератором в сеть, и АГП для предупреждения повышения напряжения на зажимах генератора вследствие сброса нагрузки.

15-2. ЗАЩИТА ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

а) Назначение и общие принципы выполнения защиты

В качестве основной защиты от междуфазных коротких замыканий в генераторе применяется быстродействующая продольная дифференциальная защита (см. § 10-2).

Схема продольной дифференциальной защиты для одной фазы генератора показана на рис. 15-4, *а*. Полные схемы в двух вариантах приведены на рис. 15-10.

Принцип действия защиты (рис. 15-4, *а*) основан на сравнении величин и фаз токов (I_I и I_{II}) в начале и конце обмотки фазы статора. С этой целью с обеих сторон обмотки статора устанавливаются трансформаторы тока *TI* и *TII* с одинаковыми коэффициентами трансформации $n_{тI} = n_{тII}$. Вторичные обмотки соединяются последовательно, как показано на чертеже, разноимен-

ными полярностями. Дифференциальное реле P включается параллельно вторичным обмоткам обоих трансформаторов тока.

При к. з. вне зоны (точка K_I на рис. 15-4, *а*) первичные токи I_I и I_{II} равны по величине и направлены в одну сторону (к месту к. з.). Распределение вторичных токов показано на рис. 15-4, *а*, ток в реле $I_р = I_{Iв} - I_{IIв}$, при идеальной работе трансформаторов тока $I_{Iв} = I_{IIв}$ и поэтому $I_р = 0$ — защита не работает. В действительности, из-за погрешности трансформаторов тока $I_{Iв} \neq I_{IIв}$ и в реле

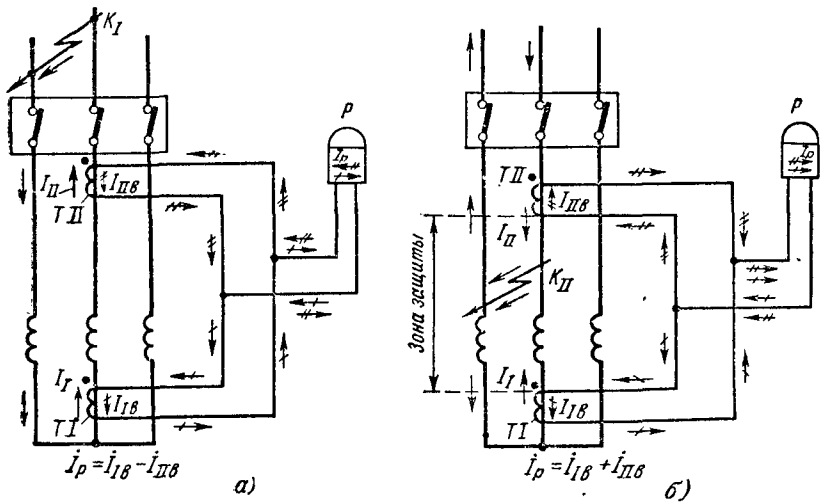


Рис. 15-4. Схема и принцип действия продольной дифференциальной защиты генератора.

а — токораспределение при внешнем к. з.; *б* — при к. з. в зоне.

появляется ток небаланса $I_р = I_{нб} = I_{Iв} - I_{IIв}$. Для исключения ложной работы защиты необходимо обеспечить условие:

$$I_{с.з} > I_{нб.макс}.$$

При нагрузке распределение первичных и вторичных токов соответствует условиям внешнего к. з., ток $I_р = 0$ и защита не действует. При к. з. в зоне (точка K_{II} на рис. 15-4, *б*) первичные токи к. з. на обеих сторонах обмотки направлены встречно (к месту к. з.). В результате этого вторичные токи в реле суммируются $I_р = I_{Iв} + I_{IIв}$ и реле приходит в действие, если $I_р > I_{с.з}$. Для прекращения к. з. защита должна отключить генераторный выключатель и АГП.

Трехфазные и двухфазные защиты. Поскольку в СССР сети генераторного напряжения работают с изолированными нулевыми точками, защита от междуфазных к. з. генератора может выполняться на двух фазах. Однако двухфазная защита не может

обеспечить отключение генератора при двойных замыканиях на землю (рис. 15-5) в тех случаях, когда одно из замыканий K_2 возникает в сети, а другое K_1 — на фазе генератора, не имеющей защиты. В то же время двойные замыкания на землю являются опасным видом повреждения генератора и требуют быстрого отключения, так как возникающий при этом ток к. з. проходит через сталь статора, причиняя значительные разрушения. Для быстрого отключения такого повреждения дифференциальная защита генератора должна выполняться трехфазной. В целях экономии трансформаторов тока дифференциальные защиты генератора можно выполнять двухфазными, предусматривая при этом соответствующее исполнение защиты от замыкания на землю, позволяющее ей отключать двойные замыкания на землю (см. § 15-5). На мощных генераторах, 100 тыс. *квт* и больше, по соображениям повышения надежности их защиты целесообразно применять трехфазные схемы дифференциальных защит при всех условиях.

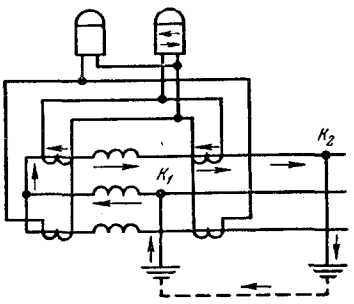


Рис. 15-5. Работа продольной дифференциальной защиты при двойном замыкании на землю.

Зона действия защиты ограничивается участком, расположенным между трансформаторами тока *TI* и *TII* (рис. 15-4). При выполнении защиты стремятся по возможности расширить ее зону; с этой целью трансформаторы тока *TII* обычно устанавливаются непосредственно у выключателя, так чтобы повреждения на всех токоведущих частях от выводов генератора до выключателя отключались мгновенно дифференциальной защитой.

Обрыв соединительного провода в схеме дифференциальной защиты или замыкание между соединительными проводами нарушает баланс токов в реле и вызывает неправильную работу защиты при сквозных к. з. или даже в нормальном режиме.

Поэтому токовые цепи защиты должны выполняться с особой надежностью. Число контактных соединений в токовых цепях должно быть минимальным, а качество соединений — надежным.

Вторичные обмотки трансформаторов тока дифференциальной защиты заземляются только у одной группы трансформаторов *TI* или *TII*; вторая группа трансформаторов тока электрически связана с первой и поэтому своего заземления не имеет. При заземлении обеих групп трансформаторов образуется цепь, по которой могут проходить токи, появляющиеся в контуре заземления подстанции, в результате чего возможно неправильное действие защиты.

б) Ток небаланса

При внешних к. з. в дифференциальном реле защиты P (рис. 15-4) появляется ток небаланса, обусловленный погрешностями трансформаторов тока TI и TII, как было показано в § 10-4:

$$I_{нб} = I_{IIнам} - I_{Iнам}. \qquad (15\text{-}3)$$

Ток небаланса может вызвать неправильную работу дифференциальной защиты, поэтому принимаются меры к ограничению его величины.

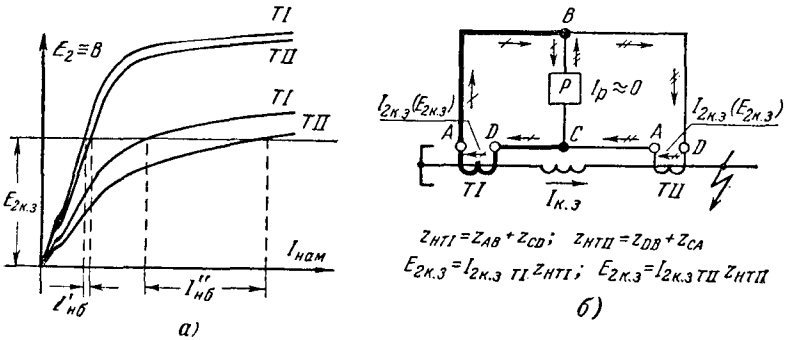


Рис. 15-6. Влияние характеристики трансформаторов тока на величину тока небаланса.

а — токи $I'_{нб}$ при отсутствии насыщения и идентичности характеристики намагничивания и $I''_{нб}$ при насыщении и неидентичных характеристиках; *б* — нагрузка на трансформаторы тока при внешнем к. з.

Для этой цели необходимо соблюдать следующие требования:

а) Трансформаторы тока не должны насыщаться при токах сквозного к. з., что позволяет уменьшить токи намагничивания, а следовательно, и ток небаланса при внешних к. з. Это обеспечивается применением трансформаторов тока, насыщающихся при возможно больших значениях вторичной э. д. с. E_2, и уменьшением сопротивления плеч защиты, составляющих нагрузку трансформаторов тока при внешних к. з., от которой зависит величина E_2 (рис. 15-6).

Поставленным требованиям наилучшим образом удовлетворяют трансформаторы тока класса Д, которые обычно и применяются для дифференциальных защит генераторов.

Уменьшение сопротивления плеч достигается выбором сечения жил соединительного кабеля. Допустимое сопротивление соединительных проводов находится по кривым 10%-ной погрешности трансформаторов тока.

б) Для уменьшения разности намагничивающих токов характеристики намагничивания $E_2 = f(I_{нам})$ трансформаторов тока TI и TII должны быть идентичными (совпадающими), а сопротивления

плеч — по возможности равными. При этих условиях разность $I_{\text{IIнам}} - I_{\text{Iнам}}$ будет минимальной (рис. 15-6).

Выполнение указанных требований весьма существенно ограничивает установившееся значение тока небаланса. Однако первоначальный бросок тока небаланса, обусловленный апериодической составляющей тока при внешнем к. з. или самосинхронизации генератора, может достигать значительной величины.

В гл. 10 было показано, что начальный ток небаланса содержит значительную апериодическую составляющую, которая придает кривой небаланса несимметричный вид (рис. 10-7).

Для исключения работы дифференциальной защиты от тока небаланса в неустановившемся режиме кроме отмеченных выше мер по уменьшению разности намагничивающих токов (15-3) могут использоваться два способа:

1) уменьшение величины и продолжительности броска $I_{\text{нб}}$ в неустановившемся режиме и

2) применение реле, отстроенных от бросков $I_{\text{нб}}$, возникающих в этом режиме.

Уменьшение броска тока небаланса достигается с помощью активного сопротивления порядка 5 *ом*, включаемого последовательно с обмотками дифференциальных реле (рис. 15-10, *а*). Активное сопротивление ограничивает величину $I_{\text{нб}}$ и, кроме того, уменьшает постоянную времени T_2 вторичного контура трансформаторов тока ($T_2 = L/r$). Однако включение значительного активного сопротивления (5 *ом*) создает повышенную нагрузку на трансформаторы тока при к. з. в генераторе. В результате этого их погрешность увеличивается, а вторичный ток, поступающий в реле, уменьшается, что понижает чувствительность защиты и является недостатком, ограничивающим применение этого способа.

В качестве второго, более совершенного способа применяется отстройка от неустановившихся токов небаланса с помощью быстронасыщающихся трансформаторов [Л. 66]. Этот метод получил широкое распространение в СССР.

в) Применение насыщающихся трансформаторов для отстройки от тока небаланса

Принцип работы БНТ. Эффективным и простым способом отстройки от апериодической составляющей тока небаланса является включение дифференциальных реле через вспомогательные быстронасыщающиеся трансформаторы тока (БНТ), как показано на рис. 15-10, *б*. Параметры БНТ подбираются так, что они почти не трансформируют апериодический ток, преобладающий в начальном токе небаланса, но достаточно хорошо пропускают синусоидальный ток, появляющийся в реле при к. з. в зоне защиты.

Если представить, что в первичной обмотке БНТ проходит апериодический ток $I_a = f(t)$ (рис. 15-7, *а*), то на зажимах разомкну-

той вторичной обмотки БНТ будет наводиться э. д. с.

$$e_2 = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Как следует из кривой намагничивания БНТ (рис. 15-7, *б*), за некоторый весьма малый промежуток времени Δt изменению тока I'_a соответствует ничтожное изменение потока $\Delta\Phi'$ ($d\Phi/dt \approx 0$). В результате этого величина индуктируемой э. д. с. e_2 будет ничтожной. Следовательно, и ток во вторичной обмотке БНТ будет мал.

Синусоидальный ток $I''_п$ трансформируется на вторичную сторону БНТ значительно лучше. За время Δt (рис. 15-7, *б*) поток в

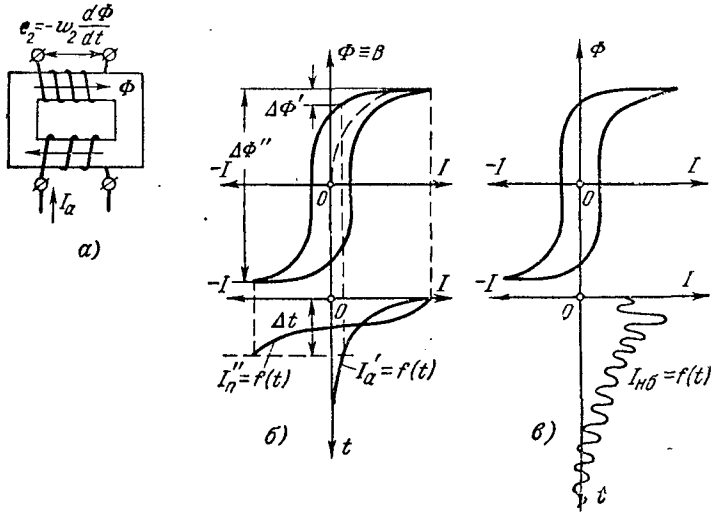


Рис. 15-7. Работа и характеристики быстронасыщающегося трансформатора (БНТ).

магнитопроводе изменится весьма значительно — на $\Delta\Phi''$. Это означает, что скорость изменения магнитного потока $d\Phi/dt$, определяющая e_2, при питании БНТ синусоидальным током будет значительно больше, чем при питании его апериодическим током.

Можно считать, что *практически апериодическая составляющая тока небаланса не трансформируется во вторичную обмотку БНТ и полностью расходуется на подмагничивание его сердечника*. Это приводит к насыщению БНТ и ухудшению трансформации также и периодической составляющей $I''_п$ тока небаланса.

Таким образом, в реле попадает только периодическая составляющая тока небаланса, уменьшенная по величине за счет насыщения, обусловленного подмагничиванием сердечника апериодическим током.

В установившемся режиме, когда апериодическая составляющая в токе небаланса затухает, последний трансформируется в реле без существенных искажений по величине и форме кривой.

Параметры БНТ выбираются с таким расчетом, чтобы он насыщался при относительно небольших значениях апериодического тока. Подбором стали магнитопровода БНТ с широкой петлей гистерезиса и величины индукции срабатывания $B_{с.р}$, близкой к $B_{нас}$ ($\sim 12\,000$ *гс*), можно добиться таких условий, при которых начальный ток небаланса, смещенный асимметрично относительно оси времени (рис. 15-7, *в*), не будет трансформироваться через БНТ за счет наличия в нем большой апериодической составляющей. На этом и основана отстройка от асимметричных токов небаланса дифференциальных реле при включении их через БНТ.

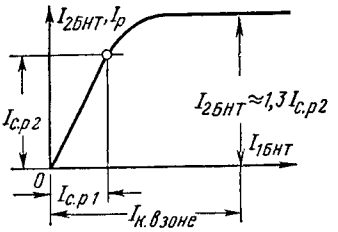


Рис. 15-8. Зависимость вторичного тока БНТ от первичного тока.

Добиваясь для отстройки от $I_{нб}$ насыщения сердечника БНТ при относительно малых токах необходимо обеспечить достаточную надежность действия реле БНТ при повреждениях в зоне защиты. Чтобы обеспечить это условие, вторичный ток БНТ при к. з. в зоне должен быть на 20—30% больше тока срабатывания реле. За минимальную величину тока к. з., при котором должна обеспечиваться надежная работа реле, принимается $I_{к.з.мин} = 2I_{с.р1}$.

Характеристика БНТ $I_{2БНТ} = f(I_{1БНТ})$, удовлетворяющая этому условию, показана на рис. 15-8 (при первичном токе БНТ, равном $2I_{с.р1}$, ток в реле равен $1{,}3\,I_{с.р2}$).

Чебоксарский электроаппаратный завод выпускает реле РНТ-565 (рис. 15-9) для дифференциальной защиты генераторов и трансформаторов [Л. 65].

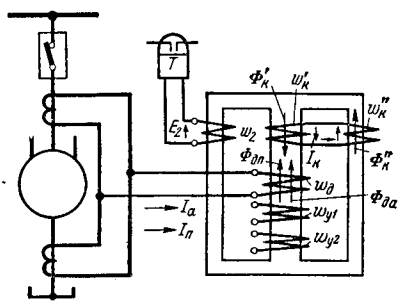


Рис. 15-9. Принципиальная схема продольной дифференциальной защиты генератора с реле РНТ-565.

Реле РНТ состоит из трехстержневого быстронасыщающегося трансформатора (БНТ) и питающегося от него реле. Трансформатор имеет три первичные обмотки: $w_д$, $w_{у1}$, $w_{у2}$, одну вторичную w_2 и короткозамкнутую обмотку $w_к$.

Обмотки $w_д$ и w_2 являются основными обмотками БНТ. Первая $w_д$ включается в дифференциальную цепь защиты, вторая w_2 питает реле типа РТ-40/0,2.

Вспомогательные обмотки $w_{у1}$ и $w_{у2}$, называемые у р а в н и т е л ь н ы м и, предназначены для компенсации неравенства вторичных токов I_I и I_{II} в плечах дифференциальных защит трансформаторов (рис. 16-3). В защите генератора они обычно не используются.

Ток срабатывания реле регулируется изменением числа витков дифференциальной обмотки $w_д$.

К о р о т к о з а м к н у т а я обмотка $w_к$ позволяет усиливать или ослаблять (регулировать) подмагничивающее действие апериодического тока, поступающего в обмотку $w_д$ [Л. 65, 68] (см. § 16-8, в).

г) Разновидности схем дифференциальных защит

На рис. 15-10, *а* и *б* приведены две основные схемы дифференциальной защиты. П е р в а я схема (рис. 15-10, *а*) выполняется с помощью простых токовых реле типа РТ или ЭТ. Последовательно с ними включается сопротивление $r = 5 \div 10$ *ом*, которое служит для уменьшения тока небаланса.

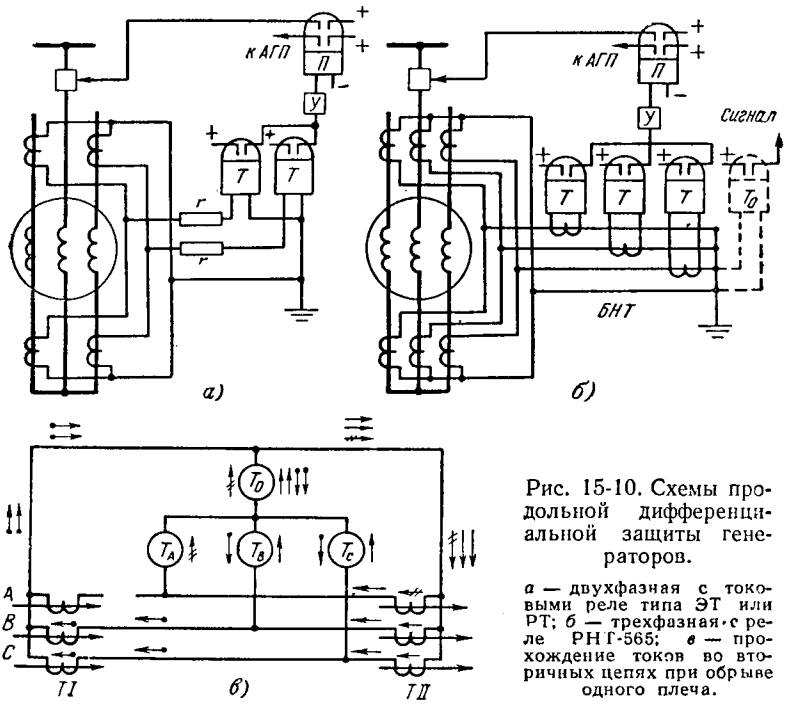


Рис. 15-10. Схемы продольной дифференциальной защиты генераторов.

а — двухфазная с токовыми реле типа ЭТ или РТ; *б* — трехфазная с реле РНГ-565; *в* — прохождение токов во вторичных цепях при обрыве одного плеча.

Такие схемы применяются для генераторов малой мощности. Из соображений экономии трансформаторов тока они обычно выполняются двухфазными, при этом отключение двойных замыканий производится защитой от замыкания на землю.

В т о р а я, наиболее распространенная схема осуществляется с помощью реле РНТ-565. Она показана на рис. 15-10, *б* в трехфазном исполнении. В реле РНТ используется только дифференциальная обмотка $w_д$. Уравнительные обмотки остаются разомкнутыми

и не используются. Наличие быстронасыщающегося трансформатора в РНТ обеспечивает надежную отстройку защиты от токов небаланса. Это является преимуществом данной схемы по сравнению со схемой с простыми токовыми реле. Схема с реле РНТ рекомендуется к применению на всех генераторах, мощность которых равна и больше 25 *Мвт*. Схема может применяться и в двухфазном исполнении.

При обрыве соединительного провода в одном плече токовой цепи защиты (например, фазы *А* от *ТІ*) в реле T_A, как это следует из токораспределения на рис. 15-10, *в*, появляется ток нагрузки от трансформатора тока *ТІІ* фазы *А*. Под воздействием этого тока защита может сработать при отсутствии повреждения в генераторе. При надежном выполнении токовых цепей и хорошем уходе за ними подобные обрывы бывают очень редко.

Для исключения ложного действия защиты можно применять два способа.

1. Ток срабатывания защиты выбирается так, чтобы она не действовала от номинального тока нагрузки генератора, появляющегося в реле при обрыве соединительного провода. Исходя из этого, принимается

$$I_{с.з} = 1{,}3I_{ном.г}. \qquad (15\text{-}4)$$

Для немедленного выявления нарушения целости токовой цепи в схеме защиты предусматривается сигнализация, выполняемая с помощью сигнального токового реле T_0. Это реле включается в рассечку нулевого провода дифференциальных реле, как показано пунктиром на рис. 15-10, *б*.

В нормальных условиях ток в нулевом проводе отсутствует и реле T_0 не действует. При обрыве токовой цепи (рис. 15-10, *в*) в нулевом проводе появляется ток, реле T_0 срабатывает и подает сигнал о неисправности.

Ток срабатывания сигнального реле (T_0) выбирается минимальным — порядка 20% $I_{ном.г}$.

Недостатком рассмотренного способа является ухудшение чувствительности защиты, обусловленное выбором $I_{с.з} > I_{ном}$.

2. Второй способ основан на применении специальной схемы включения реле РНТ, позволяющей обеспечить различную чувствительность защиты при к. з. в генераторе и при обрыве в ее токовых цепях. В первом случае защита имеет $I_{с.з} < I_{ном.г}$, а во втором $I_{с.з} > I_{ном.г}$.

Защита выполняется с реле РНТ, включаемым по схеме, изображенной на рис. 15-11 [Л.84].

Дифференциальная обмотка $w_д$ включается, как обычно, на разность токов, а одна из уравнительных обмоток реле $w_у$ — в нулевой провод дифференциальной цепи. Обмотки $w_д$ и $w_у$ в каждом реле включаются встречно, так чтобы при обрыве провода в плече защиты намагничивающие силы Iw в реле поврежденной фазы были направлены противоположно друг другу.

При трехфазных и двухфазных к. з. (внешних и в зоне) ток в нулевом проводе и обмотках $w_у$ отсутствует. Поведение реле при к. з. в зоне определяется н. с. обмотки $w_д$. Реле на поврежденных фазах приходит в действие, если

$$I_р w_д \geqslant F_{с.р}, \tag{15-5}$$

где $F_{с.р}$ — наименьшая намагничивающая сила, необходимая для срабатывания реле.

Из (15-5) нетрудно определить, что для действия защиты при к. з. необходим ток

$$I_р \geqslant I_{с.з} = \frac{F_{с.р}}{w_д}. \tag{15-5а}$$

При обрыве провода в плече защиты, например фазы A, распределение токов соответствует рис. 15-11, *б*. По обмоткам $w_д$ и $w_у$ реле

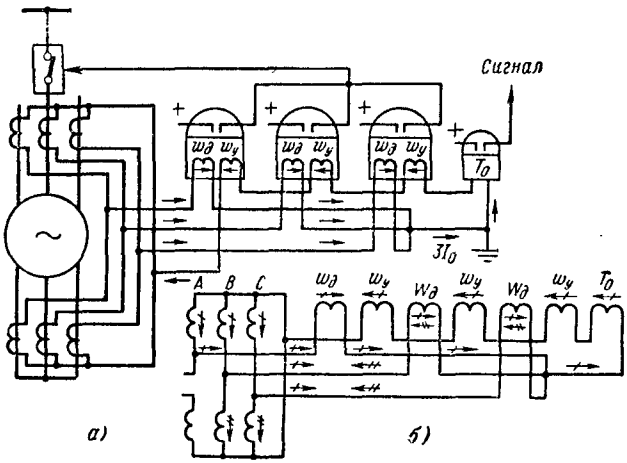


Рис. 15-11. Схема продольной дифференциальной защиты генератора с повышенной чувствительностью с реле РНТ-562, не реагирующая на обрыв токовой цепи.

а — схема защиты; *б* — токораспределение при обрыве плеча в фазе A.

поврежденной фазы A проходит одинаковый ток оборванной фазы. Намагничивающая сила обмотки $w_д$ действует навстречу н. с. обмотки $w_у$.

Реле на фазе A с оборванным проводом сработает при условии, что

$$\dot{I}_р w_д - \dot{I}_р w_у \geqslant F_{с.р}, \tag{15-6}$$

отсюда

$$I_{с.з.об} = \frac{F_{с.р}}{w_д - w_у}, \tag{15-7}$$

где $I_{с.з.об}$ — ток срабатывания при обрыве плеча защиты.

Из сопоставления (15-5а) и (15-7) следует, что при обрыве фазы благодаря противодействию обмотки $w_у$ ток срабатывания реле увеличивается. Загрубление реле зависит от соотношения $w_д$ и $w_у$.

В реле неповрежденных фаз B и C ток в обмотках $w_д$ отсутствует, ток $I_р$ проходит только по обмотке $w_у$. Поэтому условие работы этих реле определяется уравнением

$$I_р w_у \geqslant F_{с.р}, \tag{15-8}$$

откуда находится ток срабатывания реле на неповрежденных (необорванных) фазах:

$$I_{\text{с.з.об}} = \frac{F_{\text{с.р}}}{w_{\text{у}}}. \qquad (15\text{-}9)$$

Принимая $w_{\text{д}} = 2w_{\text{у}}$, из уравнений (15-7) и (15-9) получаем, что чувствительность реле при обрыве фазы будет одинаковой как у реле поврежденной фазы, так и на неповрежденных фазах (в обоих случаях $I_{\text{с.з.об}} = F_{\text{с.р}}/w_{\text{у}}$). В случае же междуфазных к. з. из выражения (15-5а) следует, что

$$I_{\text{с.з}} = \frac{F_{\text{с.р}}}{w_{\text{д}}} = \frac{F_{\text{с.р}}}{2w_{\text{у}}} = \frac{I_{\text{с.з.об}}}{2},$$

т. е. ток срабатывания при принятом соотношении $w_{\text{д}}$ и $w_{\text{у}}$ в условиях междуфазных к. з. будет в 2 раза меньше, чем при обрыве соединительного провода. Чтобы исключить работу защиты при обрыве плеча при полной загрузке генератора ($I_{\text{ном.г}}$), принимаем $I_{\text{с.з.об}} = 1{,}1\ I_{\text{ном.г}}$, тогда при к. з.

$$I_{\text{с.з}} = \frac{I_{\text{с.з.об}}}{2} = \frac{1{,}1I_{\text{ном.г}}}{2} = 0{,}55I_{\text{ном.г}}. \qquad (15\text{-}10)$$

Рассмотренная схема, обеспечивая отстройку от токов при обрыве соединительных проводов, имеет повышенную чувствительность при междуфазных к. з.

При двойных замыканиях (одно в генераторе, а другое в сети) чувствительность защиты ухудшается за счет противодействия обмотки $w_{\text{у}}$. В этом случае ток срабатывания защиты получается таким же, как и при повреждении в токовых цепях, т. е. больше $I_{\text{ном.г}}$, что является некоторым недостатком схемы. Для сигнализации об обрыве предусматривается реле T_0, как показано на рис. 15-11.

Выводы. Первый способ исключения действия защиты при обрыве соединительных проводов связан с загрублением защиты и недопустим на мощных генераторах (100 *Мвт* и больше).

Второй способ приводит к усложнению схемы защиты и вызывает ее загрубления при двойных замыканиях на землю. Применение этой схемы целесообразно только на генераторах, отключение которых приводит к нарушению электроснабжения потребителей. Опыт эксплуатации показывает, что наиболее простой и надежной схемой является схема с БНТ на рис. 15-10, *б*, которая и рекомендуется к применению без отстройки от тока при обрыве вторичной цепи.

д) Выбор тока срабатывания защиты [Л. 2, 6, 22] и трансформаторов тока

Для исключения неправильной работы дифференциальной защиты при внешних к. з. ток срабатывания защиты должен отстраиваться от максимального значения тока небаланса, возникающего в этом режиме. Исходя из этого условия, первичный ток срабатывания определяют по выражению

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{н}} I_{\text{нб.макс}}, \qquad (15\text{-}11)$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности.

Расчет $I_{нб}$. Согласно (15-3) ток небаланса равен разности намагничивающих токов трансформаторов тока дифференциальной защиты. Он достигает наибольшего значения при максимальном токе внешнего к. з. $I_{к.з.макс}$. Выражая ток намагничивания трансформаторов тока *TI* и *TII* (рис. 15-6, *б*) через их токовую погрешность в относительных единицах f_{iI} и f_{iII} (см. § 3-1), получаем:

$$I_{нб.макс} = I_{намII} - I_{намI} = (f_{iII} - f_{iI})\, I_{к.з.макс}. \qquad (15\text{-}12)$$

Для повышения чувствительности защиты при повреждениях в генераторе и надежности при внешних к. з. необходимо выполнить мероприятия по снижению $I_{нб}$, рассмотренные в § 15-2, *б: установить трансформаторы тока класса Д, обеспечить их одинаковую загрузку и выбрать величину сопротивления нагрузки* $z_н$ *для каждого трансформатора тока по* 10%*-ным характеристикам.*

При соблюдении последнего условия погрешность каждого трансформатора тока не может превысить 10% (или 0,1).

Если принять, что $f_{iII} = 0{,}1$, а $f_{iI} = 0$, то согласно (15-12) небаланс будет наибольшим и равным 0,1 от тока к. з.

$$I_{нб.макс} = 0{,}1 I_{к.з.макс}. \qquad (15\text{-}12а)$$

При равномерной загрузке плеч и идентичности характеристик трансформаторов тока разница в их погрешностях будет меньше 0,1. Это учитывается в расчетной формуле $I_{нб}$ (15-12а) с помощью коэффициента однотипности $k_{одн}$, тогда:

$$I_{нб.макс} = k_{одн} \cdot 0{,}1 I_{к.з.макс}. \qquad (15\text{-}13)$$

При однотипности трансформаторов тока и равенстве сопротивлений плеч принимается, что $k_{одн} = 0{,}5$. При несоблюдении этих условий $k_{одн} = 1$. Выражение (15-13) определяет установившееся значение $I_{нб}$.

В начальный момент к. з. в токе к. з. имеется апериодическая составляющая, которая намагничивает трансформаторы тока и увеличивает их расчетную максимальную погрешность (см. § 11-3) f_i, принятую в выражении (15-13) равной 0,1.

Это увеличение f_i по рекомендации Руководящих указаний [Л. 2] оценивается коэффициентом $k_а = 1 \div 2$. С учетом этого коэффициента в общем случае:

$$I_{нб.макс} = k_а k_{одн} f_i I_{к.з.макс}, \qquad (15\text{-}13а)$$

где $I_{к.з.макс}$ — периодическая составляющая максимального тока к. з., проходящего через трансформаторы тока защиты, при трехфазном к. з. на выводах генератора (вне зоны дифференциальной защиты) в момент времени $t = 0$; $k_{одн} = 0{,}5$; $f_i = 0{,}1$; $k_а$ выбирается с учетом схемы защиты.

Расчетное выражение $I_{нб}$ по (15-13) и (15-13а) является приближенным, поэтому коэффициент $k_н$ в (15-11) следует принимать равным 1,3—1,5, а ток $I_{с.з}$ не рекомендуется выбирать меньше

0,5 $I_{ном.г}$. Ниже приводятся некоторые особенности выбора $I_{с.з}$ в зависимости от схемы защиты и типа дифференциальных реле.

Выбор уставок для схемы с БНТ по рис. 15-10, *б*. Защита с дифференциальными реле, включенными через БНТ (реле типа РНТ-565), не реагирует на апериодическую слагающую $I_{нб}$, и поэтому ее нужно отстраивать от периодической составляющей тока небаланса, т. е. от небаланса установившегося режима (когда затухают апериодические составляющие $I_{нб}$). Расчетный ток небаланса определяется по уравнению (15-13а), в котором принимается $k_а = 1$. С учетом этого ток срабатывания дифференциальной защиты с реле РНТ равен:

$$I_{с.з} = k_н k_{одн} f_i I_{к.з.макс}. \qquad (15\text{-}13б)$$

Число витков дифференциальной обмотки РНТ определяется по величине намагничивающей силы, необходимой для срабатывания реле $F_{с.р} = I_{с.р} w_д$, откуда

$$w_д = \frac{F_{с.р}}{I_{с.р}}; \qquad I_{с.р} = \frac{I_{с.з}}{n_т}.$$

Если защита не должна действовать при обрыве провода в токовых цепях схемы, то кроме условия (15-13б) необходимо выполнить условие (15-4): $I_{с.з} = 1{,}3\ I_{ном.г}$.

Ток $I_{с.з}$ принимается больший из двух значений, после чего находится число витков $w_д = F_{с.р}/I_{с.р}$.

Выбор уставок при выполнении защиты с БНТ по схеме на рис. 15-11 с разной чувствительностью при к. з. и обрыве токовой цепи. Ток срабатывания выбирается из двух условий: отстройки от $I_{нб}$ по (15-13б) и недействия защиты при обрыве одного плеча защиты. Для выполнения второго условия принимается ток срабатывания защиты больше тока нагрузки, появляющегося в реле при обрыве токовой цепи: $I_{с.з.обр} = 1{,}1\ I_{ном.г}$. С учетом этого при междуфазных к. з. согласно (15-10)

$$I_{с.з} = 0{,}55 I_{ном.г}. \qquad (15\text{-}14)$$

Из двух значений $I_{с.з}$ по (15-13б) и (15-14) выбирается большее. Подставляя окончательно выбранное значение $I_{с.з}$ в (15-10), находим число витков обмотки, включенной в дифференциальную цепь, $w_д = F_{с.р}/I_{с.р}$, тогда витки обмотки, включенной в нулевой провод, находятся из условия $w_у = w_д/2$. Ток $I_{с.з.обр} = F_{с.р}/w_у = 2I_{с.з}$ при к. з.

Выбор уставок для схемы с простыми токовыми реле (без БНТ) по рис. 15-10, *а*. Токовые реле в этой схеме реагируют на полный ток небаланса. Поэтому защиту необходимо отстраивать от максимального значения $I_{нб}$ в неустановившемся режиме по (15-13а).

В соответствии с этим $I_{с.з} = k_н k_а k_{одн} f_i\ I_{к.з.макс}$, коэффициент $k_а$, учитывающий увеличение тока небаланса в неустановившемся режиме, принимается равным 1,5—2.

Чувствительность защиты проверяется по минимальному току к. з., в качестве такового принимается ток двухфазного к. з. на выводах генератора (в зоне защиты), когда последний отключен от сети. По ПУЭ необходимо иметь $k_ч \geqslant 2$.

При замыкании между собой части витков фаз обмоток статора можно ожидать уменьшения тока к. з. Однако расчет токов к. з.

в этом случае весьма труден — содержит много условных допущений и поэтому недостаточно точен. Ориентировочная зависимость величины тока короткого замыкания $I_к$ от процента замкнувшихся витков обмотки статора [Л.70] приведена на рис. 15-12. На основании этого видно, что теоретически дифференциальная защита может иметь мертвую зону вблизи нулевых выводов обмотки.

Пробой изоляции фаз вблизи нулевых выводов маловероятен вследствие небольшой величины напряжения на этой части обмотки статора. Практикой эксплуатации не зарегистрировано подобных повреждений с током $I_{к.з} \ll I_{ном.г}$. С учетом этого, на генераторах малой и средней мощности в СССР считается нецелесообразным применение очень чувствительных защит в ущерб надежности их отстройки от токов небаланса. Однако, учитывая возможность (хотя и редкую) повреждения изоляции обмоток статора вблизи нулевых выводов, по причинам, указанным в начале § 15-1, и особенно вследствие увлажнения изоляции при охлаждении обмоток водой, *на генераторах большой мощности, 200, 300, 500, 800 Мвт и более, целесообразно стремиться к повышению чувствительности дифференциальных защит, имея в виду высокую стоимость столь крупных машин,* но и в этих случаях чувствительные дифференциальные защиты должны надежно отстраиваться от $I_{нб}$ при внешних к. з.

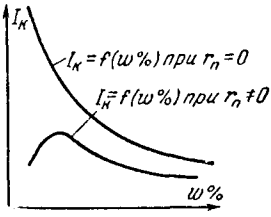


Рис. 15-12. Зависимость величины тока к. з. от процента замкнувшихся витков ($r_п$ — переходное сопротивление в месте замыкания).

Для повышения чувствительности возможно применение дифференциальных реле с торможением (см. § 10-4, и), в частности можно применять реле типа ДЗТ, описанное в § 16-8, г.

Оценка дифференциальной защиты. Дифференциальная защита является быстродействующей, чувствительной и простой защитой от междуфазных коротких замыканий. Проведение мероприятий по повышению надежности дифференциальной защиты, сводящихся к правильному выбору трансформаторов тока, включению реле через БНТ и отстройке тока срабатывания от $I_{нб}$, позволяет полностью обеспечить правильную работу защиты при внешних коротких замыканиях. Надежная отстройка от $I_{нб}$ является основным условием выполнения этой защиты.

15-3. ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ВИТКАМИ ОДНОЙ ФАЗЫ

Защита от витковых замыканий имеет ограниченное применение вследствие отсутствия простых способов ее осуществления.

Только для мощных генераторов, каждая из фаз которых выполнена в виде двух и более параллельных ветвей, выведенных наружу, разработаны относительно простые и надежные схемы защиты.

В нормальных условиях и при внешних к. з. в параллельных ветвях *1* и *2* каждой фазы генератора наводятся одинаковые по величине и фазе э. д. с. E_1 и E_2 (рис. 15-13, *а*). Сопротивления параллельных ветвей равны, и поэтому токи ветвей I_1 и I_2 в нормальном режиме и при внешнем к. з. также равны по величине и совпадают по фазе.

В случае замыкания части витков $w_к$ ветви одной фазы в закороченных витках под действием их э. д. с. $E_к$ возникает большой ток к. з. $I_к$, циркулирующий по закороченным виткам.

Электродвижущая сила и сопротивление поврежденной ветви (на рис. 15-13 ветвь *2*) уменьшается за счет повредившихся витков $w_к$, замкнутых накоротко. В результате этого нарушается баланс

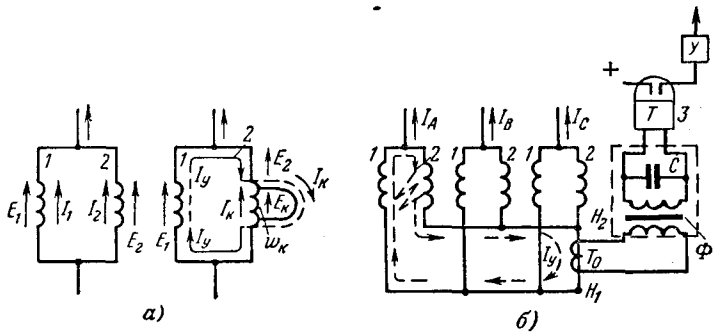


Рис. 15-13. Поперечная дифференциальная защита генератора.

а — распределение токов в параллельных ветвях фазы; *б* — схема односистемной защиты.

э. д. с. E_1 и E_2 и токов I_1 и I_2 в параллельных ветвях поврежденной фазы. Появляется э. д. с. $\Delta E = E_1 - E_2$, под действием которой в контуре поврежденной фазы возникает уравнительный ток

$$I_y = \frac{E_1 - E_2}{x_1 + x_2}, \qquad (15\text{-}15)$$

где x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления ветвей *1* и *2*, активные сопротивления не учитываются, так как они очень малы; E_1 и E_2 — э. д. с. неповрежденной и поврежденной ветвей.

Чем меньше число замкнувшихся витков $w_к$, тем меньше будет различие между E_1 и E_2. Следовательно, согласно (15-15) с уменьшением $w_к$ будет уменьшаться и ток повреждения I_y из-за уменьшения $E_1 - E_2$.

Нарушение равенства токов в параллельных ветвях статора генератора, происходящее при витковых замыканиях, и *появление уравнительного тока* I_y *используются для выполнения защиты от этого вида повреждения.*

Для защиты от витковых замыканий в СССР применяется поперечная дифференциальная защита, основанная на сравнении токов двух параллельных ветвей фаз генератора. Такое сравнение можно

осуществлять с помощью трехсистемной или односистемной схемы защиты.

Трехсистемная схема предусматривает сравнение токов ветвей отдельно для каждой фазы. Для этой цели устанавливаются три токовых реле. Каждое реле включается на разность токов параллельных ветвей фазы A, B и C соответственно.

Односистемная схема выполняется с помощью одного дифференциального реле, *сравнивающего сумму токов параллельных ветвей 1 трех фаз* $\dot{I}_{A1}+\dot{I}_{B1}+\dot{I}_{C1}$ *с такой же суммой токов* $\dot{I}_{A2}+\dot{I}_{B2}+\dot{I}_{C2}$ *другой группы параллельных ветвей 2.*

Односистемная схема получила преимущественное распространение в СССР и поэтому рассматривается ниже.

Односистемная схема поперечной дифференциальной защиты (рис. 15-13, *б*). Три параллельные ветви *1* фаз статора A, B и C и три параллельные ветви *2* тех же фаз соединяются раздельно в две звезды с двумя выведенными наружу нейтралями H_1 и H_2. Эти нейтрали соединяются друг с другом нулевым проводом H_1 — H_2. В цепи нулевого провода устанавливается трансформатор тока T_0. К его вторичной обмотке через фильтр $Ф$ подключается токовое реле T. Фильтр $Ф$ пропускает ток основной частоты 50 *гц* и запирает ток высших гармоник, в том числе третьей гармоники.

Из схемы видно, что ток $I_{н.п}$ в нулевом проводе H_1 — H_2, питающий реле T, равен разности токов нулевой последовательности звезды двух групп параллельных ветвей *1* и *2*:

$$\dot{I}_{н.п}=(\dot{I}_{A1}+\dot{I}_{B1}+\dot{I}_{C1})-(\dot{I}_{A2}+\dot{I}_{B2}+\dot{I}_{C2})=3I_{01}-3I_{02}, \quad (15\text{-}15а)$$

где I_{01} и I_{02} — ток нулевой последовательности параллельных ветвей *1* и *2*.

В нормальном режиме геометрическая сумма токов фаз каждой звезды равна нулю, т. е. $\dot{I}_{A1}+\dot{I}_{B1}+\dot{I}_{C1}=0$ и $\dot{I}_{A2}+\dot{I}_{B2}+\dot{I}_{C2}=0$.

При трехфазных и двухфазных внешних к. з. сумма токов к. з. в каждой звезде также равна нулю. Токи нагрузки, проходящие при этих повреждениях в ветвях статора, балансируются, так как нейтраль нагрузки не связана с нейтралью генераторов и токи нулевой последовательности в нагрузке отсутствуют.

Таким образом, в обоих случаях ток в нулевом проводе по выражению (15-15а) $I_{н.п}=0$ и реле не работает. В действительности ток $I_{н.п}\neq 0$. Вследствие некоторого искажения формы кривой фазных э. д. с. генератора в каждой группе параллельных ветвей возникают токи третьей гармоники $I_1^{(3)}$ и $I_2^{(3)}$. Эти токи совпадают по фазе и суммируются в нулевом проводе H_1 — H_2, образуя результирующий ток: $3I_1^{(3)}-3I_2^{(3)}=3I^{(3)}$.

Вследствие неточного равенства э. д. с. параллельных ветвей E_{A1} и E_{A2}, E_{B1} и E_{B2}, E_{C1} и E_{C2} в контуре каждой фазы появляется уравнительный ток основной частоты $I_{уA}$, $I_{уB}$ и $I_{уC}$. Уравнительный

ток и ток третьей гармоники замыкаются в контуре параллельных ветвей каждой фазы, протекая по нулевому проводу $H_1 — H_2$:

$$I_{н.п} = (3I_1^{(3)} - 3I_2^{(3)}) + (I_{уA} + I_{уB} + I_{уC}) = 3I^{(3)} + I_у.$$

Токи третьих гармоник запираются фильтром $Ф$ и не попадают в реле. Уравнительные токи $I_у$ имеют частоту 50 *гц* и поэтому беспрепятственно проходят в реле, обусловливая появление в нем тока небаланса:

$$I_{нб} = I_{уA} + I_{уB} + I_{уC} = I_у.$$

Для исключения ложного действия защиты необходимо выполнить условие:

$$I_{с.з} > I_{нб}. \qquad (15\text{-}15б)$$

При замыкании витков в ветви одной из фаз, как было показано выше, равенство токов в ветвях поврежденной фазы нарушается, возникает уравнительный ток $I_у$, определяемый выражением (15-15).

Этот ток замыкается по нулевому проводу $H_1 — H_2$ и вызывает появления тока в реле

$$I_р = \frac{I_у}{n_т}.$$

Защита приходит в действие при $I_у > I_{с.з}$.

Поскольку величина тока $I_у$ уменьшается с уменьшением числа замкнувшихся витков $w_к$, защита имеет мертвую зону. Она не действует при $I_у < I_{с.з}$. Защита реагирует не только на витковые замыкания, она может сработать при междуфазных к. з. и при замыканиях между ветвями одной фазы, так как при этом обычно нарушается равенство э. д. с. и токов в параллельных ветвях поврежденных фаз. В этом можно убедиться, рассмотрев токораспределения в обмотках статора для каждого из указанных повреждений. В обоих случаях защита имеет значительные мертвые зоны.

Трансформатор тока T_0, питающий защиту, выбирается без учета тока нагрузки, поскольку ток появляется в нем только кратковременно при повреждениях.

Коэффициент трансформации его обычно выбирается по условию $n_т \approx \frac{0{,}25 I_{ном.г}}{5}$, при этом вторичный ток T_0 при срабатывании защиты должен соответствовать уставкам на реле *РТФ*. В отличие от всех остальных схем дифференциальных защит в данной схеме погрешность трансформатора тока T_0 не вызывает токов небаланса и поэтому к его точности (характеристикам намагничивания) не предъявляют особых требований.

В связи с образованием двух нейтралей у нулевых выводов обмоток статора трансформаторы тока для продольной дифференциальной защиты генератора должны иметь по две первичные обмотки, состоящие из двух изолированных друг от друга пакетов шин первой и второй параллельной ветвей фазы статора генератора.

Ток срабатывания защиты должен быть больше тока небаланса, появляющегося в реле при внешних к. з.: $I_{с.з} = k_н I_{нб.макс}$. На основании опыта эксплуатации принимается $I_{с.з} = (20 \div 30\%)\ I_{ном.г}$. Как показывает опыт, такая уставка при наличии фильтра обеспечивает достаточную отстройку от тока небаланса и действие защиты согласно расчетам ВНИИЭ при замыкании одного витка (имеется в виду, что обмотка фазы турбогенератора имеет 7—9 витков).

Для выполнения защиты применяется реле РТ-40, схема которого показана на рис. 15-13, *б*. Сопротивления обмоток реле и конденсатора C подобраны так, что токи третьей гармоники, циркулирующие по проводу, соединяющему нейтрали H_1 и H_2, замыкаются главным образом через конденсатор; благодаря этому $I_{с.р}$ реле при частоте 150 *гц* получается в 10 раз больше, чем при токе с частотой 50 *гц*. Ток срабатывания реле регулируется отпайками на трансформаторе T и пружиной на реле в пределах 1,75—8,8 *а*.

В процессе эксплуатации выявилось, что *поперечная дифференциальная защита может неправильно работать при двойных замыканиях на землю в обмотке ротора.* Это объясняется тем, что витки параллельных ветвей фаз статора располагаются в разных пазах; при двойном замыкании в роторе магнитное поле ротора становится неравномерным; ветви одной фазы попадают в поле с разной магнитной индукцией, в результате чего равенство э. д. с. ветвей нарушается и в реле поперечной дифференциальной защиты появляется ток.

Двойные замыкания на землю в роторе иногда бывают неустойчивыми (носят кратковременный характер). Чтобы исключить в этом случае работу поперечной дифференциальной защиты, можно замедлять ее действие. Однако при этом защита теряет свое быстродействие, что приводит к увеличению повреждения при витковых замыканиях. Поэтому от применения замедления отказались, допуская срабатывание защиты при двойных замыканиях на землю в обмотке ротора.

Оценка защиты. Достоинством рассмотренной защиты от витковых замыканий является ее простота и быстродействие, а недостатком — наличие мертвой зоны.

15-4. ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА НА КОРПУС (НА ЗЕМЛЮ)

а) Требования к защите

Как уже отмечалось, в СССР сети генераторного напряжения работают с изолированными нейтралями, а емкостные токи сети компенсируются дугогасящими катушками. При замыканиях на корпус (на землю) обмотки статора ток повреждения $I_з$ замыкается на землю через магнитопровод статора, вызывая при этом повреждения стали. Размеры повреждения зависят от величины тока и длительности его протекания.

Лаборатория высокого напряжения имени Смурова, проводившая специальные испытания, установила зависимость допустимой продолжительности прохождения тока $I_з$ от его величины, т. е. $t = f(I_з)$ (рис. 15-14). В частности, исследования лаборатории показали, что ток 5 *а* может допускаться длительно. Допустимыми разрушениями считались такие, устранение которых не требует переборки стальных листов статора.

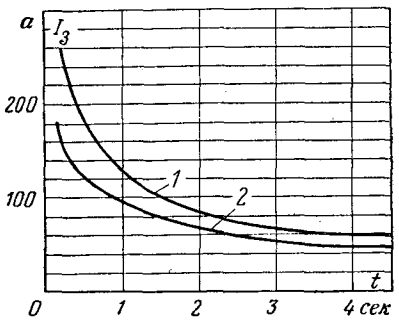


Рис. 15-14. Зависимость допустимой длительности тока замыкания на землю от величины этого тока $I_з$.

1 — по данным лаборатории имени Смурова; *2* — по рекомендации завода «Электросила».

В 1950 г. ЦНИЭЛ МЭС производил опыты непосредственно на генераторе, которые также подтвердили, что ток до 5 *а* может допускаться длительно. Токи более 5 *а* вызывают повреждение стали и поддерживают электрическую дугу, вызывающую горение изоляции обмотки статора. Поэтому токи более 5 *а* могут допускаться лишь ограниченное время.

В эксплуатации имелись случаи длительной работы генератора с замыканием на землю обмотки статора, не сопровождавшиеся опасным повреждением стали при токе замыкания на землю порядка 5 *а*.

На основании результатов экспериментов и опыта эксплуатации к защите от замыкания на землю генераторов в СССР предъявляются два требования:

а) При токах замыкания на землю 5 *а* и менее защита должна действовать на сигнал, так как при этих токах не наблюдается опасных повреждений статора.

б) При токе замыкания на землю, превышающем 5 *а*, защита должна действовать на отключение генератора, поскольку при этом имеется опасность повреждения стали статора.

б) Принципы выполнения защиты

По принципу своего действия на замыкание на землю в обмотке статора генератора может реагировать дифференциальная защита, но ее использование для этой цели было бы возможным только при глухом заземлении нейтрали, при изолированной нейтрали она оказывается нечувствительной. Поэтому для защиты генераторов от замыканий на землю применяется специальная высокочувствительная защита, реагирующая на ток нулевой последовательности.

В СССР были созданы чувствительные токовые защиты, действующие при токах $I_з = 4 \div 5$ *а*. Эти защиты выполняют на естественном емкостном токе или остаточном токе компенсации, не прибегая к искусственным мерам и не предъявляя каких-либо требований к его величине, так как при появлении опасных токов (больше 5 *а*) действие защиты на отключение генератора обеспечено.

Токи I_0 и напряжения U_0 при замыканиях на землю обмотки статора. В § 9-1 показано, что ток

замыкания на землю $I_з$ равен $3I_0$ и пропорционален напряжению нулевой последовательности U_0:

$$I_з = 3I_0 = 3\frac{U_0}{x_C}, \qquad (15\text{-}16)$$

где x_C — емкостное сопротивление фазы сети генераторного напряжения.

При замыкании на землю в обмотке генератора (рис. 15-15) напряжение U_0 равно напряжению замкнувшихся на землю витков $w_з$ обмотки фазы статора. С некоторым приближением можно считать, что напряжение распределяется равномерно по всем виткам фазы генератора. Тогда, выражая $w_з$ в процентах от всех витков фазы, получаем:

$$U_0 = \frac{w_з\%}{100} U_{ф.г}, \qquad (15\text{-}16а)$$

где $U_{ф.г}$ — нормальное напряжение фазы генератора.

Подставив U_0 в (15-16), найдем:

$$I_з = 3I_0 = 3\frac{U_{ф.г}}{x_C}\frac{w_з\%}{100}. \qquad (15\text{-}16б)$$

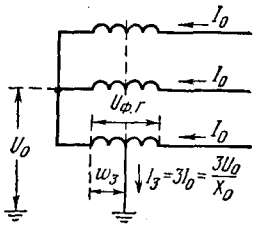


Рис. 15-15. Напряжение U_0 и ток I_0 при замыкании на землю обмотки статора генератора.

Из (15-16а) и (15-16б) следует, что U_0, I_0 и $I_з$, появляющиеся при замыкании на землю, пропорциональны числу замкнувшихся витков $w_з$. Графически эта зависимость изображена на рис. 15-16.

Величины U_0, I_0, $I_з$ имеют максимальное значение при замыкании на землю на выводах генератора. В этом случае $w_з = 100\%$; подставив это значение в (15-16а) и (15-16б), получим $U_0 = U_{ф.г}$, а

$$I_з = 3I_0 = 3\frac{U_{ф.г}}{x_C} = 3U_{ф.г}\omega C,$$

где C — емкость одной фазы сети генераторного напряжения.

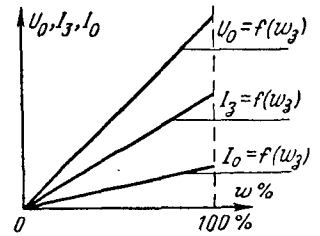


Рис. 15-16. Зависимость U_0, I_0 и $I_з$ от числа замкнувшихся витков обмотки статора генератора.

При приближении точки замыкания на землю к нейтрали генератора $w_з$ уменьшается от 100% до 0, вследствие этого уменьшается и U_0, I_0, $I_з$, достигая нуля при замыкании в нейтрали генератора (рис. 15-16).

При наличии дугогасящей катушки ток замыкания на землю $I_з$ состоит из двух составляющих: тока, замыкающегося через емкостное сопротивление сети x_C, и тока, замыкающегося через сопротивление дугогасящей катушки x_L.

Результирующий ток равен их разности

$$I_з = \frac{3U_0}{x_C} - \frac{3U_0}{x_L} = 3U_{ф.г}\frac{w_з\%}{100}\left(\frac{1}{x_C} - \frac{1}{x_L}\right).$$

Фильтры токов I_0. Принципиально, как и в защите линий (§ 9-4,б), возможны два способа выполнения токовых защит нулевой последовательности: с трехтрансформаторным фильтром I_0 (рис. 15-17,*а*) и однотрансформаторным фильтром I_0 — ТНП (рис. 15-17,*б*).

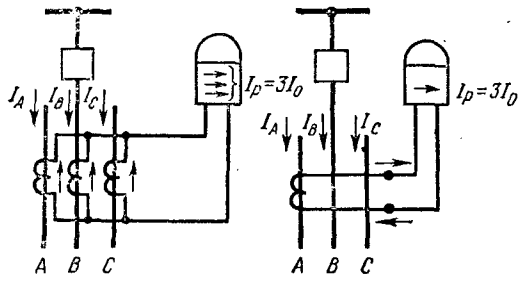


Рис. 15-17. Защита от замыканий на землю.
а — с обычными трансформаторами; *б* — с ТНП.

Первоначально защита выполнялась с помощью трехтрансформаторного фильтра. Такая защита была недостаточно чувствительна, она срабатывала при токах замыкания на землю 15—20 *а*. Чувствительность этой защиты ограничивалась током небаланса, от которого защита должна быть отстроена, $I_{с.з} > I_{нб}$. Последний определяется погрешностью трансформаторов тока и имеет поэтому значительную величину (см. § 9-4,б и в).

В настоящее время защита генератора от замыканий на землю выполняется только по второму способу — с ТНП. Ток небаланса

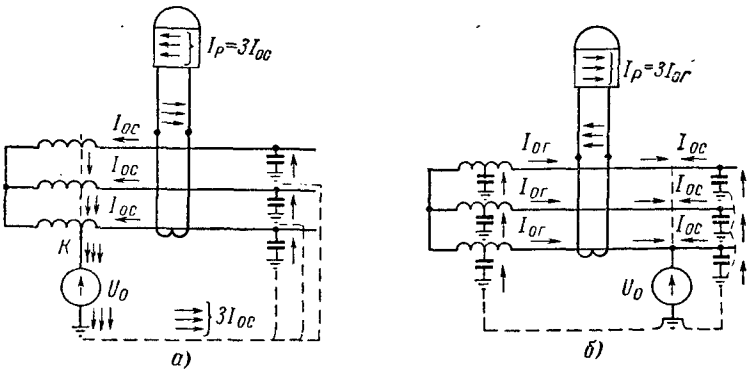


Рис. 15-18. Принцип действия защиты от замыканий на землю с ТНП.
Токораспределение при замыкании в генераторе (*а*), при внешнем замыкании (*б*).

в ТНП значительно меньше, вследствие чего защита получается более чувствительной. Однако ТНП обычной конструкции (см. рис. 9-8) не обеспечивают необходимой чувствительности, поэтому применяются ТНП с подмагничиванием, позволяющие получить требуемую чувствительность защиты (3—5*а* первичных).

Принцип действия токовой защиты с ТНП, выполненной по рис. 15-17. При замыкании на землю в обмотке генератора (рис. 15-18, *а*) в месте замыкания (в точке *К*) возникает напряжение U_0, под действием которого в каждой фазе генератора появится ток I_{0C}, замыкающийся через емкость *С* соответствующей фазы сети и место повреждения *К*. Проходя через магнитопровод ТНП, охватывающий три фазы генератора, три тока $I_{0C}(3I_{0C})$ индуктируют во вторичной обмотке ТНП ток $I_р = 3I_{0C}$, который питает обмотку токового реле. Если ток $I_р > I_{с.з}$, то защита приходит в действие. Отнеся токи $I_р$ и $I_{с.з}$ к первичной стороне ТНП, получим, что условием работы защиты является соотношение $3I_{0C} \geqslant I_{с.з}$, где $3I_{0C} = I_р$ — емкостный ток, поступающий в реле.

Если в сети установлена дугогасящая катушка (ДГК), то на ток I_{0C} наложится ток ДГК I_{0L}, замыкающийся по контуру: катушка — место повреждения. В этом случае $I_р = 3I_{0C} - 3I_{0L}$, а условие срабатывания примет вид:

$$(3I_{0C} - 3I_{0L}) \geqslant I_{с.з}.$$

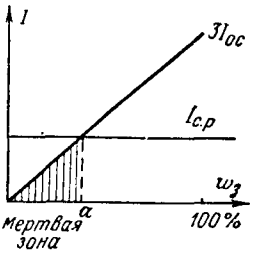


Рис. 15-19. «Мертвая зона» защиты при замыкании на землю.

Поскольку токи I_{0C} и I_{0L} пропорциональны $w_з$, то и ток $I_р \equiv w_з$. При замыкании вблизи нейтрали генератора ток $I_р$ может оказаться меньше тока срабатывания (рис. 15-19) и защита не подействует.

Таким образом, защита по принципу своего действия имеет мертвую зону. Величина мертвой зоны, т. е. число незащищенных витков обмоток α, может быть определена графически как точка пересечения прямых $3I_{0C} = f(w_з)$ и $I_{с.з}$ (рис. 15-19). Мертвая зона является недостатком защиты. Однако создание устройства, обеспечивающего защиту 100% витков обмотки статора, представляет трудную задачу и требует усложнения схемы и реле. Поэтому на генераторах малой и средней мощности мертвая зона считается допустимой, если при повреждении в ней $I_з < 5а$.

При внешних замыканиях на землю (рис. 15-18, *б*) под действием напряжения U_0, появляющегося в месте повреждения, возникают токи I_0, замыкающиеся через емкость сети и емкость обмоток генератора (I_{0C} и $I_{0г}$). Токи $I_{0г}$ проходят через ТНП и реле. Поэтому при внешних замыканиях ток $I_р = 3I_{0г}$.

Как уже отмечалось в гл. 9, в момент возникновения замыкания появляется нестационарный бросок тока, в 4—5 раз превосходящий установившееся значение $3I_{0г}$. Очевидно, что защита генератора должна быть отстроена от этого броска тока с некоторым запасом, для чего

$$I_{с.з} > k_б 3I_{0г},$$

где $k_б$ — коэффициент, характеризующий величину броска емкостного тока.

Величины токов $3I_{0г}$ по данным завода «Электросила» для турбогенераторов приводятся в табл. 15-4.

Таблица 15-4

Тип турбогенератора	Номинальное напряжение, *кв*	Емкостный ток турбогенератора $I_{Cг}$, *а*	Тип турбогенератора	Номинальное напряжение, *кв*	Емкостный ток турбогенератора $I_{Cг}$, *а*
Т-2-12-2	10,5	0,46	ТВФ-100-2	10,5	1,48
Т-2-12-2	6,3	0,34	ТВ2-150-2	18,0	3,14
Т-2-25-2	10,5	0,92	ТВВ-150-2	18,0	1,64
Т-2-25-2	6,3	0,69	ТВВ-200-2	11,0	2,88
Т-2-50-2	10,5	1,43	ТВВ-200-2	15,75	0,9
ТВ-60-2	10,5	1,22	ТГВ-200	15,75	3,34
ТВ-100-2	15,75	3,34	ТВВ-200-2	20,0	3,23
ТВ2-100-2	13,8	2,15	ТГВ-300	20,0	4,56

Ток небаланса. При нормальной нагрузке и внешних к. з. сумма первичных токов, проходящих через ТНП, равна нулю, поэтому ток в реле должен отсутствовать. Однако за счет несимметрии расположения фаз по отношению к магнитопроводу ТНП в реле защиты появляется ток небаланса $I_{нб}$. В нормальном режиме ток небаланса очень мал. При к. з. $I_{нб}$ возрастает, что может привести к неправильной работе защиты.

Для предупреждения неправильной работы защиты при внешних к. з. можно или загрубить защиту так, чтобы она была надежно отстроена от $I_{нб.к.з.}$, *или блокировать, т. е. выводить защиту из действия во время к. з.*, сохраняя ее нормальную чувствительность.

Предпочтение отдается второму способу, позволяющему обеспечить большую чувствительность защиты.

Применение блокировки исключает действие защиты при одновременных замыканиях на землю в генераторе и сети (двойных замыканиях), так как в этом случае появляется ток к. з. и защита от замыканий на землю выводится из действия. Поэтому если дифференциальная защита генератора выполнена на двух фазах, то в схеме защиты от замыканий на землю предусматривается второе реле с грубой уставкой, во много раз превосходящей ток небаланса $I_{нб.к.з.}$, но надежно действующее от тока $3I_0$ при двойных замыканиях на землю.

Для обеспечения необходимой чувствительности защиты ($I_{с.з} < 5$ *а*) применяются ТНП с подмагничиванием.

Место установки ТНП. Кабели или шины, соединяющие генератор с выключателем, не рекомендуется включать в зону защиты от замыкания на землю генератора. Замыкание на землю в этих элементах не представляет опасности и может быть ликвидировано персоналом так же, как это делается при замыканиях в кабельных линиях. Включение генераторных токопроводов в зону защиты приводит к увеличению тока I_{0C}, проходящего через ТНП, при внешних замыканиях на землю и вызывает загрубление защиты. По этим причинам ТНП устанавливается непосредственно у выводов генератора.

в) Защита от замыканий на корпус с ТНП, имеющим подмагничивание *

Конструкция ТНП. Магнитопровод *1* ТНП имеет форму прямоугольника, внутри которого располагаются кабели или токопроводы трех фаз генератора (рис. 15-20). Магнитопровод ТНП выполняется из трансформаторной стали, на нем намотана вторичная обмотка *2*, питающая реле.

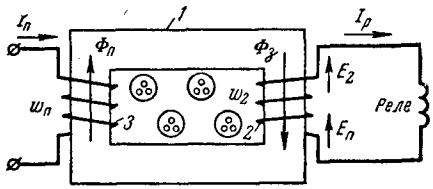


Рис. 15-20. Упрощенная схема ТНП с подмагничиванием.

На рис. 15-21 изображена кривая намагничивания ТНП для переменного тока. Она представляет зависимость э. д. с. на зажимах разомкнутой вторичной обмотки ТНП от намагничивающей силы F первичного тока: $E_2 = f(F)$.

Показав на диаграмме н. с. $F_з$ при токе замыкания на землю $I_з$, можно убедиться, что вследствие малой величины $I_з$ трансформатор работает в начальной пологой части характеристики намагничивания. Наводимая во вторичной обмотке э. д. с. $E_2 = E'_2$ будет мала; соответственно будет мал и вторичный ток, если вторичную обмотку замкнуть на реле. Чувствительность защиты значительно возрастает, если на магнитопровод поместить дополнительную обмотку *3* (рис. 15-20), питаемую переменным током $I_п$ от постороннего источника. Магнитодвижущая сила дополнительной обмотки $F_п$ будет подмагничивать магнитопровод, создавая в нем магнитный поток. Если при наличии подмагничивания появится тот же ток замыкания на землю $I_з$, то созданная им намагничивающая сила $F_з$ складывается с намагничивающей силой обмотки подмагничивания $F_п$. В результате этого ТНП работает в более крутой части характеристики намагничивания BC и э. д. с. E''_2, наводимая током $I_з$, будет значительно (в 15—20 раз) больше, чем при том же $I_з$ без подмагничивания; соответственно возрастает ток в реле, что повышает чувствительность защиты. Указанное подмагничивание осуществляется переменным током ** от трансформатора напряжения генератора, поэтому магнитный поток $Ф_п$, создаваемый

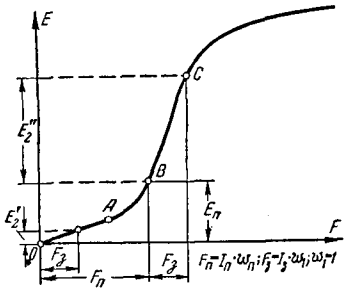


Рис. 15-21. Влияние подмагничивания на вторичную э. д. с. E_2 ТНП.

* Защита разработана Институтом электродинамики АН УССР.

** Подмагничивание постоянным током не дает увеличения э. д. с. ТНП, создаваемой током $I_з$, и поэтому не может использоваться для повышения чувствительности защиты (подробнее этот вопрос рассмотрен в [Л. 13 и 37]).

обмоткой подмагничивания, будет наводить во вторичной обмотке дополнительную э. д. с. $E_п$, искажающую работу ТНП. Для устранения вредного влияния обмотки подмагничивания магнитопровод выполняется из двух одинаковых сердечников: 1*а* и 1*б* (рис. 15-22). На каждом сердечнике располагаются вторичные обмотки 2*а* и 2*б* и обмотки подмагничивания 3*а* и 3*б*. Обмотки подмагничивания 3*а* и 3*б* соединяются встречно последовательно и поэтому создают в сердечниках магнитные потоки противоположного направления. Вторичные обмотки 2*а* и 2*б* соединяются согласно последовательно, поэтому наводимые в них током подмагничивания э. д. с. $E_{па}$ и $E_{пб}$ взаимно уничтожаются. Практически за счет неточной балансировки во вторичной обмотке появляется разность этих э. д. с. ($E_{па} - E_{пб} = E_{нб.п}$), создающая ток небаланса $I_{нб.п}$. Его величина может быть точно измерена и может иметь максимальное значение при нормальном напряжении сети.

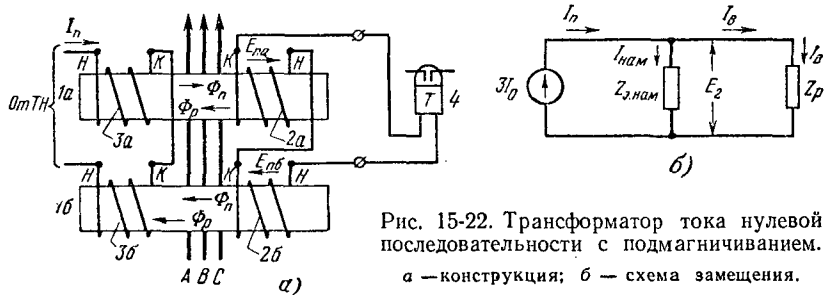


Рис. 15-22. Трансформатор тока нулевой последовательности с подмагничиванием.
а —конструкция; *б* — схема замещения.

При замыкании на землю в первичной цепи ТНП появляется ток $3I_0$. Он наводит в обмотках 2*а* и 2*б* последовательно направленные и равные по величине э. д. с., которые складываются и вызывают в реле ток $I_р = 3I_0$.

При к. з. и нагрузке ток в реле должен отсутствовать, однако из-за несимметрии расположения первичных токопроводов во вторичных обмотках ТНП возникает э. д. с. небаланса $E_{нб.нес}$, обусловливающая появление в реле тока $I_{нб.нес}$.

С учетом небаланса от обмоток подмагничивания результирующий ток небаланса

$$I_{нб} = I_{нб.нес} + I_{нб.подм}.$$

Таким образом, при внешних к. з. и токах нагрузки в реле защиты появляется ток небаланса, состоящий из двух составляющих: обусловленной несимметрией первичных токопроводов ТНП $I_{нб.нес}$ и подмагничиванием $I_{нб.подм}$.

Теоретический анализ [Л. 37] и эксперименты показывают, что $E_{нб.нес}$, а следовательно, и $I_{нб.нес}$ пропорциональны величине первичного тока, т. е. $E_{нб.нес} = kI_{перв}$. Расположение вторичной обмотки на магнитопроводе ТНП подобрано с таким расчетом, чтобы $I_{нб.нес}$ имел минимальное значение.

Благодаря этому при нагрузке $I_{нб.нес}$ не превышает 2—3 *ма*, при к. з. он соответственно возрастает.

Число витков вторичной обмотки выбирается из расчета, чтобы сопротивление намагничивания ТНП равнялось сопротивлению реле ($z_{ТНП} = z_р$). Как известно, при этом условии обеспечивается отдача максимальной мощности от источника питания (вторичной обмотки ТНП) в нагрузку (реле).

При включении на ТНП реле ЭТ-521/0,2, имеющего потребление 0,1 *ва*, с уставкой 0,1 *а* защита работает при токе замыкания на землю 4—5 *а*. Включая реле ЭТД-551/60 с потреблением 0,01 *ва*, можно повысить чувствительность защиты до 3 *а*. В настоящее время из-

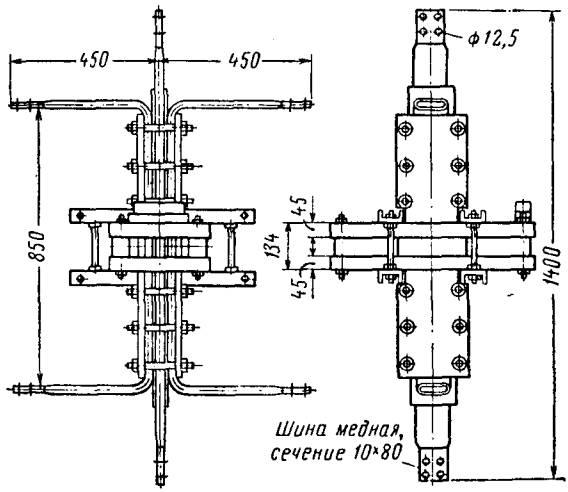


Рис. 15-23. Конструкция ТНП шинного типа.

готовляются ТНП для генераторов с числом кабелей до 16. Для генераторов с шинными выводами имеется аналогично выполненная конструкция ТНПШ.

Основное затруднение в конструкции шинного ТНП составляет ограничение токов небаланса, возникающих из-за большей, чем в кабельных ТНП, несимметрии расположения фаз относительно магнитопровода. Эти затруднения преодолеваются подбором размещения вторичной обмотки ТНП. Конструкция шинного ТНП показана на рис. 15-23. Токоведущие шины для первичной цепи должны иметь надежную, разделяющую их изоляцию. Форма токоведущих шин выбрана из условия ограничения тока небаланса, наводимого во вторичной обмотке токами, проходящими по шинам. На шинные ТНП обычно включается реле ЭТД-551/60.

Технические данные выпускаемых промышленностью ТНП и ТНПШ приведены в [Л. 2].

Принципиальная схема защиты с ТНП, имеющим подмагничивание, изображена на рис. 15-24. В схеме предусмотрены два токовых

реле: чувствительное и грубое. Чувствительное реле *1* предназначено для действия при однофазных замыканиях на землю в обмотке статора генератора. Это реле не отстраивается от токов небаланса при внешних к. з. и имеет поэтому блокировку, выводящую его из действия при внешних повреждениях [1].

В цепи отключения реле *1* предусмотрено реле времени *4* с выдержкой времени 0,5—1 *сек*. Замедление повышает надежность отстройки реле *1* от мгновенных бросков нестационарного емкостного тока при внешних замыканиях на землю и позволяет не считаться

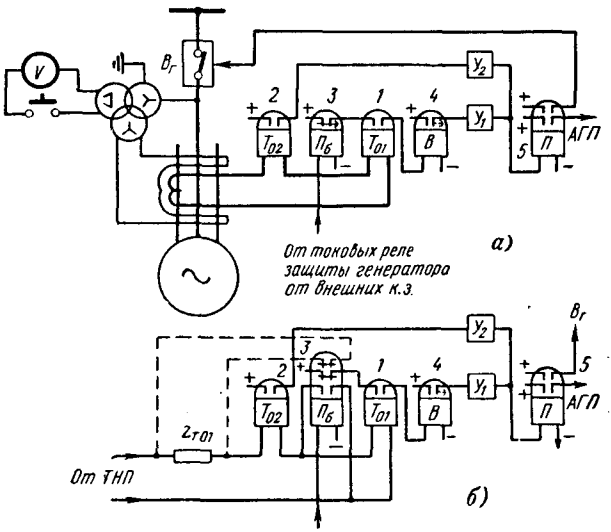


Рис. 15-24. Принципиальная схема защиты от замыканий на землю с ТНП, имеющим подмагничивание.

а — с блокировкой, размыкающей оперативную цепь чувствительного комплекта; *б* — с блокировкой, размыкающей оперативную цепь и шунтирующей токовую цепь защиты.

с пиками этого тока. В результате этого уменьшается $I_{с.з}$ и повышается чувствительность защиты. Замедление защиты не ухудшает ее качеств, поскольку максимальные значения токов замыкания на землю ограничены: они обычно не превосходят 20—40 *а* и могут поэтому допускаться в течение нескольких секунд (рис. 15-14). Грубое токовое реле *2* устанавливается для действия при двойных замыканиях на землю (одном — в генераторе и втором — в сети), когда чувствительное реле *1* выводится из работы блокировкой. Реле *2* отстраивается от токов небаланса при внешних к. з. и действует на отключение без выдержки времени.

Обмотка подмагничивания ТНП питается от трансформатора напряжения генератора. При обрыве этой цепи защита загрубляется

[1] Опыт эксплуатации показывает, что благодаря весьма малым токам небаланса в кабельных ТНП блокировка может не применяться.

и может отказать при повреждениях с малым током замыкания. Для контроля этой цепи может предусматриваться реле, подающее сигнал при исчезновении тока в его обмотке (на рис. 15-24 не показано).

Блокировка реле *1* осуществляется с помощью промежуточного реле *3*, которое пускается от токовых реле защиты генератора от внешних к. з. При своем действии реле *3* разрывает оперативную цепь реле *1*, выводя его из действия. На рис. 15-24,*б* показан второй вариант блокировки; здесь реле *3* разрывает оперативную цепь реле *1* и, кроме того, для обеспечения надежного возврата чувствительного реле *1* шунтирует его обмотку. Такой способ блокировки позволяет выбирать уставку реле без учета коэффициента возврата реле *1*, что повышает чувствительность последнего (см. выбор уставок).

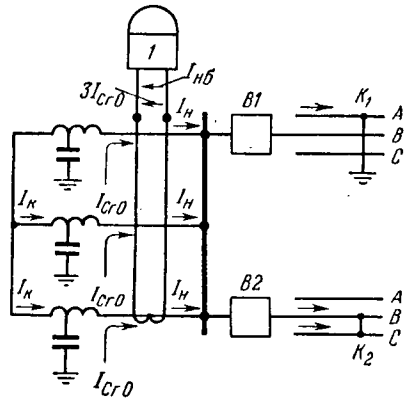


Рис. 15-25. Расчетный вид повреждения при выборе уставок защиты от замыкания на землю.

При шунтировании токовой обмотки реле *1* сопротивление вторичной цепи ТНП уменьшается. В результате этого резко возрастает ток небаланса, от которого может сработать грубое токовое реле *2*. Поскольку реле *2* предназначено для действия при двойном замыкании на землю, его блокировка при к. з. недопустима. Для предупреждения ложного действия реле *2* от $I_{нб}$, появляющегося при шунтировании обмотки реле *1*, необходимо или выбрать $I_{с.р}$ реле *2* больше повышенного $I_{нб}$, или ввести при действии блокировки в токовую цепь защиты сопротивление $z_{доп}$, равное сопротивлению реле *1*, благодаря чему сопротивление цепи, а следовательно, и $I_{нб}$ остаются неизменными. Ввод $z_{доп}$ осуществляется контактом реле *3*, как показано на схеме пунктиром.

Выбор уставок чувствительного комплекта защиты [Л. 2]. Первичный ток срабатывания токового реле *1* выбирается из условия недействия защиты при повреждениях вне генератора (в сети).

Наиболее тяжелым случаем, принимаемым для расчета, является замыкание на землю одной фазы сети (в K_1*) при одновременном к. з. между двумя другими фазами в* K_2 (рис. 15-25).

В этом случае в реле *1* появляются бросок емкостного тока генератора $I_{Cг}$, обусловленный замыканием на землю, и ток небаланса $I_{нб}$, вызванный токами к. з., протекающими через ТНП от генератора к месту повреждения. Если блокировка, выводящая чувствительный комплект защиты, размыкает только ее оперативную цепь,

то токовое реле *1* может замкнуть свои контакты под действием появившихся в нем токов $I_{Cг}$ и $I_{нб}$.

После отключения к. з. блокировка возвращается, восстанавливая оперативную цепь, и поэтому необходимо обеспечить возврат реле *1* при прохождении по нему оставшихся токов $I_{Cг} + I_{нб}$.

Ток $I_{Cг}$ обусловлен оставшимся замыканием на землю (в точке K_1), а ток $I_{нб}$ — протеканием через ТНП токов нагрузки генератора $I_н$. Вследствие самозапуска двигателей, происходящего при восстановлении напряжения в сети, ток $I_н$ может иметь повышенное значение.

Исходя из сказанного, $I_{с.з}$ выбирается из условия возврата реле *1* при прохождении по нему тока $I_р = I_{Cг} + I_{нб}$.

С учетом коэффициента возврата $k_{воз}$ и соответствующих коэффициентов надежности

$$I_{с.з} = \frac{1}{k_{воз}} (k'_н I_{Cг} + k''_н I_{нб(бл)}), \qquad (15\text{-}17)$$

где $I_{Cг}$ — установившееся значение емкостного тока генератора при «земле» в сети (см. табл. 15-4); $k'_н$ — коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока в неустановившемся режиме; при наличии выдержки времени $t = 0{,}5 \div 1$ *сек* $k'_н = 2 \div 3$; $I_{нб(бл)}$ — ток небаланса при токе нагрузки генератора в послеаварийном режиме, в худшем случае ток $I_{наг}$ равен току возврата блокировки; $k''_н$ — коэффициент надежности, учитывающий неточность расчета $I_{нб}$, принимается равным 1,3—1,5.

В схемах с блокировкой, шунтирующей токовую цепь защиты (рис. 15-24, *б*), возврат чувствительного реле обеспечивается шунтировкой, при которой ток $I_р$ снижается до нуля.

В этом случае ток срабатывания выбирается из условия недействия реле от тока $I_р = I_{Cг} + I_{нб}$, появляющегося в нем после отключения к. з. в сети K_2 и дешунтирования обмотки реле *1*:

$$I_{с.з} = k'_н I_{Cг} + k''_н I_{нб(бл)}, \qquad (15\text{-}18)$$

где $I_{Cг}$, $I_{нб(бл)}$, $k'_н$, $k''_н$ — то же, что и в (15-17).

Из сопоставления (15-17) и (15-18) видно, что $I_{с.з}$ при блокировке, шунтирующей токовую цепь реле, получается меньше, чем $I_{с.з}$ по (15-17).

Ток небаланса $I_{нб(бл)}$ в (15-17) и (15-18) отнесен к первичной цепи ТНП. Для его определения находится вторичный ток небаланса $I_{нб(в)}$, проходящий по реле, который затем пересчитывается на первичную сторону ТНП.

Согласно выражению (15-16) $I_{нб(в)} = I_{нб.нес(в)} + I_{нб.подм(в)}$. Обе составляющие $I_{нб.нес(в)}$ и $I_{нб.подм(в)}$ определяются по формулам, рассмотренным в [Л. 2], согласно которым

$$I_{нб.нес(в)} = \frac{kE_{неб.нес.ном}}{z_р + z_{э.нам.в}}; \qquad (15\text{-}19)$$

$$I_{нб.подм(в)} = \frac{E_{неб.подм}}{z_р}, \qquad (15\text{-}19а)$$

где $E_{\text{нб.нес.ном}}$ — $E_{\text{нб.нес}}$ при номинальном токе ТНП; k — отношение тока к. з. (при котором определяется $I_{\text{нб}}$) к номинальному току ТНП; $z_{\text{р}}$ — сопротивление обмотки реле; $z_{\text{э. нам. в}}$ — сопротивление ветви намагничивания в схеме замещения ТНП, отнесенное к вторичной обмотке. Числовые значения $E_{\text{нб}}$, $z_{\text{р}}$, $z_{\text{э.нам.в}}$ даются заводом и приведены в [Л. 2].

Полный вторичный ток небаланса

$$I_{\text{нб(в)}} = \frac{kE_{\text{нб. нес. ном}}}{z_{\text{р}} + z_{\text{э. нам. в}}} + \frac{E_{\text{нб. подм}}}{z_{\text{р}}}. \qquad (15\text{-}20)$$

Сопротивление намагничивания равно отношению E_2 ТНП к $I_{\text{нам}}$, т. е. $z_{\text{э.нам. в}} = E_2/I_{\text{нам}}$ и может определяться по кривой на рис. 15-21. Величина $z_{\text{э.нам. в}}$ зависит от степени подмагничивания ТНП, она уменьшается с уменьшением тока подмагничивания. Поэтому для определения максимального небаланса ток $I_{\text{нб(в)}}$ определяется для двух случаев — при наличии подмагничивания по (15-20) и при его отсутствии. В последнем случае $E_{\text{нб.подм}}$ и $z_{\text{э.нам.в}}$ равны нулю и выражение (15-20) принимает вид:

$$I_{\text{нб(в)}} = \frac{kE_{\text{нб. нес. ном}}}{z_{\text{р}}}. \qquad (15\text{-}20\text{а})$$

За расчетный $I_{\text{нб(в)}}$ принимается большее из двух значений (15-20) и (15-20а).

По найденному $I_{\text{нб(в)}}$ можно вычислить первичный ток небаланса, определив связь между первичным и вторичным токами ТНП.

Эта связь находится из схемы замещения ТНП (рис. 15-22, *б*). Из этой схемы следует, что $I_{\text{п}} = I_{\text{в}} + I_{\text{нам}}$. Зная сопротивления ветвей, по которым замыкаются $I_{\text{п}}$ и $I_{\text{в}}$, и учитывая, что токи распределяются обратно пропорционально сопротивлению ветвей, получаем:

$$I_{\text{п}} = \frac{z_{\text{р}} + z_{\text{э. нам. в}}}{z_{\text{э. нам. в}}} I_{\text{в}} w_{\text{в}}, \text{ где принято, что } w_{\text{п}} = 1.$$

При оптимальных условиях работы ТНП $z_{\text{р}} = z_{\text{э.нам.в}}$. В этом случае $I_{\text{п}} = 2w_{\text{в}}I_{\text{в}}$. Пользуясь этим соотношением, находим, что $I_{\text{нб.п}} = 2w_{\text{в}}I_{\text{нб(в)}}$.

Ток срабатывания грубого токового реле *2* должен быть таким, чтобы реле не могло подействовать от броска емкостного тока при замыканиях на землю в сети и тока небаланса при внешних к. з., в наиболее тяжелом расчетном случае, приведенном на рис. 15-25. Для этого необходимо выполнить условие:

$$I_{\text{с.з2}} > I_{\text{р. макс}} = k'_{\text{н}} I_{\text{С}} + k''_{\text{н}} I_{\text{нб. к. з.}}.$$

На основании анализа и опыта эксплуатации рекомендуется принимать первичный ток срабатывания $I_{\text{с.з2}} = 100$ *а*. При этом грубое токовое реле с большим запасом отстраивается от $I_{\text{р.макс}}$.

г) Повышение чувствительности защиты от замыканий на землю

На мощных генераторах (50 тыс. *квт* и больше) защита получается грубой за счет большой величины емкости обмоток генератора. Чувствительность защиты может быть повышена или путем применения направленных реле, не действующих от емкостного тока генератора, протекающего через ТНП при внешнем замыкании на землю, или путем компенсации емкостного тока генератора. В обоих случаях необходимость загрубления защиты для отстройки от емкостного тока генератора отпадает.

Один из вариантов схемы защиты с компенсацией емкостного тока генератора изображен на рис. 15-26.

Компенсирующая обмотка *1* питается от трансформатора напряжения *2*. Величина конденсатора *C* подобрана с таким расчетом, чтобы ток в компенсирующей обмотке был равен емкостному току генератора при внешнем замыкании и противоположен ему по знаку. Тогда ток в компенсирующей обмотке при внешнем замыкании на землю компенсирует емкостный ток генератора, а при повреждении в генераторе действует согласно с током повреждения и повышает чувствительность защиты. Подобные схемы еще недостаточно проверены на практике.

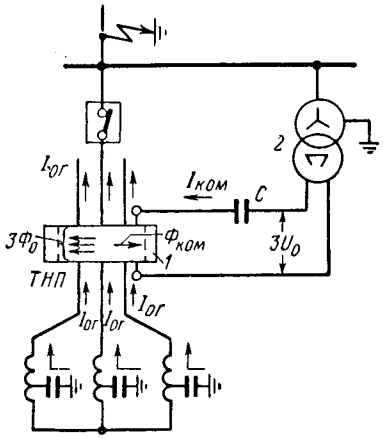


Рис. 15-26. Схема защиты от замыканий на землю с компенсацией емкостного тока генератора.

д) Оценка защит с ТНП

Разработанные в СССР токовые защиты с трансформаторами тока нулевой последовательности с подмагничиванием отличаются простотой и высокой чувствительностью. Опыт эксплуатации их дал весьма положительные результаты. Нуждается в дальнейшей разработке вопрос об отстройке защиты от бросков емкостного тока при замыканиях на землю вне генератора.

15-5. ЗАЩИТА ОТ СВЕРХТОКОВ ПРИ ВНЕШНИХ К. З. И ПЕРЕГРУЗКАХ

а) Назначение и виды защит от внешних к. з.

Защита генераторов от внешних к. з. служит для отключения генераторов при повреждениях на сборных шинах электростанции или на отходящих от них присоединениях.

Нормально указанные к. з. отключаются защитой поврежденных элементов (т. е. шин или линий и трансформаторов), поэтому защита на генераторах от внешних к. з. является резервной и работает только в случае отказа защиты или выключателей этих элементов.

В тех случаях, когда сборные шины генераторного напряжения не имеют специальной защиты, защита генератора от внешних к. з. служит основной защитой генератора от повреждений на шинах и резервной при повреждении на присоединениях.

Защита от внешних к. з. дополнительно используется для резервирования дифференциальной защиты генератора при междуфазных к. з. в нем.

Таким образом, *в зону действия защиты от внешних к. з. должны входить: генератор, сборные шины и отходящие от них присоединения*.

Выполняя функции резервной защиты генератора, защита от внешних к. з. должна действовать на отключение генератора и АГП.

К защите от внешних к. з. предъявляется одно очень важное требование — она не должна работать при перегрузках и качаниях.

При несоблюдении этого условия могут происходить массовые отключения генераторов при неопасных для них перегрузках и качаниях, что приводит к дефициту генераторной мощности и тяжелым авариям в энергосистемах.

В соответствии с поставленными требованиями в качестве защиты генераторов от внешних к. з. в настоящее время применяются максимальные токовые защиты с *блокировкой* (или пуском) *от реле напряжения* и фильтровая защита (реагирующая на ток I_2) с дополнительной приставкой, действующей при трехфазных повреждениях.

Простая максимальная токовая защита (без блокирующих реле напряжения) *реагирует на кратковременные и неопасные перегрузки и поэтому не должна применяться на генераторах, отключение которых при перегрузках и качаниях недопустимо.*

б) Максимальная защита с блокировкой (пуском) по напряжению

Защита выполняется в двух вариантах: с блокировкой, осуществляемой с помощью трех реле минимального напряжения H (рис. 15-27), и с блокировкой, выполненной по комбинированной схеме, состоящей из реле напряжения обратной последовательности H_2 и одного реле минимального напряжения H, включенного на линейное напряжение (рис. 15-28).

В обеих схемах токовые реле T питаются от трансформаторов тока, расположенных на нулевых выводах генератора. При таком подключении максимальная защита не только реагирует на внешние к. з., но и резервирует дифференциальную защиту генератора, действуя от тока генератора при повреждении в нем.

Включение токовых реле на трансформаторы тока со стороны шинных выводов генератора нецелесообразно с точки зрения защиты самого генератора. В этом случае при повреждении в обмотках генератора защита действует только при наличии тока из сети. Если ток со стороны сети отсутствует (из-за отсутствия параллельно работающих генераторов или связи с системой) или прекратился вследствие отключения связи с другими генераторами раньше, чем сработала максимальная защита поврежденного генератора, то она не сможет подействовать и не ликвидирует повреждения в генераторе.

Максимальная защита может устанавливаться только на двух фазах. Однако по соображениям повышения надежности и чувствительности ее устанавливают на трех фазах. Токовые реле применяются мгновенные. Индукционные реле с зависимой характеристикой могут срабатывать при качаниях, так как они суммируют импульсы тока качаний, не успевая возвращаться в промежутках между ними. Поэтому зависимые реле в максимальной защите генератора не применяются.

Реле минимального напряжения питаются от генераторного трансформатора напряжения.

Питание от трансформаторов напряжения на шинах станции не применяется, так как при этом защита не действует при повреждении на отключенном от шин генераторе.

Реле напряжения H включаются на междуфазные напряжения для большей чувствительности при междуфазных к. з. Для обеспечения действия блокировки при двухфазных к. з. необходимо устанавливать три реле напряжения (рис. 15-27).

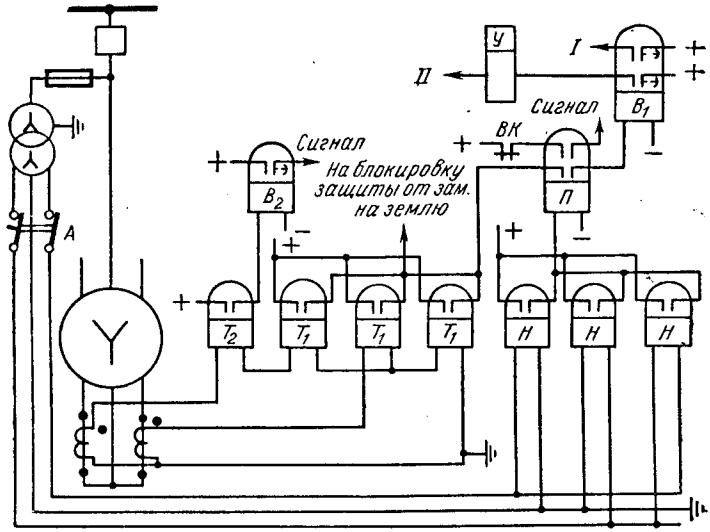


Рис. 15-27. Схема максимальной токовой защиты с блокировкой (пуском) минимального напряжения.

В обеих схемах блокировка по напряжению служит для исключения действия защиты при перегрузках.

В схеме на рис. 15-27 при к. з. вследствие возрастания тока и снижения напряжения работают как реле T_1, так и реле H и защита действует с выдержкой, установленной на реле времени B_1 на отключение генератора и АГП. При перегрузках, не сопровождающихся понижением напряжения, реле H не действует, чем предотвращается нежелательная в этих случаях работа защиты.

В схеме на рис. 15-28 реле минимального напряжения H питается междуфазным напряжением через нормально замкнутые контакты реле H_2. Реле H_2 включено через фильтр обратной последовательности на напряжение U_2. При несимметричных к. з. появляется напряжение U_2 и реле H_2 срабатывает, снимая напряжение с реле H. Последнее замыкает свои контакты и разрешает токовым реле подействовать на отключения. При симметричном к. з. реле H_2 размыкает свои контакты кратковременно. Реле H успевает сработать, но

затем после исчезновения несимметрии и возврата H_2 поведение реле H будет зависеть от уровня остаточного напряжения $U_к$ на его зажимах.

Если $U_к < U_{воз}$ реле H, то оно останется в сработанном состоянии и разрешит действовать защите. Если же $U_к > U_{воз}$, то реле H возвратится и защита не сможет подействовать. Таким образом, чувствительность блокировки при симметричных к. з. определяется не $U_{с.р}$, а $U_{воз}$ реле H. Поскольку $U_{воз} < U_{с.р}$ на 10—15%, то, следовательно, схема с комбинированным пуском при трехфазных к. з. чувствительнее, чем схема с обычной блокировкой на рис. 15-27.

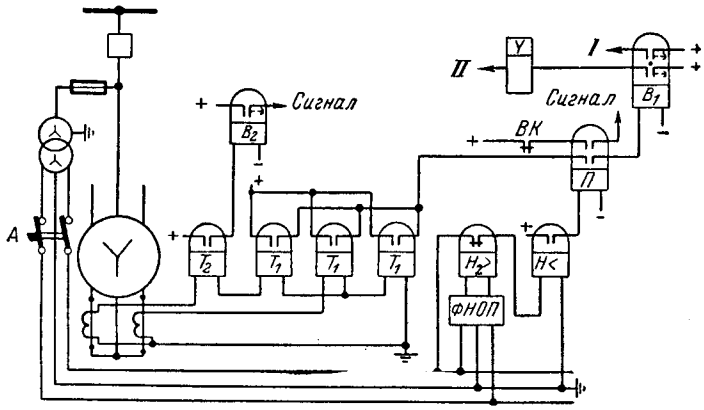


Рис. 15-28. Схема максимальной токовой защиты с комбинированным пуском по напряжению.

При несимметричных к. з. схема с реле H_2 также чувствительнее обычной схемы за счет большей чувствительности реле H_2 по сравнению с реле H.

При симметричных перегрузках реле H_2 и H не действуют, запрещая работать защите.

Уставки защиты. Ток срабатывания токовых реле в схемах максимальных защит с пуском по напряжению выбирается из условия их возврата при номинальном токе генератора:

$$I_{с.з} = \frac{k_{зап}}{k_{воз}} I_{ном.г}. \qquad (15\text{-}21)$$

Коэффициент запаса $k_{зап}$ обычно принимается равным 1,1—1,2.

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения H, включенного на междуфазное напряжение, в обеих схемах выбирается из следующих соображений.

Реле минимального напряжения должны удовлетворять двум условиям:

а) возвращаться при минимальном уровне рабочего напряжения $U_{\text{раб.мин}}$ после отключения к. з. в сети, для чего необходимо выбрать:

$$U_{\text{с.з}} = \frac{U_{\text{раб.мин}}}{k_{\text{н}} k_{\text{воз}}}, \tag{15-22}$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,1—1,2; $U_{\text{раб.мин}} = 0{,}95 U_{\text{раб.норм}}$;

б) не действовать при понижении напряжения на зажимах генератора, вызванном самозапуском двигателей или асинхронным режимом работы генератора, имеющим место при потере возбуждения. Расчеты и опыты показывают, что в обоих случаях напряжение может понижаться до $(0{,}65 \div 0{,}7) U_{\text{раб.норм}}$. Для исключения действия реле в этих условиях необходимо иметь:

$$U_{\text{с.з}} = (0{,}6 \div 0{,}5)\, U_{\text{раб.норм}}. \tag{15-22а}$$

Условие п. «б» является определяющим, поэтому $U_{\text{с.з}}$ выбирают по (15-22а). Напряжение срабатывания реле обратной последовательности H_2 в схеме с комбинированным пуском выбирается из условия отстройки от напряжения небаланса на выходе фильтра. На основе опыта эксплуатации принимается:

$$U_{\text{с.з2}} = 0{,}06 U_{\text{раб.норм}}. \tag{15-22б}$$

Чувствительность защиты проверяется по току и напряжению при к. з. на шинах и в конце второго участка согласно выражениям:

по току

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.з.мин}}}{I_{\text{с.з}}}; \tag{15-23}$$

по напряжению для реле H в схеме по рис. 15-27

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{с.з}}}{U_{\text{к.з.макс}}}, \tag{15-24}$$

где $U_{\text{к.з.макс}}$ — наибольшее остаточное напряжение при двухфазном к. з. в конце второго участка.

Для реле H в схеме с комбинированным пуском чувствительность проверяется по $U_{\text{воз}}$ при трехфазных к. з., так как при двухфазных к. з. работает реле H_2, а при трехфазных — оно в первый момент к. з. снимает напряжение с реле H и дальнейшее поведение реле H определяется $U_{\text{воз}}$ этого реле. С учетом сказанного

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{воз}}}{U_{\text{к.з.макс}}}, \tag{15-24а}$$

для реле H_2

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{2к.з.мин}}}{U_{\text{с.з2}}}, \tag{15-24б}$$

где $U_{2к.з.мин}$ — наименьшее напряжение обратной последовательности при двухфазном к. з. в конце второго участка.

Выдержка времени. По условию селективности время действия защиты не должно быть меньше

$$t = t_{прис} + \Delta t, \qquad (15\text{-}25)$$

где $t_{прис}$ — наибольшая выдержка времени на защите присоединений, питающихся от генераторных шин.

При выборе уставки по времени необходимо учитывать большую ответственность генераторов, являющихся источниками питания, и отсутствие необходимости в быстром отключении генераторов при внешних к. з. по условиям работы самого генератора. В то же время необходимо считаться с тем, что процесс восстановления напряжения на генераторах и снижение их токов нагрузки во время тяжелых аварий могут проходить относительно медленно. Для предотвращения преждевременного отключения генераторов в подобных режимах, когда пусковые реле защиты могут возвращаться не сразу после отключения к. з., выдержка времени на максимальной защите генераторов выбирается порядка 5—8 *сек*. Повышение $t_з$ улучшает также отстройку защиты от качаний.

в) Токовая защита от симметричной перегрузки

На электростанциях, имеющих постоянный дежурный персонал, защита от перегрузки должна действовать на сигнал и выполняться по схеме, приведенной на рис. 15-27 и 15-28.

Перегрузка, как правило, является симметричным режимом. Поэтому защита от перегрузки выполняется при помощи одного токового реле T_2, включенного в одну из фаз генератора. Срабатывая, оно действует на реле времени B_2, которое подает сигнал. Поскольку перегрузка может продолжаться длительно, реле времени B_2 должно быть термически устойчивым. Ток срабатывания токового реле T_2 выбирается по выражению (15-9). Для повышения чувствительности к перегрузкам $k_{зап}$ применяется равным 1,05.

Выдержка времени на реле времени выбирается несколько большей, чем на защите от внешних к. з., с тем чтобы защита от перегрузки не давала сигналов при внешних к. з., отключаемых защитой.

На электростанциях без постоянного дежурного персонала максимальная токовая защита от перегрузки должна выполняться с двумя выдержками времени и действовать: с меньшей — на сигнал и снижение возбуждения, а с большей — на отключение выключателя и АГП.

Для мощных генераторов ведется разработка защиты с независимой характеристикой, соответствующей тепловой характеристике генератора. Такую защиту следует выполнять с действием на отключение.

г) Токовая защита обратной последовательности

Назначение, требование и принцип действия. Как указывалось в § 15-1, б, несимметрия токов в статоре является опасным режимом для генераторов, особенно для генераторов с форсированным охлаждением. Подобные несимметрии возникают при внешних двухфазных и однофазных к. з. и в режиме нагрузки, при обрыве одной или двух фаз, например вследствие обрыва провода на линии электропередачи или недовключения фаз выключателя. Повышенный ток при неотключившихся внешних несимметричных к. з. нагревает статор генератора, а токи обратной последовательности, появляющиеся при несимметричных внешних к. з. и нагрузках, индуктируют в роторе вихревые токи, вызывающие опасный нагрев металлических частей и обмотки последнего (см. § 15-1, б).

Вследствие недостаточной чувствительности максимальной защиты к несимметричным внешним к. з. и недействия ее при несимметричных нагрузках разработана и применяется токовая защита обратной последовательности, реагирующая на появление тока I_2. Эта защита выполняет функции двух защит: 1) защиты от чрезмерного нагрева ротора генератора при несимметричных к. з. и нагрузках и 2) резервной защиты статора при несимметричных внешних к. з., а также при к. з. в самом генераторе в случае отказа его дифференциальной защиты.

В первом случае защита должна удовлетворять двум условиям: во-первых, она должна срабатывать при I_2, превышающем максимальный длительно допустимый ток $I_{2\text{доп.макс}}$ по условию нагрева ротора, для чего необходимо иметь:

$$I_{\text{с.з}} \approx I_{2\text{длит.доп.макс}}, \tag{15-26}$$

и, во-вторых, должна иметь выдержку времени

$$t_{\text{з}} \leqslant t_{\text{доп}} \quad \text{или} \quad t_{\text{з}} = k_{\text{н}} t_{\text{доп}}, \tag{15-26а}$$

где $t_{\text{доп}}$ — время, в течение которого ротор при данном значении I_2 нагревается до предельной температуры, определяется по тепловой характеристике ротора из уравнения (15-1а); $k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, принимаемый равным 0,9—1.

Во втором случае (в качестве резервной защиты статора) защита обратной последовательности должна иметь чувствительность, достаточную для отключения несимметричных к. з. в конце зоны резервирования, и действовать с наименьшей выдержкой времени, обеспечивающей селективность.

Указанные требования можно выразить следующими соотношениями:

$$I_{\text{с.з}} < I_{2\text{к.з.мин}}; \tag{15-26б}$$

$$t_{\text{з}} = t_{\text{л}} + \Delta t, \tag{15-26в}$$

где $I_{2\text{к.з.мин}}$ — минимальный ток обратной последовательности в генераторе при к. з. в конце самой длинной линии, отходящей от шин

электростанции; $t_л$ — выдержка времени защиты линий, отходящих от шин электростанции.

Характеристика реле. Наилучшим способом защиты ротора от нагрева токами обратной последовательности является защита с зависимой от тока I_2 характеристикой $t_з = f(I_2)$, соответствующей тепловой характеристике ротора по уравнению (15-1а). Отвечающая этому условию характеристика защиты

$$t_з = k_н t_{доп} = k_н \frac{A}{I_з^2} \qquad (15\text{-}27)$$

показана пунктиром на рис. 15-29.

Защита с зависимой характеристикой *1* позволяет полностью использовать перегрузочные возможности генератора, что является ее главным достоинством. Однако простой и серийно выпускаемой конструкции реле с зависимой характеристикой в Советском Союзе пока еще нет, и поэтому на практике применяется защита обратной последовательности со ступенчато-зависимой характеристикой *2* (рис. 15-29). Как видно из рис. 15-29, независимая защита не позволяет полностью использовать перегрузочные возможности генератора и отключает его раньше, чем это допустимо по условию нагрева, что является ее существенным недостатком. Ниже рассмотрены общие принципы выполнения обеих защит.

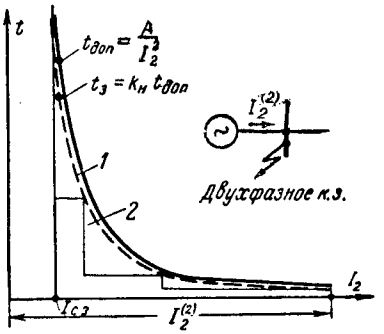


Рис. 15-29. Зависимая и ступенчатая характеристика выдержки времени защиты обратной последовательности генератора.

Токовая защита обратной последовательности с зависимой характеристикой. Все разновидности этой защиты (рис. 15-30) состоят из трех токовых реле $Т_1$, $Т_2$, $Т_3$, питающихся током I_2 от фильтра обратной последовательности $Ф_2$.

Реле $Т_1$ действует на сигнал, предупреждая дежурный персонал о появлении опасных токов $I_2 > I_{2длит.доп.макс}$.

Сигнальное реле предназначено для работы при малых кратностях тока I_2, которые могут допускаться по условиям нагрева ротора в течение 2 *мин* и более. Предполагается, что за это время (2 *мин* и более) дежурный персонал может принять меры к устранению несимметрии, а при отсутствии такой возможности своевременно отключить генератор. По тепловой характеристике ротора (рис. 15-2) можно установить, что $t_{доп} > 2$ *мин* имеет место в начальной части характеристики в диапазоне токов от $I_{2макс.длит}$ до $(0{,}4 \div 0{,}6)\ I_{ном.г}$.

Ток срабатывания реле $Т_1$ отстраивается от $I_{2длит.доп.макс}$ с учетом $k_{воз}$ реле, т. е.

$$I_{с.з1} = \frac{1{,}05 I_{2длит.доп.макс}}{k_{воз}}. \qquad (15\text{-}28)$$

Выдержка времени t_I выбирается так, чтобы сигнализация не действовала при к. з. в сети, но была не больше 5—6 *сек* с тем, чтобы дежурный имел возможно больше времени для проведения операций по ликвидации несимметрии.

Р е л е T_2 является защитой ротора от несимметричных режимов с такими токами I_2, при которых ручная ликвидация несимметрии невозможна, так как требуется быстрое отключение генератора с $t < 2$ *мин*. Это реле должно иметь зависимую характеристику согласно уравнению (15-27) и должно действовать при токах I_2, которым соответствует по тепловой характеристике ротора $t_{доп} \leqslant$

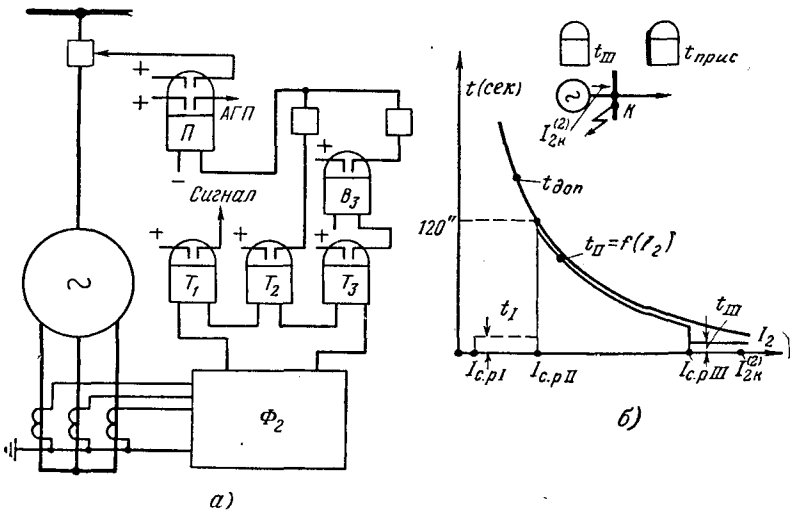


Рис. 15-30. Токовая защита обратной последовательности с зависимой от тока I_2 характеристикой.

а — схема; *б* — характеристика $t_з = f(I_2)$.

$\leqslant 2$ *мин*. Отвечающий этому условию ток находится из уравнения (15-1), если принять в нем $t_{доп} = 2$ *мин* (120 *сек*):

$$I_{с.зII} = \sqrt{\frac{A}{t_{доп}}} = \sqrt{\frac{A}{120}}. \qquad (15\text{-}28а)$$

Р е л е T_3 служит резервной защитой от н е о т к л ю ч и в ш и х с я несимметричных к. з. внешних или в генераторе. Генератор в этих случаях следует отключать, не дожидаясь, когда истечет допустимое время $t_{доп}$ по условию нагрева статора и ротора. Реле T_3 действует на отключение генератора и АГП с независимой от тока I_2 выдержкой времени t_{III}, создаваемой реле времени B_3 (рис. 15-30, *а*). Ток срабатывания реле T_3 выбирается так, чтобы оно надежно действовало при несимметричных к. з. в конце зоны резервирования, т. е. $I_{с.зIII} < I_{2к.мин}$. Выдержка времени t_{III} выбирается из двух условий:

1) селективности с защитами присоединений, отходящих от шин электростанции, $t_{\text{III}} = t_{\text{прис}} + \Delta t$;

2) согласования с $t_{\text{доп}}$ по тепловой характеристике ротора при наибольшем значении $I_{2\text{к.макс}}$ в случае двухфазного к. з. на выводах генератора (точка K на рис. 15-30, *б*): $t_{\text{III}} \leqslant t_{\text{доп}}$ при $I_{2\text{к.макс}}$. *Второе условие является обязательным.*

Характеристика времени действия рассмотренной защиты приведена на рис. 15-30, *б*.

Принципы выполнения зависимых токовых реле I_2. В Советском Союзе разрабатываются конструкции зависимых реле, реагирующих на величину $I_{*2}^2 t$, косвенно характеризующую количество тепла, выделенное в роторе при прохождении тока I_2 в статоре за время t.

Поскольку величина тока I_2 во время несимметричного режима может изменяться, то для правильного определения допустимого времени $t_{\text{доп}}$ зависимое реле должно суммировать величины $I_{2(t)}^3 t$ в каждый момент времени или, иначе говоря, осуществлять интегрирование $\int_0^t I_{2(t)}^3 \, dt$. Реле должно срабатывать, когда $\int_0^t I_{2(t)}^3 \, dt = A$, т. е. когда количество тепла, обусловленное током I_2, достигнет значения $Q_{\text{пред}} = A$, при котором температура наиболее нагретого элемента ротора повысится до предельно допустимого значения. *Характеристика реле $t_3 = f(I_2)$, учитывающая процесс нагрева ротора при изменяющемся значении I_2, называется* интегральной.

При исчезновении I_2 вследствие ликвидации несимметричного режима процесс возврата реле в начальное состояние должен соответствовать процессу остывания ротора генератора.

Наиболее удачными являются конструкция на магнитных элементах с прямоугольной характеристикой намагничивания, предложенная ВНИИЭ [Л. 93], и реле, разработанные Энергосетьпроектом и ЧЭТНИИ на полупроводниках с использованием для получения интегрально зависимой характеристики процесса заряда и разряда конденсатора [Л. 94]. Опытная партия реле последнего типа РТФ-6 выпущена ЧЭАЗ. Однако, поскольку окончательной схемы этого реле еще нет, ниже рассматриваются основные принципы выполнения аналогичного реле, разработанного Энергосетьпроектом. Упрощенная структурная схема этого реле показана на рис. 15-31, *б*. Реле состоит из фильтра тока I_2 (*1*); выпрямителя (*2*); преобразователя (*3*), преобразующего ток I_2 в ток $I_{\text{п}} = kI_2^3$; интегратора *4*, обеспечивающего работу реле с выдержкой времени, обратно пропорциональной I_2^3, с учетом меняющегося значения тока I_2; исполнительного органа *5*, подающего импульс на отключение.

Интегратор. В качестве интегратора используется конденсатор C (рис. 15-31, *а*), процесс заряда которого во времени происходит по такому же закону, как и адиабатический нагрев ротора от тока I_2.

Заряд конденсатора характеризуется уравнением

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C}\int_0^t I_{C(t)}\,dt, \qquad (15\text{-}29)$$

где U_C и C — напряжение и емкость конденсатора; $I_{C(t)}$ — мгновенное значение зарядного тока конденсатора; q — заряд конденсатора, равный $\int_0^t I_{C(t)}\,dt$.

Из (15-29) получим:

$$U_C C = \int_0^t I_{C(t)}\,dt. \qquad (15\text{-}29а)$$

Сравнив (15-29а) с (15-2), можно сделать вывод, что при $U_C C = A$ и $I_{C(t)} = I^{з}_{2(t)}$ оба выражения идентичны, и поэтому *конденсатор может служить электрической моделью нагрева ротора.*

Возможны две схемы интегратора с конденсатором C: одна — основанная на его заряде и вторая — на разряде. Схема интегратора с использованием заряда конденсатора приведена на рис. 15-31. При появлении тока I_2 на зажимах mn возникает напряжение и конденсатор C начинает заряжаться током $I_п \equiv I^{з}_{2}$.

В процессе заряда конденсатора напряжение U_C на его зажимах mn будет расти. Реле срабатывает, когда U_C достигнет значения $U'_C \equiv A$. Время, в течение которого U_C достигнет U'_C, зависит от величины тока $I^{з}_{2}$. Чем больше будет зарядный ток, определяемый величиной $I^{з}_{2}$, тем меньше будет время нарастания U_C до U'_C, а следовательно, и время действия реле $t_з$.

В обоих вариантах интегрального органа принимаются меры для исключения влияния на величину тока $I_п$ напряжения U_C, меняющегося в процессе заряда. Ток $I_п$ должен зависеть только от величины I_2. На время действия схемы оказывают влияние токи утечек, имеющие место в конденсаторе и зависящие от температуры. Схема с перезарядом конденсатора в меньшей мере подвержена искажающему влиянию токов утечек и поэтому считается лучшей.

Преобразователь. В обоих вариантах ток $I_п = I^{з}_{2}$ получается от преобразователя *3*. Преобразование тока I_2 в ток $I^{з}_{2}$ может осуществляться различными способами. Простейшая схема диодного преобразователя показана на рис. 15-31, *а*. Как видно из схемы, к диодам преобразователя *3* подводятся два напряжения: напряжение $U_п$, с потенциометра запирающее диоды, напряжение $U_ф = kI_2$ от фильтра $Ф_2$, открывающее их. Когда $U_ф = 0$, диоды заперты и ток преобразователя *1* отсутствует. При появлении I_2 возникает $U_ф$. Когда оно станет больше напряжения потенциометра между точками A и a, диод $Д_1$ открывается и возникает ток $I_{п1} = \frac{U_ф - U_{A-a}}{R_1}$. При $U_ф > U_{A-b}$ открываются два диода $Д_1$ и $Д_2$ и т. д. Величина тока $I_п$ зависит от числа открывающихся диодов, а последнее зависит от величины $U_ф \equiv I_2$. Параметры сопротивлений подобраны так, что при подводе к преобразователю тока I_2 выходной ток его $I_п = I^{з}_{2}$. Этим током и осуществляется заряд конденсатора C.

Рассмотренное реле, так же как и реле РТФ-6, имеет два токовых элемента, работающих на выпрямленном токе I_2, получаемом от выпрямителя *2'*. Один элемент *7* сигнальный, а второй *6* — для защиты от внешних к. з. — работает на выносное реле времени. Кроме того, имеется аналогичным образом выполненное пусковое реле *2*,

осуществляющее пуск зависимого реле. На рис. 15-31, *а* показано одно из этих реле. Блок-схема реле из указанных элементов приведена на рис. 15-31, *б*.

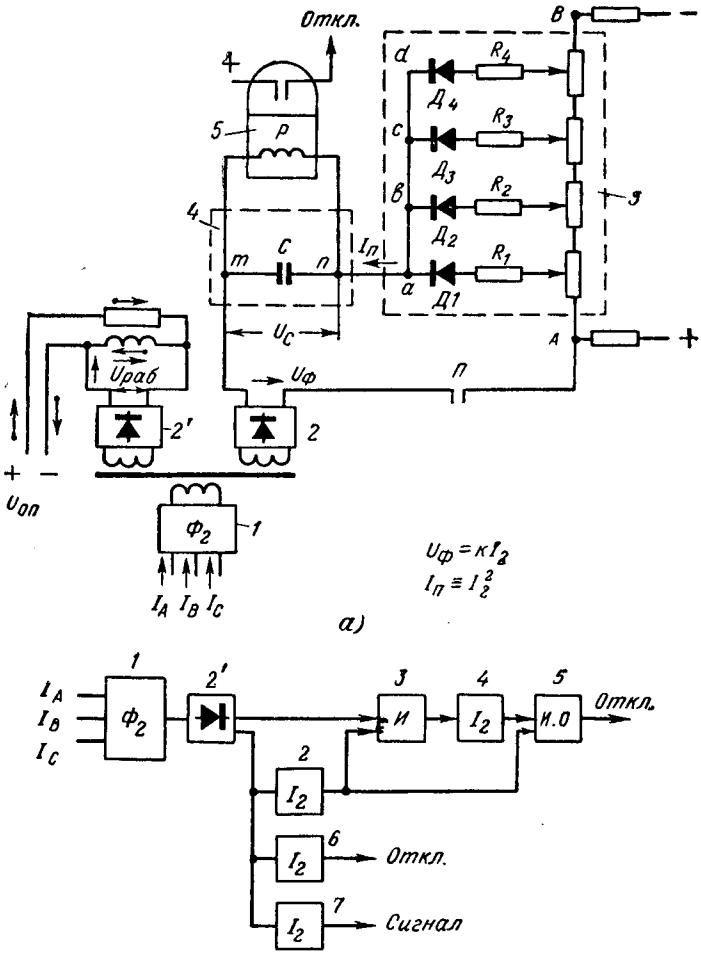
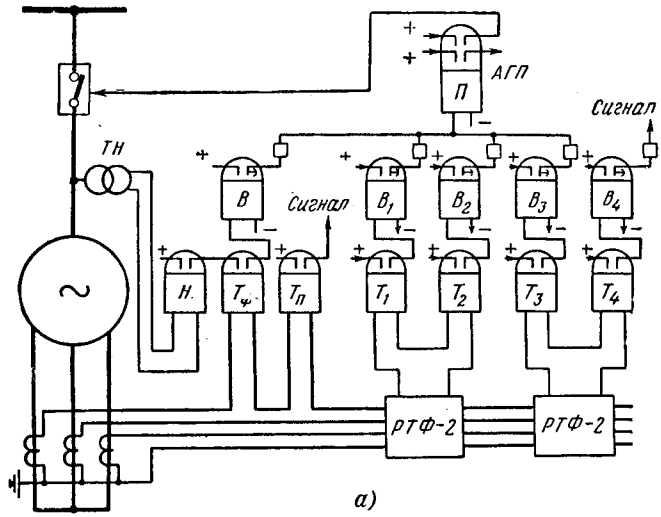


Рис. 15-31. Упрощенная принципиальная схема зависимой защиты, реагирующей на I_2.

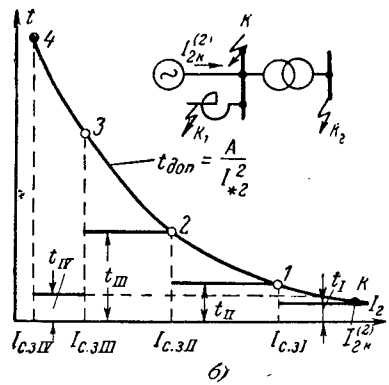
а — реле, основанное на заряде конденсатора; *б* — структурная схема защиты.

Ступенчатая защита обратной последовательности с независимой характеристикой. Ступенчатая защита рекомендуется к применению [Л. 103] на генераторах с непосредственным охлаждением обмоток, пока не появятся достаточно совершенные реле с зависимой характеристикой.

Схема и характеристика четырехступенчатой защиты показаны на рис. 15-32. Три ступени защиты действуют на отключение, четвертая ступень — на сигнал. Каждая ступень имеет пусковое токовое реле (T_1, T_2, T_3, T_4) и свое реле времени (B_1, B_2, B_3, B_4). Пусковые реле питаются от двух фильтров обратной последовательности типа РТФ2 и реагируют на ток I_2.



а)



б)

Рис. 15-32. Токовая защита обратной последовательности со ступенчатой характеристикой с приставкой от симметричных к. з.

а — схема; *б* — характеристика $t = f(I_2)$.

Первая ступень (T_1, B_1) предназначена для отключения к. з. на выводах генератора. Вторая ступень (T_2, B_2) служит для резервирования отключения несимметричных к. з. в сети. Третья ступень (T_3, B_3) является защитой ротора от несимметричных режимов с токами I_2, при которых ликвидация несимметрии вручную невозможна, так как допустимое время относительно мало ($t_{доп} < 2 \div 3$ *мин*). Четвертая ступень (T_4, B_4) работает на сигнал, предупреждая де-

журного о появлении несимметрии с $I_2 > I_{2\,\text{длит. доп. макс}}$. Характеристика защиты приведена на рис. 15-32, *б*.

Для блокировки защиты от замыканий на землю генератора (§ 15-4, б) устанавливается пятое реле РТ-40/0,6; оно подключается дополнительно к одному из фильтров (на рис. 15-32 не показан).

Выбор уставок (рис. 15-32, *б*). Исходной для выбора уставок является тепловая характеристика ротора по выражению (15-1а), в котором величина A принимается по данным завода, соответственно типу генератора (см. табл. 15-3).

Первая ступень. Ток срабатывания первой ступени должен обеспечивать ее надежное действие при двухфазных к. з. на выводах генератора; точка K на рис. 15-32, *б*. В этом случае наибольший ток обратной последовательности в генераторе будет при работе генератора изолирован от сети. Величина этого тока в относительных единицах

$$I_{*2\text{к}}^{(2)} = \frac{1}{x_d'' + x_2},$$

где x_d'' — сверхпереходное реактивное сопротивление генератора; x_2 — сопротивление обратной последовательности.

С учетом этого

$$I_{\text{с.з}I} = \frac{I_{2\text{к}}^{(2)}}{k_\text{ч}}, \qquad (15\text{-}30)$$

где $k_\text{ч}$ — коэффициент чувствительности.

Выдержка времени t_I не должна превышать допустимого времени по условию нагрева ротора при к. з. на выводах генератора. Подставляя в (15-1а) $I_{2*} = I_{2\text{к. макс}}^{(2)}$, получаем:

$$t_I = t_\text{доп} = \frac{A}{(I_{2\text{к. макс}}^{(2)})^2}.$$

Если это время не удается согласовать с защитами присоединений отходящих от шин электростанций, то необходимо ограничить зону действия первой ступени, так чтобы она не работала при к. з. за трансформаторами и реакторами отходящих линий. Исходя из этого, в выражении (15-30) допускается принимать $k_\text{ч} = 1{,}2$.

Вторая ступень. Выдержка времени t_{II} должна равняться $t_\text{доп}$ при $I_{2*} = I_{\text{с.з}I}$ (точка *1*), т. е.

$$t_{II} = \frac{A}{I_{\text{с. з}I*}^2}. \qquad (15\text{-}30\text{а})$$

Ток срабатывания выбирается из условия достаточной чувствительности для резервирования защит присоединений, отходящих от генераторных шин:

$$I_{\text{с.з}II} = \frac{I_{2\text{к}}}{k_\text{ч}}, \qquad (15\text{-}30\text{б})$$

где $I_{2\text{к}}$ — ток обратной последовательности при к. з. в конце зоны (в точке K_1).

Если t_{II} по условию (15-30а) мало и не обеспечивает селективности с защитами линий, отходящих от шин, то зону действия второй ступени приходится ограничить для обеспечения необходимой селективности, уменьшая $k_\text{ч}$.

Если $t_{\text{II}} > t$ защит присоединений, отходящих от генераторных шин, то $I_{\text{с.з.II}}$ выбирается из условия чувствительности при к. з. в конце резервируемой

зоны по (15-30б), в котором $I_{2к}$ соответствует наименьшему значению тока I_2, проходящего по генератору, при двухфазном к. з. в конце присоединения с наибольшим сопротивлением.

Третья зона. Выдержка времени t_{III} выбирается по $t_{доп}$ при $I_{2*} = I_{с.з.II}$ (точка *2*):

$$t_{III} = t_{доп} = \frac{A}{I^2_{с.зII}}.$$

Ток срабатывания третьей ступени выбирают, исходя из ее назначения — отключать генератор при токах I_2, при которых $t_{доп} \leqslant 2 \div 3$ *мин*. С учетом этого $I_{с.з.\,III} = \sqrt{\frac{A}{120}}$.

Четвертая ступень действует на сигнал. Защита должна действовать при токе $I_2 > I_{2длит.макс.доп}$. С учетом этого $I_{с.з.IV} = I_{2длит.макс.доп} = (0{,}05 \div 0{,}1)\, I_{ном.г}$. Выдержка времени четвертой ступени t_{IV} выбирается минимальной, но больше времени отключения к. з. в сети. Обычно принимается $t_{IV} = 5 \div 9$ *сек*.

Рассмотренная ступенчатая защита позволяет обеспечить требования к защите от перегрузки и требования по чувствительности и селективности при внешних к. з. Недостатком защиты является многорелейность, недостаточное использование перегрузочной возможности генератора и неинтегральность характеристики, но, несмотря на это, многоступенчатая защита является лучшей из практически осуществимых вариантов этой защиты.

На генераторах 60 *Мвт* и меньшей мощности по соображениям упрощения применяется двухступенчатая защита. Первая ступень действует на отключение с $t_1 = t_{доп}$ при к. з. в точке *К* на генераторных шинах и срабатывает при токах I_2, при которых $t_{доп} < 2$ *мин*, отсюда $I_{с.з1} = A/120$. Вторая ступень работает на сигнал с уставками сигнального комплекта четырехступенчатой защиты.

Защита от внешних трехфазных к. з. и симметричных перегрузок. Защита обратной последовательности не действует при трехфазных к. з. и симметричных перегрузках, поскольку при этом виде повреждения и ненормальном режиме $I_2 = 0$. В связи с этим для отключения трехфазных к. з. необходимо предусматривать дополнительный комплект защит. Он выполняется в виде однофазной максимальной защиты с блокировкой минимального напряжения (рис. 15-32). В дополнительный комплект входят токовое реле $T_ф$, включенное на ток одной из фаз, и реле минимального напряжения *Н*, включенное на одно из междуфазных напряжений. Оба реле надежно реагируют на трехфазные к. з., поскольку изменение тока и напряжения во всех фазах имеет в этом случае одинаковый характер. Защита действует с выдержкой времени, для чего предусмотрено реле времени *В*. Поведение и чувствительность комплекта и защиты от трехфазных к. з. во всем аналогичны поведению и чувствительности максимальной защиты, рассмотренной в § 12-2, а.

Для защиты от симметричных перегрузок устанавливается токовое реле $T_п$ в одной фазе согласно § 15-5,в.

Уставки реле комплекта от трехфазных к. з. выбираются так же, как и для максимальной защиты с пуском от реле минимального напряжения.

д) Оценка защит от сверхтоков и несимметричных режимов

Максимальная защита с пуском по напряжению является достаточно простой защитой от внешнего к. з. Она не действует при перегрузках, не сопровождающихся значительным понижением напряжения, что является ее положительным свойством. Существенным дефектом защиты является недостаточная чувствительность к удаленным и особенно несимметричным к. з. на присоединениях, отходящих от генераторных шин. По своему принципу действия максимальная защита не может реагировать на несимметричные режимы, если они не сопровождаются увеличением токов до $I_{с.з}$ и понижением напряжения на зажимах генератора до $U_{с.з}$. В настоящее время максимальная защита с пуском по напряжению применяется на генераторах с косвенным охлаждением мощностью до 30 *Мвт* включительно, где не требуется защит от несимметричных режимов. На генераторах большей мощности она используется в качестве защиты от симметричных к. з. в однофазном исполнении (см. § 15-5, г). Наилучшей следует признать схему с комбинированным пуском, которая обладает значительно большей чувствительностью (по напряжению) при несимметричных к. з. и несколько более чувствительна к симметричным повреждениям.

На генераторах 60 *Мвт* и больше в качестве защиты от несимметричных режимов должна применяться токовая защита обратной последовательности в сочетании с защитой от внешних трехфазных к. з., выполняемой в виде однофазной приставки. Защита I_2 обладает высокой чувствительностью к несимметричным к. з., не реагирует на нагрузку и качания. Защита обратной последовательности с зависимой характеристикой обеспечивает достаточно совершенную защиту ротора от нагрева в несимметричных режимах.

15-6. ЗАЩИТА ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ ОТ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Выше указывалось, что при сбросе нагрузки на гидрогенераторах напряжение на их зажимах резко возрастает и достигает 150% номинального и больше. Такое напряжение опасно для изоляции статора и должно быть ликвидировано за несколько секунд. При правильно выбранных параметрах регулирования возбуждения и наличии специальных устройств для быстрого развозбуждения генератора повысившееся напряжение удается снизить до нормального в течение допустимого времени. Однако в случае неисправности этих устройств повышенное напряжение останется, создавая опасность повреждения генератора. Поэтому на гидрогенераторах устанавливается защита от повышения напря-

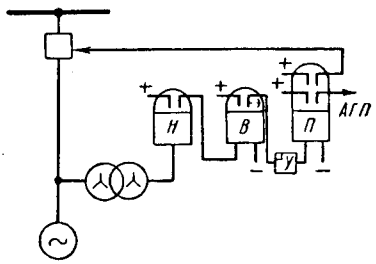


Рис. 15-33. Защита от повышения напряжения гидрогенератора.

жения (рис. 15-33), действующая на отключение выключателя и АГП генератора. Защита состоит из одного реле напряжения H и реле времени B.

Напряжение срабатывания защиты выбирается равным $U_{с.з} = (1{,}5 \div 1{,}7)U_{ном}$, поскольку такое напряжение признается опасным для генератора даже кратковременно. На реле времени защиты устанавливается небольшая выдержка времени, 0,5—1 *сек*.

Как показывает опыт, за это время регулирование возбуждения успевает снизить повысившееся напряжение до значения, меньшего $U_{воз}$ реле H, что предупреждает срабатывание защиты.

15-7. ЗАЩИТА РОТОРА

а) Защита обмотки ротора от замыкания на корпус (на землю) во второй точке

При появлении замыкания на землю в одном месте обмотки ротора турбогенераторы часто оставляют в работе, поскольку через место повреждения ток не проходит и напряжение на зажимах ротора остается нормальным.

Двойное замыкание на землю (рис. 15-34) представляет опасность для генератора, и поэтому по «Правилам электротехнических установок» при появлении одного замыкания на землю на оставленном в работе генераторе должна включаться защита от второго замыкания на землю. Обычно на станции имеется один комплект защиты, приспособленный к удобному и быстрому подсоединению его к любому генератору станции.

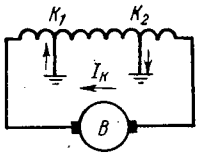


Рис. 15-34. Замыкание на землю обмотки ротора в двух точках.

Принцип действия защиты от второго замыкания на землю показан на рис. 15-35. Параллельно обмотке ротора включается потенциометр $r_п$. На потенциометре находится точка K_1', потенциал которой равен потенциалу места первого замыкания в обмотке ротора (точка K_1). Между точкой K_1' и землей включается обмотка токового реле T.

Схема представляет собой четырехплечий мостик с реле в его диагонали. При равенстве потенциалов точки повреждения K_1 и точки потенциометра K_1' сопротивления плеч моста удовлетворяют условию $r_1/r_2 = r_{1п}/r_{2п}$, при этом ток в реле T равен нулю и защита не действует. В случае появления второго замыкания на землю, например в точке K_2, подобранное соотношение сопротивлений плеч моста нарушается, вследствие чего потенциалы точек K_1' и K_1 становятся неравными и в диагонали моста (в реле) появляется ток, величина которого зависит от степени небаланса плеч. Если ток в реле $I_р > I_{с.р}$, то защита приходит в действие.

Чем дальше от точки K_1 возникает второе повреждение K_2, тем больше будет ток в реле. Защита имеет мертвую зону,

расположенную вблизи точки K_1 (между точками *а* и *б*). Если второе замыкание (K_2) окажется в пределах этой зоны, то ток $I_р$ будет меньше $I_{с.р}$ и защита не сможет действовать. Точка K_1 на потенциометре защиты находится опытным путем по милливольтметру постоянного тока, который измеряет напряжение на обмотке реле *Т*. Движок потенциометра передвигается до тех пор, пока показание вольтметра не станет равным нулю, что указывает на балансировку плеч и отсутствие тока $I_р$.

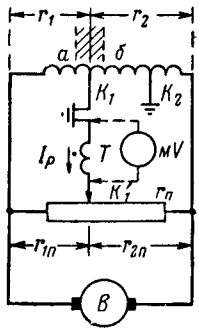


Рис. 15-35. Принцип действия защиты обмотки ротора от замыкания на землю в двух точках.

Принципиальная схема защиты показана на рис. 15-36. При замыкании на землю в одной точке, даже при наличии баланса плеч, через реле непрерывно протекает переменный ток I', обусловленный неравномерностью воздушного зазора между статором и ротором. Вследствие этой неравномерности величина магнитного потока, пронизывающего обмотку ротора, пульсирует при вращении ротора. Эта пульсация потока вызывает в обмотке ротора э. д. с., обусловливающую появление переменного тока I' в цепи реле. Под влиянием тока I' реле может срабатывать при отсутствии второго замыкания.

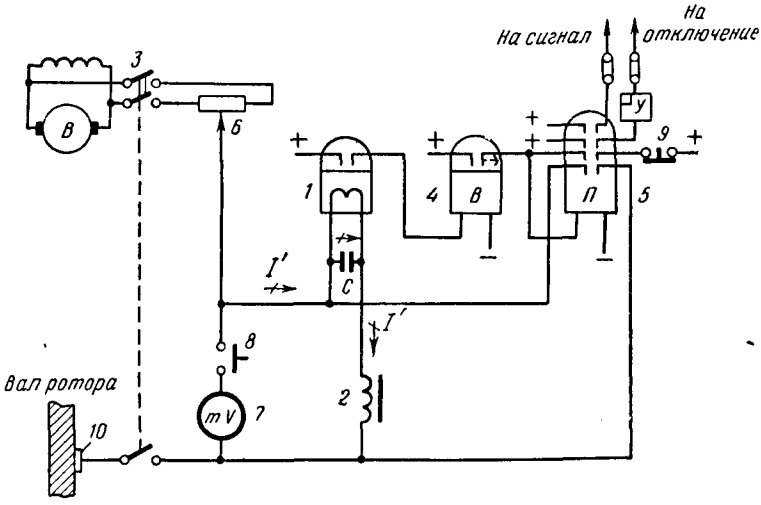


Рис. 15-36. Схема защиты обмотки ротора от замыкания на землю в двух точках, не реагирующая на переменную составляющую тока ротора.

Для предупреждения неправильной работы защиты последовательно с обмоткой реле включается дроссель *2*. Сопротивление дросселя подбирается таким образом, чтобы величина переменного тока

I' была меньше $I_{с.р}$ реле. Для постоянного тока сопротивление дросселя мало, и поэтому оно не оказывает существенного влияния на величину этого тока.

Для повышения надежности отстройки защиты от переменного тока I' параллельно обмотке реле *1* включается конденсатор *С*, через который замыкается большая часть тока I'. При появлении второго замыкания на землю весь ток повреждения, являющийся постоянным, протекает по реле, поскольку конденсатор не пропускает постоянный ток.

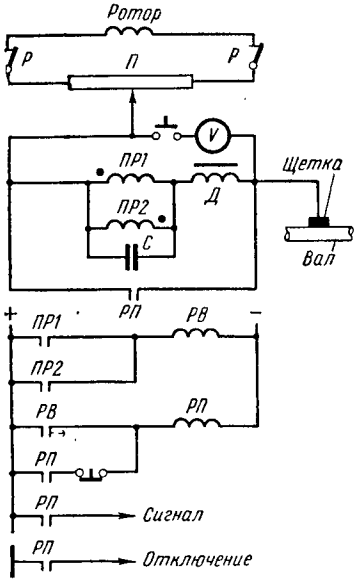


Рис. 15-37. Защита ротора от замыкания на землю в двух точках типа КЗР-2.

Обмотка реле *1* присоединяется не непосредственно на землю, а на вал ротора, поскольку замыкание обмотки происходит также не непосредственно на землю, а на корпус ротора. Для подсоединения к валу устанавливается специальная щетка *10*. Защита имеет реле времени *4*, на котором устанавливается выдержка времени 0,5—1 *сек*. Замедление защиты предупреждает ложную работу ее при внешних к. з. в сети, а также нежелательное действие при неустойчивых замыканиях в роторе.

Реле *5* действует на отключение или подает сигнал о действии защиты и шунтирует обмотку реле *1*, которая не рассчитана на длительный ток.

Для удобного присоединения цепей защиты к поврежденному генератору устанавливается рубильник *3*. Вольтметр *7* и кнопка *8* служат для настройки защиты, а кнопка *9* для деблокировки схемы после срабатывания защиты.

Чувствительность защиты зависит не только от тока срабатывания реле *1*, но и от сопротивлений реле и потенциометра *6*, влияющих на величину тока повреждения. Чем меньше их сопротивление, тем больше ток в реле и выше чувствительность защиты. Для уменьшения мертвой зоны желательно иметь возможно большую чувствительность защиты. Опыт эксплуатации показывает, что при потенциометре с $r_п = 50 \div 100$ *ом* и уставке на реле 50—100 *ма* защита обладает достаточной для практики чувствительностью. Расчет параметров защиты приведен в [Л. 2]. Промышленность выпускает комплектное устройство КЗР-2, выполненное по схеме, показанной на рис. 15-37.

Для повышения чувствительности в КЗР-2 в качестве реагирующего органа вместо реле *1* используются два поляризованных реле *ПР1* и *ПР2*. Одно из них действует при токе повреждения, когда

потенциал точки K_1 больше K_1', а второе — при токе обратного направления, когда потенциал точки K_1' больше K_1.

Оценка защиты. Недостатками защиты являются возможность неправильного действия ее при к. з. в цепи статора, наличие мертвой зоны и непригодность схемы в случае, если первое замыкание на землю произошло на конце обмотки ротора.

Несмотря на несовершенство схемы, она имеет широкое распространение на генераторах ввиду своей простоты. Опыт эксплуатации показал, что при повреждениях в роторе рассмотренная защита действует четко.

б) Защита ротора от перегрузки током

Мощные турбогенераторы 100 *Мвт* и выше с непосредственным охлаждением проводников обмоток статора и ротора имеют в отличие от генераторов малой мощности меньшую перегрузочную способность, поэтому при перегрузках ротора, когда $I_{рот} > I_{рот.ном}$, обмотка ротора мощных турбогенераторов нагревается быстрее и их тепловая характеристика $t_д = f(I_{рот})$ идет ниже, чем у машин малой мощности. Так, например, у небольших турбогенераторов при двукратном токе в роторе допустимое время $t_{доп} \geqslant 1$ *мин*, в то время как для мощных машин типа ТВФ $t_{доп} = 30$ *сек*, а для ТВВ и ТГВ — 20 *сек* (см. табл. 15-3). За такой промежуток времени (20—30 *сек*) дежурный персонал не сможет принять необходимых мер по ликвидации перегрузки или отключению генератора.

В связи с этим для мощных турбогенераторов необходима автоматически действующая защита ротора от перегрузки его током, предупреждающая повреждение изоляции обмотки ротора от чрезмерного нагрева ее повышенным током.

Перегрузка ротора возникает при работе регулятора или устройства форсировки возбуждения. Максимальное значение перегрузки определяется кратностью тока форсировки возбуждения. В Советском Союзе максимальное значение тока форсировки возбуждения («потолок» возбуждения) принимается равным $2I_{рот.ном}$. Продолжительная форсировка, опасная для ротора, может возникнуть при недостатке реактивной мощности генераторов для восстановления нормального напряжения в системе или при неисправности регулятора возбуждения генератора, вызывающей увеличение тока в роторе.

Защита с зависимой от тока выдержкой времени. Наиболее совершенной защитой от перегрузки ротора является токовая защита с интегрально зависимой характеристикой $t_з = f(I_р)$, соответствующая перегрузочной характеристике ротора. Опытные экземпляры такой защиты типа РЗР-1 изготовлены заводом ЧЭАЗ и проходят эксплуатационную проверку. Защита РЗР-1 выполнена на полупроводниках. Характеристика времени действия защиты соответствует перегрузочной характеристике ротора и выражается

приближенно уравнением

$$t_з = t_{доп} = \frac{B}{I^n_{*рот} - 1}, \qquad (15\text{-}31)$$

где $I_{*рот} = I_{рот}/I_{рот.ном}$;
B — постоянная величина; n — величина постоянная для определенного диапазона тока $I_{*рот}$, она колеблется от четырех до двух.

Защита (рис. 15-38) состоит из преобразователя, преобразующего $I_{рот}$ в $I = I^n_{*рот} - 1$, и интегрирующего элемента, создающего зависимую выдержку времени $t_з$ по выражению (15-31) с учетом изменения тока $I_{рот}$ в течение времени действия защиты $t_з$. В качестве интегратора используется конденсатор, процесс заряда которого приближенно совпадает с процессом нагрева обмотки ротора. Защита состоит из двух органов: сигнального 2 — действующего при $I_{рот} > I_{рот.ном}$ на сигнал, и интегрально зависимого 4 — действующего с первой ступенью времени на развозбуждение и со второй — на отключение генератора.

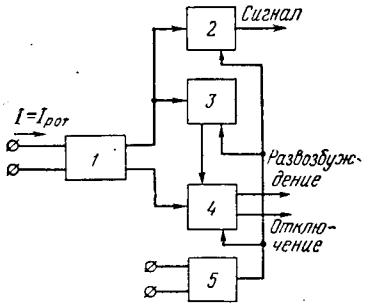


Рис. 15-38. Структурная схема зависимой защиты ротора от перегрузки (типа РЗР-1).

Орган с интегрально зависимой выдержкой времени имеет пусковое реле 3, разрешающее действовать этому органу при увеличении тока ротора до определенного значения: $I_{рот} = I_{с.з}$.

Пусковое реле выполнено в виде схемы сравнения величины (см. § 2-15, рис. 2-45) напряжения $U_р \equiv I_{рот}$ с величиной опорного напряжения $U_{оп}$. Разность $U_р - U_{оп}$ подводится к магнитоэлектрическому реле, которое срабатывает при $U_р > U_{оп}$, т. е. при $I_{рот} > I_{с.з}$.

Зависимый орган состоит из двух указанных выше элементов: преобразователя и интегратора. Оба элемента выполняются по схемам, аналогичным рассмотренным в § 15-5, г. Сигнальное реле выполняется так же, как и пусковое реле; для создания выдержки времени применяется выносное реле времени.

Защита питается током $I \equiv I_{рот}$, получаемым от трансформатора постоянного тока I типа И-514. Трансформатор постоянного тока уменьшает ток ротора до значения, соответствующего параметрам защиты.

Ток I (от трансформатора тока) поступает в разделительный элемент 1, где он направляется по двум независимым каналам: по одному — в сигнальное и пусковое реле 2 и 3, по второму — в орган с зависимой выдержкой времени 4.

Защита с независимой выдержкой времени. До окончательной разработки и серийного выпуска зависимого реле применяется упрощенная, менее совершенная схема защиты с независимой характери-

стикой, реагирующей на напряжение $U_{рот}$ на зажимах ротора. Это напряжение пропорционально $I_{рот}$, так как $U_{рот} = I_{рот}R_{рот}$, где $R_{рот}$ — сопротивление обмотки ротора.

Схема подобной защиты показана на рис. 15-39. Пусковое реле напряжения *РН* питается от делителя напряжения *П*, включенного параллельно обмотке ротора *Р*, поэтому напряжение на зажимах реле $U_р \equiv U_{рот}$ и $I_{рот}$.

Защита выполняется с двумя реле времени $РВ_1$ и $РВ_2$. Первое с $t_{з1} = t_{доп}$ посылает импульс на отключение генератора. Второе действует на снижение или снятие форсировки возбуждения с $t_{з2} = t_{з1} - \Delta t$.

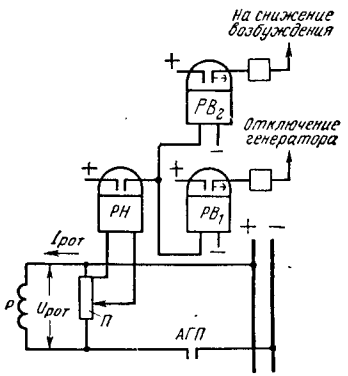


Рис. 15-39. Защита ротора от перегрузки с независимой от тока выдержкой времени.

Уставки защиты. Защита должна срабатывать при таком токе ротора, при котором ликвидация перегрузки дежурным персоналом невозможна из-за малого значения $t_{доп}$. Принимая последнее равным 1,5—2 *мин*, по тепловой характеристике ротора (рис. 15-31) находим, что защита должна действовать при $I_{рот} = (1{,}4 \div 1{,}5)I_{рот.ном}$. Исходя из этого

$$U_{с.з} = 1{,}5I_{рот.ном}R_{рот}. \quad (15\text{-}32)$$

Выдержка времени $РВ_1$ должна удовлетворять условию $t_{з1} \leqslant t_{доп}$ при максимальной возможной перегрузке.

Последняя равна полной форсировке возбуждения, которая, как указывалось, в общем случае достигает $2I_{рот.ном}$. По тепловой характеристике ротора определяется, что при этом токе $t_{доп} \approx 20 \div 30$ *сек*. Отсюда $t_{з1} = 20 \div 30$ *сек*.

На генераторах с ионным и высокочастотным возбуждением ротор питается выпрямленным током. Кривая этого тока имеет пульсирующий характер и содержит переменные составляющие разной частоты. Форма кривой $I_{рот}$ нестабильна и может меняться при различных режимах или неисправностях в системе возбуждения. Это необходимо учитывать при выборе пускового реле напряжения защиты. Чувствительность пускового реле не должна меняться с изменением формы кривой выпрямленного тока. В этих случаях рекомендуется применять электромагнитные реле без выпрямителей типа РН 53/400.

Для исключения ложной работы защиты при кратковременных перегрузках, не опасных для ротора, необходимо во всех схемах защиты иметь быстрый возврат пускового реле при спаде тока $I_{рот}$ до величины, близкой к $I_{с.з}$. Чтобы обеспечить это условие, пусковое реле защиты должно иметь коэффициент возврата, близкий к 1. Обычно добиваются $k_{воз} = 0{,}95$—$0{,}98$.

15-8. ПОЛНАЯ СХЕМА ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРА

В качестве примера на рис. 15-40 приведена полная схема защиты генератора средней мощности, 60—100 тыс. *квт*. Для защиты от повреждений в статоре генератора предусмотрены: продольная дифференциальная защита *1* в трехфазном исполнении с реле типа РНТ-565; поперечная дифференциальная защита *2*; защита от замы-

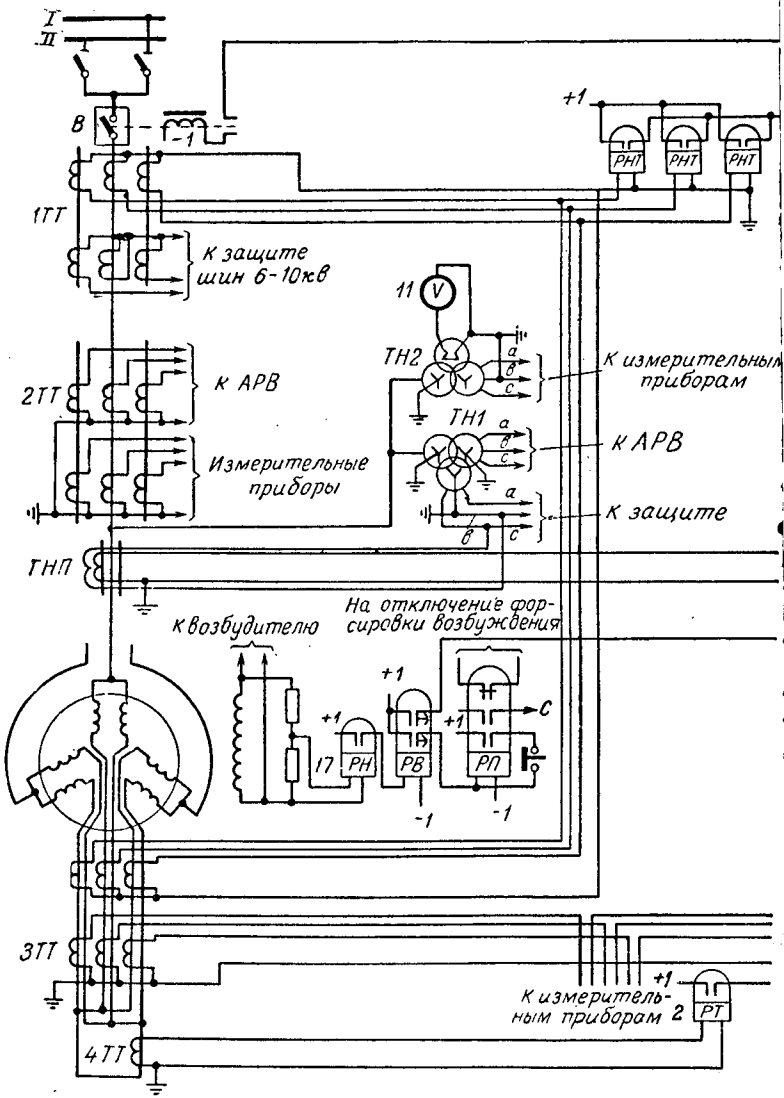
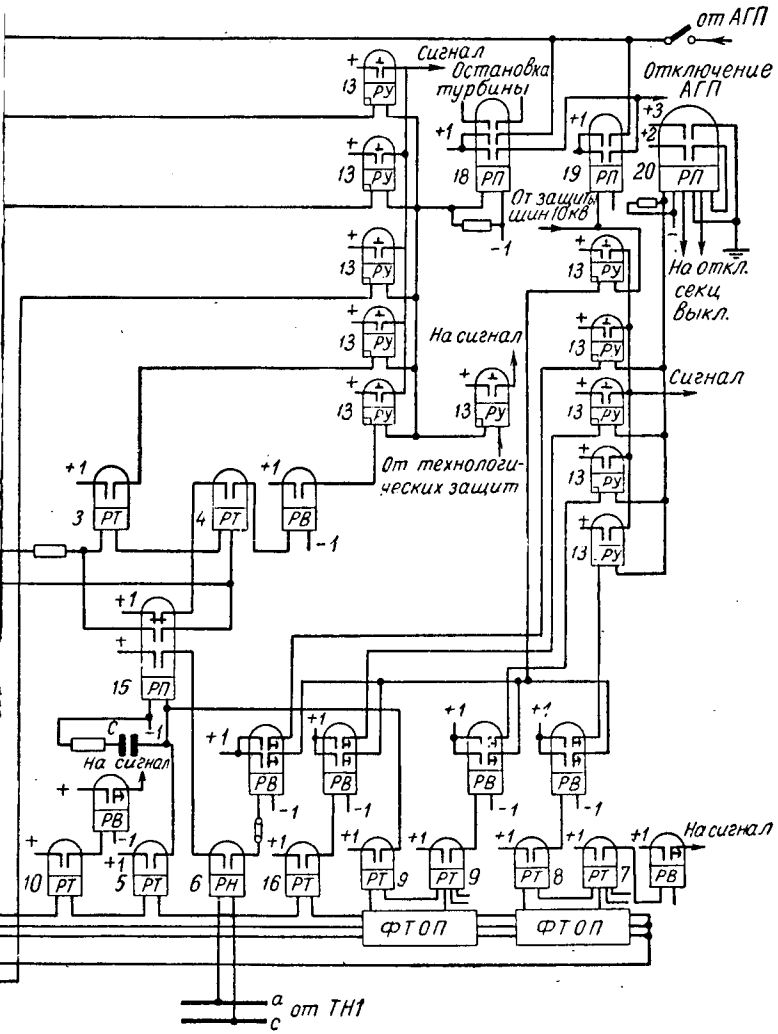


Рис. 15-40. Полная схема защиты турбогенератора

каний на землю с ТНП с подмагничиванием с грубым и чувствительным реле *3* и *4*. В качестве защиты от внешних трехфазных к. з. устанавливается однофазная максимальная токовая защита *5* с блокировкой минимального напряжения *6*. От несимметричных перегрузок и внешних к. з. предусмотрена трехступенчатая защита обратной последовательности реле *7*, *8* и *9*. Защита от симметричной перегрузки осуществлена токовым реле *10* с действием на сигнал.



ботающего на шины генераторного напряжения.

Дополнительно для контроля за изоляцией статора при работе генератора на холостом ходу предусмотрен вольтметр *11*, включенный на напряжение $3U_0$ трансформатора напряжения *TH2*.

Блокировка защиты от замыкания на землю осуществляется промежуточным реле *15*. Это реле пускается при несимметричных к. з. от реле *9*, а при симметричных — от реле *5*. Для задержки возврата блокировки после отключения к. з. обмотка промежуточного реле *15* шунтируется конденсатором *C*.

Защита ротора от перегрузки выполняется с помощью реле напряжения *17* и реле времени *PB*. Для повышения надежности в схеме предусмотрены два выходных промежуточных реле *18* и *19*. На одно (*18*) действуют основные защиты, на второе (*19*) — резервные защиты генератора.

В выходных цепях каждой защиты устанавливаются сериесные указательные реле *13*, фиксирующие действие защит. При одновременном действии двух или трех защит ток, потребляемый промежуточным реле *18*, делится между тремя указательными реле поровну и может оказаться недостаточным для их работы.

Для увеличения тока в указательных реле до значения, достаточного для их действия в указанном случае, параллельно обмотке реле *18* включено сопротивление.

В токовых цепях дифференциальной защиты предусматривается испытательный блок, позволяющий без пересоединения в цепях произвести измерение токов небаланса в дифференциальных реле. Токовые цепи всех остальных защит заводятся на специальные испытательные зажимы, устанавливаемые на панелях защиты и позволяющие производить необходимые измерения без разрыва цепей.

15-9. ЗАЩИТА СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

а) Включение синхронных компенсаторов в сеть

Синхронный компенсатор (СК) является генератором реактивной мощности. Он устроен и работает как синхронный двигатель, генерирующий реактивный ток. Конструктивное выполнение синхронных компенсаторов сходно с генераторами. Важной особенностью компенсаторов, которую надлежит учитывать при рассмотрении защиты, является их пуск. Наиболее простым способом пуска СК, принятым в СССР, является асинхронный пуск. Он осуществляется включением СК на напряжение сети при отсутствии возбуждения в цепи ротора. В этом случае СК ведет себя как короткозамкнутый асинхронный двигатель. После того как скорость вращения ротора приблизится к синхронной, включается возбуждение и СК втягивается в синхронизм.

В момент включения компенсатора на напряжение сети в нем появляется бросок пускового тока, как и в обычном асинхронном двигателе. Для уменьшения этого тока мощные компенсаторы пу-

скаются через специальный реактор *Р* (рис. 15-41), который шунтируется выключателем *В-2* после затухания пускового тока.

Так же как и генератор, синхронные компенсаторы снабжаются автоматами гашения поля *АГП*, разрывающими цепь возбуждения и замыкающими обмотку ротора на сопротивление.

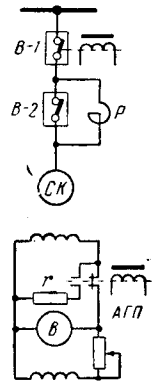


Рис. 15-41. Схема включения в сеть синхронного компенсатора.

б) Защита СК от внутренних повреждений

В компенсаторах возможны такие же повреждения, как и в генераторах. Основными защитами от внутренних повреждений СК являются дифференциальная защита и защита от замыканий на землю, выполняемые по приведенным выше схемам с теми же параметрами. На СК, имеющих пусковой реактор *Р*, последний желательно включать в зону дифференциальной защиты.

Защита от витковых замыканий может выполняться на компенсаторах с параллельными ветвями в фазах, но по соображениям упрощения эта защита обычно не применяется. Все защиты от внутренних повреждений СК должны отключать его от сети и снимать возбуждение отключением *АГП*.

в) Защита СК от ненормальных режимов

Защита минимального напряжения. При исчезновении напряжения компенсатор лишается питания и останавливается. Для предотвращения подачи напряжения на неподвижный СК при наличии на нем возбуждения предусматривается защита минимального напряжения (рис. 15-42). Эта защита должна или отключить остановившийся СК от сети, или подготовить его к самозапуску, отключая *АГП* и дешунтируя реактор (если он имеется). Самозапуск СК предусматривается на подстанциях без дежурного персонала и подразумевает наличие автоматики, включающей *АГП* после появления напряжения и разворота СК.

Защита минимального напряжения состоит из реле минимального напряжения *Н* и реле времени *В* (рис. 15-42). Для выполнения поставленной задачи — отключение СК при исчезновении напряжения — достаточно одного реле минимального напряжения, включенного на линейное напряжение. Но с целью уменьшения вероятности неправильного отключения синхронного компенсатора при неисправности в цепях напряжения целесообразно устанавливать два реле минимального напряжения, включаемые или на разные трансформаторы напряжения, или на разные междуфазные напряжения одного и того же трансформатора, как показано на рис. 15-42. Контакты обоих реле соединяются последовательно. При исчезновении напряжения, питающего СК, оба реле срабатывают. В слу-

чае же нарушения вторичной цепи одной из фаз трансформатора напряжения подействует только одно из двух реле и цепь защиты останется разомкнутой. Схема питания от разных трансформаторов напряжения надежнее, но сложнее.

Если оба реле *Н* питаются от трансформатора напряжения СК (рис. 15-42), то цепь оперативного тока защиты должна заводиться через блокировочные контакты *БК* главного выключателя, автоматически выводящие защиту из действия при отключенном СК. При отсутствии такой блокировки защита минимального напряжения приходила бы в действие в том случае, когда СК отключен от сети, и не позволяла бы произвести обратное его включение.

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения выбирается возможно меньшим с тем, чтобы отключение СК могло происходить только при глубоких понижениях напряжения, могущих вызвать его остановку. «Правила эксплуатации электротехнических установок» рекомендуют принимать $U_{с.р} = 0{,}4U_{ном}$.

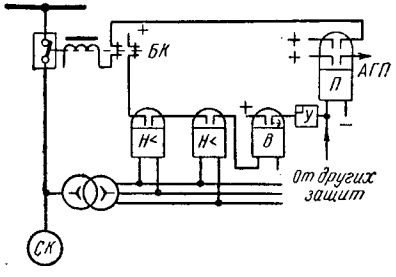


Рис. 15-42. Защита минимального напряжения синхронного компенсатора.

Уставка по времени должна превосходить наибольшие выдержки времени защит, установленных в сети, с которой связан компенсатор. Обычно уставка принимается равной 8—10 *сек*.

Защита от внешних к. з., работающая при повреждении на шинах или неотключившемся присоединении, на синхронных компенсаторах не ставится, так как после отключения источников питания СК теряет напряжение, снижает свои обороты и ток, посылаемый им в место к. з., затухает. Следует также иметь в виду, что при глубоком снижении напряжения во время внешнего к. з. может подействовать защита минимального напряжения, которая произведет отключение СК.

Защита от перегрузки. Длительная перегрузка синхронного компенсатора возможна при продолжительном понижении напряжения, вызывающем действие регулятора напряжения и форсировку возбуждения СК. Для устранения этой перегрузки рекомендуется устанавливать специальное разгрузочное устройство, снижающее ток возбуждения и отключающее регулятор. Это устройство реагирует на ток одной из фаз и действует только в том случае, если перегрузка длится долго — примерно 1 *мин* и больше.

Восстановление нормальной работы регулятора осуществляется вручную или автоматически при помощи реле напряжения, фиксирующего восстановление нормального уровня напряжения.

Кроме разгрузочного устройства, можно устанавливать сигнализацию от перегрузки, осуществляемую, как и на генераторе, при помощи одного токового реле.

Глава шестнадцатая

ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

16-1. ПОВРЕЖДЕНИЯ И НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ, ВИДЫ ЗАЩИТ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

а) Виды повреждений трансформаторов и типы защит [1]

Виды повреждений. Основными видами повреждений в трансформаторах и автотрансформаторах являются:

а) замыкания между фазами внутри кожуха трансформатора и на наружных выводах обмоток;

б) замыкания в обмотках между витками одной фазы (так называемые витковые замыкания);

в) замыкания на землю обмоток или их наружных выводов.

Опыт показывает, что к. з. на выводах и витковые замыкания в обмотках трансформаторов происходят наиболее часто.

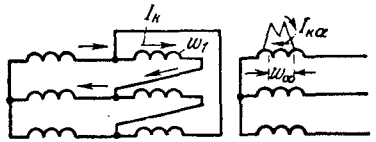


Рис. 16-1. Токи при витковом коротком замыкании в обмотках трансформатора.

Междуфазные повреждения внутри трансформаторов возникают значительно реже. В трехфазных трансформаторах они хотя и не исключены, но маловероятны вследствие большой прочности междуфазной изоляции. В трансформаторных группах, составленных из трех однофазных трансформаторов, замыкания между обмотками фаз практически невозможны.

При витковых замыканиях токи, идущие к месту повреждения от источников питания, могут быть небольшими. Так, например, если принять, что в замкнувшихся накоротко витках ω_α (рис. 16-1) ток к. з. равен $I_{к\alpha}$, то ток повреждения $I_к$, проходящий от источника питания, можно найти из уравнения баланса н. с. трансформатора: $I_к\omega_1 = I_{к\alpha}\omega_\alpha$, откуда $I_к = \frac{\omega_\alpha}{\omega_1} I_{к\alpha}$. Отношение $\omega_\alpha/\omega_1 < 1$, следовательно, ток $I_к < I_{к\alpha}$. Чем меньше число замкнувшихся витков ω_α, тем меньше будет ток $I_к$, приходящий из сети.

В случае замыкания на землю обмотки трансформатора, подключенной к сети с малым током замыкания на землю, ток повреждения определяется величиной емкостного тока сети. Поэтому защиты трансформатора, предназначенные для действия при витковых замыканиях, а также при замыканиях на землю в обмотке, работаю-

[1] Все изложенное ниже в равной мере относится к трансформаторам и автотрансформаторам. Особенности защиты автотрансформаторов будут оговариваться особо.

щей на сеть с изолированной нейтралью, должны обладать высокой чувствительностью.

Для ограничения размера разрушения защита от повреждений в трансформаторе должна действовать б ы с т р о. Повреждения, сопровождающиеся большим током к. з. $I_{к.з}$, должны отключаться без выдержки времени с $t = 0{,}05 \div 0{,}1$ *сек*.

З а щ и т ы о т п о в р е ж д е н и й. В качестве таких защит применяются токовая отсечка, дифференциальная и газовая защиты. В последнее время за рубежом применяется довольно простая защита от замыкания на корпус (кожух) трансформатора.

б) Ненормальные режимы и защита от них

Наиболее частым ненормальным режимом работы трансформаторов является появление в них с в е р х т о к о в, т. е. токов, превышающих номинальный ток обмоток трансформатора. С в е р х т о к и в трансформаторе возникают при внешних к. з., качаниях и перегрузках. Последние возникают вследствие самозапуска электродвигателей, увеличения нагрузки в результате отключения параллельно работающего трансформатора, автоматического подключения нагрузки при действии АВР и т. п.

Внешние к. з. При внешнем к. з., вызванном повреждением на шинах трансформатора или неотключившимся повреждением на отходящем от шин присоединении, по трансформатору проходят токи к. з. $I_{к.з} > I_{ном}$, которые нагревают его обмотки сверх допустимого значения, что может привести к повреждению трансформатора. В связи с этим трансформаторы должны иметь защиту от внешних к. з., отключающую трансформатор для прекращения протекающего по нему тока повреждения. Поскольку внешнее к. з. сопровождается понижением напряжения в сети, защита должна действовать с минимальной выдержкой времени, необходимой для селективности.

З а щ и т а о т в н е ш н и х к. з. осуществляется при помощи максимальной токовой защиты, максимальной защиты с блокировкой минимального напряжения, токовой защиты нулевой последовательности и защиты обратной последовательности. В зону действия защиты от внешних к. з., как правило, должны входить шины подстанций (I участок защиты) и все присоединения, отходящие от этих шин (II участок защиты). Защиты от сверхтоков являются также резервными от повреждений в трансформаторе.

Перегрузка. Перегрузки обычно не сопровождаются значительным понижением напряжения в сети. Поэтому требование ко времени действия защиты от перегрузки определяется только нагревом изоляции обмоток. Масляные трансформаторы допускают длительную перегрузку по току на 5%. В аварийных режимах допускается кратковременная перегрузка в следующих пределах [Л. 100]:

Кратность перегрузки $I_{наг}/I_{ном}$	1,3	1,6	1,75	2	3
Допустимое время перегрузки, *мин* . . .	120	45	20	10	1,5

Из таблицы видно, что перегрузку порядка $(1{,}5 \div 2)\ I_{ном}$ можно допускать в течение значительного времени, измеряемого десятками минут.

Наиболее часто возникают кратковременные, самоликвидирующиеся перегрузки, неопасные для трансформатора ввиду их непродолжительности. Например, перегрузки, вызванные самозапуском электродвигателей или толчкообразной нагрузкой (электропоезда, подъемники и т. п.). Отключения трансформатора при таких перегрузках не требуется.

Более длительные перегрузки, вызванные, например, автоматическим подключением нагрузки от АВР, отключением параллельно работающего трансформатора и т. п., могут быть ликвидированы обслуживающим персоналом, который имеет для этого достаточное время. На подстанциях без дежурного персонала ликвидация длительной перегрузки должна производиться автоматически от защиты отключением менее ответственных потребителей или перегрузившегося трансформатора.

Таким образом, защита трансформатора от перегрузки должна действовать на отключение, только когда перегрузка не может быть устранена персоналом. Во всех остальных случаях защита должна действовать на сигнал.

Защита от перегрузки выполняется, как правило, реагирующей на ток с действием на сигнал или отключение в зависимости от характера обслуживания подстанции.

Повышение напряжения. К числу опасных для трансформаторов ненормальных режимов, возникающих в сетях 500—750 *кв*, относится повышение напряжения. Оно возникает при одностороннем отключении длинных линий с большой емкостной проводимостью или при резонансе, вызванном определенным сочетанием емкости линии и индуктивности шунтирующих реакторов.

Повышение напряжения вызывает увеличение магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора, вследствие чего происходит возрастание тока намагничивания и вихревых токов. Эти токи нагревают обмотку и сердечник трансформатора, что может привести к повреждению изоляции обмоток и «пожару железа» сердечника. Чем больше уровень повышения напряжения, тем меньше время $t_{доп}$, в течение которого оно допускается.

в) Особенности автотрансформаторов

Релейная защита трансформаторов и автотрансформаторов выполняется однотипно. Однако автотрансформаторы имеют некоторые особенности, которые необходимо учитывать при расчете, а в отдельных случаях и при выполнении их защит.

Для сравнения на рис. 16-2, *а* и *б* представлены схемы однофазного понизительного трансформатора и автотрансформатора. Последний можно рассматривать как трансформатор, у которого вторичная обмотка *ax* совмещена с первичной *AX*. Распределение токов в автотрансформаторе и трансформаторе различно [Л. 29].

В трансформаторе первичный ток I_1 проходит по первичной обмотке w_1, а вторичный — I_2 по вторичной w_2.

В автотрансформаторе первичный ток I_1 проходит только по части первичной обмотки автотрансформатора $w_1 - w_2$, называемой последовательной (обмотка aA). Во вторичной обмотке w_2, называемой общей, проходит ток $I_{общ} = I_2 - I_1$.

Ниже отмечены особенности автотрансформатора, имеющие значения для релейной защиты.

1. В отличие от трансформаторов автотрансформаторы характеризуются двумя значениями номинальной мощности: проходной $S_{прох}$ и расчетной $S_{расч}$, называемой также типовой.

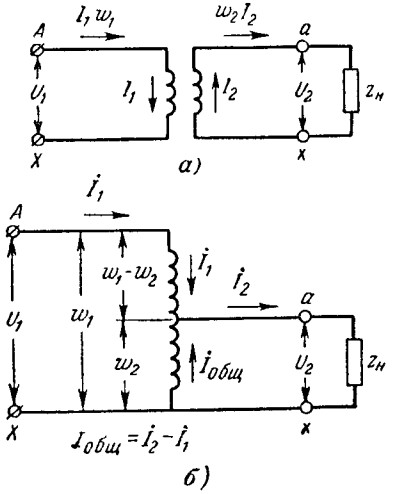


Рис. 16-2. Токораспределение в обмотках трансформатора (*а*) и автотрансформатора (*б*).

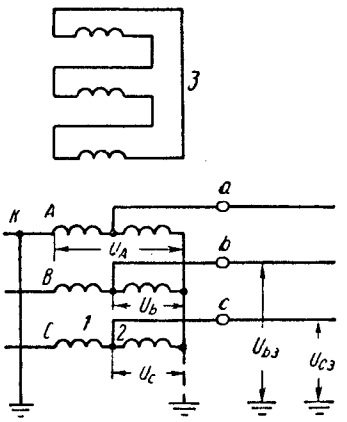


Рис. 16-3. Повышение напряжения в сети среднего напряжения не заземленного автотрансформатора при однофазном к. з. на стороне высшего напряжения.

Проходной называется мощность, передаваемая с первичной на вторичную сторону трансформатора или автотрансформатора:

$$S_{прох} = U_1 I_1 = U_2 I_2. \qquad (16\text{-}1)$$

Расчетной $S_{расч}$ называется мощность, по которой рассчитываются параметры обмоток и магнитопровода трансформатора и автотрансформатора. Она определяется токами, проходящими по обмотке, и напряжениями на их зажимах, т. е. $S_{расч} = U_{обм} I_{обм}$.

Расчетная мощность общей части обмотки $S_{общ} = U_2 (I_2 - I_1)$, а последовательной части $S_{посл} = (U_1 - U_2) I_1$. Сопоставляя оба выражения, можно установить, что $S_{общ} = S_{посл}$. Это означает, что общая и последовательная обмотки автотрансформатора должны рассчитываться по одной и той же расчетной мощности:

$$S_{расч} = I_1 (U_1 - U_2) = I_1 U_1 \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) = S_{прох} \left(1 - \frac{1}{n_a}\right) S_{прох} k_{выг}, \qquad (16\text{-}2)$$

где $S_{прох} = I_1 U_1$ — проходная мощность; n_a — коэффициент трансформации автотрансформатора, равный U_1/U_2; $k_{выг}$ — коэффициент выгодности, показывающий, во сколько раз $S_{расч}$ меньше $S_{прох}$,

$$k_{выг} = \left(1 - \frac{1}{n_a}\right). \qquad (16\text{-}3)$$

2. В автотрансформаторе вторичная цепь электрически связана с первичной, поэтому при замыкании на землю одной фазы в сети высшего напряжения автотрансформатора потенциал (по отношению к земле) неповрежденных фаз в сети среднего напряжения повышается по отношению к земле на величину фазного напряжения сети высшего напряжения (рис. 16-3); напряжение фазы *b* относительно земли на стороне среднего напряжения будет равно $\dot{U}_A + \dot{U}_b$, фазы *C* равно $\dot{U}_A + \dot{U}_c$.

Для предупреждения такого повышения напряжения *нейтраль автотрансформатора должна обязательно заземляться,* как показано пунктиром на рис. 16-3.

3. Трехфазные силовые автотрансформаторы дополняются обмоткой *3*, соединенной в треугольник (рис. 16-3). Эта обмотка служит для компенсации третьих гармоник магнитных потоков, а следовательно, и фазных э. д. с. автотрансформатора.

Дополнительная обмотка имеет магнитную связь с основными обмотками автотрансформатора *1* и *2*. Она обычно выполняется на напряжении 6—10—35 *кв* и используется для питания потребителей или подключения генераторов и СК. Автотрансформатор с компенсирующей обмоткой аналогичен трехобмоточному трансформатору. При наличии третьей обмотки, в некоторых режимах (см. рис. 16-17, *б*), ток $I_{общ}$ равен не разности, а сумме $I_1 + I_2$. Для исключения перегрузки общей обмотки, выбираемой по $S_{расч}$, например в режиме передачи мощности из обмотки *3* только на сторону среднего напряжения, номинальная мощность этой обмотки принимается равной или меньше $S_{расч}$ автотрансформатора.

16-2. ЗАЩИТА ОТ СВЕРХТОКОВ ПРИ ВНЕШНИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

а) Общие положения

Защита от внешних к. з. служит для отключения трансформатора при к. з. на сборных шинах или на отходящих от нее присоединениях (рис. 16-4), если защиты или выключатели этих элементов отказали в работе.

Одновременно защита от внешних к. з. используется и для защиты от повреждения в трансформаторе. Однако по условиям селективности защита от внешних к. з. должна иметь выдержку времени и, следовательно, не может быть быстродействующей. По этой причине в качестве основной защиты от повреждений в трансформаторах она используется лишь на маломощных трансформаторах. На трансформаторах, имеющих специальную защиту от внутренних повреждений, защита от внешних к. з. служит резервом к этой защите на случай ее отказа или вывода из работы.

Наиболее простой защитой от внешних к. з. является токовая максимальная защита. В тех случаях, когда ее чувствительность оказывается недостаточной, применяются более чувствительные токовые максимальные защиты с пуском (блокировкой) по напряжению или же токовые защиты обратной и нулевой последовательностей.

Понизительные трансформаторы, к которым относятся трансформаторы, питающие потребителей, в большинстве случаев защищаются с помощью максимальной защиты. При внешних к. з. по этим трансформаторам проходит ток к. з. от всех генераторов системы (рис. 16-4, *а*). Поэтому кратность тока к. з. получается обычно значительной и достаточной для действия максимальной защиты.

При недостаточной чувствительности простой максимальной защиты устанавливаются более чувствительные защиты: максимальная защита с пуском по напряжению и защита обратной последовательности.

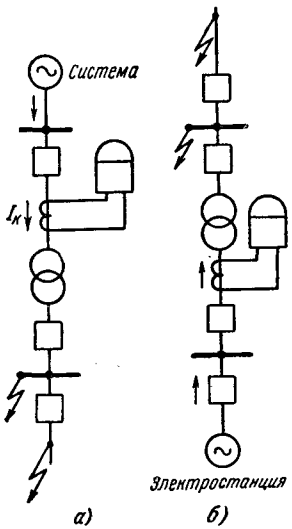


Рис. 16-4. Размещение защиты от сверхтока трансформатора.

а — понизительного; *б* — повысительного.

Повысительные трансформаторы, устанавливаемые на электростанциях, находятся в худших условиях.

Применение на этих трансформаторах максимальной токовой защиты в большинстве случаев оказывается невозможным из-за недостаточной чувствительности последней при к. з. на стороне высшего напряжения.

В этом случае величина тока к. з. $I_к$, проходящего через защиту (рис. 16-4, *б*), определяется мощностью генераторов электростанции, которая соизмерима с мощностью повысительного трансформатора, и поэтому кратность тока к. з. получается небольшой, а чувствительность защиты — недостаточной.

В связи с этим для защиты повысительных трансформаторов от внешних к. з. применяются более чувствительные защиты: защита, реагирующая на ток обратной последовательности; токовая защита нулевой последовательности и максимальная защита с пуском по напряжению.

б) Токовые максимальные защиты трансформаторов

Защита двухобмоточных понижающих трансформаторов. Схема подобной защиты трансформатора с односторонним питанием приведена на рис. 16-5. Защита устанавливается со стороны источника питания с тем, чтобы включить в ее зону действия сам трансформатор.

Для расширения зоны действия максимальной токовой защиты трансформаторы тока располагаются у выключателя.

На двухобмоточных трансформаторах с односторонним питанием (рис. 16-5) защита должна действовать на выключатель *В-1* со стороны источника питания. Однако по соображениям надежности целесообразно воздействовать на оба выключателя: *В-1* и *В-2*, с тем чтобы при внешних к. з. один выключатель резервировался вторым.

Схема соединений трансформаторов тока и реле максимальной токовой защиты должна обеспечивать работу защиты при всех возможных видах к. з. В сети с глухозаземленной нейтралью защита

выполняется по трехфазной схеме, а в сети с изолированной нейтралью — по схеме неполной звезды. Схема с одним реле, включенным на разность токов двух фаз, на трансформаторах с соединением обмоток звезда — треугольник не рекомендуется к применению, так как защита в этом случае не действует при некоторых видах двухфазных к. з. на стороне треугольника (см. § 3-6, ж, рис. 3-17).

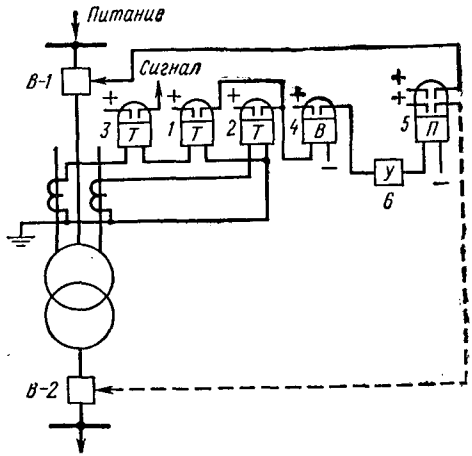


Рис. 16-5. Максимальная токовая защита двухобмоточного трансформатора.

Схема неполной звезды по сравнению с трехфазной имеет меньшую чувствительность при к. з. за трансформатором с соединением обмоток звезда — треугольник. Так, например, если защита установлена на фазах A и C звезды (рис. 16-6), то при к. з. между фазами a и b на стороне треугольника (рис. 16-6) в реле защиты протекает лишь половина полного тока к. з. Для повышения чувствительности защиты можно устанавливать третье реле в общем проводе трансформаторов тока, в котором в этом случае проходит сумма токов поврежденных фаз:

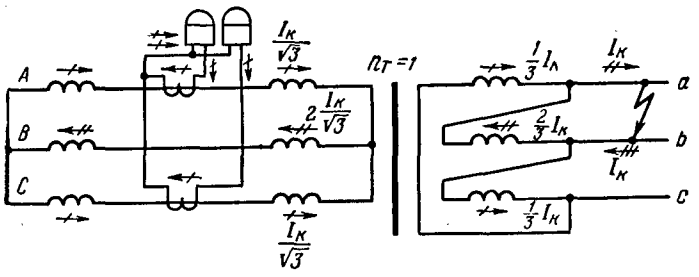


Рис. 16-6. Распределение токов в трансформаторе с соединением обмоток Y/Δ при двухфазном к. з. на стороне треугольника.

$$I_{о.п}=I_A+I_C=2\frac{I_к}{\sqrt{3}}.$$

Ток срабатывания максимальной токовой защиты выбирается исходя из условия, что защита от к. з. не должна действовать при перегрузках, не требующих быстрого отключения трансформатора.

Максимальный ток нагрузки, от которого необходимо отстроить защиту, обычно определяется из рассмотрения двух режимов: отключение параллельно работающего трансформатора или автоматическое подключение нагрузки при действии АВР (рис. 16-7). Оставшийся в работе трансформатор перегружается в первом случае вдвое ($I_{\text{наг.макс}} = 2I_{\text{ном.т}}$), а во втором (рис. 16-7) ток перегрузки равен сумме тока I_1 трансформатора *Т1* и тока подключившейся нагрузки I_2, т. е. $I_{\text{раб}} = I_1 + I_2$, где I_2 — установившийся ток подключившейся нагрузки. В первый момент после переключения нагрузки ее ток превышает установившееся значение за счет самозапуска оставшихся в работе двигателей. Оценивая это увеличение коэффициентом $k_з$, характеризующим кратность токов самозапуска к току I_2, получаем, что максимальный ток трансформатора при действии АВР равен: $I_{\text{наг.макс}} = I_1 + k_з I_2$. Аналогичным образом определяется максимальный ток нагрузки и в других подобных случаях. В общем случае с учетом самозапуска двигателей при восстановлении напряжения после отключения к. з. в сети или после успешного действия АПВ максимальный расчетный ток нагрузки $I_{\text{наг. макс}} = k_з I_{\text{раб. макс}}$, где $I_{\text{раб. макс}}$ — установившееся значение максимального тока нагрузки в условиях нормальной работы; $k_з$ — коэффициент, учитывающий увеличение $I_{\text{раб. макс}}$ в результате самозапуска двигателей, оставшихся в работе при понижении или исчезновении напряжения во время к. з. или бестоковой паузы АПВ либо АВР.

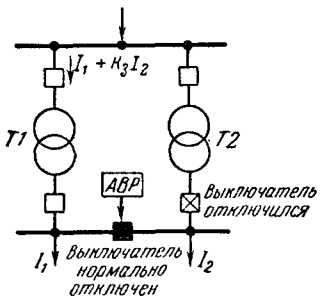


Рис. 16-7. При отключении трансформатора *Т2* и включении от АВР секционного выключателя возникает перегрузка трансформатора *Т1*.

Ток срабатывания находится из условия возврата реле, как и для всех максимальных защит, по выражению:

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_н k_з}{k_{\text{воз}}} I_{\text{раб.макс}}. \qquad (16\text{-}4)$$

Коэффициент чувствительности при к. з. в конце второго участка находится по формуле $k_ч = I_{\text{к.мин}}/I_{\text{с.з}}$. Величина $k_ч$ не должна быть меньше 1,3.

Если чувствительность максимальной защиты оказывается неудовлетворительной, то применяются другие более чувствительные защиты, рассмотренные ниже.

Выдержка времени выбирается из условий селективности на ступень выше наибольшей выдержки времени $t_л$ защит присоединений, питающихся от трансформатора, т. е.

$$t_т = t_л + \Delta t. \qquad (16\text{-}5)$$

Выдержка времени максимальной токовой защиты с ограниченно зависимой характеристикой выбирается, исходя из условия (16-5)

в предположении, что ток в реле равен току к. з., проходящему через трансформатор в случае повреждения в начале линии, питаемой трансформатором. Защиту с ограниченно зависимой характеристикой следует применять в тех случаях, когда посредством ее удается ускорить отключение повреждения в трансформаторе или на шинах.

Защита трехобмоточных понижающих трансформаторов. При внешних к. з. защита трехобмоточных трансформаторов (рис. 16-8) должна обеспечивать селективное отключение только той обмотки трансформатора, которая непосредственно питает место повреждения. Так, например, при коротком замыкании на шинах *III* (рис. 16-8)

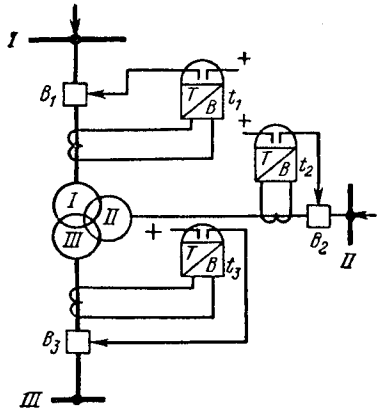


Рис. 16-8. Размещение максимальной токовой защиты на трехобмоточном трансформаторе.

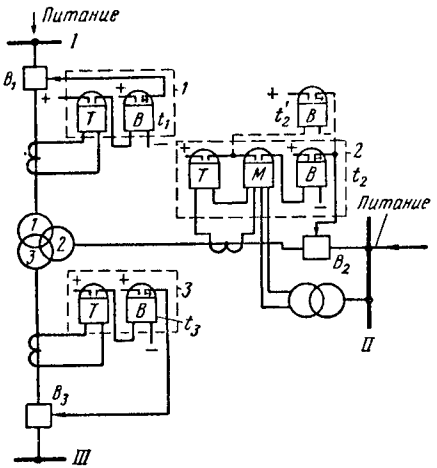


Рис. 16-9. Селективная защита от внешних к. з. на трехобмоточном трансформаторе с двусторонним питанием.

должен отключиться выключатель B_3, а обмотки трансформатора *I* и *II* должны остаться в работе.

На трехобмоточных трансформаторах с односторонним питанием (например, от шин *I*) на обмотках *II* и *III* устанавливаются самостоятельные комплекты максимальной защиты, действующие на соответствующие выключатели (рис. 16-8). На обмотке *I*, питающей трансформатор, устанавливается третий комплект защиты, предназначенный для отключения трансформатора при к. з. в нем и резервирования защит и выключателей обмоток *II* и *III*. Выдержка времени t_1 выбирается больше t_2 и t_3.

На трехобмоточных трансформаторах, имеющих двустороннее и трехстороннее питание, максимальная токовая защита не может обеспечить селективности. Так, например, если со стороны обмоток *1* и *2* (рис. 16-9) подключены источники питания, то при к. з. на шинах *II* время действия t_2 должно быть меньше t_1, но тогда при к. з. на шинах *I* защита *2* окажется неселективной.

Для получения селективности защиту *2* необходимо выполнить направленной (рис. 16-9), так чтобы она действовала только при к. з., на шинах *II* с $t_2 < t_1$. При к. з. на шинах *I* или *III* защита *2* должна работать помимо реле направления мощности (как максимальная токовая защита) с выдержкой $t_2' > t_1$ и t_3 (рис. 16-9).

Таким образом, *на трансформаторах с двух- и трехсторонним питанием для обеспечения селективности необходимо применять направленные защиты.*

Следует, однако, иметь в виду, что при наличии защиты шин и устройств резервирования отказа выключателей на присоединениях, питающихся от шин (см. гл. 20), вероятность работы максимальных защит трансформатора очень мала. Поэтому на практике в целях упрощения защиты допускается применение простых токовых защит, особенно если на защищаемом трансформаторе имеются АПВ или АВР. Направленная защита устанавливается только на особо ответственных трансформаторах.

С целью упрощения защиты по «Правилам электротехнических установок» допускается не устанавливать защиты на одной из сторон трехобмоточного трансформатора, при этом выполняют защиту со стороны основного питания с двумя выдержками времени; с меньшей из них эта защита действует на отключение выключателя, не имеющего защиты от сверхтоков.

в) Токовая защита обратной последовательности

Защита реагирует на ток обратной последовательности, появляющийся при несимметричных к. з. внешних и в трансформаторе. Схема защиты показана на рис. 16-10. Защита состоит из токового реле T_2, включенного через фильтр обратной последовательности $Ф_2$, и реле времени B, обеспечивающего необходимую выдержку времени.

Ток срабатывания защиты $I_{2с.з}$ выбирается в общем случае, исходя из двух условий [Л. 5]:

1) отстройки защиты от тока небаланса фильтра при максимальной нагрузке трансформатора:

$$I_{2с.з} > I_{нб.макс}; \tag{16-6}$$

2) согласования по чувствительности с защитами присоединений, отходящих от шин, на которые включен трансформатор:

$$I_{2с.з} > I_{2расч}, \tag{16-7}$$

где $I_{2расч}$ — ток I_2, проходящий по трансформатору в условиях несимметричного к. з., при котором защита рассматриваемого присоединения находится на грани срабатывания.

Определение $I_{2расч}$ дано в [Л. 6]. Анализ показывает, что при $I_{с.з} = (0{,}5 \div 0{,}7) I_{ном}$ трансформатора условия (16-6) и (16-7) обычно выполняются.

Отсюда следует, что *чувствительность защиты обратной последовательности при несимметричных к. з. получается значительно большей, чем у максимальной защиты, у которой* $I_{с.з} > I_{ном}$.

На трехобмоточных повысительных трансформаторах, имеющих питание с двух или трех сторон, для обеспечения селективности при несимметричных внешних к. з. необходимо применять направленную защиту с органом направления мощности, реагирующим на мощность обратной последовательности.

Защита обратной последовательности реагирует только на двухфазные и однофазные к. з., поэтому она обычно дополняется приставкой от трехфазных к. з. Последняя выполняется, как и на генераторах (§ 15-5), в виде однофазной максимальной защиты с блокировкой по напряжению (реле T и H на рис. 16-10).

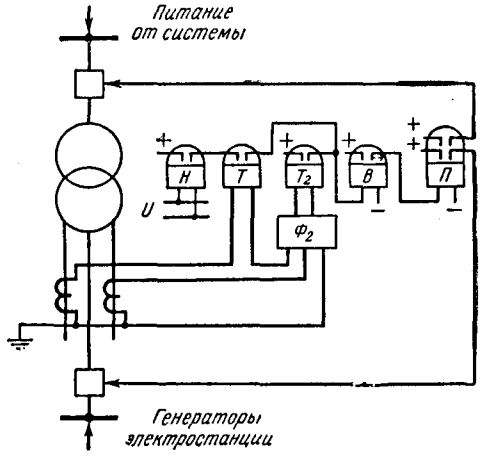


Рис. 16-10. Токовая защита обратной последовательности на повысительном трансформаторе.

Защита I_2 может применяться и на понизительных трансформаторах.

г) Токовая защита нулевой последовательности

Защита на трансформаторах реагирует на ток I_0, появляющийся при внешних к. з. (однофазных и двухфазных на землю) и в трансформаторе. Она устанавливается на повысительных трансформаторах со стороны обмотки высшего и среднего напряжения, если последние соединены по схеме звезды и работают с глухозаземленной нулевой точкой. Защита имеет два варианта исполнения, показанные на рис. 16-11, *а* и *б*. В обоих случаях защита состоит из токового реле T_0, включенного на ток нулевой последовательности I_0. В схеме на рис. 16-11, *а* ток $3I_0$ получается от трехтрансформаторного фильтра нулевой последовательности, а в схеме рис. 16-11, *б* — от трансформатора тока, включенного в провод, связывающий нейтраль трансформатора с землей. Вторая схема проще и охватывает своей зоной действия обмотки звезды силового трансформатора. Благодаря указанным преимуществам она рекомендуется к применению.

Для обеспечения селективности защита выполняется с реле времени B.

Ток срабатывания защиты, включенной на ток в заземляющем проводе трансформатора (рис. 16-11, *б*), выбирают, исходя из двух условий:

1) Для соблюдения селективности защита трансформатора должна быть согласована по чувствительности с защитами нулевой последовательности линий, отходящих от шин электростанции *А* (рис. 16-11, *в*).

2) Защита должна надежно действовать при однофазных и двухфазных к. з. в конце наиболее длинной линии, отходящей от шин *А*.

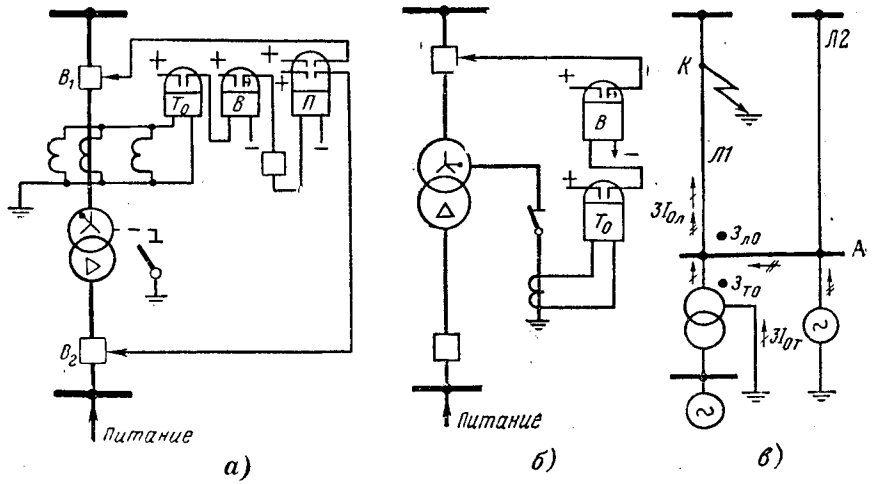


Рис. 16-11. Токовая защита нулевой последовательности повысительного трансформатора.

а — защита включается на трехтрансформаторный фильтр I_0; *б* — на ток в нейтрали трансформатора; *в* — схема сети с распределениями токов I_0.

По первому условию

$$I_{с.з.т} = k_н 3I_{0расч}, \tag{16-8}$$

где $I_{0расч}$ — ток нулевой последовательности в трансформаторе при однофазном и двухфазных к. з. на землю в условиях, когда защита, с которой производится согласование по чувствительности, находится на грани срабатывания, т. е. когда ток $3I_0$ в этой защите (например, в $З_{л0}$ линии *Л1*) равен ее току срабатывания: $3I_{0л} = I_{с.з.л0}$. Как видно из рис. 16-11, *в*, на котором приведена в качестве примера схема сети, ток $3I_{0т}$ в нейтрали трансформатора составляет часть тока $3I_{0л}$, проходящего в линии. Это отношение характеризуется коэффициентом распределения $k_т = 3I_{0т}/3I_{0л}$. Отсюда $3I_{0т} = k_т \cdot 3I_{0л}$. Допустив, что $3I_{0л} = I_{с.з.л0}$, найдем соответствующий этому ток в нейтрали трансформатора

$$3I_{0т} = 3I_{0расч} = k_т I_{с.з.л0}. \tag{16-8а}$$

Сделав подстановку (16-8а) в (16-8), получим:

$$I_{с.з.т} = k_н k_т I_{с.з.л0}. \qquad (16\text{-}8б)$$

По второму условию $I_{с.з.т}$ должен быть меньше минимального значения тока $3I_{0т.мин}$, проходящего по нейтрали трансформатора при к. з. на землю в конце линии (в точке K на рис. 16-11, *в*). Согласно ПУЭ при к. з. в конце отходящих линий коэффициент чувствительности $k_ч = \frac{3I_{0т.мин}}{I_{с.з.т}} \geqslant 1{,}2$.

Выдержка времени (на реле B) выбирается из условия селективности с защитами присоединений, отходящих от шин станции, со стороны которых установлена рассматриваемая защита.

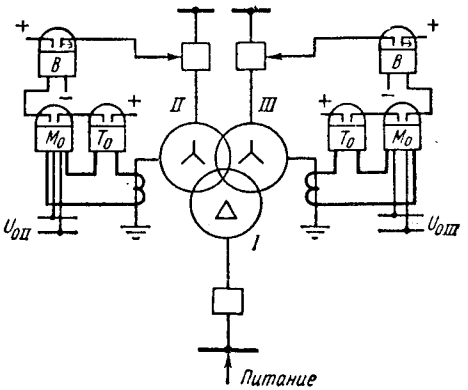


Рис. 16-12. Направленная защита нулевой последовательности трехобмоточного повысительного трансформатора.

На трехобмоточных трансформаторах (рис. 16-12), имеющих две обмотки (*II* и *III*) с заземленными нейтралями, защиты нулевой последовательности выполняются направленными, что необходимо для обеспечения селективности.

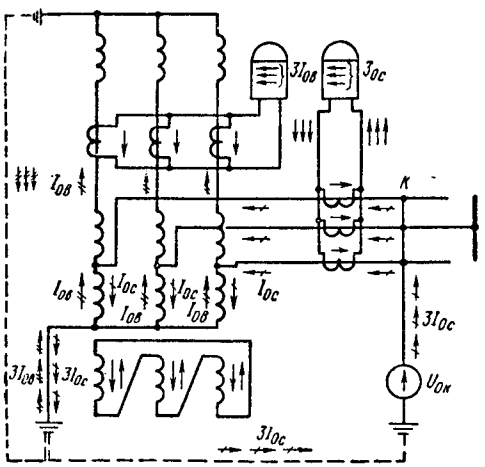


Рис. 16-13. Размещение защиты нулевой последовательности на автотрансформаторе.

Защита на автотрансформаторах. На выполнение этой защиты влияют особенности автотрансформаторов, и она поэтому имеет некоторые отличия от трансформаторной защиты:

1. У автотрансформаторов заземляются концы обмоток среднего напряжения, являющиеся общей частью обмотки автотрансформатора. Как указывалось, по общей части обмотки протекают встречно направленные токи высшего и среднего напряжения (рис. 16-2, *б*).

При к. з. на землю (рис. 16-13) в сети одного напряжения (например, в точке K) в заземляющем проводе течет ток $3I_0 = 3I_{0с} - 3I_{0в}$. Этот ток получается меньше своих составляющих и может ока-

заться недостаточным для надежной работы защиты. Поэтому *защита нулевой последовательности в заземляющем проводе автотрансформатора не устанавливается, ее включают на трехтрансформаторный фильтр I_0, устанавливаемый со стороны выводов высшего и среднего напряжения.* При таком исполнении она реагирует на полные токи $3I_0$ высшего и среднего напряжения, т. е. на $3I_{0в}$ и $3I_{0с}$ соответственно.

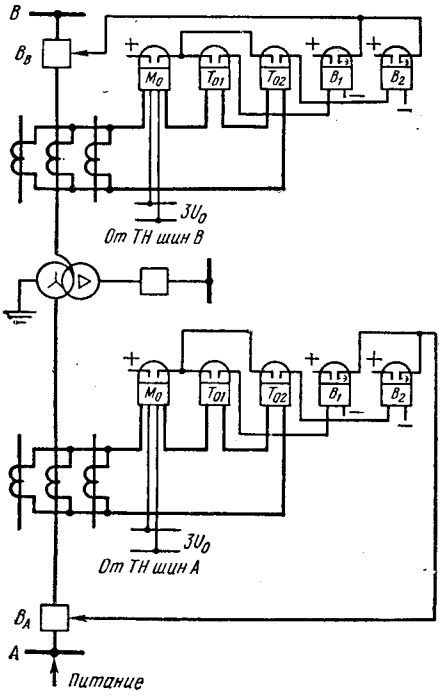


Рис. 16-14. Направленная защита нулевой последовательности автотрансформатора, имеющего двустороннее питание токами I_0.

2. Вследствие наличия электрической связи между обмотками высшего и среднего напряжения автотрансформатора к. з. на землю на стороне одного напряжения вызывает токи I_0 на стороне другого.

В связи с этим возникает необходимость в согласовании выдержек времени защит нулевой последовательности на выводах высшего и среднего напряжения автотрансформатора. Для обеспечения селективности эти защиты выполняются направленными (рис. 16-14), так чтобы каждая из них действовала только при к. з. в сети своего напряжения.

3. Наличие автотрансформаторной связи между сетями высшего и среднего напряжения приводит к необходимости согласования выдержек времени защит, реагирующих на ток I_0, в сетях одного напряжения с защитами сетей другого напряжения. Это увеличивает число ступеней и вызывает повышение выдержек времени на защитах. Для их уменьшения защиты нулевой последовательности на автотрансформаторах рекомендуется выполнять двухступенчатыми (рис. 16-14). Первая ступень осуществляется в виде отсечки с $t = 0{,}5$ *сек.* Она отстраивается от быстродействующих защит присоединений, отходящих от шин. Вторая ступень выполняется как чувствительная защита, полностью резервирующая защиту следующего участка сети.

Ток срабатывания защиты должен отстраиваться от тока небаланса, возникающего в трехтрансформаторном фильтре

I_0 при междуфазных к. з., и согласовываться по чувствительности с защитами отходящих линий согласно (16-8б).

Ток небаланса определяется так же, как и в аналогичной защите линий (см. гл. 8).

д) Защита от внешних к. з. на землю повысительных трансформаторов, работающих с разземленной нейтралью

Для ограничения токов к. з. часть повысительных трансформаторов работает с разземленной нейтралью. Для таких трансформаторов возникает опасность при выделении их на изолированную работу на сеть, имеющую замыкание на землю одной из фаз.

Подобные условия могут возникнуть, если, например, при однофазном к. з. на одной из линий (рис. 16-15, *а*) ее защита или выключатель откажут в действии. Тогда все присоединения, питающие место

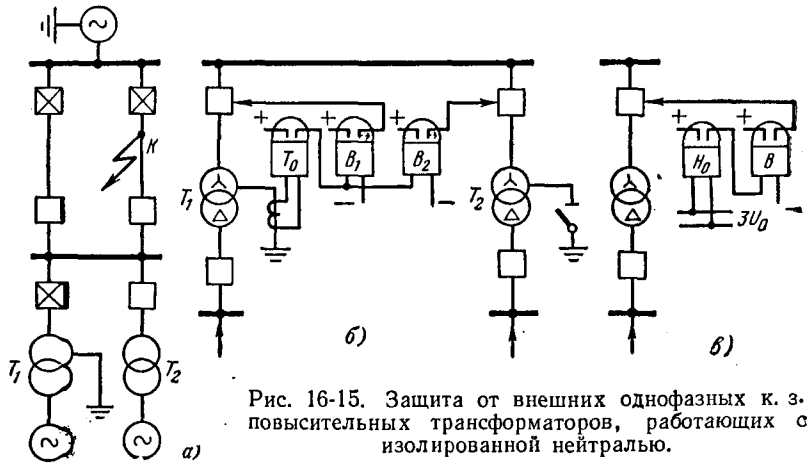


Рис. 16-15. Защита от внешних однофазных к. з. повысительных трансформаторов, работающих с изолированной нейтралью.

к. з. током I_0, отключаются резервными защитами (точки отключения отмечены на чертеже крестиком), а трансформатор T_2 с незаземленной нейтралью останется работать на выделившийся участок сети с повреждением в точке K. Как известно, в такой сети при замыкании на землю возникают опасные перенапряжения, которые могут повредить изоляцию трансформатора.

Для предупреждения этого *трансформаторы, работающие с изолированной нейтралью, должны иметь резервную защиту, отключающую их при замыканиях на землю раньше, чем могут отключиться трансформаторы с заземленными нейтралями.*

В качестве указанной защиты может применяться:

1) **токовая защита нулевой последовательности,** установленная на параллельно работающих трансформаторах с заземленной нейтралью.

Для этого на защите нулевой последовательности трансформатора T_1 с заземленной нейтралью предусматриваются две выдержки времени (рис. 16-15, *б*). С меньшей выдержкой защита отключает трансформатор T_2 с разземленной нейтралью, а с большей — трансформатор T_1 с заземленной нейтралью;

2) **защита, реагирующая на появление напряжения** U_0 (рис. 16-15, *в*). Эта защита выполняется с помощью чувствительного реле повышения напряжения H_0, которое включается на разомкнутый треугольник шинного трансформатора напряжения.

При к. з. на землю в сети защита H_0 приходит в действие и отключает трансформатор с разземленной нейтралью с выдержкой времени меньшей, чем на защитах I_0 трансформаторов с заземленной нейтралью.

Напряжение срабатывания реле H_0 отстраивается от $U_{нб}$ и согласуется по чувствительности с защитами отходящих линий;

3) **фильтровая защита,** реагирующая на ток I_2, появляющийся при к. з. на землю.

Полные схемы указанных выше вариантов защит приведены в [Л. 5].

е) Токовая защита с пуском по напряжению

Принцип действия и схема защиты аналогичны подобной же защите генераторов. Так же как и на генераторах (см. § 15-4, б), эта защита может выполняться с пуском от трех реле минимального напряжения или с комбинированным пуском от реле H_2 и реле, реагирующего на понижение напряжения сети H. Последняя схема как более чувствительная рекомендуется к применению и показана на рис. 16-16. *Защита с пуском по напряжению не действует при перегрузках,* в связи с этим отпадает необходимость в отстройке токовых реле защиты T от аварийных нагрузок, что и позволяет получить большую, чем у простой максимальной защиты, чувствительность.

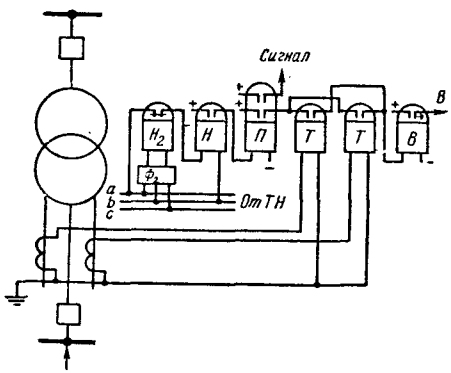


Рис. 16-16. Максимальная токовая защита двухобмоточного трансформатора с пуском от напряжения.

Для улучшения чувствительности пуска по напряжению цепи напряжения защиты обычно питаются от трансформатора напряжения, установленного с той стороны трансформатора, где должна действовать рассматриваемая защита. Уставки защиты выбираются согласно формулам (15-21) — (15-22).

16-3. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

а) Защита трансформаторов

На трансформаторах, находящихся под наблюдением персонала, защита от перегрузки выполняется действующей на сигнал посредством токового реле *3*, показанного в схеме на рис. 16-5. Токовое реле *3* устанавливается в одной фазе, поскольку перегрузка трансформатора возникает одновременно во всех трех фазах. Чтобы избежать излишних сигналов при коротких замыканиях и кратковременных перегрузках, предусматривается реле времени, обмотки которого должны быть рассчитаны на длительное прохождение тока (на схеме на рис. 16-5 не показано).

Ток срабатывания выбирается из условия возврата токового реле при номинальном токе трансформатора:

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{воз}}} I_{\text{ном}},$$

где $k_{\text{н}} = 1{,}05$.

Время действия перегрузочной защиты выбирается на ступень больше времени максимальной защиты трансформатора:

$$t_{\text{перег}} = t_{\text{макс.з}} + \Delta t.$$

На подстанциях без дежурного персонала защита от перегрузок выполняется трехступенчатой. Первая ступень работает при малых перегрузках и действует на сигнал, передаваемый с помощью телемеханики на дежурный пункт. Выдержка времени $t_1 = t_{\text{макс.защ}} + \Delta t$. Вторая ступень действует при больших перегрузках, когда требуется быстрая разгрузка. Эта ступень действует на отключение части потребителей, разгружая трансформатор до допустимого значения. Выдержка времени второй ступени $t_2 \leqslant t_{\text{доп}}$, где $t_{\text{доп}}$ — допустимое время перегрузки, определяемое перегрузочной характеристикой трансформатора.

Третья ступень — страховочная, она действует на отключение трансформатора, если по каким-либо причинам вторая ступень не осуществит разгрузки. Выдержка времени $t_3 = (t_2 + \Delta t) < t_{\text{доп}}$.

На трехобмоточных трансформаторах перегрузочная защита должна устанавливаться таким образом, чтобы она, во-первых, реагировала на перегрузку любой из трех обмоток и, во-вторых, обеспечивала защиту при работе трансформатора в режиме, когда одна из обмоток отключена.

Руководствуясь этими соображениями, на трехобмоточных трансформаторах с одинаковой мощностью обмоток и односторонним питанием перегрузочную защиту устанавливают только на питающей обмотке. При неравной мощности обмоток защита устанавливается на всех трех обмотках.

На трехобмоточных трансформаторах с равной мощностью обмоток и двусторонним питанием защиту следует ставить на обеих питающих обмотках.

б) Защита от перегрузки автотрансформаторов

Защита от перегрузки автотрансформаторов выполняется на основе требований к защите трехобмоточных трансформаторов с учетом особенностей токораспределения в обмотках автотрансформатора и различия номинальных мощностей обмоток. *Защита от перегрузки должна реагировать на перегрузку последовательной (П), общей (О), и дополнительной (Д) обмоток* автотрансформатора (рис. 16-17, *а*).

Номинальный (допустимый) ток в последовательной обмотке (относящейся к высшему напряжению) определяется по проходной мощности $S_{прох}$, а для общей части обмотки и обмотки низшего напряжения (соединенной в треугольник) — по расчетной (или типовой) мощности $S_{расч}$ (см. рис. 16-2).

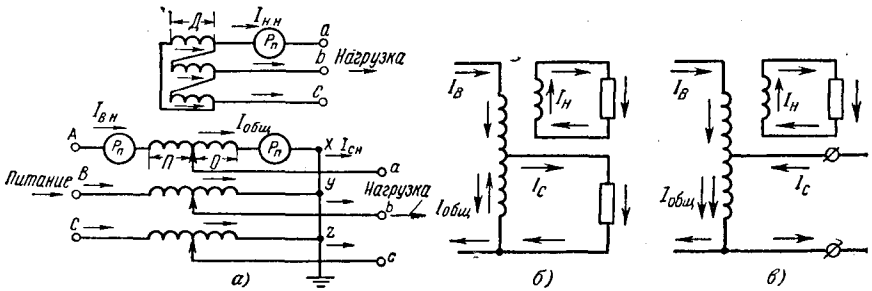


Рис. 16-17. Размещение защит и токораспределение в обмотках автотрансформатора при перегрузках.

а — в трехфазной схеме при одностороннем питании; *б* — токораспределение при одностороннем питании; *в* — при двустороннем питании.

Для контроля за перегрузкой обмотки среднего напряжения (общей) перегрузочное реле должно устанавливаться в нулевых выводах автотрансформатора, по которым протекает ток $I_{общ}$. Перегрузка последовательной обмотки (высшего напряжения) и обмотки низшего напряжения учитывается по току в выводах высшего и низшего напряжения соответственно. Места установки реле $P_п$ отмечены на рис. 16-17, *а* кружком.

Необходимость установки защиты от перегрузки той или иной обмотки автотрансформатора определяется на основе анализа токораспределения при различных режимах его работы. Так, например, при перегрузке обмотки низшего напряжения в режиме, когда сторона среднего напряжения отключена, ток на стороне высшего напряжения может быть меньше номинального, так как мощность обмотки низшего напряжения равна $S_{расч}$ и меньше $S_{прох}$, по которой определяется $I_{ном}$ на стороне высшего напряжения. Отсюда следует, что *на обмотке низшего напряжения всех автотрансформаторов необходимо устанавливать защиту от перегрузки.*

Рассматривая токораспределение на понизительном трансформаторе, имеющем питание со стороны высшего напряжения

(рис. 16-17, *б*), можно сделать вывод, что при перегрузке обмотки высшего напряжения токи в обмотках среднего и низшего напряжения могут быть ниже номинального. *Следовательно, на автотрансформаторах, имеющих питание на стороне высшего напряжения, необходимо устанавливать защиту, реагирующую на перегрузку этой стороны.* Указанная защита будет также защищать и общую обмотку автотрансформатора, так как перегрузка этой обмотки будет сопровождаться перегрузкой обмотки высшего напряжения.

При работе автотрансформаторов в режиме передачи энергии со стороны высшего и среднего напряжения на сторону низшего напряжения в общей обмотке проходит ток $I_{общ} = I_в + I_с$ (рис. 16-17, *в*).

В этих условиях общая обмотка может перегружаться при отсутствии перегрузки в двух других обмотках автотрансформатора.

На автотрансформаторах, работающих в указанном режиме, необходимо устанавливать защиту от перегрузки на нулевых выводах общей обмотки. Такая же защита должна предусматриваться на автотрансформаторах, в которых энергия передается со стороны среднего напряжения одновременно на высшее и низшее напряжение.

Более полный анализ перегрузки обмоток автотрансформатора приводится в [Л. 5, 6]. В соответствии с этим анализом защита от перегрузки должна устанавливаться на понижающих автотрансформаторах при питании со стороны высшего напряжения, на сторонах высшего и низшего напряжения.

На тех же автотрансформаторах, имеющих питание и со стороны обмотки среднего напряжения, защита ставится и на нулевых выводах. *На повысительных автотрансформаторах защита устанавливается на всех трех обмотках.*

16-4. ТОКОВАЯ ОТСЕЧКА

Токовая отсечка является самой простой быстродействующей защитой от повреждений в трансформаторе, действующей с $t = 0$. Однако она не является полноценной, так как реагирует только на большие токи повреждения и охватывает своей зоной действия лишь часть трансформатора.

Отсечка не действует при витковых замыканиях и замыканиях на землю в обмотке, работающей на сеть с малым током замыкания на землю, и является по существу защитой от к. з. (междуфазных и однофазных).

Ток к. з. при повреждении на выводах трансформатора со стороны источника питания (в точке K_1 на рис. 16-18, *а*) обычно значительно больше, чем при повреждении за трансформатором (в точке K_2). Такое соотношение токов и дает возможность использовать для защиты трансформаторов токовую отсечку мгновенного действия (рис. 16-18, *б*).

Отсечка устанавливается с питающей стороны трансформатора и выполняется при помощи мгновенных токовых реле *1* или электромагнитного элемента реле РТ-80, если реле этого типа использованы для выполнения максимальной защиты.

На трансформаторах, питающихся от сети с глухозаземленной нейтралью, отсечка устанавливается на трех фазах, а при питании от сети с изолированной нейтралью — на двух фазах.

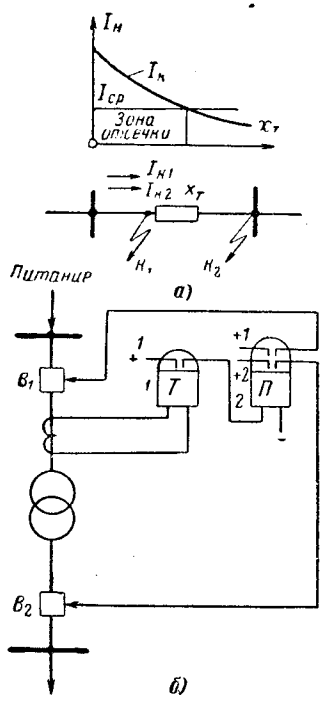


Рис. 16-18. Токовая отсечка. *а* — принцип действия; *б* — однолинейная схема защиты.

Ток срабатывания отсечки отстраивается от максимального тока короткого замыкания при повреждении за трансформатором (в точке K_2) и вычисляется по формуле

$$I_{с.з} = k_{зап} I_{к2макс}, \qquad (16\text{-}9)$$

где $k_{зап}$ — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,25—1,5 в зависимости от точности токовых реле (для реле типа РТ-80 $k_{зап} = 1{,}5$).

Кроме того, токовая отсечка должна отстраиваться от броска намагничивающего тока $I_{нам}$, возникающего при включении трансформатора под напряжение:

$$I_{с.з} > I_{нам}. \qquad (16\text{-}10)$$

Для выполнения этого условия ток срабатывания должен в 3—5 раз превышать номинальный ток трансформатора.

В зону действия отсечки входят ошиновка, выводы и часть обмотки трансформатора со стороны, где установлена отсечка. В пределах этой зоны отсечка отключает повреждения без выдержки времени.

Поскольку отсечка является защитой от внутренних повреждений, она должна отключать трансформатор со всех сторон, имеющих источники питания.

Большим достоинством отсечки являются ее простота и быстродействие. Ускоряя отключение повреждений на выводах трансформатора и в части его обмотки, токовая отсечка вместе с тем понижает выдержки времени на защитах присоединений, питающих шины, к которым подключен защищаемый трансформатор.

Отсечка в сочетании с максимальной защитой и газовой защитой (рассматриваемой ниже) обеспечивает хорошую защиту для трансформаторов малой и средней мощности.

16-5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

а) Назначение и принцип действия дифференциальной защиты

Для защиты трансформаторов от к. з. между фазами, на землю и от замыканий витков одной фазы широкое распространение получила дифференциальная защита (рис. 16-19). В соответствии с принципом действия этой защиты трансформаторы тока устанавливаются с обеих сторон трансформатора. Их вторичные обмотки соединяются так, чтобы при нагрузке и внешних к. з. в реле протекала разность вторичных токов $I_р = I_{Iв} - I_{IIв}$ (рис. 16-19, *а*). Тогда при к. з. в зоне защиты (рис. 16-19, *б*) ток в реле равен сумме $I_р = I_{Iв} + I_{IIв}$. Если $I_р > I_{с.р}$, то реле приходит в действие и отключает трансформатор.

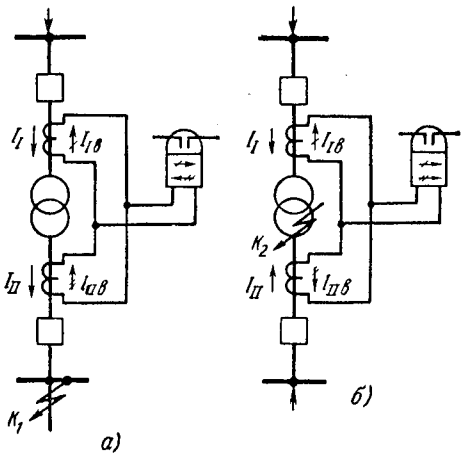


Рис. 16-19. Принцип действия дифференциальной защиты трансформатора.

а — внешнее к. з.; *б* — к. з. в трансформаторе.

Для того чтобы дифференциальная защита не работала при нагрузке и внешних к. з., необходимо уравновесить вторичные токи в плечах защиты так, чтобы в этих случаях ток в реле отсутствовал:

$$I_р = I_{Iв} - I_{IIв} = 0. \qquad (16\text{-}11)$$

Для этого необходимо, чтобы

$$I_{Iв} = I_{IIв}. \qquad (16\text{-}12)$$

б) Особенности дифференциальной защиты трансформаторов

В дифференциальной защите линий и генераторов первичные токи в начале и конце защищаемого участка одинаковы, поэтому для выполнения условия селективности (16-11) достаточно иметь равенство коэффициентов трансформации трансформаторов тока. Иное положение имеет место в дифференциальной защите трансформаторов. *Первичные токи разных обмоток трансформатора не равны по величине и в общем случае не совпадают по фазе.*

В режиме нагрузки и внешнего к. з. ток трансформатора на стороне низшего напряжения I_{II} всегда больше тока на стороне высшего напряжения I_I. Их соотношение определяется коэффициентом трансформации силового трансформатора.

В трансформаторе с соединением обмоток звезда — треугольник токи I_I и I_{II} различаются не только по величине, но и по фазе. Угол сдвига фаз зависит от группы соединения обмоток трансформатора. При наиболее распространенной, одиннадцатой группе линейный ток на стороне треугольника опережает линейный ток со стороны звезды на 30° (рис. 16-20). В трансформаторах с соединением обмоток звезда — звезда токи I_I и I_{II} или совпадают по фазе, или сдвинуты на 180°.

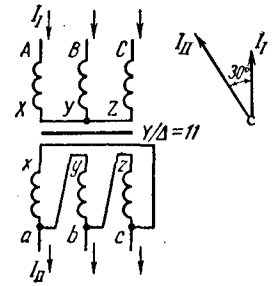


Рис. 16-20. Образование углового сдвига между токами силового трансформатора.

Таким образом, *для выполнения условия селективности* (16-11) *необходимы специальные меры по выравниванию вторичных токов* $I_{1в} = \dot{I}_I/n_{тI}$ и $I_{IIв} = \dot{I}_{II}/n_{тII}$ *как по величине, так и по фазе*, с тем чтобы поступающие в реле токи были равны.

Компенсация сдвига токов по фазе осуществляется соединением в треугольник вторичных обмоток трансформаторов тока, установленных на стороне звезды силового трансформатора (рис. 16-21).

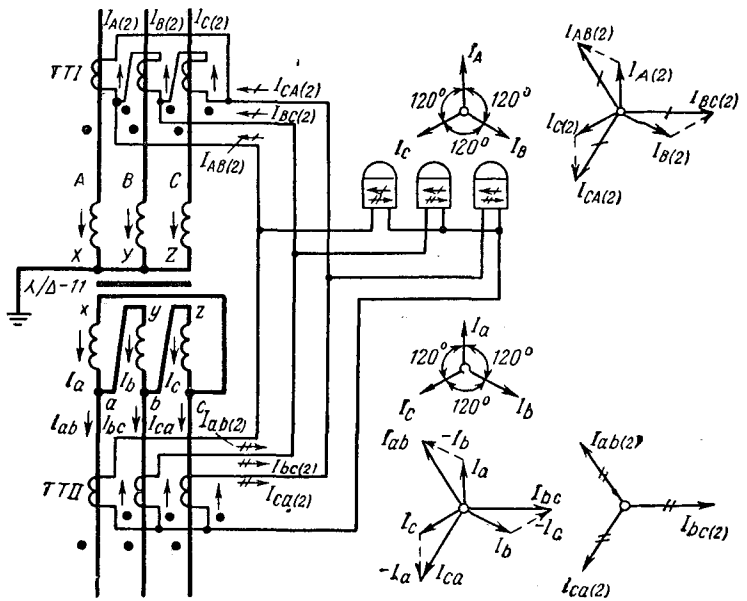


Рис. 16-21. Токораспределение и векторные диаграммы токов в схеме дифференциальной защиты.

Соединение в треугольник обмоток трансформаторов тока должно точно соответствовать соединению в треугольник обмотки силового трансформатора.

Трансформаторы тока, расположенные на стороне треугольника силового трансформатора, соединяются в звезду.

На рис. 16-21 изображены векторные диаграммы токов в схеме защиты при нагрузке и внешних трехфазных к. з. Векторы первичных и вторичных токов в трансформаторах тока и силовом трансформаторе показаны на диаграмме совпадающими по фазе.

Из диаграммы следует, что токи в линейных проводах трансформаторов тока, соединенных в треугольник, $I_{AB(2)}$, $I_{BC(2)}$, $I_{CA(2)}$, сдвигаются относительно соответствующих фазных токов во вторичной и первичной обмотках трансформаторов тока на угол 30°. Токи в проводах второй группы трансформаторов тока $I_{ab(2)}$, $I_{bc(2)}$ и $I_{ca(2)}$ совпадают по фазе со своими первичными токами и поэтому сдвинуты по отношению к первичному току звезды силового трансформатора, так же как и токи $I_{AB(2)}$, $I_{BC(2)}$, $I_{CA(2)}$, на угол 30°. В результате этого токи, поступающие в реле, совпадают по фазе.

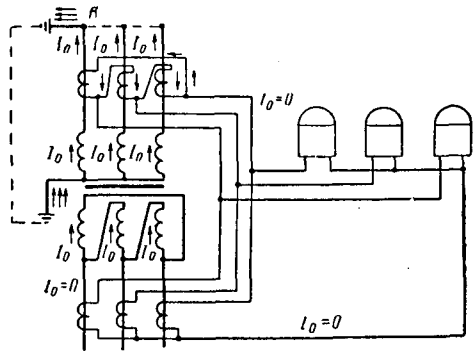


Рис. 16-22. Прохождение токов нулевой последовательности в схеме дифференциальной защиты.

Соединение одной из групп трансформаторов тока в треугольник обеспечивает компенсацию сдвига фаз между вторичными и первичными токами силового трансформатора не только при симметричной нагрузке и трехфазных к. з., но и при любом несимметричном повреждении или нагрузочном режиме.

Справедливость этого положения наиболее просто доказывается с помощью метода симметричных составляющих. Токи прямой и обратной последовательностей симметричны, и поэтому токораспределение их в схеме защит полностью соответствует токораспределению при трехфазном к. з. (рис. 16-21). Следовательно, соединение одной из групп трансформаторов тока в треугольник, а другой — в звезду обеспечивает компенсацию сдвига фаз первичных токов прямой и обратной последовательностей.

Токи нулевой последовательности появляются в случае к. з. на землю и могут замыкаться только через обмотку трансформатора, соединенную в звезду, при условии, что ее нулевая точка заземлена. Проходя по этой обмотке, токи нулевой последовательности трансформируются в фазы обмотки, соединенные треугольником (рис. 16-22).

В контуре треугольника токи I_0 каждой фазы направлены последовательно и поэтому циркулируют в нем, не выходя за его пределы (рис. 16-22). Это означает, что в дифференциальной защите

трансформаторов с соединением обмоток звезда — треугольник токи нулевой последовательности протекают только по трансформаторам тока, установленным со стороны звезды силового трансформатора.

Такое протекание первичных токов равноценно токораспределению при повреждении внутри трансформатора (при одностороннем питании) и может вызвать неправильную работу защиты. Эта опасность устраняется тем, что на стороне звезды силового трансформатора (где протекают первичные токи I_0) трансформаторы тока соединяются в треугольник, как показано на рис. 16-22. Тогда токи I_0, трансформируясь на вторичную сторону трансформаторов тока, замыкаются в контуре этого треугольника, не попадая в реле. При соединении трансформаторов тока на стороне звезды силового трансформатора также в звезду токи нулевой последовательности получают возможность замыкаться через реле, что приведет к неправильной работе защиты при однофазных и двухфазных к. з. на землю в сети.

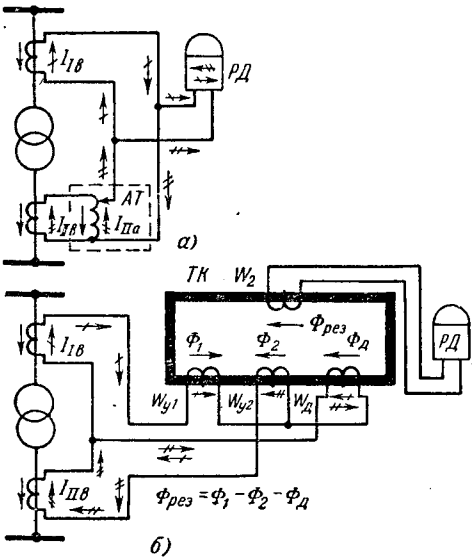


Рис. 16-23. Выравнивание вторичных токов в схеме дифференциальной защиты.

а — с помощью промежуточного автотрансформатора; *б* — с помощью уравнительных обмоток насыщающегося трансформатора.

Таким образом, *для компенсации сдвига фаз токов трансформаторов, соединенных по схеме* Y/Δ *необходимо трансформаторы тока на стороне звезды соединить в треугольник, а на стороне треугольника — в звезду.*

Компенсация неравенства первичных токов силовых трансформаторов и автотрансформаторов достигается подбором коэффициентов трансформации $n_{т\,I}$, $n_{т\,II}$ трансформаторов тока дифференциальной защиты и параметров специально для этой цели установленных уравновешивающих автотрансформаторов (рис. 16-23, *а*) или трансформаторов (рис. 16-23, *б*).

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока $n_{т\,I}$ и $n_{т\,II}$ выбираются с таким расчетом, чтобы вторичные токи в плечах защиты были равны, как это требуется по условию (16-12), при нагрузке и внешних к. з.

При соединении обмоток силового трансформатора Y/Y условие (16-12) имеет вид: $I_I/n_{т\,I} = I_{II}/n_{т\,II}$,

отсюда находим, что для обеспечения равенства токов в плечах защиты коэффициенты трансформации трансформаторов тока защиты должны удовлетворять условию

$$\frac{n_{тII}}{n_{тI}} = \frac{I_{II}}{I_I} = N, \tag{16-13}$$

где N — коэффициент трансформации силового трансформатора.

При соединении обмоток по схеме $\curlywedge/\triangle$ ток в плече, питающемся от трансформаторов тока, включенных в треугольник, равен $\frac{I_I}{n_{тI}}\sqrt{3}$, а в плече, питающемся от трансформаторов, соединенных в звезду, равен $I_{II}/n_{тII}$. С учетом этого уравнение (16-12) имеет вид:

$$\frac{I_I}{n_{тI}}\sqrt{3} = \frac{I_{II}}{n_{тII}},$$

отсюда

$$\frac{n_{тII}}{n_{тI}} = \frac{I_{II}}{I_I\sqrt{3}} = \frac{N}{\sqrt{3}}. \tag{16-14}$$

Задаваясь одним из коэффициентов трансформации, например $n_{тII}$, можно найти, пользуясь выражением (16-13) или (16-14), расчетное значение второго — $n_{тI}$, обеспечивающее равенство вторичных токов в плечах защиты. Найденный, таким образом, $n_{тI}$, как правило, получается нестандартным. Поэтому используются стандартные трансформаторы с ближайшим к расчетному значению коэффициентом трансформации, а *компенсация оставшегося неравенства осуществляется с помощью выравнивающих автотрансформаторов или трансформаторов.* В первом случае (рис. 16-23, *а*) в одном из плеч защиты устанавливается автотрансформатор AT. Для выравнивания токов в плечах защиты коэффициент трансформации $n_а$ автотрансформатора подбирается так, чтобы его вторичный ток $I_{IIа}$ был равен току $I_{Iв}$ в противоположном плече защиты:

$$I_{IIа} = \frac{I_{IIв}}{n_а} = I_{Iв}.$$

Исходя из этого, находят:

$$n_а = \frac{I_{IIа}}{I_{IIв}} = \frac{I_{Iв}}{I_{IIв}}. \tag{16-15}$$

Во втором случае (рис. 16-23, *б*) применяется компенсирующий трансформатор TK. Трансформатор TK состоит из трех первичных обмоток. Обмотки $w_{у1}$ и $w_{у2}$ (уравнительные) включаются в плечи защиты, а обмотки $w_д$ (дифференциальная) — по дифференциальной схеме на разность токов $I_{Iв} - I_{IIв}$. Вторичная обмотка w_2 питает дифференциальное реле $РД$. Число витков уравнительных обмоток подбирается так, чтобы геометрическая сумма

намагничивающих сил всех трех обмоток в условиях сквозного тока была равна нулю:

$$I_{Iв}w_{уI} - I_{IIв}w_{уII} + (I_{Iв} - I_{IIв})\,w_д = 0. \qquad (16\text{-}16)$$

При выполнении этого условия результирующая н. с. и магнитный поток $\Phi_{рез}$ в магнитопроводе *ТК* отсутствуют, поэтому ток в дифференциальном реле $I_р = 0$.

В рассмотренной схеме неравенство токов плеч ($I_{Iв} \neq I_{IIв}$) компенсируется магнитным способом. Этот способ компенсации удобно сочетается с дифференциальным реле, включаемым через БНТ, и получил поэтому широкое распространение в Советском Союзе.

16-6. ТОКИ НЕБАЛАНСА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

а) Составляющие тока небаланса

При внешних к. з. и нагрузке обеспечить полный баланс вторичных токов, поступающих в реле, не удается. Вследствие неравенства вторичных токов в реле в указанных режимах появляется ток небаланса

$$\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{Iв} - \dot{I}_{IIв}, \qquad (16\text{-}17)$$

который может вызвать неправильную работу защиты.

Неравенство вторичных токов обусловливается: погрешностью трансформаторов тока; изменением коэффициента трансформации силового трансформатора при регулировании напряжения; неполной компенсацией неравенства вторичных токов в плечах защиты; наличием намагничивающих токов силового трансформатора, вносящих искажение в его коэффициент трансформации.

Каждая из этих причин порождает свою составляющую $I_{нб}$. Рассмотрим эти составляющие и способы оценки их величины.

1) Составляющая $I_{нб.т.т}$ вызывается наличием погрешностей (токов намагничивания) трансформаторов тока, питающих защиту (рис. 16-19). С учетом токов намагничивания разность вторичных токов, проходящих в реле при внешнем к. з.,

$$\dot{I}_р = \dot{I}_{Iв} - \dot{I}_{IIв} = \left(\frac{\dot{I}_I}{n_I} - \dot{I}_{Iнам}\right) - \left(\frac{\dot{I}_{II}}{n_{II}} - \dot{I}_{IIнам}\right). \qquad (16\text{-}17а)$$

Считая, что неравенство первичных токов по величине и фазе полностью скомпенсировано, получим, что $I_I/n_I = I_{II}/n_{II}$. С учетом этого из (16-17а) следует, что в реле появляется ток:

$$\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{IIнам} - \dot{I}_{Iнам}. \qquad (16\text{-}17б)$$

Выражение (16-17б) показывает, что, как и в других дифференциальных защитах, ток небаланса, обусловленный погрешностью

трансформаторов тока, равен геометрической разности намагничивающих токов трансформаторов тока защиты. Эта составляющая тока небаланса имеет наибольшую величину и является основной.

2) Составляющая $I_{\text{нб.рег}}$ появляется при изменении (регулировании) коэффициента трансформации N силового трансформатора или автотрансформатора.

Компенсация неравенства первичных токов, осуществляемая с помощью компенсирующего трансформатора или вспомогательного автотрансформатора, обеспечивается при определенных соотношениях токов обмоток силовых трансформаторов, определяемых их коэффициентом трансформации N. При изменении N компенсация токов нарушается и в дифференциальном реле появляется ток небаланса $I_{\text{нб.рег}}$. Обычно параметры компенсирующих устройств ($w_{\text{у}}$ или $n_{\text{а}}$) подбираются для среднего значения N. При отклонении от него на $\pm\Delta N\%$ появляется ток небаланса

$$I_{\text{нб.рег}} = \frac{\Delta N\%}{100} I_{\text{скв}}, \qquad (16\text{-}18)$$

где $I_{\text{скв}}$ — сквозной ток к. з., протекающий через трансформатор.

Обычно на силовых трансформаторах и автотрансформаторах предусматриваются ответвления, позволяющие изменять N в пределах $\pm 5\%$ номинального (среднего) значения. У трансформаторов с регулировкой N под нагрузкой $\Delta N = \pm 10 \div 15\%$.

3) Составляющая небаланса, возникающая при неточной компенсации неравенства токов плеч. Этот небаланс $I_{\text{нб.комп}}$ появляется в тех случаях, когда регулирующие возможности компенсирующих устройств не позволяют подобрать расчетные значения ($w_{\text{у}}$ или $n_{\text{а}}$), необходимые для полной компенсации.

4) Составляющая, обусловленная наличием тока намагничивания $I_{\text{нам}}$ у силового трансформатора. Ток намагничивания нарушает расчетное соотношение между первичным и вторичным токами силового трансформатора, что вытекает из схемы на рис. 16-23, и вызывает ток $I_{\text{нб.нам}} = I_{\text{нам}}$ трансформатора.

В нормальном режиме $I_{\text{нам}}$ силового трансформатора не превышает 1—5% номинального тока; при к. з. ток намагничивания уменьшается; при неустановившемся режиме, связанном с внезапным увеличением напряжения на трансформаторе, ток намагничивания силового трансформатора резко возрастает. В режиме нагрузки и к. з. $I_{\text{нб.нам}}$ обычно не учитывается из-за малой величины его.

5) Компенсирующие трансформаторы и автотрансформаторы вносят погрешность при трансформации токов плеч, что вызывает появление небаланса. Однако этот небаланс очень мал и поэтому не учитывается.

Из сказанного вытекает, что *полный ток небаланса в дифференциальной защите трансформаторов при внешних к. з. определяется в основном* $I_{\text{нб.т.т}}$ и $I_{\text{нб.рег}}$.

В некоторых случаях к ним добавляется ток $I_{\text{нб.комп}}$, *вызванный неточностью компенсации неравенства токов в плечах защиты.* Таким образом, *в общем случае полный ток небаланса*

$$I_{\text{нб}} = I_{\text{нб.т.т}} + I_{\text{нб.рег}} + I_{\text{нб.комп}}. \qquad (16\text{-}19)$$

б) Причины повышенного $I_{\text{нб}}$ в дифференциальной защите трансформаторов

Величина тока небаланса в дифференциальных защитах трансформаторов оказывается обычно большей, чем в дифференциальных защитах генераторов и линий, что объясняется наличием дополнительных составляющих в токе небаланса ($I_{\text{нб.рег}}$ и $I_{\text{нб.комп}}$) и большим абсолютным значением составляющей $I_{\text{нб.т.т}}$, обусловленной погрешностями трансформаторов тока. Последнее вызывается тремя особенностями, характерными для дифференциальных защит трансформаторов.

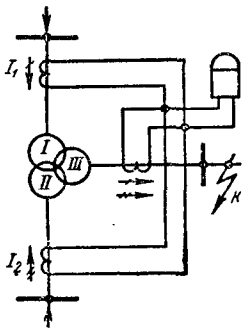


Рис. 16-24. Условия работы дифференциальной защиты трехобмоточного трансформатора при внешнем к. з.

Первая из них состоит в конструктивной разнотипности трансформаторов тока, применяемых на стороне высшего и низшего напряжения силовых трансформаторов.

Эти конструктивные различия порождают различие магнитных характеристик трансформаторов тока и их токов намагничивания, что приводит к увеличению разности $I_{\text{IIнам}} - I_{\text{Iнам}}$, определяющей величину $I_{\text{нб.т.т}}$.

Особенно резко отличаются характеристики трансформаторов тока, встраиваемых в вводы масляных выключателей (напряжением 35 *кв* и выше), от характеристик выносных трансформаторов тока, применяемых на напряжения 10 и 6 *кв*.

Второй особенностью дифференциальной защиты трансформаторов является большое сопротивление нагрузки, присоединенной ко вторичным обмоткам трансформаторов тока, и значительное различие сопротивлений плеч.

Сопротивление нагрузки состоит из сопротивлений соединительных проводов между трансформатором тока и реле и определяется расстоянием от щита управления, где устанавливаются реле, до распределительных устройств, в которых размещаются трансформаторы тока защиты силовых трансформаторов. Очень часто эти расстояния бывают значительными и неодинаковыми по величине.

Кроме того, нужно учитывать, что сопротивление линейных проводов ложится утроенной нагрузкой на трансформаторы тока, соединенные в треугольник, благодаря чему даже при равенстве длин плеч трансформаторы тока, соединенные в треугольник, оказываются более загруженными, чем вторая группа трансформаторов тока, соединяемая в звезду (см. § 3-7).

Третья особенность имеет место у трехобмоточных трансформаторов, а также у двухобмоточных с двумя выключателями на стороне какой-либо обмотки.

В этих случаях кратности токов при внешних к. з. для различных групп трансформаторов тока дифференциальной защиты получаются неодинаковыми. Через одну группу протекает суммарный ток к. з., в то время как через две другие группы — лишь часть этого тока (рис. 16-24).

В результате первые трансформаторы тока намагничиваются сильнее, что вызывает резкое увеличение их намагничивающих токов по сравнению с намагничивающими токами двух остальных групп.

в) Расчет $I_{нб}$

Расчетным путем ток небаланса $I_{нб.т.т}$ оценивается, так же как и в дифференциальной защите генераторов, по приближенной формуле, из предположения, что при максимальном значении тока внешнего к. з. $I_{к.з.макс}$ погрешность трансформаторов тока не превышает 10% (0,1). В соответствии с этим

$$I_{нб.т.т} = k_{одн} 0,1 I_{к.з.макс}, \qquad (16\text{-}20)$$

где $k_{одн}$ учитывает различие в погрешности трансформаторов тока, образующих дифференциальную схему, $k_{одн} = 0,5 \div 1$; при существенном различии условий работы и конструкций трансформаторов тока различие их погрешностей достигает максимального значения и принимается равным 1.

С учетом выражений (16-18) и (16-20) расчетное значение полного тока небаланса по выражению (16-19) примет вид:

$$I_{нб} = (k_{одн} 0,1 + \Delta N_{рег}) I_{к.з.макс}. \qquad (16\text{-}20а)$$

г) Меры для предупреждения действия защиты от токов небаланса

Предотвращение работы защиты от токов небаланса достигается выбором тока срабатывания защиты $I_{ср} > I_{нб}$.

Очевидно, что данное условие ограничивает чувствительность защиты.

Для обеспечения достаточной чувствительности защиты принимаются меры к понижению величины $I_{нб}$. *Уменьшение токов небаланса*, обусловленных погрешностью трансформаторов тока $I_{нб.т.т}$, *обеспечивается подбором трансформаторов тока и их вторичной нагрузки таким образом, чтобы они не насыщались при максимальном значении тока сквозного к. з.* Для обеспечения этого условия трансформаторы тока и их вторичная нагрузка выбираются по кривым 10%-ной погрешности или по характеристикам намагничивания трансформаторов тока.

Хотя указанные меры и позволяют уменьшить ток небаланса (за счет снижения $I_{нб.т.т}$), его значение остается все же большим. В связи с этим для повышения чувствительности дифференциальной защиты и вместе с тем для более надежной отстройки от токов небаланса применяются реле, включенные через быстронасыщающиеся вспомогательные трансформаторы, и реле с торможением.

16-7. ТОКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ПОД НАПРЯЖЕНИЕ

а) Характер изменения токов намагничивания

При включении силовых трансформаторов под напряжение или при восстановлении на них напряжения после отключения внешнего к. з. в обмотке, питающей трансформатор, возникает резкий бросок тока намагничивания, имеющий затухающий характер (рис. 16-25). Максимальное значение этого тока в несколько раз превосходит номинальный ток трансформатора.

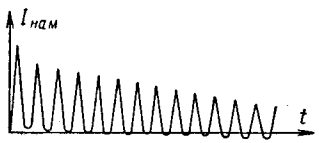


Рис. 16-25. Характер изменения намагничивающего тока по времени.

Резкое возрастание тока намагничивания объясняется насыщением магнитопровода трансформатора. При включении трансформатора под напряжение оно появляется на его обмотке внезапно. Аналогичная картина имеет место на трансформаторе после отключения к. з. при восстановлении напряжения (рис. 16-26).

Во время к. з. напряжение на трансформаторе понижается в пределе до нуля. После отключения повреждения (точка B) происходит скачкообразное восстановление напряжения на зажимах трансформатора.

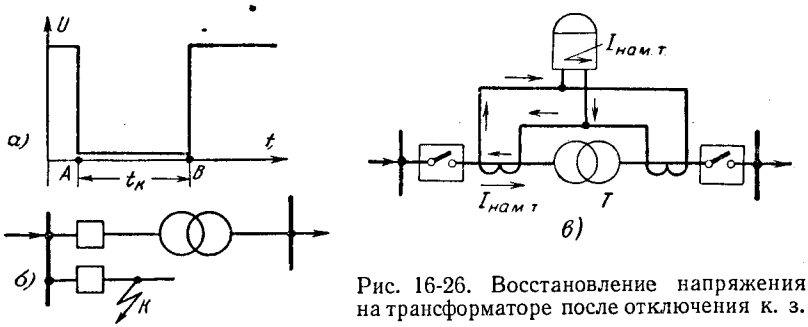


Рис. 16-26. Восстановление напряжения на трансформаторе после отключения к. з.

В обоих случаях магнитный поток в сердечнике трансформатора устанавливается не сразу. Возникает переходный процесс, сопровождающийся появлением двух потоков: установившегося $\Phi_у$ и свободного, постепенно затухающего $\Phi_{св}$ (рис. 16-27). Результирующий поток $\Phi_т = \Phi_у + \Phi_{св}$; в начальный момент ($t = 0$) $\Phi_{т0} = 0$ и поэтому $\Phi_{св0} = -\Phi_{у0}$. Во втором полупериоде знаки обоих

потоков совпадают и результирующий поток трансформатора достигает максимума $\Phi_{т.макс}$.

Установившийся поток $\Phi_у$ отстает от напряжения $U_т$ на 90°, поэтому величина свободного потока $\Phi_{св0}$, а следовательно, и $\Phi_{т.макс}$ зависят от фазы $U_т$ и достигают наибольшего значения при включении трансформатора в момент прохождения $U_т$ через нуль. В этом случае без учета затухания $\Phi_{т.макс} \approx 2\Phi_у$. Величина потока $\Phi_{т.макс}$ может достигать и больших значений, если магнитопровод трансформатора имеет остаточное намагничивание и соответствующий ему поток $\Phi_{ост}$ совпадает по знаку со свободным потоком $\Phi_{св}$. Тогда $\Phi_{т.макс} = (2\Phi_у + \Phi_{ост}) > 2\Phi_у$.

При потоках, близких к $2\Phi_у$, магнитопровод трансформатора насыщается, что и обусловливает резкий рост (бросок) намагничивающего тока $I_{нам}$ трансформатора.

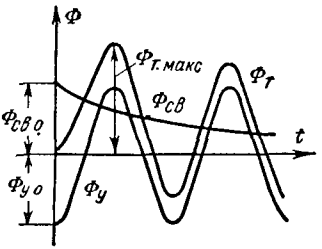


Рис. 16-27. Магнитные потоки в сердечнике трансформатора при включении его под напряжение.

Изменение тока $I_{нам}$ по времени характеризуется следующими особенностями:

1. Кривая тока носит асимметричный характер до тех пор, пока $I_{нам}$ не достигнет установившегося значения.

2. Кривая может быть разложена на апериодическую составляющую и синусоидальные токи различных гармоник. Апериодическая составляющая имеет весьма большое удельное значение.

3. Время затухания токов определяется постоянными времени трансформатора и сети и может достигать 2—3 *сек*. Чем мощнее трансформатор, тем дольше продолжается затухание.

4. Первоначальный бросок тока может достигать 5—10-кратного значения номинального тока трансформатора. Кратность броска тока на мощных трансформаторах меньше, чем на маломощных.

Ток намагничивания $I_{нам.т}$ появляется только в одной обмотке силового трансформатора, той, на которую подается напряжение при его включении. Как видно из рис. 16-26, *в*, этот ток трансформируется через трансформатор тока защиты и поступает в реле, вызывая его работу, если $I_{нам.т.} > I_{с.з}$. Для предотвращения ложной работы дифференциальной защиты под действием $I_{нам.т}$ принимаются специальные меры, рассмотренные ниже.

б) Способы предотвращения работы защиты от бросков тока намагничивания

Наиболее простым и ранее широко применявшимся является способ замедления защиты на время порядка 1 *сек*. Однако при этом терялось наиболее ценное свойство защиты — ее быстродействие. Применялись и другие, более сложные способы отстройки от токов намагничивания с сохранением быстродействия (блокировки от понижения напряжения, торможение от токов высших гармоник и т. д.).

Опыт эксплуатации показал, что эти способы себя не оправдали; они приводили к усложнению защиты и не давали достаточно надежной отстройки от намагничивающих токов. Поэтому в Советском Союзе указанные способы не рекомендуются к применению.

На основании работ ВНИИЭ, ТЭП и опыта эксплуатации энергосистем в настоящее время в СССР приняты два способа отстройки от токов намагничивания.

Первый из них заключается в применении быстронасыщающихся трансформаторов (БНТ), через которые включаются дифференциальные реле [Л. 66, 67]. БНТ не пропускают апериодического тока, составляющего значительную часть тока намагничивания, и позволяют, таким образом, надежно отстроить дифференциальные реле от намагничивающих токов.

Второй способ состоит в отстройке тока срабатывания реле от тока намагничивания по величине. На таком принципе выполняется защита, называемая дифференциальной отсечкой.

Преимуществом обоих способов являются: простота, надежность и сохранение основного достоинства дифференциальной защиты — быстроты действия.

16-8. СХЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

а) Варианты схем токовых цепей защиты

Схемы токовых цепей защиты на трансформаторах с соединением Y/Δ могут выполняться в двух вариантах: по полной трехфазной схеме, показанной на рис. 16-21 с тремя реле, и упрощенной схеме в двухфазном исполнении на стороне треугольника силового трансформатора (рис. 16-28, *а*) с двумя или тремя реле.

Упрощенная схема позволяет сэкономить один трансформатор тока. В этой схеме вместо провода отсутствующей фазы B используется нулевой (обратный) провод, в котором, как это следует из токораспределения на рис. 16-28, *а*, проходит геометрическая сумма противоположно направленных токов фаз A и C, т. е. ток, совпадающий по величине и направлению с током отсутствующей фазы B (рис. 16-28, *б*):

$$\dot{I}_{\text{обр}} = (-\dot{I}_a) + (-\dot{I}_c) = \dot{I}_b.$$

Поэтому при всех случаях внешних к. з. токи в реле упрощенной схемы балансируются так же, как и в полной трехфазной схеме. В этом можно убедиться, построив распределение токов в цепях защиты при всех видах внешних к. з. или, что проще, рассмотрев для этих повреждений распределение токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Упрощенная схема имеет два недостатка. Первый состоит в том, что она не действует при двойных замыканиях на землю на стороне низшего напряжения в тех случаях, когда земля в трансформаторе

возникает на фазе, не имеющей трансформатора тока. Это повреждение будет отключаться другими защитами трансформатора — максимальной или газовой или защитой поврежденной линии.

Второй недостаток заключается в повышенной величине тока небаланса в реле фазы *B* (рис. 16-28, *а*). В этом реле балансируются не два тока, как обычно, а три: $I_{B\triangle}$ со стороны треугольника и токи двух трансформаторов тока *a* и *b* со стороны неполной звезды. В результате этого $I_{нб}$ равен геометрической разности трех намагничивающих токов $(I_{намa} + I_{намb}) - I_{намB\triangle}$ вместо двух в трехфазной схеме $(I_{намb} - I_{намB\triangle})$. Наличие отмеченных недостатков ограничивает применение упрощенной схемы. На трансформаторах большой и средней мощности следует применять трехфазную схему как более совершенную.

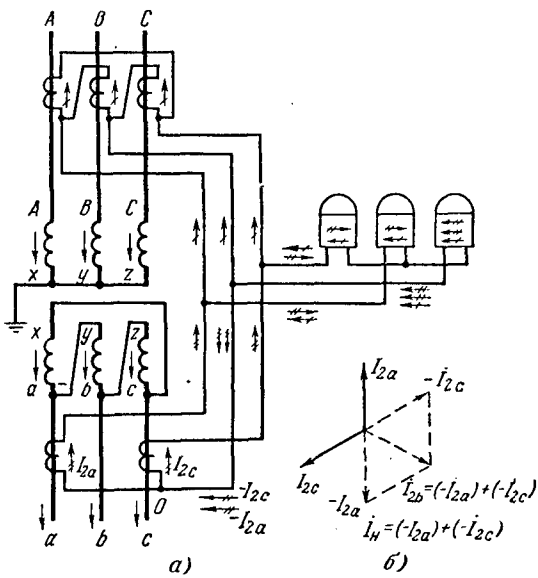


Рис. 16-28. Упрощенная схема дифференциальной защиты.

а — схема; *б* — векторная диаграмма.

б) Дифференциальная токовая отсечка

Дифференциальная токовая отсечка выполняется посредством простых токовых реле, действующих на отключение без выдержки времени. Схема защиты показана на рис. 16-29.

Основным условием правильной работы защиты является отстройка тока срабатывания реле защиты от бросков намагничивающих токов, возникающих при включении трансформатора, и токов небаланса при внешних к. з.

Для облегчения отстройки от мгновенного пика бросков намагничивающих токов на выходе защиты следует устанавливать промежуточное реле с временем действия 0,04—0,06 *сек*. За это время величина намагничивающего тока успевает снизиться, что позволяет не отстраиваться от максимального броска намагничивающего тока.

Ток срабатывания для отстройки от токов намагничивания при наличии выходного промежуточного реле со временем действия 0,03—0,06 *сек* принимается в пределах $I_{с.з} = (3 \div 5)\, I_{ном.т}$.

Выбранный ток срабатывания должен проверяться непосредственным включением холостого трансформатора под напряжение.

Трансформаторы тока должны удовлетворять кривым 10%-ной погрешности. При этих условиях отстройка от тока намагничивания одновременно обеспечивает отстройку и от токов небаланса при внешних к. з.

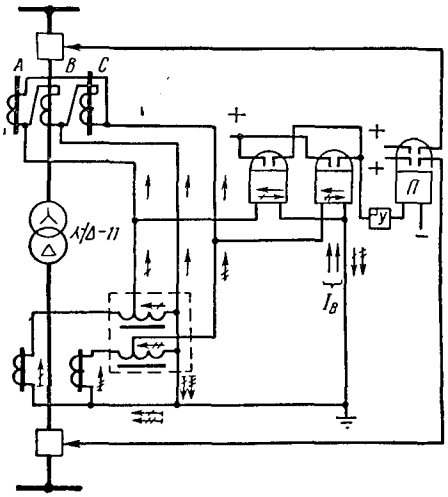


Рис. 16-29. Дифференциальная отсечка в двухфазном исполнении.

Из-за большой величины тока срабатывания защита недостаточно чувствительна к витковым замыканиям. Надежность действия защиты при повреждениях на выводах трансформатора с приемной стороны необходимо проверять по току к. з. Как обычно, чувствительность оценивается коэффициентом

$$k_ч = \frac{I_{к.з.макс}}{I_{с.з}} \geqslant 1{,}5.$$

Расчет коэффициентов трансформации трансформаторов тока и автотрансформаторов производится по § 16-5, б. Для выравнивания токов используются автотрансформаторы ВУ-25Б.

Достоинством защиты являются простота и быстродействие. Недостатком следует считать ограниченную чувствительность.

Дифференциальная отсечка обычно применяется на трансформаторах малой мощности в случаях, когда необходимо обеспечить быстрое и двустороннее селективное отключение их при междуфазных коротких замыканиях.

в) Дифференциальная защита с токовыми реле, включенными через быстронасыщающиеся трансформаторы

Схема и принцип действия. Применение быстронасыщающихся трансформаторов (БНТ) позволяет выполнить простую и быстродействующую дифференциальную защиту, надежно отстроенную от токов небаланса и бросков намагничивания. На рис. 16-30, *а* представлена схема дифференциальной защиты с реле типа РНТ-565. Как указывалось, БНТ плохо трансформирует апериодические токи (см. гл. 15). Переходные токи небаланса и броски намагничивающих токов силовых трансформаторов расположены а с и м м е т р и ч н о относительно оси времени и содержат вследствие этого значительную апериодическую составляющую, которая не трансформируется на вторичную сторону БНТ, а почти полностью

идет на намагничивание его сердечника. В реле защиты попадает лишь переменная составляющая тока небаланса и броска намагни-

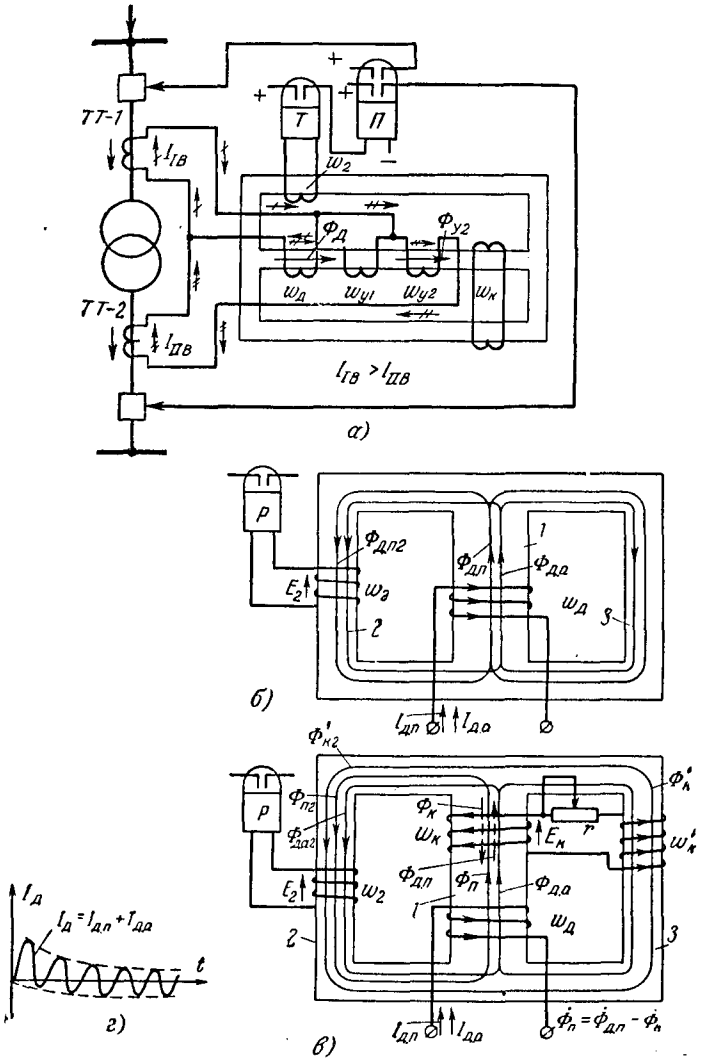


Рис. 16-30. Дифференциальная защита с реле типа РНТ-565.

а — схема защиты и реле РНТ; *б* — апериодические и периодические магнитные потоки в магнитопроводе РНТ при отсутствии короткозамкнутой цепи; *в* — те же при наличии короткозамкнутой цепи; *г* — токи $I_{нам}$ и $I_{нб}$ с небольшой асимметрией.

чивающего тока силового трансформатора. Однако за счет насыщения сердечника БНТ, обусловленного подмагничивающим действием апериодического тока, трансформация переменной состав-

ляющей также ухудшается, что еще больше уменьшает ток в реле. После затухания апериодической составляющей нормальные условия для трансформации периодического тока восстанавливаются. Подмагничивающее действие апериодического тока, появляющегося в первый момент к. з., приводит к замедлению защиты при повреждении в ее зоне. Из-за насыщения сердечника БНТ ток в реле уменьшается настолько, что оно не действует до тех пор, пока не затухнет апериодическая составляющая тока. Однако продолжительность такого замедления невелика, она составляет 0,01—0,03 *сек*.

На рис. 16-31, *а* приведена полученная из опытов осциллограмма тока намагничивания силового трансформатора, протекающего по первичной обмотке БНТ *2а*, и соответствующего ему тока во вторичной обмотке БНТ *3а*, а на рис. 16-31, *б* —

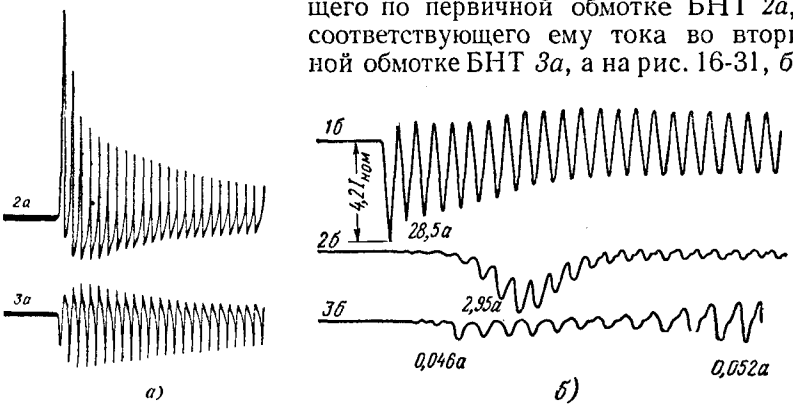


Рис. 16-31. Осциллограммы токов в обмотках БНТ.

а — при включении силового трансформатора под напряжение; *б* — при сквозном к. з. (*2а* — ток намагничивания в первичной обмотке; *3а* — ток намагничивания во вторичной обмотке; *1б* — ток сквозного к. з. в плече дифференциальной защиты; *2б* — ток небаланса в первичной обмотке; *3б* — ток небаланса во вторичной обмотке БНТ).

осциллограмма тока к. з. и вызванного им тока небаланса, протекающего по первичной и вторичной обмоткам БНТ. Эти осциллограммы наглядно показывают резкое снижение тока в реле и эффективность насыщающегося трансформатора.

Ток срабатывания защиты должен отстраиваться от переменной составляющей переходных токов намагничивания и небаланса. В результате этого чувствительность защиты с насыщающимися трансформаторами оказывается выше, чем токовой отсечки. Опыт эксплуатации показывает, что ток срабатывания можно выбирать в пределах $(1 \div 2)\, I_{ном.т}$. При этом предполагается, что трансформаторы тока подобраны по 10%-ным кривым.

Выше отмечалось, что реле РНТ-565 совмещает в себе устройство для выравнивания вторичных токов защиты и БНТ, питающий реле. Схема, поясняющая его включение, показана на рис. 16-30.

Обмотки $w_д$ и w_2 образуют насыщающийся трансформатор; первая из них включается по дифференциальной схеме (на раз-

ность токов), а вторая — питает реле T (типа РТ-40). Уравнительные обмотки включаются в плечи защит и служат для уравнивания вторичных токов. В защитах двухобмоточных трансформаторов используется одна обмотка.

Число витков уравнивающей обмотки регулируется с помощью отпаек и подбирается так, чтобы при внешнем к. з. ток в реле, а следовательно, и в обмотке w_2 отсутствовал, т. е. $I_р = I_2 = 0$. Для обеспечения этого условия намагничивающие силы уравнительной и дифференциальной обмоток должны уравновешиваться согласно выражению (16-16).

Ток срабатывания защиты регулируется изменением числа витков обмотки $w_д$. На магнитопроводе реле РНТ имеется короткозамкнутая обмотка $w_к$. Она повышает отстройку реле от токов небаланса и бросков намагничивающих токов силового трансформатора особенно, когда эти токи не полностью сдвинуты относительно нулевой линии (рис. 16-30, *г*).

Подобные токи имеют значительную периодическую составляющую и относительно небольшую апериодическую, что понижает эффективность действия БНТ. Короткозамкнутая обмотка $w_к$ ограничивает периодический ток, возникающей во вторичной обмотке РНТ, но не изменяет подмагничивающее действие апериодической составляющей.

Ток $I_д$, поступающий в первичную обмотку РНТ $w_д$ (рис. 16-30, *б*), создает магнитодвижущую силу $F_д = I_д w_д$, которая образует в среднем стержне магнитный поток $\Phi_д$, замыкающийся по крайним стержням *2* и *3* магнитопровода.

В общем случае ток $I_д$ состоит из переменной $I_{д.п}$ и апериодической $I_{д.а}$ составляющих: $I_д = I_{д.п} + I_{д.а}$. Соответственно этому образуются две составляющие м. д. с.: $F_{д.п}$ и $F_{д.а}$, и два магнитных потока: $\Phi_{д.п}$ и $\Phi_{д.а}$.

Переменный поток $\Phi_{д.п}$, замыкаясь по стержню *2*, наводит в обмотке w_2, питающей реле P, э. д. с. E_2. Апериодический поток $\Phi_{д.а}$, медленно изменяющийся во времени, не создает э. д. с. в w_2 и полностью затрачивается на намагничивание магнитопровода.

При наличии короткозамкнутой обмотки (рис. 16-30, *в*) переменная составляющая потока $\Phi_{д.п}$ наводит в витках $w_к$ э. д. с. $E_к$ и ток $I_к$. Последний создает м. д. с. $F_к = I_к w_к$ и $F'_к = I_к w'_к$.

Магнитодвижущая сила $F_к$ действует навстречу $F_{д.п}$ и почти полностью компенсирует ее. Результирующая м. д. с. $F_1 = F_{д.п} - F_к$ создает остаточный поток $\Phi_п \ll \Phi_{д.п}$ (где $\Phi_{д.п}$ — магнитный поток при отсутствии короткозамкнутой обмотки). Магнитодвижущая сила $F'_к$ образует поток $\Phi'_к$, замыкающийся вместе с составляющей потока $\Phi_п$ по стержню *2*.

Параметры короткозамкнутой обмотки подбираются так, чтобы суммарный магнитный поток в стержне *2* $\Phi_2 = \Phi_{п2} + \Phi'_{к2}$ был меньше потока $\Phi_{д.п2}$. Здесь $\Phi_{п2}$, $\Phi'_{к2}$ и $\Phi_{дп2}$ — составляющие магнитных потоков $\Phi_п$, $\Phi_к$ и $\Phi_{д.п}$, замыкающиеся по стержню *2*. Таким образом, короткозамкнутая обмотка уменьшает переменный магнитный поток, создаваемый периодическим током $I_{д.п}$, питающим обмотку $w_д$.

На магнитодвижущую силу $F_{д.а}$, создаваемую апериодическим током $I_{д.а}$, короткозамкнутая обмотка $w_к$ не влияет, так как скорость изменения тока $I_{д.а}$ очень мала и поэтому ток $I_{д.а}$ не вызывает в ней э. д. с. Это означает, что поток $\Phi_{д.а}$, создаваемый $F_{д.а} \equiv I_{д.а} w_д$, и его подмагничивающее действие практически не зависят от короткозамкнутой обмотки.

Короткозамкнутая обмотка уменьшает трансформацию периодической составляющей тока в реле и не влияет на величину и действие апериодической со-

ставляющей. Влияние обмотки $w_к$ равноценно уменьшению периодического тока в обмотке $w_д$ с $I_{д.п}$ до некоторой величины $I'_{д.п}$ при сохранении неизменной $I_{д.а}$.

Изменением сопротивления r меняются величина тока $I_к$ и его фаза относительно первичного тока $I_{д.п}$. Это позволяет регулировать влияние короткозамкнутой обмотки на работу реле.

Варианты схем включения обмоток реле РНТ (рис. 16-32). В дифференциальной защите двухобмоточных трансформаторов (или автотрансформаторов) для компенсации неравенства токов в плечах защиты достаточно использовать только одну уравнительную обмотку (например, $w_{уII}$), включая ее в плечо с меньшим током (рис. 16-32, *а*).

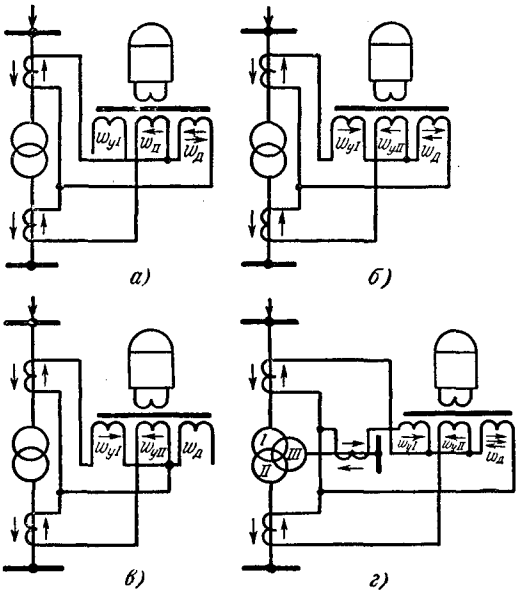


Рис. 16-32. Варианты схем включения обмоток реле РНТ-565.

Для повышения точности компенсации применяются схемы с включением уравнительной обмотки в каждое плечо защиты, при этом дифференциальная обмотка, как и в предыдущей схеме, включается на разность токов плеч (рис. 16-32, *б*) и, наконец, возможна схема с использованием только уравнительных обмоток $w_{уI}$ и $w_{уII}$ по рис. 16-32, *в*.

В схемах защиты трехобмоточных трансформаторов (рис. 16-32, *г*) используются дифференциальная и обе уравнительные обмотки. Последние включаются в плечи *II* и *III* с меньшими токами. Плечо *I* с большим током подсоединяется непосредственно к дифференциальной обмотке реле.

Выбор параметров защиты. Выбирают коэффициенты трансформации трансформаторов тока, ток срабатывания защиты и витки дифференциальной и уравнительных обмоток (рис. 16-30, *а*) [Л. 5, 6, 10].

1. Определяются коэффициенты трансформации трансформаторов тока первой и второй групп из условия, что трансформаторы тока должны длительно допускать протекание номинального тока защищаемого трансформатора (или автотрансформатора) и обеспечивать равенство токов в плечах защиты согласно (16-11) или (16-12).

В схемах защиты, в которых обе группы трансформаторов тока (первая и вторая) соединены в звезду, коэффициенты трансформации $n_{тI}$ и $n_{тII}$ определяются по выражению

$$n_{тI} = \frac{I_{ном.тI}}{5} \quad \text{и} \quad n_{тII} = \frac{I_{ном.тII}}{5}, \tag{16-21}$$

где $I_{\text{ном.т I}}$ и $I_{\text{ном.т II}}$ — номинальные токи силового трансформатора, отнесенные к напряжению той стороны, где установлены рассматриваемые трансформаторы тока.

Номинальные токи силовых трансформаторов находятся по их номинальной мощности $S_{\text{ном}}$, а автотрансформаторов — по их проходной мощности $S_{\text{прох}}$.

По расчетным значениям $n_{\text{т I}}$ и $n_{\text{т II}}$ выбираются стандартные трансформаторы тока с тем же или ближайшим большим $n_{\text{т}}$.

В дифференциальных защитах, у которых одна группа трансформаторов тока соединена в треугольник, а вторая в звезду коэффициент трансформации $n_{\text{т II}}$ второй группы выбирается по выражению (16-21).

Первая группа, соединенная по схеме треугольника, должна длительно выдерживать номинальный ток обмотки силового трансформатора, соединенного в звезду ($I_{\text{ном I}}$). Этому условию удовлетворяет трансформатор тока с коэффициентом трансформации $n_{\text{т I}} \geqslant I_{\text{ном I}}/5$. Однако для обеспечения равенства токов в плечах защиты [по условию (16-12)] расчетный коэффициент $n_{\text{т II}}$ принимается в $\sqrt{3}$ раз большим по выражению

$$n_{\text{т}II} = \frac{\sqrt{3}\, I_{\text{ном}II}}{5}. \tag{16-22}$$

В соответствии с этим выбирается стандартный трансформатор тока с $n_{\text{т}} \approx n_{\text{т II}}$.

2. Определяются токи в плечах защиты ($I_{\text{Iв}}$ и $I_{\text{IIв}}$) при прохождении по защищаемому трансформатору сквозного номинального тока. Ток в плече трансформаторов тока, соединенных в звезду, $I_{\text{IIв}} = I_{\text{ном II}}/n_{\text{т II}}$, ток в плече треугольника $I_{\text{Iв}} = \dfrac{I_{\text{ном}I}}{n_{\text{т}I}}\sqrt{3}$, при этом $I_{\text{ном I}} = I_{\text{ном II}}/N$.

Плечо с бóльшим током называется основным, в дальнейшем будем считать, что основным является плечо *I*.

Если токи $I_{\text{Iв}}$ и $I_{\text{IIв}}$ различаются больше чем на 5%, то предусматривается компенсация их различия с помощью уравнительных обмоток трансформатора в РНТ.

3. Выбирается ток срабатывания защиты. Он должен быть отстроен от первоначального броска намагничивающего тока защищаемого трансформатора или автотрансформатора и от максимального тока небаланса при внешнем к. з.

По первому условию

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{н}} I_{\text{нам.т}}. \tag{16-23}$$

На основании опыта эксплуатации и специальных экспериментов установлено, что при наличии БНТ ток намагничивания $I_{\text{нам.т}}$, попадающий в реле, не содержит апериодической составляющей и поэтому ток в реле не превышает $(1 \div 1{,}5)\, I_{\text{ном.т}}$. С учетом этого принимается

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{н}} I_{\text{ном.т}} = (1{,}2 \div 2)\, I_{\text{ном.т}}. \tag{16-24}$$

При защите автотрансформаторов ток $I_{\text{ном.т}}$ определяется по типовой мощности автотрансформатора.

По второму условию

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{н}} I_{\text{нб.макс}}. \tag{16-25}$$

Расчетное значение $I_{\text{нб.макс}}$ оценивается по выражению (16-20а) в предположении, что составляющая $I_{\text{нб.комп}} = 0$. Ток срабатывания принимается равным большему из двух значений (16-24) и (16-25).

По выбранному первичному току срабатывания защиты находится вторичный ток срабатывания реле:

$$I_{\text{с.р}} = \frac{I_{\text{с.з}}}{n_{\text{т}}} k_{\text{сх}}, \tag{16-26}$$

где $n_т$ — коэффициент трансформации трансформаторов тока на той стороне защищаемого трансформатора, для которой подсчитан $I_{с.р}$; $k_{сх}$ — коэффициент, учитывающий схему соединения трансформаторов тока; при соединении в звезду $k_{сх} = 1$, при включении по схеме треугольника $k_{сх} = \sqrt{3}$.

Ток срабатывания реле, отнесенный к основной стороне защиты, является наибольшим.

4. Определяется число витков дифференциальной и уравнительных обмоток РНТ:

а) Сначала определяются витки обмоток реле, по которым протекает ток $I_{1в}$ основного плеча защиты ($w_{осн}$).

В схеме, использующей только одну уравнительную обмотку $w_{уII}$ (рис. 16-32, *а*), ток основного плеча замыкается по дифференциальной обмотке и поэтому $w_{осн} = w_д$, в схеме, показанной на рис. 16-32, *б*, $w_{осн} = w_{уI} + w_д$.

Число витков основной обмотки $w_{осн}$ находится из уравнения, характеризующего условия срабатывания реле.

Если обозначить н. с., необходимую для срабатывания реле $F_{с.р}$, то условием действия реле будет равенство

$$I_{с.р} w_{осн} = F_{с.р}. \tag{16-27}$$

Для реле типа РНТ-565 $F_{с.р} = 100$ *ав*. Зная из предыдущего расчета ток срабатывания реле на основной стороне защиты, нетрудно определить число витков $w_{осн}$, необходимое для действия реле при этом токе, из (16-27).

По полученному значению $w_{осн}$ находится $w_д$. В схеме без уравнительной обмотки в основном плече защиты $w_д = w_{осн}$. В схеме, предусматривающей включение обмотки $w_{уI}$ в основное плечо, $w_д = w_{осн} - w_{уI}$. Величиной $w_{уI}$ задаются. Если на дифференциальной обмотке реле РНТ нет ответвлений с числом витков, равным расчетному, то принимается ближайшее меньшее число витков.

б) Определяется расчетное число витков обмоток РНТ, по которым проходит ток неосновного плеча. Указанные витки находятся из уравнения (16-16) баланса н. с. при внешнем к. з. при условии, что по обеим обмоткам защищаемого трансформатора проходят равные номинальные мощности $S_{ном}$.

Уравнение (16-16) можно преобразовать, сгруппировав в нем члены с $I_{1в}$ и $I_{IIв}$, тогда оно примет вид:

$$I_{Iв} (w_{уI} + w_д) = I_{IIв} (w_{уII} + w_д).$$

Учитывая, что $w_{уI} + w_д = w_{осн}$, а $w_{уII} + w_д = w_{IIрасч}$, получаем:

$$I_{Iв} w_{осн} = I_{IIв} w_{IIрасч}.$$

Отсюда

$$w_{IIрасч} = \frac{I_{Iв}}{I_{IIв}} w_{осн}. \tag{16-28}$$

Зная из предыдущего расчета $I_{1в}$, $I_{IIв}$ и $w_{осн}$, определяем $w_{IIрасч}$, а затем $w_{уII} = w_{IIрасч} - w_д$.

Расчет защиты трехобмоточных трансформаторов ведется аналогично, но в два приема. Сначала считают, что отключена обмотка *III* (рис. 16-32, *г*) и определяют по (16-27) и (16-28) $w_{осн}$ и $w_{IIрасч}$, затем принимают, что отключена обмотка *II* и из условия баланса н. с. при внешнем к. з. $I_{1в} w_д = I_{IIIв} (w_{уIII} + w_д)$ находят $w_{уIII}$.

5. Определяется величина тока небаланса $I_{нб.комп}$, обусловленная неточностью подбора $w_{уI}$ и $w_{уII}$.

Этот небаланс подсчитывается в общем случае по выражению

$$I_{нб.комп} = \frac{w_{Iрасч} - w_{уI}}{w_{Iрасч}} I_{Iк.з.макс} + \frac{w_{IIрасч} - w_{уII}}{w_{IIрасч}} I_{IIк.з.макс}, \tag{16-29}$$

где $w_{уI}$ и $w_{уII}$ — принятые к установке числа витков уравнительных обмоток РНТ; $I_{Iк.з.макс}$ и $I_{IIк.з.макс}$ — токи к. з., протекающие при внешнем к. з. по той стороне силового трансформатора, куда включены обмотки $w_{уI}$ и $w_{уII}$ соответственно.

Сопоставляются фактические значения $I_{с.з}$ и $I_{нб}$ (с учетом $I_{нб.комп}$). Если $I_{с.з}$ окажется недостаточно отстроенным от $I_{нб}$, то необходимо загрубить защиту и провести пересчет параметров.

6. Проверяется чувствительность защиты при к. з. в ее зоне. Чувствительность характеризуется коэффициентом $k_ч$, который равен отношению результирующей н. с., создаваемой токами плечей, по которым протекает ток при рассматриваемом к. з., к н. с. срабатывания реле:

$$k_ч = \frac{\Sigma I_п (w_у + w_д)}{F_{с.р}}, \qquad (16\text{-}30)$$

где $I_п$ — ток в плечах защиты при рассматриваемом к. з. в зоне; $w_у$ — витки уравнительной обмотки соответствующего плеча.

В качестве расчетного случая выбирается режим, при котором токи в плечах и результирующая н. с. реле оказываются наименьшими. Для этой цели в большинстве случаев рассматривается режим одностороннего питания трансформатора. При этом чувствительность может оцениваться по отношению токов:

$$k_ч = \frac{I_{к.з.мин} k_{сх}}{I_{с.з}}; \qquad (16\text{-}31)$$

здесь $k_{сх}$ учитывает схему соединений трансформаторов тока на стороне, по которой протекает ток к. з. $I_{к.з}$.

В соответствии с ПУЭ допускается $k_ч \geqslant 2$.

При недостаточной чувствительности из-за большого значения тока небаланса приходится применять более сложные реле с торможением.

Числовые примеры расчета уставок приведены в [Л. 6, 22].

г) Дифференциальная защита с реле, имеющими торможение

В дифференциальных защитах, установленных на трансформаторах с регулированием напряжения под нагрузкой или многообмоточных трансформаторах с несколькими питающими обмотками, токи небаланса в установившемся режиме имеют значительную величину. В этих случаях дифференциальная защита с реле, включенными через БНТ, получается малочувствительной вследствие того, что ее ток срабатывания приходится увеличивать до 3—4-кратного значения номинального тока трансформатора. Чувствительность дифференциальной защиты в указанных случаях может быть повышена применением дифференциальных реле с торможением. Принцип действия таких реле был рассмотрен в гл. 10.

Схема и характеристики дифференциальной защиты с торможением. Схема защиты для двух- и трехобмоточного трансформаторов показана на рис. 16-33. Рабочая обмотка реле включается дифференциально, т. е. на разность токов трансформаторов тока, а тормозные — в плечи дифференциальной защиты с таким расчетом, чтобы в любом случае внешнего к. з. хотя бы одна тормозная обмотка реле обтекалась током сквозного к. з. При этих условиях ток срабатывания защиты (т. е. ток в рабочей обмотке, необходимый для действия защиты) под влиянием тока, протекающего в тормозной обмотке реле, возрастает, что повышает надежность от-

стройки защиты от появляющихся в этом случае токов небаланса (рис. 16-34).

При к. з. в зоне защиты чувствительность тормозного реле оказывается выше, чем реле с БНТ, что видно из диаграммы, приведенной на рис. 16-34.

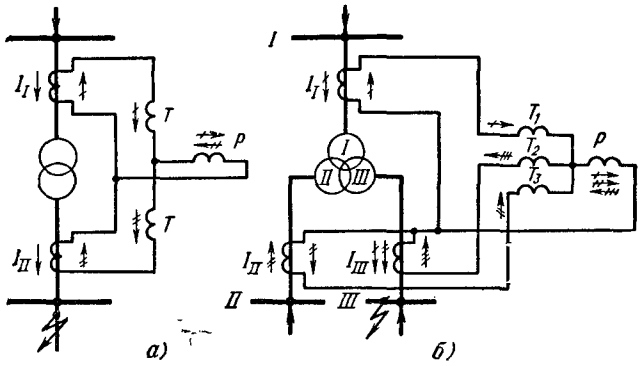


Рис. 16-33. Дифференциальная защита с торможением.

а — для двухобмоточного трансформатора; *б* — для трехобмоточного трансформатора.

Для обеспечения достаточной надежности действия защиты при повреждениях в зоне и селективности при внешних к. з. коэффициент торможения, характеризующий наклон характеристики реле (рис. 16-34), принимается равным 30—60%, а начальный ток $I_{с.р0}$ при $I_т = 0$ выбирается равным 1,5—2 *а*, т. е. 30 —40% от $I_{ном.т}$.

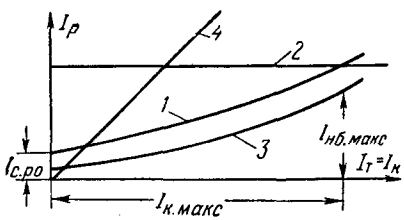


Рис. 16-34. Характеристика реле с торможением.

1 — характеристика реле с торможением; *2* — характеристика реле с БНТ; *3* — ток небаланса; *4* — ток в реле при к. з. в зоне.

Однако наличие торможения не устраняет возможности срабатывания от бросков намагничивающего тока, так как в этом случае ток в рабочей обмотке равен току в тормозной обмотке.

Наряду с этим торможение при внешних к. з. оказывается часто недостаточным для предотвращения ложного действия защиты под влиянием сильно возрастающих переходных токов небаланса. Для устранения этих недостатков тормозных реле в СССР разработана конструкция дифференциальных реле, сочетающих в себе принципы торможения с принципом отстройки от апериодических токов при помощи БНТ. Успешное решение этой задачи привело к разработке в Новочеркасском политехническом институте имени Орджоникидзе оригинальной конструкции реле с магнитным торможением, показанной на рис. 16-35 [Л. 66, 72].

Реле с магнитным торможением. Реле (рис. 16-35) состоит из трехстержневого насыщающегося трансформатора *1*, питающего обмотку электромагнитного реле *2*. Насыщающийся трансформатор имеет, как и обычный БНТ, первичную рабочую обмотку $w_р$ и вторичную обмотку w_2, в цепь которой включено дифференциальное реле. Для осуществления торможения на магнитопровод насыщающегося трансформатора насажена третья — тормозная обмотка $w_т$. Рабочая обмотка включается дифференциально, а тормозная — в рассечку плеча токовой цепи защиты, т. е. так же, как соответствующие обмотки обычного тормозного реле.

Тормозная и вторичная обмотки реле состоят из двух секций: *A* и *B*, расположенных на крайних стержнях магнитопровода. Рабочая обмотка помещена на среднем стержне.

Секции $w_{тA}$ и $w_{тB}$ тормозной обмотки соединены так, что создаваемый ими магнитный поток $Ф_т$ замыкается по крайним стержням. Поток $Ф_т$ наводит в секциях w_{2A} и w_{2B} вторичной обмотки э. д. с. $E_{тA}$ и $E_{тB}$, которые, однако, взаимно уничтожаются, так как они равны по величине и взаимно противоположны по направлению. В результате этого ток тормозной обмотки не создает тока в реле и служит только для подмагничивания крайних стержней магнитопровода, насыщая их и ухудшая трансформацию тока из рабочей обмотки во вторичную.

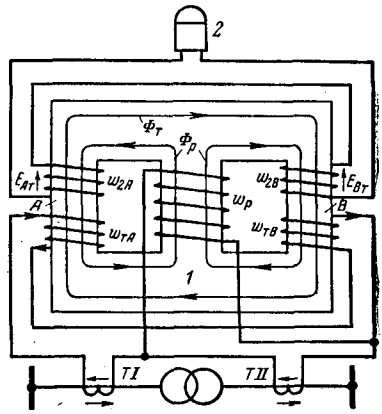


Рис. 16-35. Реле с магнитным торможением.

Поток $Ф_р$, создаваемый рабочей обмоткой, замыкается по крайним стержням и наводит в секциях вторичной обмотки согласно направленные э. д. с., обусловливающие ток в реле. Поток

$$Ф_р = \frac{I_р w_р}{R_м}.$$

Отсюда следует, что ток $I_р$, необходимый для создания потока $Ф_р$, достаточного для действия реле *2*, зависит от магнитного сопротивления $R_м$, которое увеличивается с насыщением крайних стержней магнитопровода, обусловленным подмагничиванием их током $I_т$ тормозной обмотки. Чем больше ток $I_т$, тем больший ток $I_р$ требуется для действия реле. Эта связь выражается уравнением $I_р = k_т I_т$ и изображается графически кривой *1* на рис. 16-36.

Параметры трансформатора подбираются с таким расчетом, чтобы обеспечить коэффициент торможения $k_т = 30 \div 60\%$; его

величина остается постоянной в пределах 10—50 *а*, увеличиваясь при больших значениях тормозного тока. При отсутствии тока в тормозной обмотке рассматриваемое реле работает как обычное реле с БНТ.

При внешнем к. з. ток, проходящий по тормозной обмотке, насыщает крайние стержни магнитопровода, в результате чего ток срабатывания реле возрастает, одновременно с этим ухудшается трансформация тока небаланса, появляющегося в рабочей обмотке трансформатора.

При повреждении в зоне защиты ток в рабочей обмотке равен или больше тока $I_т$; в этих условиях, несмотря на подмагничивание магнитопровода, в реле появляется ток, достаточный для его действия, что вытекает из характеристики реле, показанной на рис. 16-36.

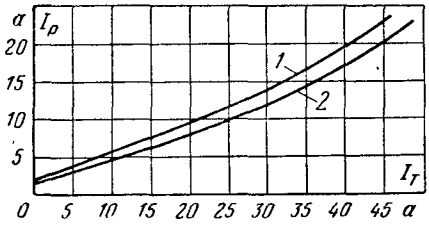


Рис. 16-36. Характеристики реле с магнитным торможением.

1 — при совпадении по фазе $I_р$ и $I_т$; *2* — при сдвиге фазы на 90°.

Магнитная индукция при токе срабатывания реле достигает значения, при котором начинается насыщение магнитопровода (1,1—1,2 *тл*) *, благодаря чему апериодический ток почти не трансформируется во вторичную обмотку, как и в обычном БНТ. Поэтому рассмотренное реле не реагирует на апериодическую составляющую, содержащуюся в намагничивающем токе силового трансформатора и токе небаланса при неустановившихся режимах.

Важнейшими преимуществами реле являются: простота конструкции, хорошая тормозная характеристика, относительно небольшая зависимость $I_{с.р}$ от фазы тормозных токов, надежная отстройка от апериодической составляющей токов намагничивания и возможность выполнения реле с тремя и более тормозными обмотками. Последнее решает задачу защиты многообмоточных трансформаторов.

Вследствие загрубления реле и уменьшения тока небаланса, поступающего в обмотку реле, повышается отстройка защиты от токов небаланса.

Отечественная промышленность выпускает реле типа ДЗТ, основанные на рассмотренном принципе. Эти реле содержат в себе трансформатор для выравнивания токов в плечах защиты. Имеются реле с одной тормозной обмоткой ДЗТ-11, предназначенные для двухобмоточных трансформаторов, с тремя (ДЗТ-13) и четырьмя (ДЗТ-14) тормозными обмотками, применяемые на многообмоточных трансформаторах.

---

* 1 *тл* = 10^4 *гс*.

16-9. КРАТКАЯ ОЦЕНКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Основное преимущество дифференциальных защит трансформаторов состоит в том, что они обеспечивают быстрое и селективное отключение повреждений как в самом трансформаторе, так и на его выводах и в токоведущих частях к его выключателям.

Основным видом защиты следует считать защиту с простым реле, включаемым через БНТ.

На маломощных трансформаторах можно для упрощения применять дифференциальные отсечки (без БНТ).

На трансформаторах с регулировкой под нагрузкой и трехобмоточных трансформаторах с двух- и трехсторонним питанием защиты простые реле с БНТ должны загрубляться до $(2 \div 3)\, I_{ном}$. При необходимости повысить чувствительность защиты надлежит применять тормозные реле с БНТ (типа ДЗТ).

16-10. ГАЗОВАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

а) Принцип действия и устройство газового реле

Газовая защита получила широкое распространение в качестве весьма чувствительной защиты от внутренних повреждений трансформаторов. Повреждения трансформатора, возникающие внутри его кожуха, сопровождаются электрической дугой или нагревом деталей, что приводит к разложению масла и изоляционных материалов и образованию летучих газов. Будучи легче масла, газы поднимаются в расширитель *2*, который является самой высокой частью трансформатора (рис. 16-37) и имеет сообщение с атмосферой.

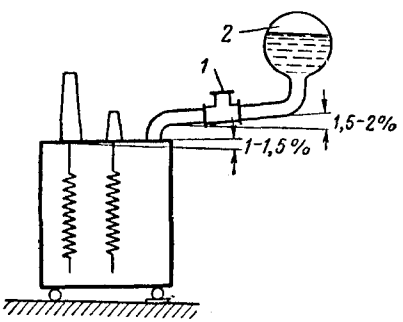


Рис. 16-37. Установка газового реле на трансформаторе.

1 — газовое реле; *2* — расширитель.

При интенсивном газообразовании, имеющем место при значительных повреждениях, бурно расширяющиеся газы создают сильное давление, под влиянием которого масло в кожухе трансформатора приходит в движение, перемещаясь в сторону расширителя.

Таким образом, *образование газов в кожухе трансформатора и движение масла в сторону расширителя могут служить признаком повреждения внутри трансформатора.* Эти признаки используются для выполнения специальной защиты при помощи газовых реле, реагирующих на появление газа и движение масла. Газовое реле *1* устанавливается в трубе, соединяющей кожух трансформатора с расширителем так, чтобы через него проходили газ и поток масла,

устремляющиеся в расширитель при повреждениях в трансформаторе.

Конструкции газовых реле имеют три разновидности, различающиеся принципом исполнения реагирующих элементов. Первоначально применялись реле с реагирующим элементом в виде поплавка, затем появились реле, у которых реагирующим элементом служит лопасть, в последнее время применяются реле с реагирующим элементом, имеющим вид чашки.

Устройство поплавкового газового реле показано на рис. 16-38. Реле состоит из чугунного кожуха *1*, имеющего вид тройного патрубка с фланцами для соединения с трубой к расширителю. Внутри кожуха реле расположены два подвижных поплавка *2а* и *2б*, выполненные в виде тонкостенных полых цилиндров, герметически запаянных и плавающих в масле. Каждый поплавок свободно вращается на оси, закрепленной на стойке. На торце поплавков располагаются ртутные контакты *3*, представляющие собой стеклянные колбочки с впаянными в нее контактами и ртутью внутри.

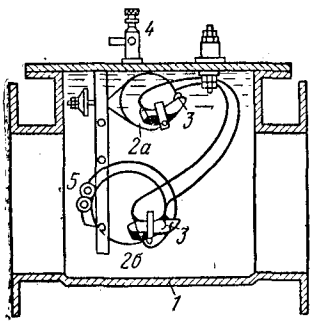


Рис. 16-38. Устройство поплавкового газового реле.

При определенном положении поплавков ртуть замыкает контакты. Выводы от контактов на наружную сторону кожуха выполнены с помощью гибких и изолированных проводников, которые не должны ограничивать свободного вращения поплавков. Контакты верхнего поплавка действуют на сигнал, а нижнего — на отключение трансформатора. Верхний поплавок находится в верхней части кожуха реле, нижний располагается на уровне соединительной трубы к расширителю так, чтобы поток масла мог воздействовать на него.

Принцип действия реле. Кожух реле находится ниже уровня масла в расширителе, поэтому он всегда заполнен маслом. Поплавки, стремясь всплыть, занимают самое верхнее положение, возможное по условиям их крепления на оси. При этом положении поплавков контакты реле разомкнуты.

При небольших повреждениях образование газа происходит медленно, и он небольшими пузырьками поднимается к расширителю трансформатора. Проходя через реле, пузырьки газа заполняют верхнюю часть его кожуха, вытесняя оттуда масло. По мере понижения уровня масла верхний контакт опускается и через некоторое время, зависящее от интенсивности газообразования, поплавок достигает такого положения, при котором его контакт замыкается.

Если повреждение трансформатора значительное, то под влиянием давления, создаваемого бурно образующимися газами, масло приходит в движение, сообщая толчок нижнему поплавку. Под его

воздействием поплавок мгновенно замыкает свои контакты, посылая импульс на отключение. Движение масла может носить толчкообразный характер, поэтому контакты нижнего поплавка замыкаются кратковременно. *Чтобы обеспечить продолжительность импульса, достаточную для отключения выключателя, применяется особая схема, обеспечивающая самоудерживание выходного промежуточного реле* $П_1$ *на время, достаточное для отключения выключателей.* Подобная схема приведена на рис. 16-39. Газовое реле подает кратковременный ток в шунтовую обмотку *1* промежуточного реле $П_1$, последнее срабатывает и удерживается сериесными катушками *2* и *3* до отключения выключателей.

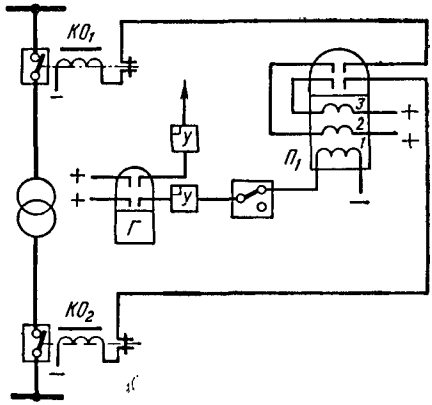


Рис. 16-39. Принципиальная схема оперативной цепи газовой защиты.

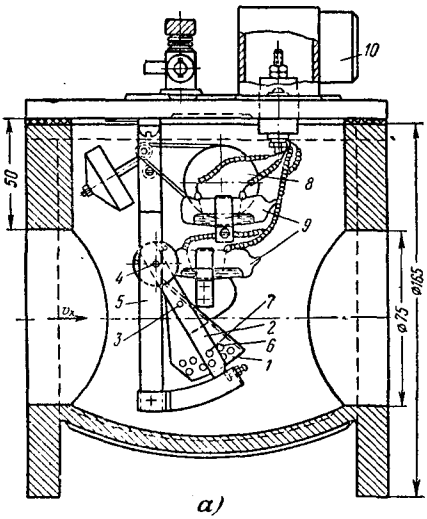
Из рассмотренного принципа действия газового реле следует, что оно способно различать степень повреждения в трансформаторе. При малых повреждениях оно дает с и г н а л, *при больших — производит отключение.* Сигнализация о небольших повреждениях вместо отключения позволяет перевести нагрузку на другой источник питания и отключить после этого трансформатор без ущерба для потребителей.

Газовая защита реагирует также на понижение уровня масла в трансформаторе. В этом случае первым сработает сигнальный контакт, а затем при продолжающемся снижении уровня масла срабатывает отключающий контакт, выключая трансформатор. Действие последнего полезно в случае быстрой утечки масла, угрожающей понижением уровня масла ниже обмотки трансформатора до того, как дежурный успеет принять меры к разгрузке и отключению трансформатора, а также на автоматизированных подстанциях, не имеющих дежурных.

Отечественная промышленность ранее выпускала реле ПГ-22, РГЗ-22 и ПГЗ-61, выполненные на описанном выше принципе с реагирующим органом в виде цилиндрических поплавков. Реле ПГЗ-61 отличается конструкцией ртутных контактов, в меньшей степени реагирующей на вибрацию трансформатора и толчки масла при внешних к. з.

Лопастные реле (рис. 16-40, *а*). Сигнальный элемент этого реле выполнен в виде поплавка, как и у реле на рис. 16-38. Нижний отключающий элемент выполняется в виде поворотной лопасти (пластины) *1* или состоит из поплавка и лопасти. При движении масла или потока газов лопасть поворачивается на некоторый угол под воздействием силы, создаваемой движущимся потоком;

при этом связанные с лопастью ртутные контакты *9* замыкаются, подавая импульс на отключение. Изменяя начальный угол наклона лопасти *1*, можно регулировать чувствительность реле, т. е. изменять скорость движения масла, при которой срабатывает лопасть реле. Нижний поплавок закрыт от воздействия движущегося масла и газа лопастью и предназначен для работы при снижении уровня масла. В конструкции на рис. 16-40, *а* нижнего поплавка нет. В этом реле на понижение уровня масла реагирует только сигнальный элемент. При таком исполнении исключается ложное действие отключающего элемента реле из-за нарушения герметичности поплавка и попадания в него масла, но при этом ухудшаются защитные свой-



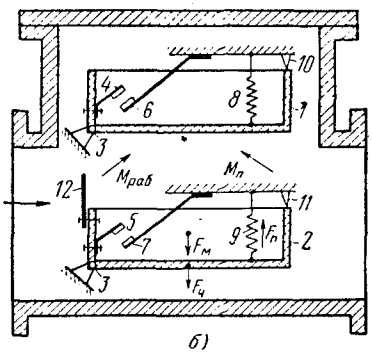


Рис. 16-40. Устройство лопастного реле (*а*) и устройство реле с чашкообразными элементами (*б*).

а: 1 — лопасть; *2* — рамка; *3* — ось лопатки; *4* — ось рамки; *5* — стойка; *6* — отверстие для изменения наклона лопасти; *7* — штифт для фиксации положения лопасти; *8* — сигнальный поплавок; *9* — ртутные контакты; *10* — коробка для выводов.

ства реле. Лопастные реле распространены за границей. Реле, показанное на рис. 16-40, *а*, разработано в Горэнерго.

Реле с чашкообразными элементами. Сигнальный и отключающий элементы реле представляют собой открытые плоскодонные алюминиевые чашки *1* и *2* (рис. 16-40, *б*). Каждая чашка закреплена на оси *3* и может вращаться вокруг нее. С корпусом чашки связан подвижной контакт *5* на нижнем и *4* на верхнем элементе. При опускании чашки подвижной контакт замыкается с неподвижным *7* или *6*. Движению чашек на замыкание контактов противодействуют пружины *8* и *9*, тянущие чашки вверх. Для ограничения движения чашек под действием пружины предусмотрены упоры *10* и *11*. На нижней чашке *2* имеется лопасть *12*, вращающаяся на оси. Если в кожухе реле и в чашках нет масла, то момент пружины $M_п$ преодолевает рабочий момент $M_{раб}$, создаваемый весом корпуса чашки. В этом случае $M_п > M_{раб}$ и контакты обоих элементов

разомкнуты. Если кожух реле, а следовательно, и чашки заполнены маслом, то за счет потери веса тела, погруженного в жидкость, $M_{раб}$ уменьшается и момент пружин $M_п$ еще более превосходит $M_{раб}$. При понижении уровня масла момент $M_{раб}$ увеличивается за счет веса находящегося в чашке масла, суммарная сила веса чашки и масла $F_ч + F_м$ преодолевает противодействие пружины ($M_{раб} > M_п$), чашка опускается и замыкает свои контакты. При бурном газообразовании под действием силы, созданной потоком масла или газов, лопасть *12* поворачивается и замыкает контакты *4—7*.

Чашечные реле не имеют недостатка, присущего поплавковой конструкции, действующей ложно при нарушении герметичности поплавков. Реле работает при понижении уровня масла, имеет удобную регулировку чувствительности и в меньшей степени, чем реле со ртутными контактами, реагирует на вибрацию корпуса трансформатора. Завод ЗТЗ выпускает реле с чашечковыми элементами типа РГЧЗ-66. Чувствительность нижнего элемента (лопасти) регулируется в пределах от 0,6 до 1,2 *м/сек*. Время действия реле при работе лопасти колеблется от 0,5 до 0,05 *сек* в зависимости от скорости движения масла.

б) Особенности газовой защиты

По своему принципу действия газовая защита может работать не только при повреждениях и опасных ненормальных режимах, но и при появлении в кожухе трансформатора воздуха, при толчках (движении) масла, вызванных любой причиной, и механических сотрясениях, имеющих место вследствие вибрации корпуса трансформатора. Воздух попадает в кожух трансформатора при доливке масла, ремонте трансформатора с перезаливкой масла и т. п. В дальнейшем при включении трансформатора под нагрузку температура масла начинает повышаться, находящийся в масле воздух прогревается и поднимается к расширителю. Попадая в реле, воздух может вызвать срабатывание верхнего (сигнального) контакта, а при быстром движении — нижнего, который неправильно отключит трансформатор.

Для предупреждения неправильного отключения трансформатора отключающая цепь защиты после доливки масла или включения нового трансформатора переводится на сигнал (на 2—3 суток) до тех пор, пока не прекратится выделение воздуха, отмечаемое по работе защиты на сигнал.

Толчки масла, не связанные с повреждением трансформатора, могут возникать при внешних коротких замыканиях, например, от смещения обмоток вследствие динамических усилий; при пуске и остановке насосов, обеспечивающих циркуляцию масла (у трансформаторов с искусственным охлаждением масла), и по ряду других причин.

Неправильная работа нижнего поплавка реле от толчков масла, не связанных с повреждением трансформатора, может быть устранена его загрублением.

Опыт эксплуатации защиты и ее исследования, проведенные ОРГРЭС и рядом энергосистем, показывают, что неправильная работа защиты от толчков масла наблюдалась на реле, реагирующих на движение масла со скоростью 20—15 *см/сек*. Более грубые реле, реагирующие на скорость 50 *см/сек* и выше, как правило, ложно не работают.

В настоящее время принято регулировать чувствительность нижнего поплавка на скорость 50—160 *см/сек*.

На трансформаторах и автотрансформаторах большой мощности (240—400 *Мва*) наблюдается повышенная вибрация корпуса. Реле ПГ-22 и РГЗ-22 недостаточно виброустойчивы и, как показал опыт эксплуатации, работают ненадежно на трансформаторах с повышенной вибрацией.

В процессе эксплуатации необходимо следить за герметичностью баллончиков у реле поплавкового типа. При ее нарушении масло попадает внутрь поплавка, он теряет плавучесть и опускается, замыкая контакты. Такие дефекты наблюдались в эксплуатации; в связи с этим у вновь включаемых реле и периодически у реле, находящихся в эксплуатации, герметичность баллончиков проверяется помещением их в нагретое масло при избыточном давлении (0,5—1 *ат*).

в) Требования к монтажу защиты

На трансформаторах, снабженных газовым реле, бак (кожух) трансформатора должен устанавливаться наклонно, так чтобы край трансформатора, связанный с расширителем, и сама труба к расширителю имели подъем на 1,5—2% (рис. 16-36). Этим обеспечивается беспрепятственный проход газов в расширитель при повреждениях и предотвращается возможность скопления пузырьков воздуха под крышкой кожуха трансформатора, которое может повлечь за собой ложное действие защиты.

Особое внимание должно обращаться на разделку кабеля, отходящего от выводов реле. Опыт показывает, что в разделку кабеля газовой защиты может попадать масло из трансформатора. Оно разъедает резиновую изоляцию жил кабеля, что приводит к замыканию между ними и неправильному отключению трансформатора. Поэтому вывод из газового реле можно выполнять только кабелем с бумажной изоляцией (КСБ или КСГ).

На открытых подстанциях следует обеспечить надежную защиту выводов на крышке газовых реле от попадания на них влаги.

г) Оценка газовой защиты

Основными достоинствами газовой защиты являются: простота ее устройства, высокая чувствительность, малое время действия при значительных повреждениях, действие на сигнал или отключение в зависимости от размеров повреждения.

Газовая защита является наиболее чувствительной защитой трансформатора от повреждений его обмоток и особенно при витковых замыканиях, на которые дифференциальная защита реагирует только при замыкании большого числа витков, а максимальная защита и отсечка не реагируют совсем. В настоящее время все трансформаторы мощностью 1 000 *ква* и выше поставляются вместе с газовой защитой.

Газовая защита не действует при повреждениях на выводах трансформатора и должна выводиться из действия, когда имеется опасность выделения воздуха в кожухе трансформатора (т. е. после доливки масла, ремонта трансформатора и включения его вновь). По этим причинам газовая защита должна дополняться второй защитой от внутренних повреждений. Для маломощных трансформаторов такой защитой служат максимальная защита и токовая отсечка. Для мощных трансформаторов применяется более совершенная дифференциальная защита.

Газовая защита не только применяется для защиты трансформаторов и автотрансформаторов, но также считается обязательной на маслонаполненных реакторах и дугогасящих катушках.

16-11. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА КОРПУС (КОЖУХ) ТРАНСФОРМАТОРА

В сети с глухозаземленной нейтралью иногда применяется защита, показанная на рис. 16-41, реагирующая на любые замыкания на корпус трансформатора [Л. 73].

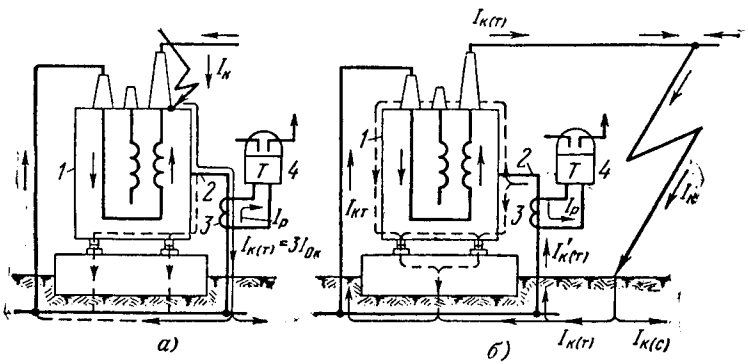


Рис. 16-41. Токовая защита от замыканий на корпус трансформатора.
а — токораспределение при к. з. на трансформаторе; *б* — токораспределение при внешнем к. з.

Для выполнения защиты корпус трансформатора *1* связывается с землей (заземляющим контуром подстанции) специальной шиной *2*. Кроме этой связи, корпус трансформатора не должен иметь других соединений с землей.

Трансформатор устанавливается, как обычно, на железобетонном фундаменте, который является достаточной изоляцией при условии, что металлическая арматура фундамента не имеет связи с землей. Специальных мер для изоляции кожуха

трансформатора от фундамента не требуется, если сопротивление изоляции корпуса трансформатора от земли составляет 15—20 *ом*.

На заземляющей шине устанавливается трансформатор тока *3*, к которому подключается токовое реле *4*.

При замыкании на корпус наружных выводов или обмотки трансформатора (рис. 16-41, *а*) бо́льшая часть тока повреждения $I_{к(т)}$ проходит на землю через заземляющую шину. В реле *4* появляется большой ток $I_р = 3I_{0к}$, и оно срабатывает, действуя на отключение трансформатора.

При к. з. в сети (рис. 16-41, *б*) часть тока повреждения $I'_{к(т)}$ также замыкается через шину, кожух и фундамент, на котором установлен трансформатор.

Для исключения неправильной работы защиты при внешних к. з. ток срабатывания реле *4* должен удовлетворять условию:

$$I_{с.з} > I'_{к.т}. \qquad (16\text{-}32)$$

При повреждениях трансформатора, сопровождающихся замыканием на корпус, защита будет действовать, если

$$I_{с.з} < I'_{к(т)}. \qquad (16\text{-}33)$$

Рассмотренная защита довольно широко применяется во Франции, США и некоторых других странах. Опыт эксплуатации такой защиты в СССР пока очень мал. Несмотря на простоту схемы защиты, она не получила распространения в Советском Союзе из-за возможности ложной работы при нарушении изоляции между корпусом трансформатора и фундаментом.

16-12. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ БЕЗ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА СТОРОНЕ ВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

а) Общие положения

Схемы питания и способы отключения трансформаторов без выключателей. В последнее время получили широкое распространение однотрансформаторные и двухтрансформаторные подстанции, выполненные по упрощенной схеме — без выключателей со стороны высшего напряжения [Л. 62, 63].

Такие подстанции подключаются к сети с помощью ответвлений от линий или по блочной схеме линия — трансформатор (рис. 16-42,*а, б*).

В обоих случаях автоматическое отключение трансформаторов при его повреждении должно производиться выключателями $В_А$ и $В_В$ на питающих концах линии *Л1* (рис. 16-42, *а* и *б*). Эту операцию возможно осуществить с помощью устройства, передающего отключающую команду от защиты трансформатора на выключатель линии по специальным каналам связи (рис. 16-43, *а*), или посредством короткозамыкателя, как показано на рис. 16-43, *б*. Суть второго способа (с короткозамыкателем *КЗ*) сводится к следующему. При повреждении в трансформаторе его защита $РЗ_т$ срабатывает и подает ток в катушку включения *КВ* короткозамыкателя *КЗ*. Нож последнего замыкается и устраивает искусственное к. з. На это к. з. реагируют защиты линии $РЗ_А$ и $РЗ_В$, отключающие линию и вместе с ней трансформатор.

Недостатком такого способа ликвидации повреждения является замедление отключения поврежденного трансформатора, обусловленное временем действия короткозамыкателя и защиты линии,

Следует отметить, что к. з. на выводах и в начальной части обмотки трансформатора обычно попадают в зону быстродействующей защиты линии и отключаются поэтому быстро без участия короткозамыкателя. Замедляющее действие короткозамыкателя сказывается при повреждениях в трансформаторе, на которые не реагирует быстродействующая защита линии.

Несмотря на указанный недостаток, схемы с короткозамыкателем получили широкое распространение.

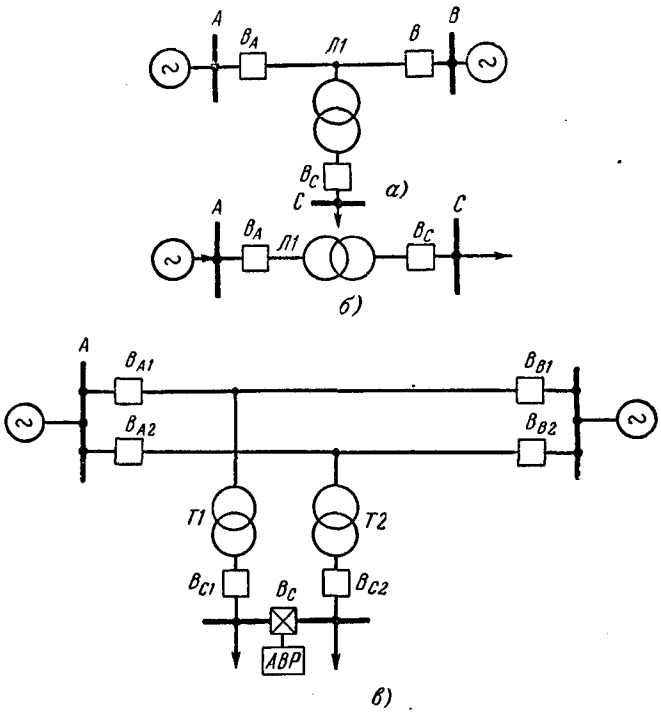


Рис. 16-42. Схемы подключения трансформаторов без выключателя на стороне высшего напряжения.

а — от одной линии; *б* — по блочной схеме; *в* — от двух параллельных линий.

Схема с передачей отключающих импульсов работает практически так же быстро, как и обычные схемы, непосредственно действующие на отключение выключателя трансформатора.

Однако из-за дорогостоящего и недостаточно надежного канала связи этот способ отключения пока применяется реже.

Селективное отключение поврежденного трансформатора. В блочной схеме отключение линии при повреждении трансформатора не нарушает принципа селективности и не наносит ущерба электроснабжению, так как трансформатор и линия представляют единое целое.

В схеме же на рис. 16-42, *а*, где трансформатор подсоединен к ответвлению, отключение линии при повреждении в трансформаторе является неселективным, поскольку при этом не только отключается поврежденный трансформатор, но и нарушается связь между подстанциями *А* и *В*. Этот недостаток устраняется с помощью АПВ на линии и установки отделителя *ОД* на трансформаторе (рис. 16-43, *б*). Отделитель представляет собой разъединитель с дистанционным приводом, который допускает автоматическое отключение поврежденного трансформатора только после снятия с него напряжения.

При этом отключение поврежденного трансформатора происходит следующим образом. На возникшее повреждение реагирует

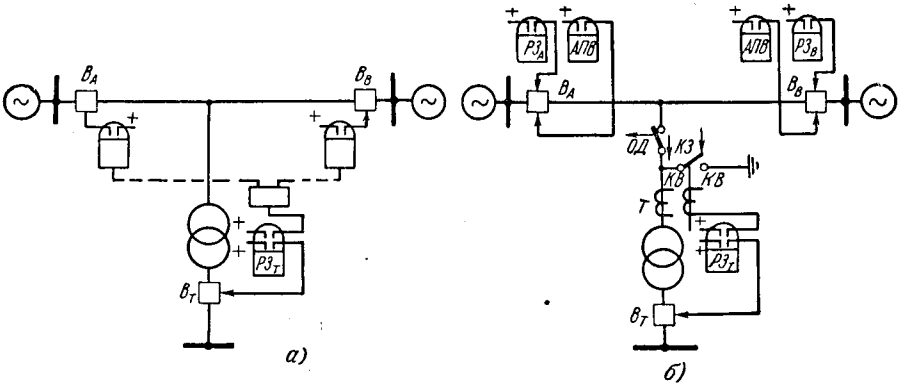


Рис. 16-43. Принципы осуществления защиты трансформаторов, подключенных к линии без выключателя на стороне высшего напряжения.

а — с помощью устройства передачи отключающей команды; *б* — с помощью короткозамыкателя и отделителя.

защита трансформатора. Она включает короткозамыкатель *КЗ* (рис. 16-43, *б*), который устраивает однофазное или двухфазное к. з. на линии. Защиты линии $РЗ_А$ и $РЗ_В$ приходят в действие, отключают выключатели $В_А$ и $В_В$ и пускают АПВ.

В бестоковую паузу (когда на линии нет напряжения и тока) отделитель *ОД* отключает трансформатор. После этого АПВ включает линию и связь между подстанциями *А* и *В* восстанавливается.

Таким образом, несмотря на отсутствие выключателя на трансформаторе, повреждение в нем отключается селективно.

Трансформаторы тока. На подстанциях, подключенных по упрощенным схемам, для выполнения защиты трансформатора должны обязательно использоваться встроенные или «накладные» трансформаторы тока *Т*.

Встроенные трансформаторы тока устанавливаются внутри кожуха на высоковольтных вводах трансформатора 110 *кв* и выше.

Накладные трансформаторы разработаны в Челябэнерго [Л. 74] и выпускаются промышленностью для трансформаторов

35—330 *кв*. Их сердечник надевается на выводы силового трансформатора снаружи. При наличии встроенных или накладных трансформаторов тока со стороны высшего напряжения силового трансформатора на них включается дифференциальная или максимальная защита, которая охватывает весь трансформатор и ошиновку низшего напряжения. При отсутствии трансформаторов тока со стороны высшего напряжения на силовом трансформаторе может быть выполнена только максимальная защита со стороны низшего напряжения. При этом вводы низшего напряжения силового трансформатора и ошиновка до трансформаторов тока остаются без защиты. Поэтому применение встроенных или накладных трансформаторов тока со стороны высшего напряжения является обязательным.

Оперативный ток. Подстанции, выполняемые по упрощенной схеме, не имеют «тяжелых» выключателей, требующих приводов с большим потреблением мощности. В связи с этим на таких подстанциях удобно применять переменный оперативный ток.

б) Выполнение защиты

Релейная защита трансформаторов на подстанциях с упрощенной схемой имеет несколько вариантов исполнения в зависимости от схемы включения трансформаторов, их мощности и чувствительности линейной защиты.

Защита трансформаторов, включенных по блочной схеме (рис. 16-42, *б*). Для защиты маломощных трансформаторов целесообразно использовать линейную защиту, установленную с питающего конца линии на подстанции *А*. Эта защита, как правило, выполняется из двух комплектов: максимальной защиты с выдержкой времени по условиям селективности и мгновенной токовой отсечкой, отстроенной от к. з. за трансформатором. Отсечка охватывает часть обмотки трансформатора, вторая часть — входит в зону максимальной защиты, которая действует также и на участке от выводов до выключателя на стороне низшего напряжения трансформатора и резервирует к. з. на шинах низшего напряжения.

На трансформаторе устанавливается максимальная защита со стороны низшего напряжения, действующая на отключение выключателя B_C. Газовая защита трансформаторов (если она имеется) действует на сигнал. Для защиты от перегрузки устанавливается сигнальное токовое реле в одной фазе.

На мощных трансформаторах, для которых требуется быстродействующая защита, полностью охватывающая обмотки и выводы трансформатора, а также защита от витковых повреждений, применяются дифференциальная и газовая защиты.

Обе защиты действуют на включение короткозамыкателя. Защита линии выполняется как и в предыдущем случае.

Защита трансформаторов, подключаемых к ответвлению от линий (рис. 16-42, *а*). На трансформаторе устанавливается короткозамыкатель и отделитель.

Для обеспечения селективного отключения повреждений в трансформаторе на нем должна быть предусмотрена полноценная защита от повреждений, действующая на короткозамыкатель и отделитель, а на линии — АПВ (рис. 16-43, *б*).

В качестве защиты от повреждений в трансформаторе устанавливается газовая и дифференциальная защиты. На трансформаторах средней и малой мощности вместо дифференциальной защиты применяется токовая отсечка в сочетании с максимальной защитой или защита от замыканий на корпус. Со стороны высшего напряжения защиты включаются на встроенные или накладные трансформаторы тока. При этом наружная часть выводов силового трансформатора попадает в зону трансформаторной защиты только при применении защиты от замыканий на корпус (§ 16-11).

Для защиты трансформатора от внешних к. з. устанавливается максимальная защита. Она подключается к трансформаторам тока на стороне низшего напряжения и действует на отключение выключателя трансформатора $B_т$.

Функции резервной защиты трансформатора (на случай отказа короткозамыкателя, выключателя $B_т$ или защиты трансформатора) возлагаются на линейную защиту.

На рис. 16-43, *а* приведена защита трансформатора с передачей отключающих импульсов на противоположные концы линии. При повреждении в трансформаторе его защита передает по каналу связи импульс на отключение выключателей B_A и B_B линии.

В обеих схемах после отключения выключателей линии специальным устройством проверяется отсутствие напряжения на поврежденном трансформаторе и автоматически отключается отделитель *ОД*. По истечении времени, необходимого для этой операции, действует АПВ, включая в работу линию *Л1*.

Двухтрансформаторные подстанции. Трансформаторы на этих подстанциях работают раздельно (рис. 16-42, *в*). Для обеспечения надежности приемные шины выполняются в виде двух секций; связывающий их секционный выключатель нормально отключен и имеет АВР. При этих условиях защита трансформаторов и питающих их линий выполняется аналогично рассмотренной по рис. 16-43, *б*.

Схема действия защиты на короткозамыкатель и отделитель. Эта схема является важной частью защиты трансформаторов без выключателей на стороне высшего напряжения.

Как уже отмечалось, действие защиты на короткозамыкатель и отделитель должно происходить в определенной последовательности, обеспечивающей работу отделителя в бестоковую паузу АПВ линии, т. е. в тот момент, когда по отделителю не проходит ток. *Схема управления отделителем выполняется таким образом, чтобы импульс на его отключение подавался после срабатывания короткозамыкателя при условии, что питающая линия отключилась и ток к. з. прекратился.* На рис. 16-44, *а, б* показаны схемы, удовлетворяющие поставленным условиям. В обеих схемах защита трансформатора при срабатывании подает импульс в катушку

включения *КВ* привода короткозамыкателя. В первом варианте схемы, показанном на рис. 16-44, *а*, отключение отделителя производится с помощью токового реле прямого действия *БРО*.

Это реле встроено в привод отделителя и питается током от трансформатора тока $T_к$, установленного в цепи короткозамыкателя. В реле *БРО* имеется отключающая пружина, которая при включении отделителя заводится (сжимается) и удерживается в таком состоянии механической защелкой реле. При включении короткозамыкателя в цепи трансформатора тока $T_к$ и реле *БРО* появляется ток. Якорь *БРО* втягивается, сжимает вспомогательную пружину и остается в подтянутом положении, пока протекает ток к. з. После отключения линии, питающей трансформатор, ток в *БРО* исчезает, его сердечник отпадает и с силой, обусловленной вспомогательной пружиной и весом сердечника, ударяет по защелке, освобождая отключающую пружину *БРО*. Последняя воздействует на механизм привода отделителя, и он отключается.

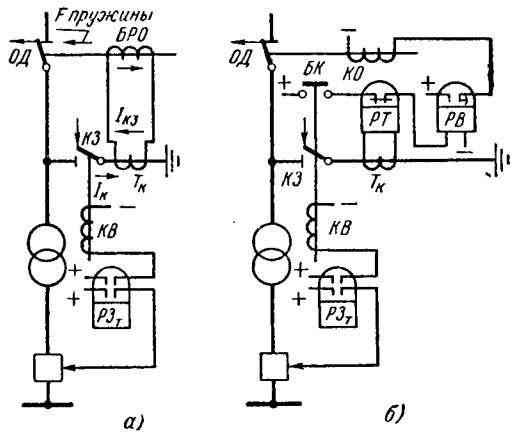


Рис. 16-44. Схема отключения отделителя.
а — с реле *БРО*; *б* — от блок-контактов короткозамыкателя с реле времени.

При наличии на линии быстродействующей защиты, реагирующей на к. з. в трансформаторе, линейное АПВ должно быть двукратным. Это необходимо для обеспечения обратного включения линии после отключения отделителя. Действительно, вследствие медленного действия короткозамыкателя линия может отключиться от своей быстродействующей защиты раньше, чем замкнется короткозамыкатель, тогда реле *БРО* не сработает и отделитель в бестоковую паузу АПВ не отключится. За время бестоковой паузы короткозамыкатель замкнется, поэтому АПВ включит линию на искусственное к. з. В короткозамыкателе появится ток $I_к$, под действием которого сработает реле *БРО* и после повторного отключения линии отключит отделитель трансформатора. При наличии второго цикла у АПВ линия включится вновь и останется в работе.

Если линия не имеет быстродействующей защиты, работающей при к. з. в трансформаторе, то схема на рис. 16-44, *а* может применяться с однократным АПВ при условии, что $t_{защ.линии} > (t_{защ.т} + t_{короткозамыкателя})$.

Во втором варианте схемы, приведенной на рис. 16-44, *б*, импульс на отключение отделителя (в катушку *КО*) подается контактами реле времени *РВ*. Реле *РВ* пускается при замыкании блок-контактов *БК* короткозамыкателя и контактов токового реле *РТ*. Первые (контакты *БК*) замыкаются при замыкании ножа короткозамыкателя, а вторые (контакты *РТ*) — при отсутствии тока в реле *РТ*.

Таким образом, отключение отделителя может произойти только при срабатывании короткозамыкателя и отключении линии.

Однако если блок-контакты *БК* замкнутся раньше, чем сработает нож короткозамыкателя, то, поскольку контакты *РТ* при этом будут еще замкнуты, возможна подача импульса на отключение отделителя до отключения линий. Для предотвращения такой опасности служит реле времени *РВ*. Оно должно работать с выдержкой времени порядка 0,2—0,3 *сек*, превосходящей возможную разновременность замыкания ножа и блок-контактов короткозамыкателя.

Чтобы обеспечить срабатывание короткозамыкателя и отделителя во время бестоковой паузы, когда питающая линия отключена и подстанция остается без напряжения, оперативная цепь короткозамыкателя и отделителя должна питаться от независимого источника. Таким источником может служить аккумуляторная батарея или предварительно заряженный конденсатор.

Рассмотренная схема (рис. 16-44, *б*) является универсальной и может применяться при наличии на линии как быстродействующей защиты, так и защиты с выдержкой времени. В обоих случаях на линии применяется однократное АПВ, при этом время АПВ должно быть больше времени включения короткозамыкателя и отключения отделителя, чтобы за время бестоковой паузы поврежденный трансформатор успел отключиться. Схема по рис. 16-44, *б* надежнее схемы с БРО и рекомендуется к применению.

Полная схема защиты на переменном оперативном токе понизительного трансформатора, подключенного к ответвлению от линий, приведена на рис. 16-45. На трансформаторе установлены дифференциальная, газовая, максимальная токовая защиты и защита от перегрузки, действующая на сигнал (рис. 16-45, *а*). Оперативные цепи дифференциальной и максимальной защит питаются от трансформаторов тока, газовой защиты и защиты от перегрузки — от трансформаторов собственных нужд. Дифференциальная защита выполнена с помощью реле типа РНТ-565 (*8РТН* и *9РТН*).

Для питания защиты со стороны высшего напряжения используются встроенные в силовой трансформатор трансформаторы тока *4ТТ*. Вследствие относительно малой мощности встроенных трансформаторов тока их вторичные обмотки соединяются на каждой фазе последовательно. Дифференциальная защита действует на включение короткозамыкателя *2КЗ* и отключение выключателя *3В*.

При срабатывании дифференциальной защиты контакты *8РТН* и *9РТН* (рис. 16-45, *б*) замыкают цепь токовых промежуточных реле *17РП* и *18РП* типа РП-341 (см. § 4-8, г); последние приходят в действие и дешунтируют катушки включения короткозамыкателя *37КВ* и *38КВ* и отключения выключателя *39КО* и *40КО*. В результате этого включается короткозамыкатель *2КЗ* и отключается выключатель *3В*. Максимальная защита (рис. 16-45, *б*) выполнена с помощью токовых реле *11РТ* и *12РТ* типа РТ-40, токового реле времени *15РВ* типа РВМ (см. § 4-8, г). Токовые реле максимальной защиты *11РТ* и *12РТ* включены на трансформаторы тока *4ТТ* со стороны высшего напряжения (в плечо дифференциальной

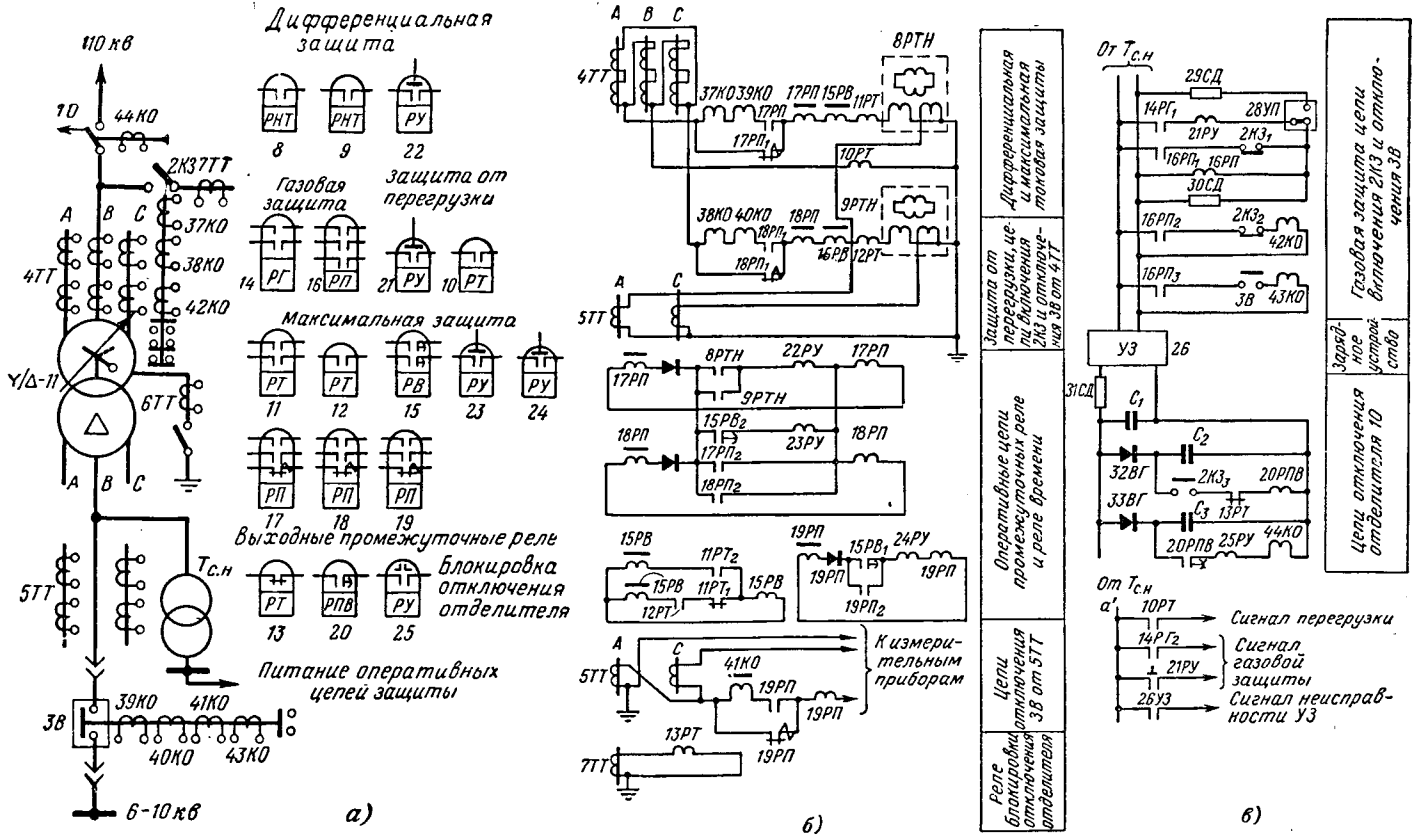


Рис. 16-45. Полная принципиальная схема защиты трансформатора, подключенного к ответвлению от линии 110 *кв* без выключателя на стороне 110 *кв*.

защиты), что позволяет ввести в зону действия максимальной защиты силовой трансформатор. Поскольку трансформаторы *4TT* соединены в треугольник, максимальная защита не реагирует на ток I_0 (см. § 3-6, г) и благодаря этому исключается возможность ее неселективной работы при к. з. на землю в сети высшего напряжения в тех случаях, когда нейтраль защищаемого трансформатора заземлена.

Максимальная защита выполняется с двумя выдержками времени. С меньшей выдержкой она отключает к. з. на шинах низшего напряжения и резервирует отказы защит отходящих от них присоединений. С большей выдержкой она работает при к. з. в трансформаторе, резервируя его дифференциальную защиту. При срабатывании токового реле *11РТ* или *12РТ* замыкается цепь обмотки реле времени *15РВ*. Последнее первым скользящим контактом $15РВ_1$ подает ток в обмотку токового промежуточного реле *19РП*. Это реле срабатывает и дешунтирует катушку отключения *41КО* выключателя *3В*, после чего он отключается. Второй контакт $15РВ_2$ замыкается с большей выдержкой времени; он приводит в действие промежуточные реле *17РП* и *18РП*, которые включают короткозамыкатель *2КЗ*. Газовая защита дополняет дифференциальную защиту и должна работать прежде всего при повреждениях, сопровождающихся малыми токами, при которых дифференциальная защита не может сработать из-за недостаточной чувствительности и малой величины оперативного тока, получаемого от трансформаторов тока. В этом случае напряжение остается близким к нормальному и поэтому оперативные цепи газовой защиты питаются от трансформатора собственных нужд $Т_{с.н}$ (рис. 16-45, *в*). Отключающий контакт газового реле $14РГ_1$ действует на промежуточное реле *16РП*, которое с помощью контакта $16РП_1$ удерживает себя в сработанном состоянии до отключения короткозамыкателя, после чего размыкается его блок-контакт *2КЗ*. Второй и третий контакты реле *16РП* замыкают цепь катушек *42КВ* и *43КО* с помощью которых включается короткозамыкатель и отключается *3В*. Второй контакт газовой защиты $РГ_2$ действует на сигнал.

Оперативная цепь отключения отделителя питается от предварительно заряженных конденсаторов $С_1$, $С_2$, $С_3$ (рис. 16-45, *в*), чем обеспечивается отключение отделителя во время бестоковой паузы, когда на подстанции отсутствует напряжение. Заряд конденсаторов *С* осуществляется от зарядного устройства УЗ-400 (см. § 4-8, е), которое питается от трансформатора собственных нужд $Т_{с.н}$. Схема отключения отделителя выполнена согласно рис. 16-44, *б*. При включении короткозамыкателя *2КЗ* и отсутствии в нем тока блок-контакт *2КЗ* и контакт токового реле *13РТ* замыкают цепь промежуточного реле замедленного действия *20РПВ*, последнее с небольшой выдержкой времени 0,2 *сек* замыкает цепь катушки отключения отделителя *44КО*.

Сигнал о перегрузке подается токовым реле *10РТ*, оперативная цепь которого питается от трансформатора собственных нужд. Рассмотренная схема защиты предназначена для трансформаторов мощностью 7,5—20 *Мва*. На более мощных трансформаторах защита выполняется также, но для большей надежности дифференциальная защита выполняется трехфазной. Другие варианты схем понизительных трансформаторов подробно рассмотрены в [Л. 5, 62, 80].

16-13. ЗАЩИТА ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫХ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

в) Виды защит

Для регулирования напряжения под нагрузкой в ряде случаев применяются специальные вольтодобавочные трансформаторы, состоящие из регулировочного автотрансформатора и последовательного трансформатора (рис. 16-46). Вторичная э. д. с. ΔE с регулировочного автотрансформатора при помощи последовательного трансформатора добавляется к э. д. с. E одной из обмоток основного

трансформатора, увеличивая или уменьшая ее величину на

$$\Delta U\% = \frac{\Delta E}{E} 100\%.$$

Для защиты вольтодобавочного трансформатора устанавливаются газовая защита и выполняемая по особой схеме максимальная

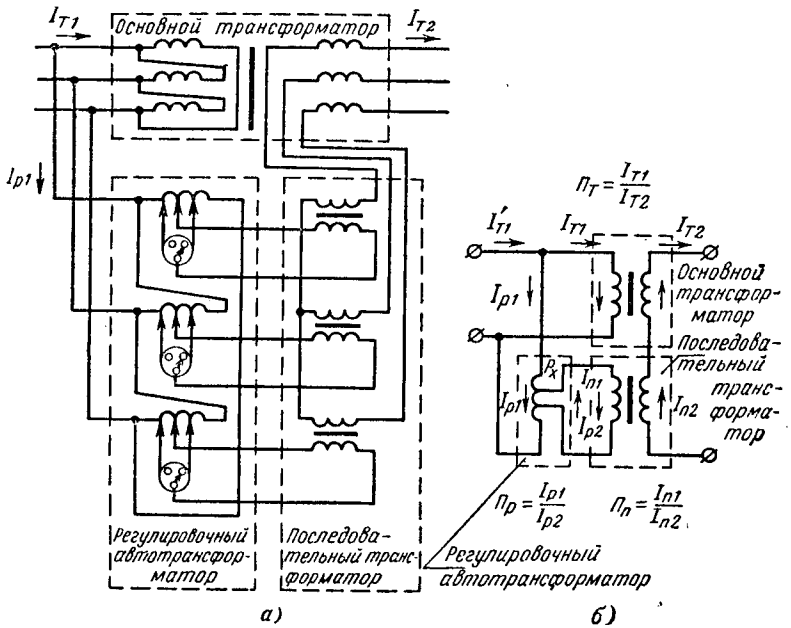


Рис. 16-46. Схема включения добавочного регулировочного трансформатора.

а — полная схема; *б* — схема одной фазы.

токовая защита. Кроме того, может использоваться дифференциальная защита основного трансформатора или устанавливается дополнительно дифференциальная защита вольтодобавочного трансформатора.

б) Максимальная токовая защита вольтодобавочного трансформатора

Для защиты от к. з. в регулировочном автотрансформаторе и соединительной проводке между автотрансформатором и последовательным трансформатором предусматривается максимальная токовая защита, имеющая два варианта исполнения. Для уменьшения выдержки времени зона действия этой защиты ограничивается так, чтобы она не работала при к. з. в сети основного трансформатора. В первом варианте исполнения для этой цели служит блокировка, а во втором — торможение. В современных схемах применяется защита с торможением.

Максимальная токовая защита с торможением (рис. 16-47) выполняется при помощи реле с магнитным торможением такой же конструкции, как и реле, показанное на рис. 16-35. Рабочая обмотка этого реле включается со стороны пер-

вичных выводов автотрансформатора, а тормозная — в цепь обмотки силового трансформатора (рис. 16-47).

Поток тормозной обмотки замыкается по крайним стержням магнитопровода, вспомогательного трансформатора, не попадая в средний стержень, где располо-

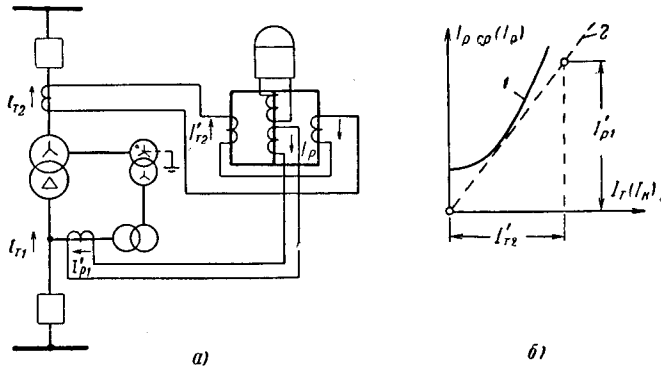


Рис. 16-47. Максимальная токовая защита регулировочного автотрансформатора с торможением.

а — схема включения реле; *б* — тормозная характеристика реле.

жена вторичная обмотка, питающая реле. Таким образом, тормозной поток только подмагничивает магнитопровод, ухудшая при больших токах $I_т$ трансформацию рабочего тока $I_р$ в цепь реле. При к. з. в автотрансформаторе подмагничивающее действие тормозной обмотки невелико, так как ток $I_т$ относительно мал, и поэтому рабочая обмотка индуктирует во вторичной обмотке ток, достаточный для действия реле. При внешних к. з. ток в тормозной обмотке возрастает, вызывая насыщение магнитопровода, трансформация рабочего тока ухудшается и реле не действует.

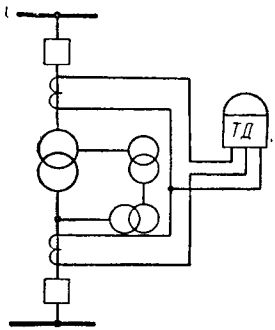


Рис. 16-48. Дифференциальная защита, охватывающая основной и регулировочный трансформаторы.

Наклон тормозной характеристики реле выбирается по соотношению токов в рабочей и тормозной обмотках при внешних к. з. Это соотношение имеет постоянное значение и определяется из уравнения, связывающего первичный ток автотрансформатора $I_р$ с током вторичной обмотки силового трансформатора $I_{т2}$: $I_{р1} = I_{т2} n_п n_р$ (рис. 16-46, *б*).

На броски намагничивающего тока, появляющегося при включении трансформатора, защита не реагирует вследствие насыщения магнитопровода, как и в обычном БНТ.

в) Дифференциальная защита

Для защиты вольтодобавочного трансформатора может использоваться дифференциальная защита основного трансформатора или может устанавливаться самостоятельная дифференциальная защита. Дифференциальная защита, охватывающая основной и вольтодобавочный трансформаторы, показана на рис. 16-48. Для надежной отстройки от токов небаланса при регулировании напряжения применяются дифференциальные реле с торможением (см. § 16-5, г).

На рис. 16-49 показана самостоятельная дифференциальная защита последовательного трансформатора.

Включить в зону действия этой защиты весь вольтодобавочный трансформатор не удается, так как при нулевом положении подвижного контакта P_x регулировочного автотрансформатора (рис. 16-46, *б*) ток $I_{р1}$ в автотрансформаторе и питающемся от него плече защиты отсутствует, в то время как во втором плече будет протекать ток силового трансформатора $I_{т2}$, в результате чего возможна неселективная работа защиты.

Для отстройки от намагничивающих токов и токов небаланса применяется дифференциальное реле с БНТ.

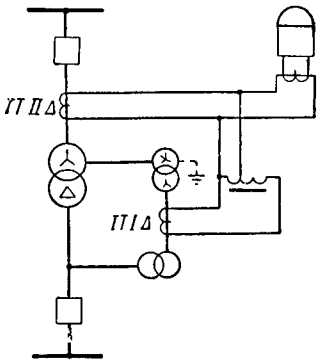


Рис. 16-49. Дифференциальная защита последовательного трансформатора.

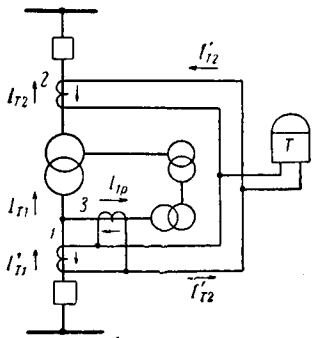


Рис. 16-50. Дифференциальная защита, охватывающая только основной трансформатор.

В зону рассматриваемой защиты входят выводы и обмотки последовательного трансформатора и обмотка звезды основного трансформатора. При наличии дифференциальной защиты последовательного трансформатора и токовой защиты вольтодобавочного трансформатора дифференциальная защита основного трансформатора может выполняться по схеме на рис. 16-50. В этом случае защита не реагирует на повреждение в вольтодобавочном трансформаторе, но при такой схеме соотношение токов в ее плечах не зависит от коэффициента трансформации регулировочного автотрансформатора.

Глава семнадцатая

ЗАЩИТА БЛОКОВ ГЕНЕРАТОР — ТРАНСФОРМАТОР И ГЕНЕРАТОР — ТРАНСФОРМАТОР — ЛИНИЯ

17-1. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ БЛОКОВ

Блочные схемы соединений находят широкое распространение на современных мощных электростанциях. Наиболее часто соединяются в один блок генератор — повысительный трансформатор (или автотрансформатор) и трансформатор собственных нужд (с. н.). Находят применение также блоки генератор — повысительный трансформатор (или автотрансформатор) — линия (рис. 17-1, *г*). Блоки большой мощности (150, 200, 300, 500, 800 *Мвт*) объединяют в единый агрегат не только генератор и трансформатор, но также

котел и турбину. Такие блоки не имеют поперечных связей, позволяющих заменять один элемент блока (например, трансформатор или котел) аналогичным элементом другого блока. В результате этого повреждение или нарушение нормальной работы одного элемента блока выводит из работы весь блок.

На генераторах, трансформаторах (или автотрансформаторах) и линиях, соединенных в один блок, устанавливаются те же защиты, что и в случае их раздельной работы. Однако объединение в один рабочий агрегат нескольких элементов большой мощности вызывает некоторые, отмеченные ниже особенности в требованиях к защитам и в отдельных случаях в исполнении защиты.

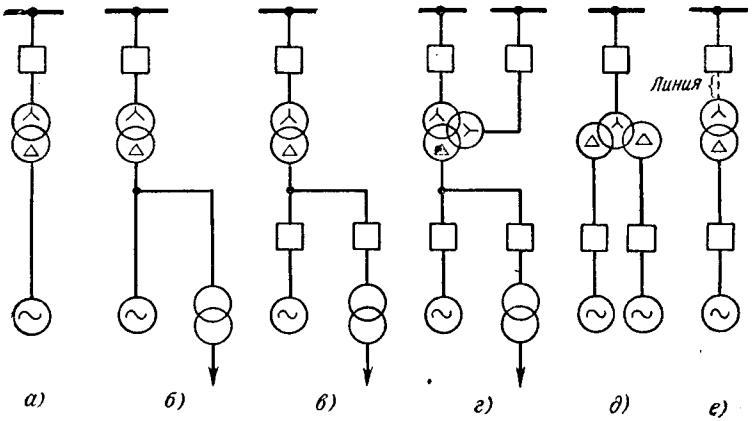


Рис. 17-1. Основные схемы блоков.

а — генератор — трансформатор; *б*, *в*, *г* — генератор — трансформатор с ответвлением на с. н.; *д* — блок с двумя генераторами; *е* — генератор — трансформатор — линия.

1. Соединение в один блок нескольких элементов позволяет объединить однотипные защиты этих элементов в одну общую защиту. Общими обычно выполняются дифференциальные защиты генератора и трансформатора, а также защиты от сверхтоков при внешних к. з. и перегрузках.

2. Отсутствие электрической связи между генератором и сетью, имеющее место в блочных схемах, позволяет существенно упростить защиту генератора от замыканий на землю.

3. Вследствие высокой стоимости мощных генераторов и трансформаторов блока к их защитам от внутренних повреждений предъявляются повышенные требования в части чувствительности, быстроты действия и надежности.

4. Малые запасы по нагреву мощных генераторов обусловливают необходимость выполнения защиты от недопустимого нагрева ротора генератора при несимметричном режиме и от перегрузки обмотки ротора.

5. На блоках без поперечных связей, все элементы которых объединены в единый агрегат, возникает необходимость действия электрических защит не только на выключатель и АГП, но и на останов блока в целом, т. е. котла и турбины.

Ниже рассмотрены особенности выполнения защит блоков.

17-2. ЗАЩИТА БЛОКА ГЕНЕРАТОР — ТРАНСФОРМАТОР

а) Защита от сверхтоков при внешних к. з. и перегрузках и защита от несимметричных режимов

Виды релейных устройств, применяемых для защиты от сверхтоков и несимметричных режимов, зависят от мощности генераторов и их перегрузочных характеристик.

Маломощные генераторы, 5—30 *Мвт*, выполняются заводами с косвенной системой охлаждения. Эти генераторы допускают по условиям нагрева значительные перегрузки, в том числе и в несимметричном режиме. В связи с этим на генераторах с косвенным охлаждением перегрузки (симметричные и несимметричные) могут ликвидироваться персоналом. Специальных защит с действием на отключение при симметричных и несимметричных перегрузках на этих генераторах руководящими указаниями по релейной защите [Л. 6] не предусматривается. Поэтому на маломощных блоках защита от перегрузки выполняется с действием на сигнал. В качестве защиты от внешних к. з. применяется токовая максимальная защита с комбинированным пуском по напряжению (§ 15-5, б и 16-2, е). Эта защита отличается простотой исполнения и малой стоимостью.

Мощные современные турбо- и гидрогенераторы, как уже отмечалось, выполняются с интенсивным использованием стали и меди ротора и с непосредственной системой охлаждения. Такие генераторы быстро нагреваются при симметричных и особенно несимметричных перегрузках и внешних к. з. и имеют пониженную перегрузочную способность как статора, так и ротора. В результате этого на блоках средней и большой мощности (60 и 100 *Мвт*, а также 150 *Мвт* и больше) для защиты от несимметричных режимов устанавливаются специальные токовые защиты обратной последовательности от несимметричной перегрузки и внешних к. з., выполняемые в соответствии с § 15-5, г. Для отключения симметричных внешних к. з. предусматривается максимальная защита с пуском по напряжению в однофазном исполнении (§ 15-5 и 16-2, е). От симметричных перегрузок устанавливается сигнальное токовое реле (см. § 15-5, в). Для повышения чувствительности к наиболее частым внешним к. з. — однофазным — устанавливается защита нулевой последовательности, реагирующая на I_0 или U_0, рассмотренная в § 16-2, г и т. д.

На всех блоках генератор и трансформатор (рис. 17-1, *а* и *б*) образуют единый агрегат, поэтому защита от внешних к. з. на сто-

роне низшего напряжения повысительного трансформатора не устанавливается, ее функции выполняет аналогичная защита генератора, которая является в этом случае резервной защитой всего блока. Необходимость защит от внешних к. з. на стороне высшего и среднего напряжения повысительного трансформатора, а также на трансформаторе собственных нужд зависит от схемы блока и расположения выключателей.

На блоках с двухобмоточным повысительным трансформатором (рис. 17-1, *а*, *б* и *в*) устанавливается только один комплект защиты

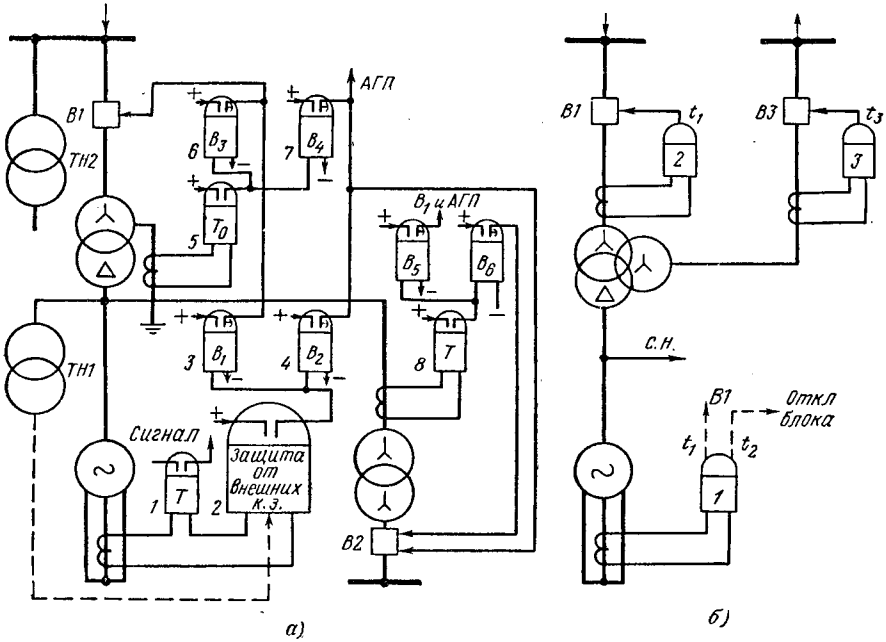


Рис. 17-2. Защита блока от внешних к. з.

а — с двухобмоточным трансформатором; *б* — с трехобмоточным трансформатором.

от внешних к. з. Он включается на трансформаторы тока, расположенные на нулевых выводах генератора. При таком размещении защиты все элементы блока попадают в ее зону, что позволяет защите от внешних к. з. блока резервировать защиты от внутренних повреждений генератора и трансформатора блока. Защита действует на выключатель блока B_1 и АГП генератора. На рис. 17-2, *а* приведена схема размещения и действия защиты от внешних к. з. Последняя условно изображена в виде реле *2* и реле времени *3* и *4*. Схема и тип защиты, как было указано выше, зависят от мощности генератора блока. Защита имеет две выдержки времени t_1 и t_2, согласованные по условию селективности с защитами присоединений, питающихся от шин электростанции. При неотключившемся к. з. на шинах стан-

ции или в сети высшего напряжения защита от внешних к. з. отключает с меньшей выдержкой t_1 (установленной на реле времени *3*) выключатель блока B_1, после чего защита прекращает свое действие, блок остается в работе, питая собственные нужды. Если же к. з. возникло на элементах блока, то при отказе дифференциальной защиты поврежденного элемента резервная защита блока отключает его от сети с выдержкой времени t_1, а затем с большей выдержкой $t_2 = t_1 + \Delta t$ (реле времени *4*) подействует на АГП, прекращая питание места к. з. от генератора. Реле напряжения максимальной защиты с пуском по напряжению обычно питается от трансформатора напряжения TH_1, подключенного к выводам генератора. Для повышения чувствительности к к. з. на стороне высшего напряжения реле напряжения могут подключаться к TH_2 на шинах блока.

Если обмотка высшего напряжения трансформатора блока заземлена, как показано на рис. 17-2, *а*, то для резервирования отключения к. з. на землю на шинах блока и в подключенной к ним сети устанавливается токовая защита нулевой последовательности (реле *5*, *6* и *7*), действующая с выдержкой времени на отключение выключателя блока B_1.

Если нейтраль трансформатора не заземлена или трансформатор может работать в режиме заземленной и разземленной нейтрали, предусматривается защита, отключающая трансформатор при замыканиях на землю в сети высшего напряжения в случае отказа соответствующих защит поврежденного элемента (шин или линий) с выдержкой времени меньшей, чем на защите других блоков станции, работающих с заземленной нейтралью. Указанная защита выполняется так же, как и на повысительных трансформаторах (§ 16-2, д).

На блоках, имеющих ответвление на собственные нужды (рис. 17-1, *б* и *в*) обе защиты блока от внешних к. з. (*2* и *5*) выполняются с двумя выдержками времени: t_1 и t_2 (рис. 17-2, *а*). При к. з. на шинах или неотключившемся к. з. в сети высшего напряжения защита блока отключает с меньшей выдержкой времени t_1 выключатель блока B_1, сохраняя при этом питание собственных нужд блока. Короткие замыкания на элементах блока в случае отказа дифференциальной защиты ликвидируются защитой с выдержкой времени t_2, при этом отключается весь блок, т. е. АГП, выключатель B_1 и трансформатор с. н. Если защита блока *2* имеет недостаточную чувствительность к к. з. за трансформатором с. н., то тогда со стороны генераторного напряжения трансформатора с. н. устанавливается максимальная защита *8*, надежно действующая при указанных повреждениях.

На блоках с трехобмоточным повысительным трансформатором (рис. 17-1, *г* и 17-2, *б*) кроме защиты *1* от внешних к. з. на генераторе устанавливаются дополнительно защиты *2* и *3* на обмотках среднего и высшего напряжения трансформатора для селективного отключения к. з. на шинах и линиях, питающихся от этих обмоток. При наличии питания со всех трех сторон трансформатора для селектив-

ного отключения внешних к. з. защиту одной из обмоток следует выполнять направленной.

В целях упрощения на блоках с трехобмоточными трансформаторами можно не ставить защиту (*2*) на стороне высшего напряжения, как показано на рис. 17-2, *б*, используя вместо нее защиту генератора *1*, которая в этом случае выполняется с двумя выдержками времени (t_1 и t_2). Чтобы обеспечить селективное действие защит *1* и *3* при внешних к. з. (в сети среднего или высшего напряжения), их выдержки времени должны удовлетворять условию: $t_3 < t_1 < t_2$.

На мощных трехобмоточных блоках для повышения чувствительности к внешним двухфазным к. з. на обмотке высшего напряжения иногда устанавливается токовая защита обратной последовательности. При необходимости она выполняется направленной.

б) Дифференциальная защита на блоках генератор — трансформатор

Дифференциальная защита блока. Для защиты от к. з. в генераторе и трансформаторе блока устанавливается общий комплект дифференциальной защиты, охватывающий генератор и трансформатор, как это показано на рис. 17-3.

На блоках с ответвлением к трансформатору собственных нужд без выключателя (рис. 17-3, *а*) дифференциальная защита блока выполняется по упрощенной схеме без трансформаторов тока на ответвлении. В этом случае при к. з. в трансформаторе собственных нужд или в питающейся от него сети в реле защиты появляется ток, равный сумме токов, проходящих к месту к. з. от генератора и от системы:

$$I_{\text{р}} = \frac{I_{\text{к.г}} + I_{\text{к.с}}}{n} = \frac{I_{\text{к. отв}}}{n},$$

где $I_{\text{к.отв}}$ — полный ток к. з., проходящий по ответвлению, при к. з. в точках K_2 и K_1.

Под действием этого тока защита может сработать. Чтобы избежать неселективной работы защиты, ее ток срабатывания выбирается больше, чем максимальный ток $I_{\text{к.отв}} = I_{\text{к2 макс}}$ при к. з. за трансформатором собственных нужд (в точке K_2), по выражению

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{н}} I_{\text{к2 макс}}. \qquad (17\text{-}1)$$

При этом условии дифференциальная защита блока не работает при к. з. за трансформатором собственных нужд. При к. з. в трансформаторе с. н. дифференциальная защита блока приходит в действие, если $I_{\text{к.отв}} > I_{\text{с.з}}$. Таким образом, трансформатор собственных нужд частично входит в зону дифференциальной защиты блока. Дополнительно к ней на трансформаторе собственных нужд устанавливаются максимальная и газовая защиты.

Условие (17-1) является дополнительным, кроме него дифференциальная защита блока, как и любая дифференциальная защита

трансформатора, должна отстраиваться от $I_{нб.макс}$ и от броска намагничивающего тока согласно § 16-8, в.

На мощных блоках трансформаторы собственных нужд, подключаемые к ответвлению, имеют значительную мощность. В связи с этим отстройка от тока $I_{к2\ макс}$ приводит к недопустимому загрублению дифференциальной защиты блока, при котором $I_{с.з} > (1{,}5 \div 2)\ I_{ном.блока}$.

В таких случаях дифференциальную защиту блока следует выполнять по полной схеме, для чего на ответвлении устанавливается трансформатор тока (показанный на рис. 17-3, *а* пунктиром)

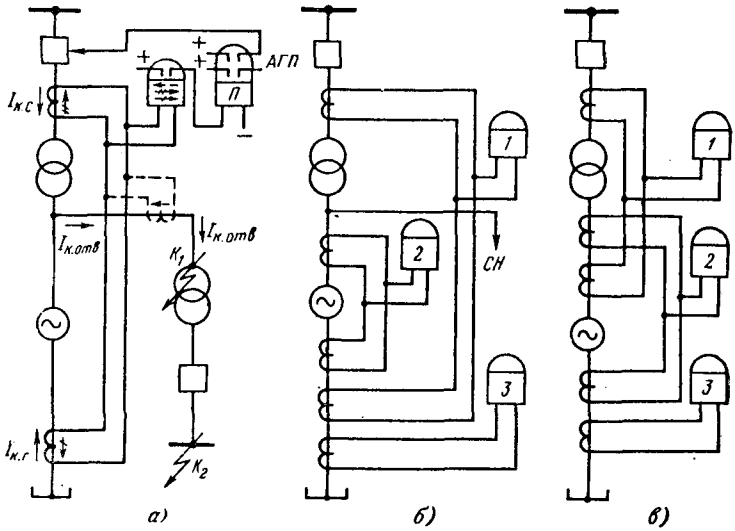


Рис. 17-3. Варианты выполнения дифференциальной защиты блоков.

с таким же коэффициентом трансформации, как и на генераторе. При этом на трансформаторе собственных нужд предусматривается собственная дифференциальная защита.

На блоках, имеющих на ответвлении к трансформатору собственных нужд выключатель, дифференциальная защита блока выполняется также по полной схеме независимо от мощности трансформатора, так как в этом случае защита блока по условию селективности не должна действовать при к. з. за выключателем ответвления.

Дифференциальная защита генератора. На мощных блоках 150 *Мвт* и больше *для повышения чувствительности и надежности защиты генератора,* помимо дифференциальной защиты блока *1*, предусматривается самостоятельная дифференциальная защита генератора *2* (рис. 17-3, *б*).

Дифференциальная защита блока отстраивается от броска тока намагничивания трансформатора блока и повышенных значений

тока небаланса, обусловленных разнотипностью трансформаторов тока и различием сопротивлений плеч. Поэтому ток срабатывания защиты получается больше $I_{ном.б}$. Практически $I_{с.з} = (1{,}3 \div 1{,}5)\ I_{ном.б}$ ($I_{ном.б}$ — номинальный ток блока).

Дифференциальная защита генератора отстраивается только от $I_{нб}$, имеющего меньшее значение, чем у защиты блока, поэтому ее $I_{с.з} \approx (0{,}5 \div 0{,}6)\ I_{ном.б}$, т. е. в 2—3 раза меньше, чем у защиты блока.

При наличии дифференциальной защиты генератора (дифференциальная) защита блока является резервной быстродействующей защитой для генератора. Такое усложнение и дублирование защит генераторов считают оправданным, учитывая большую мощность генератора и обусловленную этим его высокую стоимость.

Как видно из рис. 17-3, *б*, при установке дифференциальной защиты генератора и блока на нулевых выводах генератора необходимо устанавливать два трансформатора тока. Это вызывается тем, что трансформаторы тока выполняются не больше чем с двумя сердечниками, а с учетом защиты от внешних к. з. *3* для раздельного питания цепей указанных защит нужно иметь три самостоятельных сердечника.

На мощных генераторах 300 *Мвт* и больше размещение двух трансформаторов тока в нуле генератора оказывается довольно трудным по конструктивным причинам. В таких случаях (рис. 17-3, *в*) в нуле генератора устанавливается один трансформатор тока, от обмоток которого питаются дифференциальная защита генератора *2* и защита от внешних к. з. *3*. Вместо защиты блока устанавливается защита трансформатора *1*.

На блоках, выполненных по схеме на рис. 17-1, *д*, каждый генератор должен иметь самостоятельную дифференциальную защиту по условию селективности. Для трансформатора устанавливается отдельная дифференциальная защита.

Дифференциальная защита повысительного трансформатора. В схемах блоков, имеющих на генераторе выключатель (рис. 17-1, *в*, *г*, *е*), на повысительном трансформаторе устанавливается самостоятельная дифференциальная защита. Дифференциальная защита блока в этом случае не ставится. Для улучшения отстройки от токов небаланса на трехобмоточных трансформаторах или на трансформаторах с двумя выключателями на стороне высшего напряжения применяется (если это нужно) дифференциальные реле с торможением.

в) Защита генераторов блоков от замыканий на землю

Токи и напряжения нулевой последовательности, появляющиеся на генераторной стороне блоков при замыканиях на землю. Для выяснения возможных принципов выполнения защиты необходимо представлять величину токов и напряжений нулевой последовательности, появляющихся в цепях генераторного напряжения блоков во время замыканий на землю в сети высшего напряжения и в самом

генераторе. При этом нужно учитывать две особенности блочных схем.

1) Блочные генераторы по принятым в Советском Союзе правилам работают с изолированной или заземленной через дугогасящую катушку нейтралью.

2) Генераторы блоков связаны с сетью высшего напряжения через повысительный трансформатор. При такой схеме генератор

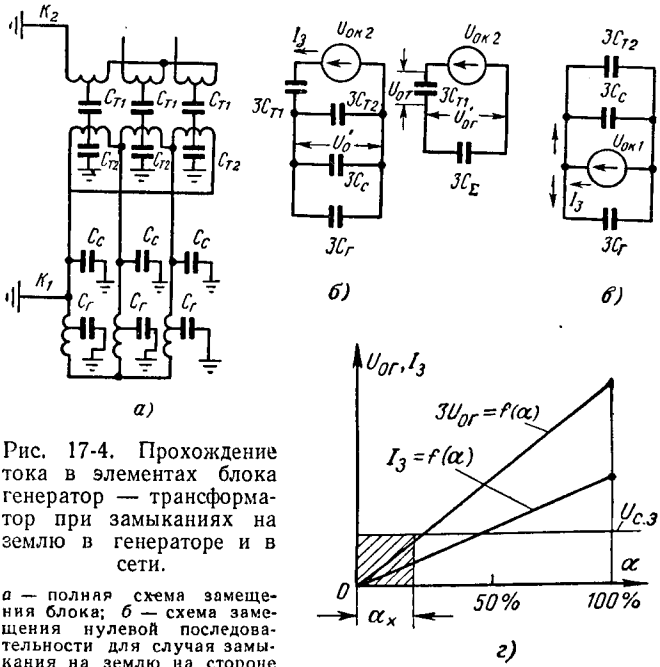


Рис. 17-4. Прохождение тока в элементах блока генератор — трансформатор при замыканиях на землю в генераторе и в сети.

а — полная схема замещения блока; *б* — схема замещения нулевой последовательности для случая замыкания на землю на стороне высшего напряжения (в точке K_2); *в* — схема замещения нулевой последовательности при замыкании на землю на стороне генераторного напряжения (в точке K_1); *г* — зависимость U_0 и I_0 от замкнувшихся на землю витков обмотки статора.

не имеет электрической связи с сетью высшего напряжения, он связан с ней посредством электромагнитной индукции между обмотками трансформатора и электростатической индукции через емкость $C_{т1}$ между этими же обмотками (рис. 17-4, *а*).

Емкость $C_{т1}$ очень мала, она зависит от мощности и напряжения трансформаторов и составляет величину порядка 0,008—0,004 *мкф*.

Поэтому сопротивление связи $X_{св} = 1/\omega C_{т1}$ получается значительным, а протекающий через него ток очень малым.

При замыкании на землю в сети высшего напряжения (например, в точке K_2, рис. 17-4, *а*) в месте повреждения, как известно (§ 9-1), возникает напряжение нулевой последовательности $U_{0к2}$. В сети с глухозаземленной нейтралью при метал-

лическом замыкании на землю $U_{0к2} = \frac{1}{3} U_ф$, а в сети с изолированной нейтралью $U_{0к2} = U_ф$, здесь $U_ф$ — фазное напряжение сети, где произошло повреждение.

Под действием $U_{0к2}$ в цепи генератора возникает ток I_0, замыкающийся через землю по контуру, образованному емкостью $C_{т1}$ между обмотками трансформатора и емкостями на землю элементов сети генераторного напряжения: $C_{т2}$ (обмоток трансформатора), $C_с$ (токоведущей цепи между трансформатором и генератором), $C_г$ (обмоток генератора).

Эквивалентная схема этого контура показана на рис. 17-4, *б*. Из схемы видно, что ток $I_0 = \frac{U_{0к2}}{X_{т1} + X_{сΣ}}$, а напряжение нулевой последовательности на стороне генератора блока $U_{0г} = I_0 X_{сΣ}$, где $X_{т1} = 1/\omega C_{т1}$, а $X_{сΣ} = 1/(C_{т2} + C_с + C_г)\omega$.

Величина $X_{т1} \gg X_с$ (в 100—50 раз), вследствие этого напряжение $U_{0г}$ очень мало и составляет 1—2% от $U_{0к2}$. Поскольку абсолютное значение $X_{т1}$ и $X_{сΣ}$ велико, то ток I_0 также очень мал и измеряется долями ампера.

У генераторов, работающих непосредственно на сборные шины, при замыканиях на землю в сети напряжение $U_{0г} = U_{ф.г}$, а ток $I_{0г}$, проходящий через генератор, достигает обычно несколько ампер (см. § 9-1). Сопоставляя эти данные для обеих схем включения генератора, можно сделать вывод, что в блочных схемах значения $U_{0г}$ и $I_{0г}$ при замыканиях в сети во много раз меньше, чем в схемах генераторов, работающих на сборные шины. Это вызвано наличием большого емкостного сопротивления связи $X_{т1}$ между генератором и сборными шинами блоков.

При замыкании на землю в генераторе блока (например, K_1 на рис. 17-4) в месте замыкания появляется напряжение нулевой последовательности $U_{0к1} = \alpha U_{ф.г}$, где α — количество замкнувшихся на землю витков обмотки генератора.

Если замыкание возникло в сети генераторного напряжения или на выводах обмотки генератора, то $\alpha = 1$ и $U_{0к1} = U_{ф.г}$. Под действием $U_{0к1}$ возникает ток I_0, который замыкается на землю через параллельно включенные емкости фаз относительно земли обмоток генератора, трансформатора и связывающих их токоведущих частей (кабелей или шин) (рис. 17-4, *а*, *в*),

$$I_0 = \frac{U_{0к1}}{X_т + X_с + X_г} = \frac{\alpha U_{ф.г}}{X_т + X_с + X_г}.$$

Поскольку $U_{0к1}$ пропорционально α, то и $I_0 \equiv \alpha$.

При изменении α от 0 до 1 $U_{0г}$ меняется от 0 до $U_{0г.макс} = U_{ф.г}$ и ток в месте замыкания $I_з = 3I_0$ меняется от 0 до максимального значения, определяемого величиной $U_{ф.г}$ $\left(U_{0г} = U_{ф.г} \text{ и } I_з = 3I_0 = 3\frac{U_{ф.г}}{X_{т1} + X_с + X_г}\right)$.

Характер зависимости $U_{0г}$ и $I_з$ от α показан на рис. 17-4, *г*. Величина емкостей элементов сети генераторного напряжения неве-

лика, и поэтому ток в месте замыкания на землю $I_з = 3I_0$ относительно мал. Максимальное значение $I_з$ не превосходит 5 *а*.

Защита и ее принцип действия. С учетом приведенного выше анализа величин токов и напряжений нулевой последовательности, возникающих на генераторной стороне блоков при замыканиях на землю в сети и в генераторе, в Советском Союзе широко применяется

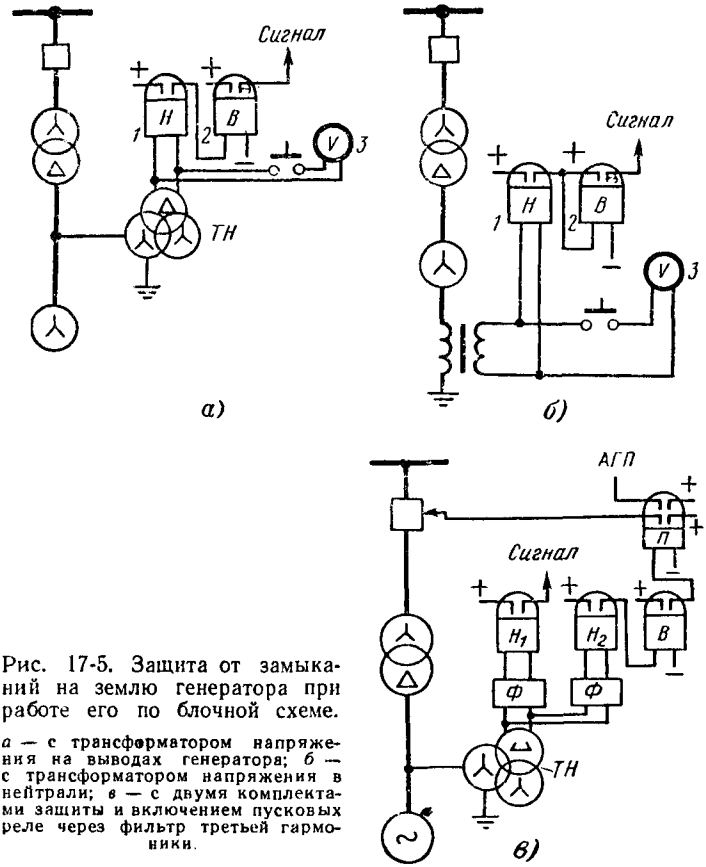


Рис. 17-5. Защита от замыканий на землю генератора при работе его по блочной схеме.

а — с трансформатором напряжения на выводах генератора; *б* — с трансформатором напряжения в нейтрали; *в* — с двумя комплектами защиты и включением пусковых реле через фильтр третьей гармоники.

простая защита, реагирующая на появление U_0 на зажимах генератора. Селективность этой защиты при замыканиях на землю в сети, питающейся от блока, обеспечивается отстройкой от появляющегося при этом напряжения $U_{0г}$ на зажимах генератора.

Схемы защиты приведены на рис. 17-5. Защита состоит из реле напряжения *1*, реагирующего на U_0, реле времени *2* и вольтметра *3*.

Реле напряжения *1* включается на фильтр напряжения нулевой последовательности. В качестве такого фильтра обычно служит трансформатор напряжения *ТН* с соединением первичной обмотки в звезду, а вторичной — в разомкнутый треугольник. Для правиль-

ной работы фильтра нейтраль первичной обмотки должна быть обязательно заземленной (§ 6-3). Напряжение на разомкнутом треугольнике $\dot{U}_{\triangle} = \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 3\dot{U}_0$.

Трансформатор напряжения *ТН* устанавливается на выводах генератора. В качестве второго варианта включения реле *1* приведена схема на рис. 17-5, *б*. Здесь реле *1* питается от трансформатора напряжения в нейтрали генератора. В нормальных условиях напряжение нейтрали равно нулю, и поэтому напряжение на вторичной обмотке *ТН* отсутствует. При замыканиях на землю в нейтрали появляется напряжение U_0, которое трансформируется на вторичную сторону *ТН*.

Обычно применяется схема по рис. 17-5, *а*, поскольку она использует имеющийся для измерения *ТН*. Рассмотрим её работу.

В нормальных условиях напряжение $U_0 = 0$ и реле *1* по принципу своего действия не должно работать. Однако из-за погрешности в трансформации *ТН* и наличия третьих гармоник в напряжении, возникающих вследствие искажения синусоидальной формы кривой фазных э. д. с. генератора, на зажимах разомкнутого треугольника появляется напряжение небаланса:

$$U_{нб} = U_{нб\,ТН} + U_{03}, \qquad (17\text{-}2)$$

где $U_{нб\,ТН}$ — напряжение небаланса из-за погрешности *ТН*; U_{03} — напряжение третьей гармоники на зажимах генератора.

Для исключения работы защиты напряжение срабатывания реле *1* должно удовлетворять условию:

$$U_{с.з} > U_{нб}. \qquad (17\text{-}3)$$

При внешних замыканиях на землю за трансформаторами блока на стороне генераторного напряжения появляется $U_{0г} = I_0 X_{C\Sigma}$, к которому добавляется напряжение ΔU_{03} третьей гармонической.

Для исключения ложной работы защиты необходимо иметь:

$$U_{с.з} > (3U_{0г} + U_{03}). \qquad (17\text{-}4)$$

При замыкании на корпус обмотки генератора появляется напряжение $U_{0г} = \alpha U_{ф.г}$. Защита приходит в действие при условии, что $3U_{0г} > U_{с.з}$.

Таким образом, *рассмотренная схема имеет мертвую зону* — она не действует, если $U_{с.з} < 3U_{0г} = \alpha_x U_{ф.г}$. Здесь α_x — число витков, при которых напряжение $U_{0г}$ недостаточно для действия защиты $\alpha_x = U_{с.з}/U_{ф}$.

Для уменьшения мертвой зоны нужно уменьшать $U_{с.з}$. Однако уменьшение $U_{с.з}$ ограничивается условием селективности (17-4).

Для повышения чувствительности защиты на мощных генераторах, 300, 500 *Мвт* и больше, реле напряжения целесообразно включать через фильтр, не пропускающий напряжение третьих гармоник.

Подобная схема осуществляется с помощью реле напряжения РНН-57, включаемого через фильтр $Ф$, как показано на рис. 17-5, *в*. При напряжении U_0 с частотой 50 *гц* реле действует при 4—8 *в*, а при частоте 150 *гц* (третья гармоника) — загрубляется примерно в 8 раз. При наличии фильтра в условиях выбора $U_{с.з}$ (17-3) и (17-4) не учитывается составляющая U_{03}, что позволяет повысить чувствительность защиты.

По принципу действия защита может работать мгновенно, так как она отстроена от внешних замыканий на землю по напряжению срабатывания.

Однако для большей надежности из-за опасения появления феррорезонансного повышения напряжения в схеме предусмотрено реле времени *3*, позволяющее отстроиться от внешних к. з. на землю с выдержкой времени $t_з$.

Выдержка $t_з$ принимается на ступень Δt больше времени действия $t_л$ защит линий от замыканий на землю:

$$t_з = t_л + \Delta t \approx 1 \div 1{,}5 \text{ } сек. \qquad (17\text{-}5)$$

Вследствие малой величины тока замыкания на землю (порядка 5 *а*) такое замедление не может привести к развитию повреждения в генераторе. При токах замыкания на землю до 5*а* защита выполняется с действием на сигнал, поскольку такой ток может допускаться длительное время, так как не вызывает разрушения стали статора (см. § 9-2). *На мощных генераторах, особенно* 500 *Мвт и выше, защиту целесообразно выполнять с действием на отключение.* Это позволит предотвратить развитие повреждения и обеспечить резервирование защиты от витковых замыканий. Витковые замыкания являются тяжелым видом повреждения и очень часто сопровождаются замыканиями на землю. Защита от витковых повреждений не имеет резервирования другими защитами. В случае отказа в работе витковой защиты повреждение будет развиваться пока не перейдет в замыкание между фазами, на которое реагирует дифференциальная защита. Действие на отключение должно также предусматриваться, если ток замыкания на землю превосходит 5*а*.

Двухступенчатая защита для мощных блоков с действием на сигнал и отключение показана на рис. 17-5, *в*. Вольтметр служит для контроля за исправностью цепей трансформатора напряжения, для контроля за изоляцией статора при включении генератора в сеть и для определения числа замкнувшихся витков фазы статора, если защита действует на сигнал.

Из принципа работы защиты вытекает, что она будет действовать при замыканиях на землю не только в генераторах, но и на всех элементах генераторного напряжения (обмотках генераторного напряжения трансформаторов блока и собственных нужд и соединительных связях между ними и генератором).

Выбор уставок [Л. 6]. Напряжение срабатывания выбирается по условию селективности при замыканиях на землю в сети высшего напряжения (17-4).

Действующее значение напряжения срабатывания реле

$$U_{с.р} = k_н \frac{3}{n_н} \sqrt{U_{0г}^2 + U_{03}^2}, \qquad (17\text{-}6)$$

где $\sqrt{U_{0г}^2 + U_{03}^2}$ — действующее значение составляющих основной частоты $U_{0г}$ и третьей гармоники U_{03} [Л. 29]; $k_н$ — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,3—1,5; $n_н$ — коэффициент трансформации *ТН*.

На основании опыта эксплуатации $U_{с.з}$ принимается в схемах без фильтра третьей гармоники равным 10—15 *в*. В схемах с фильтром $U_{с.з} = 5 \div 6$ *в*.

В схеме с двумя ступенями (рис. 17-5, *в*) реле, действующее на сигнал, выполняется с приведенными выше уставками. Реле, действующее на отключение, выполняется с уставкой $U_{с.з} = (0{,}5 \div 0{,}6)\, U_{ф.г}$ при условии, что при этом напряжении $I_з \leqslant 5$ *а*.

Чувствительность защиты и величина мертвой зоны оцениваются по проценту витков α_x, при замыкании которых защита перестает действовать: $\alpha_x\% = \frac{U_{с.з}}{U_{ф.г}} 100$. Мертвая зона может определяться графически согласно рис. 17-4, *г*.

Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы ток $I_з$ при повреждении в мертвой зоне был меньше 5 *а*.

Время действия защиты выбирается по выражению (17-5).

Как отмечалось в § 16-1, на мощных генераторах с непосредственным охлаждением имеется повышенная возможность повреждения изоляции и появления замыкания на землю обмотки статора вблизи нулевой точки. Несмотря на малые значения токов, при повреждении вблизи нейтрали признается целесообразным на особо мощных и дорогостоящих генераторах, 300—500—800 *Мвт* и более, применение защит от замыкания на корпус, не имеющих мертвой зоны (100% защиты). Такая защита позволит немедленно выявить повреждение генератора, где бы оно не появилось, и предотвратить его возможное развитие. Разработки подобных защит ведутся и в Советском Союзе.

г) Взаимодействие с технологическими защитами блока

Выше отмечалось, что основные элементы блока: котел, турбина, генератор, трансформатор — представляют единое целое. Отключение повысительного трансформатора или генератора означает прекращение работы блока и нарушение режима работы турбины и котла. В зависимости от причин отключения электрического оборудования блока и возможности его обратного включения возможен перевод тепловой части блока в один из трех режимов:

1) полной остановки турбины и гашения котла;

2) полной остановки турбины и перевода котла в растопочный режим;

3) перевод блока на холостой ход.

При повреждении генератора и повысительного трансформатора дальнейшая работа блока невозможна. Поэтому защиты от внутренних повреждений генератора и повысительного трансформатора должны воздействовать через цепи технологических защит на остановку турбины и гашение котла.

При отключении блока вследствие к. з. в сети или перегрузки генератора целесообразен перевод турбины и котла в режим холостого хода, так как в этих случаях имеется возможность и должны приниматься меры к быстрому включению блока в сеть. В соответствии с этим первые ступени защиты от внешних к. з. (действующих на отключение выключателя блока) должны одновременно воздействовать на перевод тепловой части блока в режим холостого хода.

д) Пуск от защиты устройств пожаротушения на повысительных трансформаторах блока

Мощные повысительные трансформаторы снабжаются автоматическими устройствами пожаротушения водой или многократной пеной. Пуск установок пожаротушения осуществляется от газовой

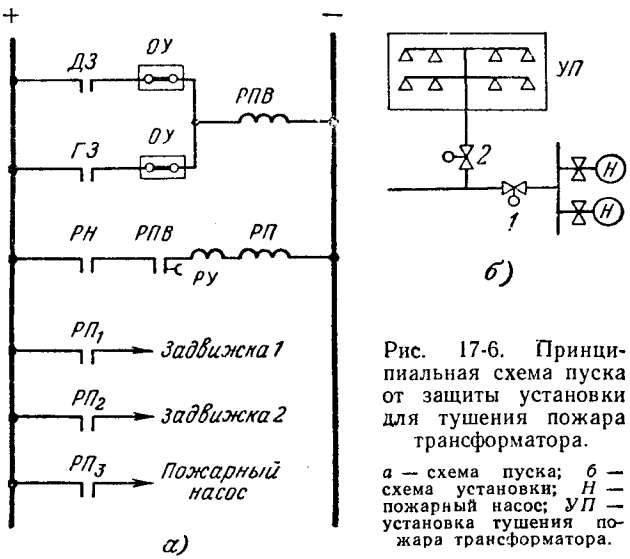


Рис. 17-6. Принципиальная схема пуска от защиты установки для тушения пожара трансформатора.

а — схема пуска; *б* — схема установки; *Н* — пожарный насос; *УП* — установка тушения пожара трансформатора.

и дифференциальной защит трансформатора (не блока). Пуск пожаротушения разрешается при действии указанных защит и фиксации (с помощью реле минимального напряжения) отсутствия напряжения на трансформаторе. Схема пуска от защиты пожарной установки показана на рис. 17-6. По действующим в СССР правилам автоматический пуск устройства пожаротушения от защиты должен выполняться на трансформаторах мощностью 200 *Мва* и выше.

17-3. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ БЛОКОВ ГЕНЕРАТОР — ТРАНСФОРМАТОР — ЛИНИЯ

Для удешевления распределительного устройства электростанций находит применение схема, при которой генераторы станции коммутируются на шины расположенной вблизи подстанции по блочной схеме: генератор — трансформатор — линия (рис. 17-7). При такой схеме выключатель на стороне высшего напряжения трансформатора обычно не устанавливается.

Повреждение в трансформаторе в этом случае должно отключаться со стороны генератора выключателем *В1* и со стороны системы — выключателем *В2*, находящимся на противоположном конце линии.

Последняя операция производится с помощью короткозамыкателя *К*, устанавливаемого на стороне высшего напряжения трансформатора, или посредством передачи отключающей команды от защиты трансформатора на противоположный конец линии по каналу связи.

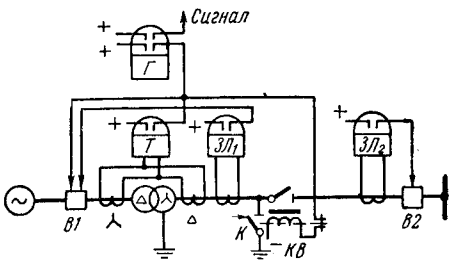


Рис. 17-7. Защита блока генератор — трансформатор — линия.

Защита элементов рассматриваемого блока получается достаточно простой и выполняется следующим образом.

Защита генератора и трансформатора осуществляется на основе принципов, рассмотренных выше для блоков генератор — трансформатор. Защита трансформатора действует на отключение генераторного выключателя *В1* и на включение короткозамыкателя *К*. При повреждении в трансформаторе его защита *Т* и *Г* отключает *В1* и включает короткозамыкатель *К*. Защита $ЗЛ_2$ линии реагирует на к. з., устроенное короткозамыкателем, и отключает трансформатор от системы.

Защита линии при блочной схеме получается достаточно простой. Со стороны системы на линии устанавливаются ступенчатые токовые направленные защиты, состоящие из двух комплектов: одного — реагирующего на ток фазы $I_ф$, и второго — на ток нулевой последовательности.

При недостаточной чувствительности токовой защиты, реагирующей на ток фазы $I_ф$, применяется дистанционная защита.

В качестве быстродействующей защиты, необходимой для обеспечения устойчивости системы, используются токовые отсечки или первая зона дистанционной защиты.

Со стороны генератора к. з. на линии могут отключаться с выдержкой времени. Ее величина не ограничивается требованиями устойчивости. Вследствие этого в качестве защиты линии со стороны генератора обычно используются генераторные и трансформа-

торные защиты от внешних к. з., реагирующие на токи I_2, I_0 и $I_ф$. Чувствительность этих защит должна быть достаточной для отключения повреждений на линии и резервирования следующего участка, а выдержка времени должна отвечать условиям селективности.

Если линия блока оборудована АПВ, включающим генератор по методу самосинхронизации, то во избежание повторного включения трансформатора при повреждении в нем АПВ, установленное на выключателе *В1*, следует блокировать при действии дифференциальной и газовой защит трансформатора, а АПВ на выключателе *В2* — разрешать действовать только при отсутствии напряжений на линии, чтобы исключить несинхронное включение генератора блока.

Избежать повторного включения поврежденного трансформатора можно также с помощью отделителя, отключающего трансформатор от линии, после исчезновения напряжения на блоке. Эта операция производится при действии защит от внутренних повреждений трансформатора.

Глава восемнадцатая

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ [1]

18-1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Релейная защита электродвигателей, так же как и защита генераторов и трансформаторов, должна реагировать на внутренние повреждения и опасные ненормальные режимы [Л. 75, 76].

Весьма важно, чтобы электродвигатели не отключались защитой при неопасных ненормальных режимах, так как такие отключения могут иметь массовый характер и нанести большой ущерб промышленности.

Защиту электродвигателей следует выполнять простой и дешевой, так как применение дорогих защит не оправдывается. Для мощных электродвигателей 2 000 *квт* и выше возможно применение более сложных защит.

Особое по своей ответственности место среди электродвигателей занимают электродвигатели механизмов собственных нужд электрических станций. Отключение этих электродвигателей из-за неправильного действия защиты может нарушить нормальную работу электростанции, поэтому *защита электродвигателей ответственных механизмов электростанций должна отличаться особой надежностью.*

Большое значение для бесперебойной работы промышленных предприятий и особенно собственных нужд электростанции имеет самозапуск электродвигателей. Самозапуск электродвигате-

[1] Эта глава написана совместно с Н. В. Виноградовым.

лей заключается в том, что при кратковременном понижении напряжения в сети, питающей электродвигатели, они не отключаются и после восстановления напряжения вновь разворачиваются до нормальной скорости вращения (т. е. «сами запускаются»). Наиболее часто кратковременные понижения напряжения происходят в результате к. з. и при автоматическом переключении двигателей с одного источника питания на другой в результате действия АВР.

Возможность и большая эффективность самозапуска электродвигателей впервые были доказаны в СССР. Многолетняя практика эксплуатации электродвигателей в Советском Союзе опровергла мнение о недопустимости самозапуска, и в настоящее время самозапуск электродвигателей является обязательным [Л. 75].

В связи с этим *защита электродвигателей должна обеспечивать возможность их самозапуска,* т. е. *она не должна преждевременно отключать электродвигатели как при понижении напряжения, так и при его восстановлении.*

Наибольшее распространение как в промышленности, так и особенно на собственных нуждах электрических станций имеют асинхронные электродвигатели. Поэтому их защите в этой главе уделяется основное внимание.

Защита синхронных двигателей кратко рассматривается в § 18-11.

18-2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЗАЩИТ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

Наиболее частыми повреждениями в электродвигателях являются междуфазные к. з. в обмотках статора. Междуфазные к. з. вызывают значительные разрушения и сопровождаются понижением напряжения в питающей сети с нарушением нормальной работы остальных потребителей. Поэтому защита электродвигателей от междуфазных повреждений является обязательной.

Однофазные замыкания обмотки статора на землю менее опасны, так как сети, от которых питаются электродвигатели, как правило, работают с изолированными нейтралями. Защита электродвигателей от замыкания на землю устанавливается в тех случаях, когда ток замыкания на землю достигает 5—10 *а* (см. ниже).

Специальные защиты от витковых замыканий в одной фазе статора не применяются, так как простых способов ее выполнения на сегодняшний день не существует.

Наиболее частым ненормальным режимом для электродвигателей является перегрузка током.

Прохождение повышенных токов сверх определенного времени опасно для электродвигателей. Поэтому на электродвигателях, подверженных перегрузкам, устанавливается защита от перегрузки, которая в зависимости от условий работы и обслуживания электродвигателей выполняется действующей на сигнал, разгрузку приводимого механизма или отключение электродвигателя.

В некоторых случаях является недопустимым или нежелательным самозапуск электродвигателей при восстановлении напряжения после кратковременного его исчезновения. Такое положение может иметь место по условиям технологии производства или безопасности персонала, а также бывает необходимо для ограничения токов самозапуска путем отключения части малоответственных электродвигателей (см. § 18-3). На таких электродвигателях устанавливается защита минимального напряжения, действующая на их отключение.

18-3. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Вращающий момент электродвигателей и момент сопротивления механизма. Нормальный установившийся режим работы электродвигателя характеризуется равенством момента $M_д$, развиваемого электродвигателем, и момента сопротивления $M_с$ механизма, приводимого электродвигателем:

$$M_д = M_с. \qquad (18\text{-}1)$$

Если $M_д < M_с$, то электродвигатель будет тормозиться, а если $M_д > M_с$, то скорость вращения электродвигателя будет увеличиваться.

При неизменном напряжении питающей сети момент, развиваемый электродвигателем, зависит от скорости вращения n или, что то же, от скольжения s (рис. 18-1). В нормальных условиях равенство $M_д = M_с$ имеет место при $s = 2 \div 5\%$. Максимальный момент двигателя $M_{д.макс}$ равен примерно двукратному номинальному моменту, т. е.

$$\frac{M_{д.\,макс}}{M_{д.\,ном}} \approx 2. \qquad (18\text{-}2)$$

Скорости вращения $n_к$ и скольжения $s_к$, соответствующие максимальному моменту, называются критическими.

Пусковой момент $M_{д.пуск}$, соответствующий скорости вращения $n = 0$ или скольжению $s = 1$, в зависимости от конструкции электродвигателя имеет различные величины (кривые *1*, *2*, *3*, рис. 18-1).

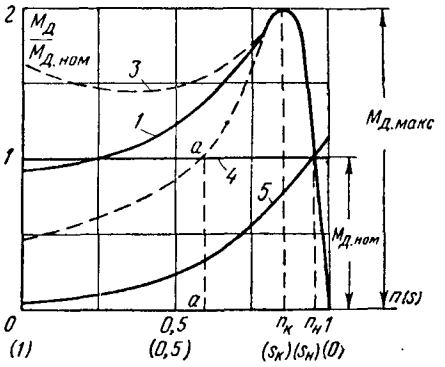


Рис. 18-1. Зависимость момента вращения асинхронных электродвигателей и момента сопротивления механизмов от скорости вращения.

Характеристики моментов сопротивления механизмов, приводимых электродвигателями, в зависимости от их скорости вращения могут быть разделены на два типа: зависящие от скорости вращения и не зависящие от нее (кривые *4* и *5*, рис. 18-1).

Момент сопротивления, не зависящий от скорости вращения, имеют, например, шаровые мельницы. Момент сопротивления, резко зависящий от скорости вращения, имеют все центробежные механизмы.

Ток, потребляемый статором электродвигателя из сети $I_д$, состоит из тока намагничивания $I_{нам}$ статора и тока ротора, приведенного к обмотке статора, $I'_{рот}$, т. е.

$$I_д = I_{нам} + I'_{рот}. \qquad (18\text{-}3)$$

Схема замещения и распределение в ней токов представлены на рис. 18-2. Ток в роторе определяется наведенной в нем э. д. с., которая зависит от скольжения (т. е. скорости пересечения обмотки ротора магнитным потоком статора электродвигателя). В результате этого токи ротора и статора также меняются с изменением скольжения.

Примерный характер зависимости периодической составляющей тока статора $I_д$ и сопротивления электродвигателя $z_д$ от скольжения представлен на рис. 18-3.

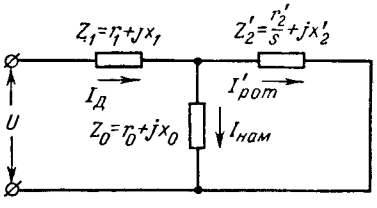


Рис. 18-2. Схема замещения асинхронного электродвигателя.

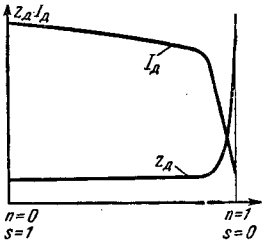


Рис. 18-3. Зависимость тока статора и сопротивления электродвигателя от скольжения s.

При нормальной работе электродвигателя, когда скольжение составляет 2—5% (т. е. близко к нулю), сопротивление ротора очень велико, ток ротора мал, а значит мал и ток статора, так как ветвь намагничивания имеет большое сопротивление.

Пуск электродвигателей. При пуске, т. е. подаче напряжения на неподвижный электродвигатель, сопротивление его мало и ток ротора имеет максимальное значение. Соответственно максимальное значение имеет и ток статора. Ток статора при пуске электродвигателя называется пусковым током. По величине начальный пусковой ток равен току трехполюсного к. з. за сопротивлением, равным сопротивлению неподвижного электродвигателя.

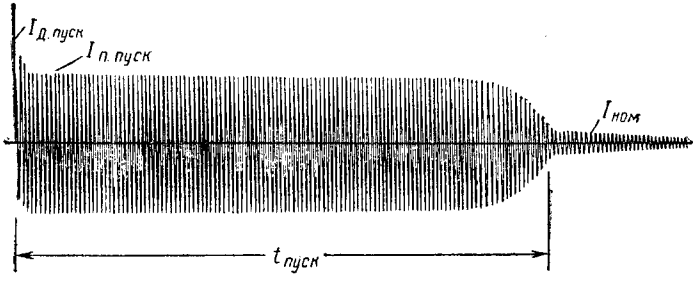


Рис. 18-4. Осциллограмма пускового тока асинхронного электродвигателя.

Пусковой ток состоит из переменной составляющей, затухающей по мере увеличения скорости вращения, и апериодической составляющей, которая затухает по экспоненциальной кривой в течение нескольких периодов.

Осциллограмма пуска двигателя представлена на рис. 18-4. Из осциллограммы видно, что по мере разворота ток, потребляемый электродвигателем, меняется сначала мало и только при приближении к синхронной скорости вращения он быстро спадает. Объясняется это характером изменения сопротивления двигателя.

Периодическая составляющая пускового тока электродвигателя $I_{п.пуск}$ при неподвижном роторе обычно в 4—8 раз превосходит его номинальный ток.

В отдельных случаях эта величина бывает больше. Максимальный пик тока с учетом апериодической составляющей достигает:

$$I_{д.пуск} = (1{,}6 \div 1{,}8)\, I_{п.пуск}. \qquad (18\text{-}4)$$

Продолжительность затухания периодической составляющей пускового тока до значения номинального тока зависит от параметров электродвигателя и условий пуска.

При пуске с нагрузкой развертывание электродвигателя до номинальной скорости происходит медленнее и продолжительность спада тока увеличивается. Это объясняется тем, что ускорение вращения ротора зависит от величины избыточного момента:

$$M_{изб} = M_д - M_с.$$

Если $M_д$ превосходит $M_с$ во все время пуска, то электродвигатель пускается быстро и легко. Как видно на рис. 18-1, электродвигатели, приводящие механизмы с зависимым от скорости вращения моментом сопротивления, пускаются легче, чем электродвигатели, приводящие механизмы с независимым от скорости вращения моментом сопротивления. В последнем случае при недостаточной величине пускового момента электродвигатели могут вообще не развернуться (кривые *2* и *4*, рис. 18-1), так как начиная со скольжения, соответствующего точке *a*, $M_с$ превосходит $M_д$ и, следовательно, избыточный момент на валу двигателя отрицательный.

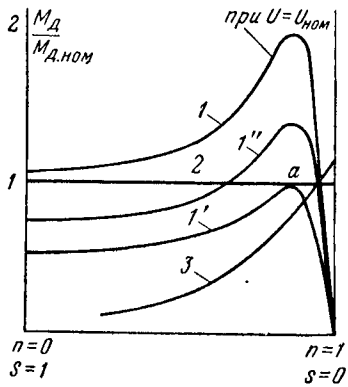


Рис. 18-5. Зависимость момента вращения асинхронных двигателей от скольжения *s* при различных значениях напряжения.

Электродвигатели с фазным ротором при отсутствии пускового сопротивления в цепи обмотки ротора имеют меньший начальный момент по сравнению с другими типами электродвигателей.

Поэтому по условиям самозапуска для ответственных механизмов собственных нужд предпочитают применять электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

Электродвигатели с глубоким пазом и двойной обмоткой ротора имеют наиболее благоприятный пусковой момент (кривая *3*, рис. 18-1). Длительность пуска электродвигателей $t_{пуск}$, как правило, не превосходит 10—15 *сек*, и только у электродвигателей с тяжелыми условиями пуска эта величина может быть значительно больше.

При возникновении к. з. в питающей сети вблизи зажимов электродвигателя последний за счет внутренней э. д. с., поддерживаемой энергией магнитного поля, посылает к месту к. з. быстро затухающий ток. По величине броски тока к. з. могут достигать значений пусковых токов.

Зависимость момента электродвигателей от напряжения характеризуется соотношением

$$M_д = kU^2. \qquad (18\text{-}5)$$

При к. з. в сети напряжение на зажимах электродвигателей снижается. В результате этого моменты электродвигателей уменьшаются и двигатели начинают тормозиться, увеличивая скольжение (рис. 18-5) до тех пор, пока вновь не восстановится равенство (18-1).

Если при этом окажется, что $M_{д.макс} = M_с$ (точка *a* на рис. 18-5), то электродвигатель будет находиться на пределе устойчивой работы и будет иметь скольжение, равное критическому. При дальнейшем снижении напряжения электродвигатель будет тормозиться вплоть до полной остановки.

Для электродвигателей, приводящих механизмы с независимым от скорости вращения моментом $M_с$ (прямая *2* на рис. 18-5), легко может быть определено

предельное снижение напряжения $U_{пред}$, при котором еще сохраняется устойчивая работа. Действительно, учитывая соотношение (18-5) и полагая $M_{д.ном} = M_c$, имеем:

$$\frac{M_{д.макс}}{M_{д.ном}} = \frac{U^2_{ном}}{U^2_{пред}}, \qquad (18\text{-}6)$$

а принимая во внимание выражение (18-2), из (18-6) получаем:

$$U_{пред} = 0{,}7U_{ном}. \qquad (18\text{-}7)$$

Электродвигатели, приводящие механизмы с зависимым от скорости вращения моментом M_c (кривая *3* на рис. 18-5), во многих случаях сохраняют устойчивую работу даже при большом снижении напряжения питания.

После отключения к. з. напряжение питания восстанавливается до нормального значения или из-за повышенного тока электродвигателей оказывается несколько ниже него и момент, развиваемый электродвигателем, определяется кривой *1''* (рис. 18-5). Дальнейшее поведение электродвигателя будет зависеть от скольжения, имевшего место в момент восстановления напряжения, и соответствующих ему значений $M_д$ и M_c. При $M_д > M_c$ электродвигатель развернется до нормальной скорости вращения, а при $M_д < M_c$ будет продолжать тормозиться до полной остановки. В этом случае электродвигатель необходимо отключить, так как он будет потреблять пусковой ток, не имея возможности развернуться.

Самозапуск электродвигателей несколько тяжелее обычного пуска. Объясняется это тем, что при самозапуске электродвигатели пускаются нагруженными, а электродвигатели с фазным ротором пускаются без пускового реостата в цепи ротора, что уменьшает их пусковой момент и увеличивает пусковой ток, и, наконец, пускается большое количество электродвигателей одновременно, что вызывает падение напряжения в питающей сети от суммарного пускового тока. Все это снижает пусковой момент и утяжеляет процесс пуска.

Самозапуск короткозамкнутых электродвигателей, а тем более электродвигателей с глубоким пазом и двойной обмоткой ротора проходит сравнительно легко. Опыт эксплуатации показывает, что самозапуск электродвигателей с фазным ротором неопасен для них и также возможен, если пусковой момент при отсутствии пускового сопротивления в роторе больше момента сопротивления механизма.

Для обеспечения самозапуска необходимо выполнение двух условий:

а) Начальное значение восстановившегося напряжения должно быть достаточным для развертывания электродвигателей или, иначе говоря, при начальном значении восстановившегося напряжения ($U_д$) должно обеспечиваться условие

$$M_д > M_c.$$

б) Защита электродвигателей не должна их отключать под действием тока самозапуска.

Проведенные исследования показали, что самозапуск электродвигателей собственных нужд электростанций возможен даже в тех случаях, когда в первый момент после восстановления напряжения величина его составляет 0,55 $U_{ном}$. При этом продолжительность самозапуска всех электродвигателей составляет 30—35 *сек*, что допустимо по условиям их нагрева.

18-4. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ

Защита от к. з. между фазами является основной защитой электродвигателей, и установка ее обязательна во всех случаях.

В качестве защиты электродвигателей от к. з. применяется максимальная токовая защита мгновенного действия (токовая отсечка), отстроенная от пусковых токов и токов самозапуска элект-

родвигателей. При недостаточной чувствительности токовой отсечки на мощных электродвигателях 2000 *квт* и больше, имеющих шесть выводов, может применяться дифференциальная токовая защита. На электродвигателях 5000 *квт* и более установка дифференциальной защиты считается обязательной.

Электродвигатели напряжением 500 *в* и ниже, как правило, защищаются от к. з. плавкими предохранителями. Предохранители могут применяться и на электродвигателях более высокого напряжения, если только разрывная мощность предохранителей достаточна для разрыва тока к. з.

Для защиты электродвигателей целесообразно применение переменного оперативного тока (рис. 18-6, *а*), а также реле прямого действия, что упрощает вторичную коммутацию и дает существенную экономию контрольного кабеля ввиду большого количества электродвигателей на предприятиях и электростанциях.

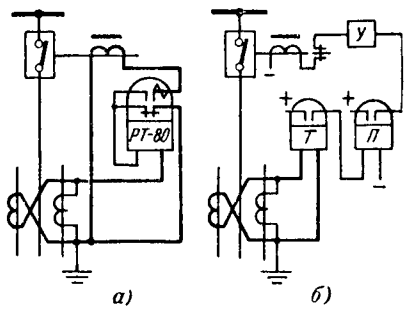


Рис. 18-6. Токовая защита двигателей от к. з., выполненная по однорелейной схеме.

а — на переменном оперативном токе; *б* — на постоянном оперативном токе.

Защита от к. з. выполняется, как правило, двухфазной, так как токи замыкания на землю в сетях, от которых питаются двигатели, обычно невелики. При этом трансформаторы тока целесообразно ставить около выключателя со стороны двигателя. Во всех случаях, когда это возможно по чувствительности, преимущество отдается однорелейной схеме защиты (трансформаторы тока включаются на разность токов двух фаз).

Защита по схеме на рис. 18-12, *а*, выполненная при помощи реле типа РТ-86, применяется для электродвигателей, подверженных перегрузке. При этом отсечка используется в качестве защиты от к. з., а индукционный элемент — для защиты от перегрузки.

Реле РТ-86 имеют два независимых контакта: один — у индукционного элемента (сигнальный), другой — у отсечки, действующий на отключение. Контакт отсечки достаточно мощен и может действовать на отключение выключателя непосредственно. На электродвигателях, не подверженных перегрузкам, устанавливается токовое реле типа ЭТ или РТ по схеме на рис. 18-6, *б*. Контактная система его не может работать на катушку отключения. Поэтому в схеме предусмотрено промежуточное реле.

В случаях, когда однорелейная схема защиты электродвигателей не обеспечивает требуемой чувствительности при двухфазных к. з. (что может иметь место на крупных электродвигателях с большими пусковыми токами), применяется двухрелейная схема защиты (рис. 18-7).

Схема защиты на рис. 18-7 более чувствительна к двухфазным к. з., чем схема на рис. 18-6.

Дифференциальная защита электродвигателей приведена на рис. 18-8. Дифференциальная защита дает возможность получить значительно большую чувствительность, чем максимальная токовая защита, так как броски тока от электродвигателя при внешних к. з. и токи пуска и самозапуска, от которых отстраивается максимальная токовая защита, в схеме дифференциальной защиты оказываются сбалансированными.

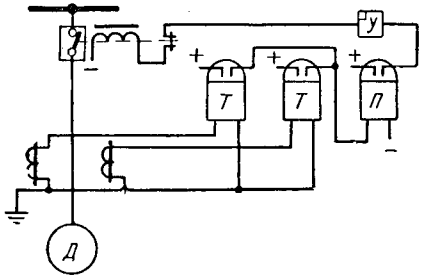


Рис. 18-7. Защита двигателей от к. з. в двухрелейном исполнении на постоянном оперативном токе.

Ток срабатывания токовой отсечки от междуфазных к. з. отстраивается от бросков тока, посылаемых электродвигателем в первый момент к. з. в сети, питающей двигатель, и от пускового тока электродвигателя при полном напряжении питающей сети и выведенном пусковом сопротивлении в цепи ротора (для электродвигателей с фазным ротором).

Определяющим, как правило, является второе условие.

Если защита выполнена при помощи быстродействующих реле типа РТ, имеющих достаточно высокий коэффициент возврата (порядка 0,85), то для отстройки от апериодической составляющей пускового тока устанавливается промежуточное реле, замедляющее действие защиты на 0,04—0,06 *сек*. Ток срабатывания защиты в этом случае выбирают из условия возврата реле ЭТ или РТ при максимальном значении периодического пускового тока $I_{\text{п.пуск}}$, учитывая, что апериодическая составляющая пускового тока затухает до того, как успеет подействовать промежуточное реле защиты. Первичный ток срабатывания защиты равен:

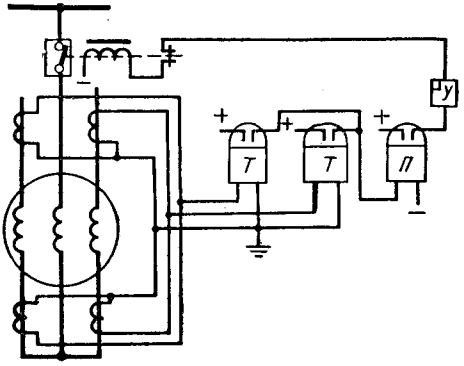


Рис. 18-8. Дифференциальная защита мощного электродвигателя.

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_{\text{н}} I_{\text{п.пуск}}}{k_{\text{воз}}}. \qquad (18\text{-}8)$$

Коэффициент $k_н$ обычно принимается равным 1,2. Максимальное значение периодической составляющей пускового тока $I_{п.пуск}$ берется по данным завода или определяется путем испытаний.

Защита, выполненная с реле типа РТ-80, имеющим большую инерционность и плохой коэффициент возврата отсечки (порядка 0,3—0,4), сработав под влиянием первоначального броска пускового тока, не сможет вернуться после затухания его апериодической составляющей. Поэтому ток срабатывания подобных реле отстраивается от максимального значения пускового тока $I_{д.пуск}$. Первичный ток срабатывания принимается равным:

$$I_{с.з} = k_н I_{д.пуск} = k_н \cdot 1{,}8 I_{п.пуск}, \qquad (18\text{-}9)$$

где $k_н$ —коэффициент надежности, обычно принимаемый равным 1,2; 1,8 — коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую пускового тока. Вторичный ток срабатывания защиты находится по формуле

$$I_{с.р} = \frac{k_{сх} I_{с.з}}{n_т}, \qquad (18\text{-}10)$$

где $k_{сх}$ — коэффициент схемы, учитывающий схему соединения трансформаторов тока, используемых для защиты; при соединении трансформаторов тока на разность токов двух фаз (рис. 18-6) $k_{сх} = \sqrt{3}$, а при соединении их по схеме неполной звезды (рис. 18-7) $k_{сх} = 1$; $n_т$ — коэффициент трансформации трансформаторов тока защиты.

Ток срабатывания дифференциальной защиты двигателей при условии индентичности трансформаторов тока дифференциальной схемы и выбора их по кривым 10%-ной погрешности принимается равным:

$$I_{с.з} = (1{,}5 \div 2)\, I_{ном}. \qquad (18\text{-}11)$$

Чувствительность защиты от междуфазных к. з. электродвигателя оценивается коэффициентом чувствительности, представляющим собой отношение тока металлического двухфазного к. з. на выводах двигателя при минимальном режиме работы питающей сети к первичному току срабатывания защиты двигателя:

$$k_ч = \frac{I^{(2)}_{к.мин}}{I_{с.з}}.$$

18-5. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ЗАМЫКАНИЙ ОДНОЙ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ

Защита от замыкания на землю устанавливается на двигателях до 2 000 *квт* только в том случае, если ток замыкания на землю $I_з \geqslant 10$ *а*. При этом учитывается сравнительно небольшая стоимость маломощных электродвигателей.

На мощных двигателях (2 000 *квт* и больше) защита устанавливается так же, как и на генераторах при токе $I_з \geqslant 5$ *а*. Защита выполняется с действием на отключение без выдержки времени (рис. 18-9) с использованием трансформатора тока нулевой последовательности (ТНП) типа ТЗЛ или ТЗРЛ.

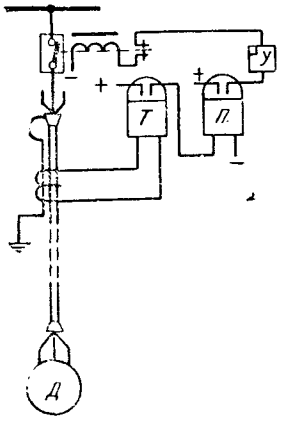


Рис. 18-9. Защита электродвигателей от замыканий на землю одной фазы.

18-6. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

Перегрузка электродвигателя возникает в следующих случаях:

а) при затянувшемся пуске или самозапуске;

б) по технологическим причинам и перегрузке механизмов;

в) в результате обрыва одной фазы;

г) при повреждении механической части электродвигателя или механизма, вызывающем увеличение момента $M_с$ и торможение электродвигателя.

Перегрузки бывают устойчивыми и кратковременными. Для электродвигателя опасны только устойчивые перегрузки.

Сверхтоки, обусловленные пуском или самозапуском электродвигателя, кратковременны и самоликвидируются при достижении нормальной скорости вращения. Эти токи могут представлять опасность, только если процесс развертывания электродвигателя затянется или если при самозапуске окажется, что $M_{д.нач} < M_{с.нач}$. В последнем случае электродвигатель развернуться не сможет и длительно будет обтекаться пусковым током.

Значительное увеличение тока электродвигателя получается также при обрыве фазы, что встречается, например, у электродвигателей, защищаемых предохранителями, при перегорании одного из них. При номинальной загрузке в зависимости от параметров электродвигателя увеличение тока статора при обрыве фазы будет составлять примерно $(1{,}6 \div 2{,}5)\ I_{ном}$. Эта перегрузка носит устойчивый характер. Также устойчивый характер носят сверхтоки, обусловленные механическими повреждениями электродвигателя или вращаемого им механизма и перегрузкой механизма.

Основной опасностью сверхтоков для электродвигателя является сопровождающее их повышение температуры отдельных частей и в первую очередь обмоток.

Повышение температуры ускоряет износ изоляции обмоток и снижает срок службы электродвигателя.

Перегрузочная способность электродвигателя определяется характеристикой зависимости между величиной сверхтока и допуска-

емым временем его прохождения:

$$t = T\frac{a-1}{k-1}, \qquad (18\text{-}12)$$

где t — допустимая длительность перегрузки, *сек*; T — постоянная времени нагрева, *сек*; a — коэффициент, зависящий от типа изоляции двигателя, а также периодичности и характера сверхтоков; для асинхронных электродвигателей в среднем $a = 1{,}3$; k — кратность сверхтока, т. е. отношение тока двигателя $I_д$ к его номинальному току:

$$k = \frac{I_д}{I_{ном}}.$$

Вид перегрузочной характеристики при постоянной времени нагрева $T = 300$ *сек* представлен на рис. 18-10.

При решении вопроса об установке защиты от перегрузки на электродвигателе и характере ее действия руководствуются условиями его работы.

а) *На электродвигателях механизмов, не подверженных технологическим перегрузкам* (например, электродвигателях циркуляционных, питательных насосов и т. п.) *и не имеющих тяжелых условий пуска или самозапуска, защита от перегрузки* не устанавливается.

б) *На электродвигателях подверженных технологическим перегрузкам* (например, электродвигателях мельниц, дробилок, багерных насосов и т. п.), *а также на электродвигателях, самозапуск которых не обеспечивается, защита от перегрузки* должна устанавливаться.

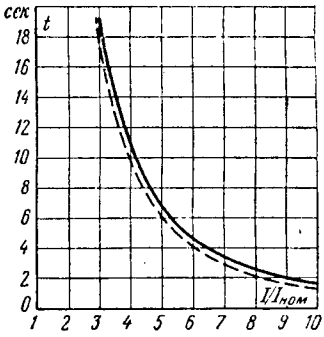


Рис. 18-10. Характеристика зависимости допустимой длительности перегрузки от кратности тока перегрузки.

в) Защита от перегрузки выполняется с действием на отключение в случае, если не обеспечивается самозапуск электродвигателей или с механизма не может быть снята технологическая перегрузка без остановки электродвигателя.

г) Защита от перегрузки электродвигателя выполняется с действием на разгрузку механизма или сигнал, если технологическая перегрузка может быть снята с механизма автоматически или вручную персоналом без остановки механизма и электродвигатели находятся под наблюдением персонала.

д) На электродвигателях механизмов, могущих иметь как перегрузку, устраняемую при работе механизма, так и перегрузку, устранение которой невозможно без остановки механизма, целесообразно предусматривать действие защиты от сверхтоков с меньшей выдержкой времени на разгрузку механизма (если это возможно)

и большей выдержкой времени на отключение электродвигателя. Ответственные электродвигатели собственных нужд электрических станций находятся под постоянным наблюдением дежурного персонала, поэтому защита их от перегрузки выполняется преимущественно с действием на сигнал.

Защиту электродвигателей, подверженных технологической перегрузке, желательно иметь такой, чтобы она, с одной стороны, защищала от недопустимых перегрузок, а с другой — давала возможность наиболее полно использовать перегрузочную характеристику электродвигателя с учетом предшествовавшей нагрузки и температуры окружающей среды. *Наилучшей характеристикой защиты от сверхтоков являлась бы такая, которая проходила бы несколько ниже перегрузочной характеристики* (пунктирная кривая на рис. 18-10).

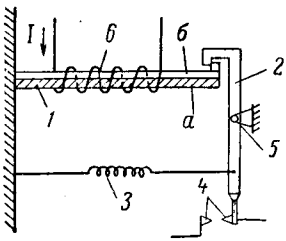


Рис. 18-11. Принцип действия тепловых реле.

Защита с тепловым реле. Лучше других могут обеспечивать характеристику, приближающуюся к перегрузочной характеристике электродвигателя, тепловые реле, которые реагируют на количество тепла $Q_р$, выделенного в сопротивлении его нагревательного элемента:

$$Q_р = \left(\frac{I_д}{n_т}\right)^2 rt.$$

Тепло, выделяемое в тепловом реле, пропорционально теплу, выделяемому в электродвигателе, т. е. $Q_р \equiv Q_д$ или

$$\left(\frac{I_д}{n_т}\right)^2 rt \equiv I_д^2 r_д t.$$

Реле настраивается так, чтобы его уставка срабатывания соответствовала теплу, выделение которого в электродвигателе считается предельно допустимым:

$$Q_{с.р} = Q_{пред.доп}.$$

Наиболее часто тепловые реле выполняются на принципе использования различия в коэффициенте линейного расширения различных металлов под влиянием нагревания. Основой такого теплового реле является биметаллическая пластинка *1* (рис. 18-11), т. е. пластина, состоящая из спаянных по всей поверхности металлов *а* и *б* с сильно отличающимися коэффициентами линейного расширения. При нагревании пластинка *1* прогибается в сторону металла с меньшим коэффициентом расширения *а* и освобождает защелку рычага *2*, который, поворачиваясь, под действием пружины *3* вокруг оси *5* замыкает контакты реле *4*.

Нагревание пластинки *1* осуществляется нагревательным элементом *6* при прохождении по нему тока *I*. В некоторых конструк-

циях реле нагревание биметаллической пластинки осуществляется непосредственным пропусканием по ней тока.

Тепловые реле сложны в обслуживании и наладке, имеют различные характеристики отдельных экземпляров реле, часто не соответствуют тепловым характеристикам двигателей и имеют зависимость от температуры окружающей среды, что приводит к нарушению соответствия тепловых характеристик реле и электродвигателя. Поэтому тепловые реле следует применять лишь в тех случаях, когда более простые токовые реле не обеспечивают защиты двигателей.

Защита от перегрузки с токовыми реле. Для защиты электродвигателей от перегрузки обычно применяются максимальные токовые защиты с использованием токовых реле с ограниченно зависимыми характеристиками выдержки времени типа РТ-80 или максимальные токовые защиты, выполненные комбинацией мгновенных токовых реле и реле времени (рис. 18-12).

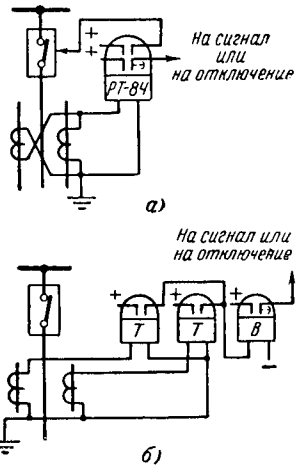


Рис. 18-12. Токовая защита от перегрузки.

а — с реле типа ИТ-86; *б* — с реле типа РТ-40.

Преимуществами токовых защит по сравнению с тепловыми являются более простая эксплуатация их и более легкий подбор и регулировка характеристик защиты. Однако токовые защиты не позволяют использовать перегрузочные возможности электродвигателей из-за недостаточного времени действия их при малых кратностях тока. Для двигателей, не имеющих технологических перегрузок, этот недостаток не имеет значения, поэтому на собственных нуждах электростанций применяются только токовые защиты.

Защита от перегрузки выполняется одним токовым реле, включенным на один из фазовых токов, или по двухфазной однорелейной схеме (рис. 18-6), когда по этой же схеме выполнена защита от междуфазных к. з.

В случае выполнения защиты от междуфазных к. з. при помощи токовых реле типа РТ-80 эти же реле используются и для защиты от перегрузки. Если при этом защита от сверхтоков должна действовать не на отключение, а на сигнал, то применяются реле типа РТ-84, имеющие раздельные контакты отсечки и индукционного элемента. Схема защиты в таком исполнении приведена на рис. 18-12, *а*.

Ток срабатывания максимальной токовой защиты от перегрузки устанавливается из условий отстройки его от номинального тока электродвигателя по выражению

$$I_{с.з} = \frac{k_н}{k_{воз}} I_{ном}. \qquad (18\text{-}13)$$

Время действия защиты от перегрузки должно быть таким, чтобы оно было больше времени пуска электродвигателя при эксплуатационно возможном понижении напряжения, а у электродвигателей, для которых предусмотрен самозапуск, — больше времени самозапуска. С другой стороны, это время не должно превышать допустимой для двигателя длительности прохождения сверхтока.

Обычно эти условия удовлетворяются,так как первая величина значительно меньше второй.

Время пуска асинхронных электродвигателей обычно составляет 10—15 *сек*. Поэтому характеристика реле типа РТ-80 должна иметь в независимой части время не меньше 12—15 *сек*. На защите от перегрузки с независимой характеристикой выдержка времени принимается 12—20 *сек*.

18-7. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ПОНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Защита минимального напряжения устанавливается на электродвигателях, которые необходимо отключать при понижении напряжения для обеспечения самозапуска ответственных электродвигателей или самозапуск которых при восстановлении напряжения недопустим по условиям техники безопасности или особенностям технологического процесса.

На электростанциях к ответственным относятся такие электродвигатели, отключение которых вызывает снижение нагрузки или остановку станции. К ним относятся электродвигатели питательных, конденсатных и циркуляционных насосов, электродвигатели дымососов, дутьевых вентиляторов и питателей пыли.

Неответственными считаются электродвигатели, отключение которых не отражается на нагрузке станции, например электродвигатели мельниц на станциях с промежуточными бункерами, багерных насосов и т. п.

Если мощность всех ответственных электродвигателей превышает допустимую мощность по условию самозапуска, то при понижении напряжения необходимо отключать и некоторые ответственные электродвигатели.

По истечении времени, достаточного для развертывания неотключаемых электродвигателей, отключенные ответственные электродвигатели можно включать обратно при помощи АПВ.

Схемы защиты минимального напряжения должны обеспечивать отключение электродвигателей как при полном исчезновении напряжения, так и при длительном коротком замыкании в сети, вызывающем торможение двигателей.

Отключение электродвигателей при исчезновении напряжения обеспечивается установкой одного реле минимального напряжения, включенного на линейное напряжение (рис. 18-13).

Защита с одним реле напряжения надежно реагирует на трехфазные к. з. Однако при двухфазных к. з. защита с одним

реле действует только при к. з. между фазами, на которые включено реле. Так, если реле включено на напряжение U_{AB} (рис. 18-14), то в случае замыкания между фазами B и C напряжение U_{AB} снижается незначительно. Оно составляет 1,5 $U_{ф}$, т. е. уменьшается всего на 15% номинального значения.

Поскольку по условию возврата реле минимального напряжения уставка на нем не может быть выше 70—80% номинального напряжения сети, то защита в рассматриваемом случае действовать не будет. Такое же положение имеет место в случае к. з. между фазами A и C.

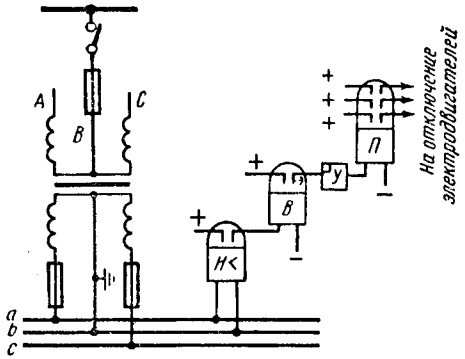


Рис. 18-13. Защита минимального напряжения с одним реле.

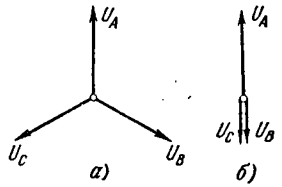


Рис. 18-14. Векторные диаграммы напряжений.

а — нормального режима; *б* — при двухфазных к. з. между фазами *B* и *C*.

Для обеспечения работы защиты при всех случаях двухфазного к. з. иногда применяется трехфазная схема, показанная на рис. 18-15. Эту схему применяют в сетях, где возможно длительное отключение к. з., сопровождаемых снижением напряжения ниже 70%. *В сетях, оснащенных быстродействующей защитой или имеющих на линиях реакторы, необходимость в защите, реагирующей на понижение напряжения при к. з. отпадает.* Поэтому, как правило, применяется более простая однофазная схема (рис. 18-13).

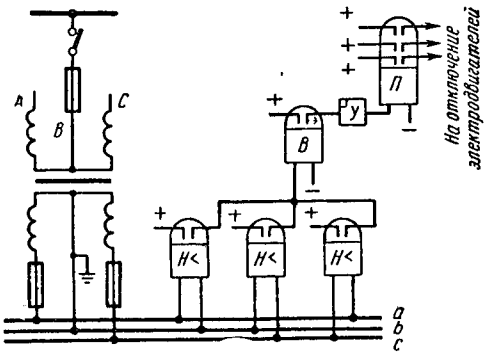


Рис. 18-15. Трехфазная защита минимального напряжения.

Существенным недостатком защиты минимального напряжения является возможность ее неправильной работы в случае обрыва цепей напряжения, чаще всего возникающего при перегорании предохранителей в этих цепях. Поэтому защита по схеме рис. 18-13 и 18-15 применима лишь для неответственных электродвигателей.

Во избежание ложного отключения электродвигателей при обрыве цепи напряжения в ответственных установках применяются схемы с двумя комплектами реле напряжения, включенными на разные трансформаторы напряжения (рис. 18-16) или разные линейные напряжения одного и того же трансформатора напряжения (рис. 18-17). Контакты реле обоих комплектов соединяются последовательно. Поэтому при нарушении цепи, питающей один комплект реле, защита не может подать импульс на отключение двигателей.

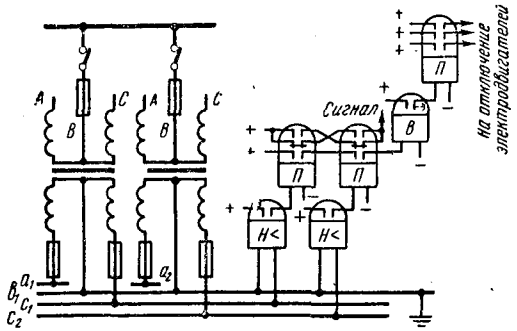


Рис. 18-16. Защита минимального напряжения с двумя реле, питаемыми от разных трансформаторов напряжения.

В случае же исчезновения питающего напряжения защита приходит в действие. В схеме, приведенной на рис. 18-17, действие защиты возможно только при полном исчезновении первичного напряжения или трехфазном коротком замыкании в сети.

Схема с питанием реле от разных трансформаторов напряжения (рис. 18-16) более надежна, поскольку одновременное повреждение цепей двух разных трансформаторов напряжения практически исключено. При включении реле на разные фазы одного трансформатора напряжения имеется возможность одновременного снижения напряжения на обоих реле при обрыве средней фазы цепей напряжения, к которой присоединены оба реле (рис. 18-17).

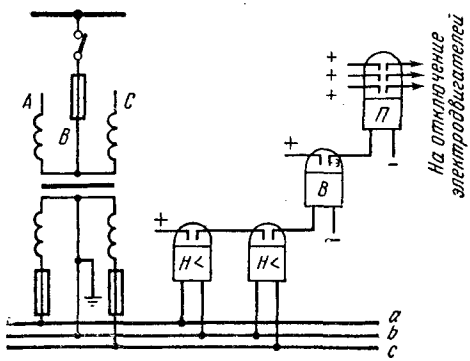


Рис. 18-17. Защита минимального напряжения с двумя реле, питаемыми от разных междуфазных напряжений одного трансформатора напряжения.

Для уменьшения вероятности такого обрыва в средней фазе вторичной цепи предохранитель не устанавливается. Кроме того, опасность неправильного действия защиты по схеме на рис. 18-17 при обрыве одного провода с высокой или низкой стороны трансформатора напряжения устраняется выбором напряжения срабатывания реле защиты меньше 50% номинального напряжения.

Для экономии аппаратуры защита минимального напряжения часто выполняется в виде групповой защиты, т. е. действующей сразу на группы электродвигателей.

При необходимости отключать от одной защиты минимального напряжения несколько электродвигателей с разными выдержками времени в схеме предусматривается соответствующее количество реле времени.

Например, с первой выдержкой времени 0,5—0,7 *сек* отключается группа электродвигателей для обеспечения самозапуска секции, со второй выдержкой времени порядка 6—10 *сек* защита действует на выключатели электродвигателей, отключение которых необходимо по условиям технологии производства, техники безопасности или для запуска АВР двигателей.

Напряжение срабатывания защиты минимального напряжения выбирается таким, чтобы обеспечивался самозапуск ответственных электродвигателей. Это напряжение определяется путем расчетов или на основании специальных испытаний.

Как указывалось, самозапуск электродвигателей, как правило, обеспечивается при напряжении на шинах порядка 55% $U_{ном}$. Поэтому напряжение срабатывания защиты должно иметь величину порядка 60—70% $U_{ном}$.

Выдержка времени защиты минимального напряжения определяется ее назначением:

а) Выдержка времени защиты, предназначенной для облегчения самозапуска ответственных электродвигателей, в целях убыстрения и повышения эффективности самозапуска принимается минимальной и отстраивается только от времени действия мгновенных защит электродвигателей:

$$t = 0{,}5 \text{ } сек.$$

б) Выдержка времени защиты, предназначенной для отключения двигателей по условиям технологии производства и техники безопасности, принимается достаточно большой, с тем чтобы отключение двигателей происходило только при длительной посадке напряжения или его исчезновении:

$$t = 6 \div 10 \text{ } сек.$$

18-8. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ НИЖЕ 1 000 *в*

Защита электродвигателей напряжением 500, 380 и 220 *в* осуществляется, исходя из тех же требований, что и электродвигателей более высоких напряжений.

Для этих электродвигателей применяются: а) мгновенная защита от междуфазных к. з.; б) защита от перегрузки; в) защита минимального напряжения.

Защита от междуфазных к. з. и перегрузки, как и аналогичные защиты электродвигателей высокого напряжения, должна надежно отстраиваться от пусковых токов и токов самозапуска.

Однако часто при небольшой мощности электродвигателей ниже 1 000 *в* и во многих случаях малоответственных двигателей защиты имеют свои особенности, а именно: а) для них в значительно большей мере применяется защита предохранителями; в ряде других случаев допускаются схемы соединения, при которых отключение к. з. в одном электродвигателе осуществляется выключателем, установленным на ответвлении, питающем несколько электродвигателей; для защиты минимального напряжения широкое распространение имеют магнитные пускатели.

Магнитными пускателями называются обычно трехфазные автоматические выключатели низкого напряжения (контакторы), рассчитанные на разрыв нормального рабочего тока двигателя и тока его перегрузки. Отключение токов к. з. при применении магнитного пускателя обычно возлагается на последовательно с ним включаемые предохранители.

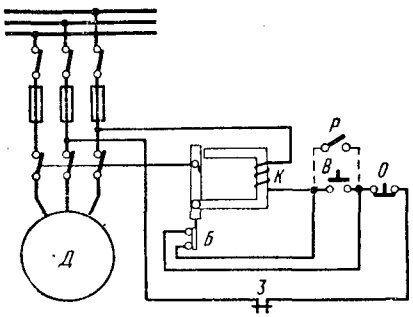


Рис. 18-18. Принцип действия магнитного пускателя.

Магнитные пускатели (рис. 18-18) в большинстве случаев не имеют защелки и во включенном положении удерживаются действием электромагнита *К*, обмотка которого подключена на напряжение питания.

Включение магнитного пускателя осуществляется нажатием кнопки *В* (включение). При этом замыкается цепь обмотки удерживающего электромагнита, якорь которого притягивается и замыкает механически связанные с ним силовые контакты. Кнопка *В* имеет самовозврат, поэтому после ее размыкания цепь обмотки электромагнита остается замкнутой через вспомогательный контакт *Б*, шунтирующий кнопку *В*. Для отключения пускателя вручную служит кнопка *О* (отключение), при нажатии которой разрывается цепь удерживания электромагнита и якорь его, отпадая, размыкает силовые контакты. При понижении напряжения питающей сети электромагнит отпадает и двигатель отключается, чем осуществляется защита минимального напряжения. После восстановления напряжения магнитный пускатель сам включиться не может и включение его должно вновь осуществляться вручную. Для ответственных электродвигателей это является существенным недостатком. Для его устранения кнопка *В* шунтируется ключом или рубильником *Р* (показан пунктиром). При замкнутом рубильнике после восстановления напряжения электромагнит пускателя вновь притягивает якорь и включает двигатель, так как цепь его обмотки остается замкнутой.

При необходимости осуществить на электродвигателе, помимо предохранителей, защиту от перегрузки последовательно в цепь

самоудерживания электромагнита вводится выходной контакт защиты *З*. Для защиты от перегрузки электродвигателей низкого напряжения, управляемых контакторами, допускается применение тепловых реле. Магнитный пускатель, являющийся по принципу индивидуальной защитой электродвигателя, весьма прост в эксплуатации.

18-9. РАСЧЕТ ТОКОВ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ИХ ЗАЖИМАХ

а) Общие положения

Расчет самозапуска необходим для выбора уставок защит источников питания, а также для определения предельной мощности самозапускающихся электродвигателей. Задача расчета сводится к определению суммарного тока самозапуска электродвигателей $I_{п\Sigma}$ и остаточного напряжения на их зажимах $U_{ост}$.

Расчет самозапуска выполняется для наиболее тяжелого режима при остановленных электродвигателях ($s = 1$).

б) Расчет самозапуска электродвигателей

Ниже рассмотрен расчет самозапуска остановленных электродвигателей при питании их от шин источника «бесконечной мощности» через трансформатор или реактор.

Расчет самозапуска от генератора, мощность которого соизмерима с мощностью самозапускающихся электродвигателей, более сложен.

Целью расчета является определение суммарного тока двигателей и остаточного напряжения на их зажимах при самозапуске.

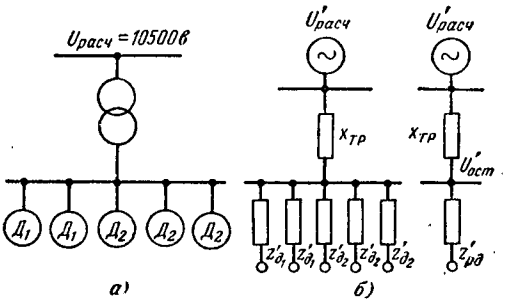


Рис. 18-19. Расчетные схемы для определения токов и напряжения при самозапуске двигателей.

а — схема питания электродвигателей; *б* — расчетная схема замещения; *в* — расчетная схема замещения после преобразования.

Как было указано выше, ток в момент пуска или самозапуска отдельного электродвигателя равен току трехполюсного к. з. за сопротивлением остановленного двигателя.

При самозапуске группы электродвигателей (рис. 18-19) их результирующее сопротивление $z_{р.д}$ находится путем параллельного сложения сопротивлений электродвигателей, участвующих в самозапуске:

$$\frac{1}{z_{р.д}} = \frac{1}{z_{д1}} + \frac{1}{z_{д2}} + \ldots + \frac{1}{z_{дn}}.$$

Величины сопротивлений отдельных заторможенных электродвигателей определяются по выражению

$$z_д = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}\, I_{п.пуск}},$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение двигателя; $I_{п.пуск}$ — начальное значение периодической составляющей пускового тока двигателя при $U_{ном}$.

Значение периодической составляющей пускового тока $I_{п.пуск}$ определяется или по паспортным данным, или практически путем осциллографирования тока при пуске двигателя.

При питании шин двигателя от трансформатора все сопротивления и расчетное напряжение приводятся к одной ступени напряжения по формулам:

$$z' = zn_т^2 = z\frac{U_2^2}{U_1^2};$$

$$U'_{расч} = U_{расч} n_т,$$

где z — действительное значение сопротивления; z' — приведенное значение сопротивления; $n_т$ — коэффициент трансформации трансформатора; U_2 — номинальное напряжение с учетом действительной отпайки трансформатора со стороны, к которой осуществляется приведение; U_1 — то же на стороне, с которой осуществляется приведение; $U_{расч}$ — расчетное напряжение (линейное); $U'_{расч}$ — приведенное значение расчетного напряжения.

Ток самозапуска электродвигателей, питающихся через трансформатор или реактор, равен:

$$I_{пΣ} = \frac{U'_{расч}}{\sqrt{3}\,(x + z'_{р.д})},$$

где $I_{пΣ}$ — ток самозапуска группы двигателей; x — сопротивление трансформатора или реактора; $z'_{р.д}$ — результирующее пусковое сопротивление группы электродвигателей, приведенное к расчетной ступени напряжения.

Для упрощения расчета полное сопротивление заторможенных электродвигателей и реактивное сопротивление трансформатора или реактора складываются арифметически.

Падение напряжения на сопротивлениях схемы замещения пропорционально величинам соответствующих сопротивлений.

Отсюда может быть определено остаточное напряжение на зажимах двигателей при самозапуске:

$$U'_{ост} = U'_{расч}\frac{z'_{р.д}}{x + z'_{р.д}},$$

где $U'_{ост}$ — остаточное напряжение на зажимах двигателя, приведённое к расчетной ступени напряжения.

в) **Пример расчета самозапуска электродвигателей.**

1. Расчетные условия. Рассчитать начальные условия самозапуска группы электродвигателей от шин бесконечной мощности 10 500 *в* через трансформатор (рис. 18-19).

Параметры электродвигателей $Д_1$: $P_{ном1} = 2\,000$ *квт*, $\cos\varphi_{ном} = 0{,}85$; $U_{ном} = 3\,000$ *в*; $k_{п.п1} = 5{,}5$.

Параметры электродвигателей $Д_2$: $P_{ном2} = 875$ *квт*, $\cos\varphi_{ном2} = 0{,}85$; $U_{ном2} = 3\,000$ *в*; $k_{п.п2} = 5$ ($k_{п.п1}$ и $k_{п.п2}$ — кратности пусковых токов электродвигателей $Д_1$ и $Д_2$ соответственно).

Параметры трансформатора: $S_{тр} = 7\,500$ *ква*; $e_к = 8\%$; $n_{тр} = \frac{10\,500}{3\,300}$.

2. Определяются расчетные сопротивления, приведенные к напряжению 3 300 *в*.

Сопротивление трансформатора

$$x_{тр} = \frac{e_к}{100}\frac{U^2_{ном(кв)}}{S_{тр(Мва)}} = \frac{8 \cdot 3{,}3^2}{100\ 7{,}5} = 0{,}116\ ом.$$

Номинальный ток электродвигателя $Д_1$

$$I_{ном1} = \frac{S_{ном1}}{\sqrt{3}\ U_{ном1} \cos \varphi_{ном1}} = \frac{2\,000\,000}{\sqrt{3} \cdot 3\,000 \cdot 0{,}85} = 454\ а.$$

Пусковое сопротивление электродвигателя $Д_1$

$$z'_{д1} = \frac{U_{ном1}}{\sqrt{3}\ I_{пуск1}} = \frac{U_{ном1}}{\sqrt{3}\ k_{п.п1} I_{ном1}} = \frac{3\,000}{\sqrt{3} \cdot 5{,}5 \cdot 454} = 0{,}69\ ом.$$

Суммарное сопротивление двух электродвигателей $Д_1$

$$z'_{д1} = \frac{z_{д1}}{2} = \frac{0{,}69}{2} = 0{,}345\ ом.$$

Номинальный ток электродвигателя $Д_2$

$$I_{ном2} = \frac{S_{ном2}}{\sqrt{3}\ U_{ном2} \cos \varphi_{ном2}} = \frac{875\,000}{\sqrt{3} \cdot 3\,000 \cdot 0{,}85} = 198\ а.$$

Пусковое сопротивление электродвигателя $Д_2$

$$z_{д2} = \frac{U_{ном2}}{\sqrt{3}\ I_{пуск2}} = \frac{U_{ном2}}{\sqrt{3}\ k_{п.п2} I_{ном2}} = \frac{3\,000}{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 198} = 175\ ом.$$

Суммарное сопротивление трех электродвигателей $Д_2$

$$z'_{д2} = \frac{z_{д2}}{3} = \frac{1{,}75}{3} = 0{,}583\ ом.$$

Результирующее пусковое сопротивление всех электродвигателей

$$z'_{р.д} = \frac{z'_{д1} z'_{д2}}{z'_{д1} + z'_{д2}} = \frac{0{,}345 \cdot 0{,}583}{0{,}345 + 0{,}583} = 0{,}217\ ом.$$

3. Расчетное напряжение, приведенное к стороне низшего напряжения трансформатора,

$$U'_{расч} = U_{расч} \frac{3\,300}{10\,500} = 10\,500 \frac{3\,300}{10\,500} = 3\,300\ в.$$

4. Ток самозапуска электродвигателей

$$I_{пΣ} = \frac{U'_{расч}}{\sqrt{3}\ (x_{тр} + z_{р.д})} = \frac{3\,300}{\sqrt{3}\ (0{,}116 + 0{,}217)} = 5\,730\ а.$$

Ток самозапуска электродвигателей, приведенный к стороне высшего напряжения трансформатора,

$$I_{пΣ10{,}5} = \frac{I_{пΣ}}{n_{тр}} = 5\,730 \frac{3\,300}{10\,500} = 1\,800\ а.$$

5. Остаточное напряжение на зажимах электродвигателей

$$U_{ост} = U'_{расч} \frac{z_{р.д}}{x_{тр} + z_{р.д}} = 3\,300 \frac{0{,}217}{0{,}116 + 0{,}217} = 2\,150\ в,$$

что составляет:

$$\frac{2\,150}{3\,000} 100 = 72\%\ \text{номинального напряжения.}$$

Вывод. Самозапуск электродвигателей обеспечивается.

18-10. ЗАЩИТА СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

а) Некоторые особенности синхронных электродвигателей

При рассмотрении защиты синхронных электродвигателей необходимо учитывать их особенности.

Отметим наиболее важные из них:

1. Пуск большинства синхронных электродвигателей производится при отсутствии возбуждения прямым включением в сеть. Для этой цели на роторе синхронного электродвигателя предусматривается дополнительная короткозамкнутая обмотка, выполняющая во время пуска ту же роль, что и в короткозамкнутом асинхронном электродвигателе. Когда скольжение двигателя приближается к нулю, включается возбуждение и электродвигатель втягивается в синхронизм под влиянием появляющегося при этом синхронного момента.

Во время пуска синхронный электродвигатель потребляет из сети повышенный ток, который по мере уменьшения скольжения затухает, так же как и у асинхронного электродвигателя.

Для уменьшения понижения напряжения и величины пусковых токов мощные синхронные электродвигатели пускаются через реактор, который затем шунтируется. Защиты синхронных электродвигателей, как и защиты асинхронных электродвигателей, должны быть отстроены от токов, возникающих при их пуске или самозапуске, имеющих место при восстановлении напряжения в сети.

2. Момент синхронного электродвигателя зависит от напряжения сети $U_д$, э. д. с. электродвигателя E_d и угла сдвига δ между $U_д$ и E_d. Без учета потерь в статоре и роторе

$$M_д = k\left(\frac{E_d U_d}{x_d} + U_д^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q}\sin 2\delta\right), \qquad (18\text{-}14)$$

где x_d и x_q — продольное и поперечное реактивные сопротивления двигателя.

При постоянных значениях $U_д$ и E_d каждой нагрузке электродвигателя соответствует определенное значение угла δ.

В случае понижения напряжения в сети, как следует из выражения (18-14), момент $M_д$ уменьшается. Если при этом он окажется меньше момента сопротивления $M_с$ механизма, то устойчивая работа синхронного электродвигателя нарушается, возникают качания и электродвигатель выходит из синхронизма. Нарушение устойчивости возможно также при перегрузке электродвигателя или снижении возбуждения.

Эффективным средством повышения устойчивости электродвигателя является форсировка возбуждения, увеличивающая E_d. Опыт показывает, что при глубоких понижениях напряжения (до нуля) синхронные электродвигатели, работающие с номинальной нагрузкой, выходят из синхронизма, если перерыв питания превосходит 0,5 *сек*.

При нарушении синхронизма скорость вращения электродвигателя уменьшается и он переходит в асинхронный режим. При этом в пусковой обмотке и цепи ротора появляются токи, создающие дополнительный асинхронный момент, под влиянием которого синхронный электродвигатель может остаться в работе с некоторым скольжением. На асинхронный момент электродвигателя накладывается момент, обусловленный током возбуждения в роторе, имеющий переменный знак. Поэтому результирующий момент электродвигателя имеет переменную величину, что вызывает колебания скорости вращения ротора и тока статора двигателя.

Токи, появляющиеся в статоре, роторе и пусковой обмотке электродвигателя при асинхронном режиме, вызывают повышенный нагрев их, поэтому длительная работа синхронных электродвигателей в асинхронном режиме с нагрузкой больше 0,4—0,5 номинальной недопустима.

В связи с этим появляется необходимость в специальной защите от асинхронного режима. Защита от асинхронного режима должна или осуществить ресинхронизацию электродвигателя, или отключить его. Ресинхронизация состоит в том, что с электродвигателя снимается возбуждение (при этом его асинхронный момент повышается и скольжение уменьшается), через некоторое время включается возбуждение и двигатель вновь втягивается в синхронизм. Признаком нарушения синхронизма электродвигателя является появление колебаний тока в статоре и переменного тока в роторе.

3. Исследования и опыт эксплуатации показывают, что после отключения к. з. или включения резервного источника питания многие синхронные электродвигатели могут самозапускаться, т. е. вновь (сами) втягиваться в синхронизм.

Самозапуск синхронных электродвигателей возможен, если после восстановления напряжения под влиянием возросшего асинхронного момента (пропорционально $U_д^2$) скольжение электродвигателя настолько уменьшится, что он сможет снова втянуться в синхронизм.

Возможность самозапуска зависит от параметров электродвигателя, его нагрузки и уровня напряжения.

Ввиду большого значения самозапуска синхронных электродвигателей их защиты должны надежно отстраиваться от токов, возникающих в режиме.

б) Защиты, применяемые на синхронных электродвигателях

На синхронных электродвигателях устанавливаются следующие защиты:

а) от междуфазных повреждений в статоре;
б) от замыканий обмотки статора на землю;
в) от перегрузки;
г) от асинхронного режима;
д) от понижения напряжения.

Защита от междуфазных повреждений является основной и обязательной защитой любого синхронного двигателя. Она выполняется мгновенной в виде токовой отсечки или продольной дифференциальной защиты по такой же схеме, как и у асинхронных электродвигателей. Отличие заключается только в том, что защита синхронного электродвигателя одновременно с выключателем отключает АГП. Ток срабатывания отсечки отстраивается от пусковых токов и токов самозапуска электродвигателя. При этом в случае прямого пуска синхронного электродвигателя от сети пусковые токи его за счет меньшего реактивного сопротивления часто получаются большими, чем у равновеликих по мощности асинхронных двигателей.

Крупные синхронные электродвигатели оборудуются обычно продольной дифференциальной защитой. В целях упрощения на электродвигателях до 5 000 *ква* дифференциальную защиту выполняют двухфазной. На более мощных электродвигателях защиту устанавливают на трех фазах, что позволяет обеспечить быстрое отключение электродвигателя при двойном замыкании на землю (одно в электродвигателе и второе в сети).

Защита от замыканий обмотки статора электродвигателя на землю применяется при токах замыкания на землю больше 10 *а*. Защита выполняется с действием на отключение таким же образом, как у асинхронных электродвигателей, и поэтому в данном разделе подробнее не рассматривается.

Защита электродвигателя от перегрузки осуществляется при помощи токового реле, включенного в одну фазу. При наличии постоянного дежурного персонала защита может выполняться с действием на сигнал с $I_{с.з} = 1{,}25\ I_{ном}$ и выдержкой времени, превышающей по возможности время затухания пусковых токов. При отсутствии дежурного персонала защиту от перегрузки рекомендуется выполнять двумя комплектами, один из которых действует на сигнал, а второй, более грубый — на отключение. Сигнал о перегрузке подается для вызова персонала, который должен прийти в помещение, где находится электродвигатель, и принять меры по его разгрузке. Отключающий комплект выполняется с $I_{с.з} = (1{,}5 \div 1{,}75)\ I_{ном}$ и выдержкой времени, отстроенной от пусковых токов. На электродвигателях с частыми перегрузками может применяться защита с тепловыми реле, действующими на отключение. Однако тепловые реле следует использовать только в крайних случаях ввиду их относительной сложности и только при условии надежности конструкции и достаточной стабильности характеристики.

Защита от асинхронного режима выполняется реагирующей на колебания тока в статоре или роторе двигателя, возникающие в этом режиме (рис. 18-20).

Самой простой защитой является токовая (рис. 18-21). Она выполняется при помощи зависимого токового реле (рис. 18-21, *а*) или посредством мгновенного токового реле, действующего на вспо-

могательное промежуточное реле с замедленным размыканием контактов (рис. 18-21, *б*). Действие этой защиты основано на том, что она не успевает возвратиться за время Δt спада тока между циклами качаний (рис. 18-20) и постепенно, за несколько периодов качаний набирает время и срабатывает на отключение. Ток срабатывания такой защиты (имеется в виду наименьший ток качаний, при котором защита замыкает цепь отключения) определяется не только уставкой на реле, но и зависит от продолжительного периода качаний. Для надежной работы защиты время возврата $t_{воз}$ (подвижной системы токового реле в схеме на рис. 18-21, *а* или якоря промежуточного реле в схеме на рис. 18-21, *б*) должно быть больше времени Δt (рис. 18-20), в течение которого ток качаний недостаточен для действия реле, т. е. $t_{воз} > \Delta t$. Выдержка времени защиты выбирается больше времени затухания пусковых токов двигателя.

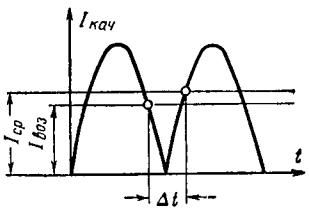


Рис. 18-20. Изменение тока статора синхронного двигателя при асинхронном режиме.

Для выполнения рассматриваемой защиты применяется реле РТ-80.

Более совершенной по своему принципу является защита, реагирующая на появление переменного тока в цепи ротора, выполняемая по схеме на рис. 18-22. Нормально в цепи ротора проходит по-

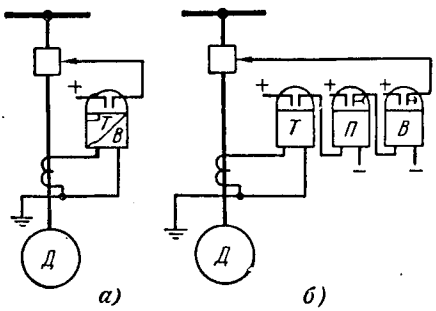


Рис. 18-21. Защита синхронного двигателя от асинхронного режима.

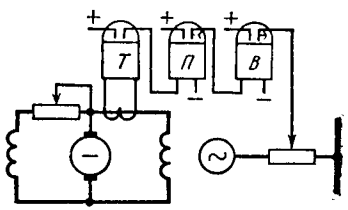


Рис. 18-22. Защита синхронного электродвигателя от асинхронного режима, реагирующая на появление переменного тока в цепи ротора.

стоянный ток, и защита не действует, так как ток во вторичной обмотке трансформатора тока отсутствует. При качаниях в роторе индуктируется переменный ток, под влиянием которого защита приходит в действие. Чтобы исключить возврат реле времени *В* в момент спада тока при большом периоде качаний, в схеме предусмотрено промежуточное реле *П* с замедленным возвратом, которое поддерживает ток в реле времени, если провалы тока не превышают времени отхода якоря. Выдержка времени на защите устанавливается больше продолжительности несимметричных к. з. в сети, во время

которых токи обратной последовательности, возникающие в статоре, индуктируют переменный ток в роторе, могущий вызвать ложное действие защиты.

Вместо трансформатора тока в схеме на рис. 18-22 можно включить дроссель, к зажимам которого подключается токовое реле T. Сопротивление дросселя при постоянном токе ничтожно, и поэтому напряжение на его зажимах близко к нулю и ток в реле T отсутствует. При переменном токе на зажимах дросселя появляется напряжение, достаточное для действия реле T.

Защита от понижения напряжения является вспомогательной и устанавливается только в следующих случаях:

1) на электродвигателях неответственных механизмов для облегчения самозапуска ответственных электродвигателей;

2) на электродвигателях, самозапуск которых оказывается невозможным;

3) на электродвигателях ответственных механизмов, произвольный самозапуск которых недопустим по условям технологии производства или техники безопасности.

Схема защиты выполняется так же, как и асинхронных электродвигателей и синхронных компенсаторов. Уставки защиты зависят от ее назначения. На защитах, установленных для обеспечения самозапуска ответственных электродвигателей, напряжение срабатывания берется равным уровню напряжения, при котором обеспечивается надежный самозапуск, т. е.

$$U_{с.з} = (0{,}5 \div 0{,}7)\, U_{ном}.$$

Выдержка времени в этом случае отстраивается от мгновенно действующих защит в сети и принимается равной 0,5 *сек*.

На электродвигателях, самозапуск которых невозможен, напряжение срабатывания берется равным $0{,}5U_{ном}$, исходя из того, что двигатели, работающие с полной нагрузкой, могут выйти из синхронизма при понижении напряжения в сети на 50% или ниже. Выдержка времени, как и в предыдущем случае, принимается равной 0,5 *сек*. На защитах, отключающих электродвигатели по условиям технологии или техники безопасности, напряжение срабатывания выбирается также по уровню, опасному по условиям устойчивости, т. е. $U_{с.з} = 0{,}5U_{ном}$, а время — максимальным по условию выбега (остановки) электродвигателя (больше времени остановки).

Глава девятнадцатая

ЗАЩИТА СБОРНЫХ ШИН

19-1. ВИДЫ ЗАЩИТ ШИН И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Опыт эксплуатации показывает, что, несмотря на благоприятные условия для надзора и ухода за элементами распределительных устройств электростанций и подстанций, повреждения на их шинах все же имеют место. К числу наиболее характерных причин, вызы-

вающих к. з. на шинах, следует отнести: перекрытие шинных изоляторов и вводов выключателей; повреждение трансформаторов напряжения и установленных между шинами и выключателями трансформаторов тока; поломка изоляторов разъединителей и воздушных выключателей во время операций с ними; ошибка обслуживающего персонала при переключениях в распределительных устройствах.

Для отключения к. з., возникающих на шинах электростанций и подстанций, на питающих шины генераторах, трансформаторах и линиях, обычно предусматриваются соответствующие защиты. В качестве таких защит на генераторах и трансформаторах служат защиты от внешних к. з., а на линиях — максимальные или дистанционные защиты, однако эти защиты работают при к. з. на шинах с выдержкой времени, имеющей иногда значительную величину.

В то же время *по условиям устойчивости, особенно в сетях 110—500 кв, обычно требуется мгновенное отключение междуфазных к. з. на шинах. В таких случаях появляется необходимость в применении специальных защит шин, способных отключать повреждения на них без выдержки времени.*

Кроме недостаточной быстроты действия, защиты линий, трансформаторов и генераторов в некоторых случаях не могут обеспечить селективного отключения поврежденной системы шин.

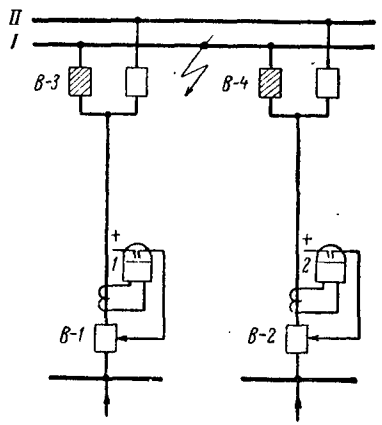


Рис. 19-1. Схема подстанции с двумя выключателями на каждом присоединении. Выключатели, отключаемые защитой при к. з. на первой (*I*) системе шин, заштрихованы.

Характерным примером этого может служить подстанция с двумя выключателями на каждом присоединении (рис. 19-1). При к. з., например, на первой системе шин защиты *1* и *2* отключают соответственно выключатели *В-1* и *В-2*, лишив питания обе системы шин, хотя при данной схеме соединений имеется возможность сохранить в работе всю подстанцию, отключив выключатели *В-3* и *В-4*. Такая ликвидация повреждения может быть обеспечена с помощью специальной защиты шин.

Таким образом, *специальные защиты шин применяются в тех случаях, когда защита присоединений не в состоянии обеспечить необходимого быстродействия или селективности.*

Для прекращения к. з. на шинах их защита должна действовать на отключение всех присоединений, питающих шины. В связи с этим специальные защиты шин приобретают особую ответственность, так как их неправильное действие приводит к отключению целой электростанции или подстанции либо их секции. Поэтому принцип действия защит шин и их практическое выполнение (монтаж) долж-

ны отличаться повышенной надежностью, исключающей какую-либо возможность их ложного действия.

В настоящее время в качестве быстродействующей и селективной защиты шин получила повсеместное распространение защита, основанная на дифференциальном принципе. На трансформаторах и секционных выключателях, питающих шины, у которых отходящие линии имеют реакторы, в качестве специальной защиты шин применяются токовые отсечки и дистанционные защиты.

В последнее время быстрое отключение к. з. на шинах сочетается с автоматическим повторным включением шин (АПВ). Опыт эксплуатации показывает, что некоторая часть к. з. на шинах имеет переходящий характер и при быстром отключении не восстанавливается после повторного включения.

19-2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ШИН

Дифференциальная защита шин (рис. 19-2) основывается на том же принципе, что и рассмотренные ранее дифференциальные защиты генераторов, трансформаторов и линий, т. е. на сравнении величины и фазы токов, приходящих к защищаемому элементу и уходящих от него.

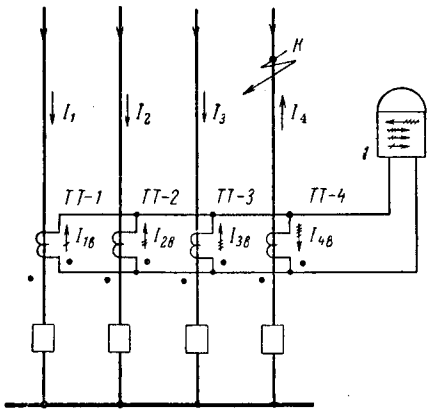


Рис. 19-2. Токораспределение во вторичных цепях дифференциальной защиты шин при внешних к. з.

Для питания защиты на всех присоединениях устанавливаются трансформаторы тока с одинаковым коэффициентом трансформации $n_т$ (независимо от мощности присоединения).

Дифференциальное реле *1* подключается к трансформаторам тока всех присоединений, так чтобы при первичных токах, направленных к шинам, в нем проходил ток, равный сумме токов всех присоединений, т. е. $I_р = \Sigma I_{прис}$. Тогда при внешних к. з. $\Sigma I_{прис} = 0$ и реле не действует, а при к. з. в зоне (на шинах) $\Sigma I_{прис}$ равна сумме токов, притекающих к месту повреждения, и защита работает.

Обычно первичные обмотки всех трансформаторов тока подключаются к шинам одноименными зажимами (рис. 19-2); при этом для выполнения указанного включения реле *1* все вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются параллельно одноименной полярностью (начало — с началом, конец — с концом) и параллельно к ним подключается обмотка реле *1*.

При внешнем к. з. (точка *K* на рис. 19-2) ток к. з. I_4, идущий от шин к месту повреждения, равен сумме токов, притекаю-

щих к шинам от источников питания:

$$I_4 = I_1 + I_2 + I_3. \qquad (19\text{-}1)$$

Из токораспределения, показанного на рис. 19-2, видно, что вторичные токи $I_{1в}$, $I_{2в}$ и $I_{3в}$, соответствующие первичным токам, притекающим к шинам, направлены в обмотке реле противоположно току $I_{4в}$ (первичный ток которого утекает от шин). Ток в реле

$$I_р = (I_{1в} + I_{2в} + I_{3в}) - I_{4в}. \qquad (19\text{-}2)$$

Выражая вторичные токи через первичные и учитывая равенство (19-1), получаем, что ток

$$I_р = \frac{I_1}{n_т} + \frac{I_2}{n_т} + \frac{I_3}{n_т} - \frac{I_4}{n_т} = 0.$$

Следовательно, при внешних к. з. ток в реле отсутствует.

С учетом токов намагничивания вторичные токи трансформаторов тока равны:

$$\dot{I}_{1в} = \frac{\dot{I}_1}{n_т} - \dot{I}_{нам1};$$

$$\dot{I}_{2в} = \frac{\dot{I}_2}{n_т} - \dot{I}_{нам2} \text{ и т. д.}$$

Подставив эти значения вторичных токов в выражение (19-2), найдем:

$$\dot{I}_р = \dot{I}_{нам4} - (\dot{I}_{нам1} + \dot{I}_{нам2} + \dot{I}_{нам3}) = \dot{I}_{нб}. \qquad (19\text{-}3)$$

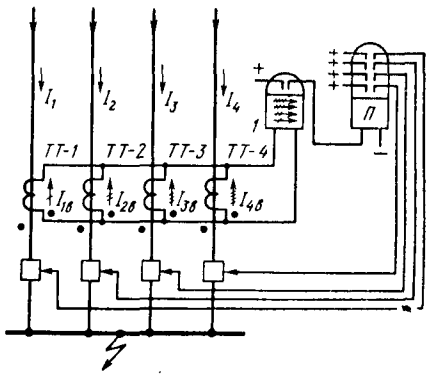


Рис. 19-3. Токораспределение во вторичных цепях дифференциальной защиты шин при к. з. на шинах.

Полученное выражение позволяет сделать вывод, что вследствие погрешности трансформаторов тока в реле появляется ток небаланса $I_{нб}$, равный геометрической разности токов намагничивания трансформаторов тока. Защита не будет действовать при условии, что ток срабатывания реле будет больше максимального тока небаланса:

$$I_{с.р} > I_{нб.макс}.$$

При к. з. на шинах (рис. 19-3) по всем присоединениям, имеющим источники питания (генераторы), ток к. з. направляется к месту повреждения, т. е. к шинам подстанции. Вторичные токи направлены в обмотке реле одинаково, поэтому ток в реле равен их сумме: $I_р = I_{1в} + I_{2в} + I_{3в} + I_{4в}$.

Выражая вторичные токи через первичные, получаем:

$$\dot{I}_р = \frac{\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4}{n_т}.$$

Так как

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 = \dot{I}_к, \qquad (19\text{-}4)$$

то

$$I_р = \frac{I_к}{n_т}. \qquad (19\text{-}5)$$

Выражение (19-5) показывает, что при к. з. на шинах дифференциальная защита шин реагирует на полный ток $I_к$ в месте к. з. и благодаря этому имеет наивыгоднейшие условия в отношении чувствительности. Защита будет действовать, если

$$I_к > I_{с.р}.$$

В нормальном режиме в реле проходит разность токов, притекающих к шинам и утекающих от них. Эти токи уравновешиваются, и защита не действует. Но из-за погрешности трансформаторов тока в реле появляется ток небаланса. Поскольку токи нагрузки меньше токов к. з., величина тока небаланса в нормальном режиме значительно меньше, чем при внешнем к. з.

19-3. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ШИН

а) Снижение тока небаланса

Ток небаланса может вызвать неправильную работу защиты, поэтому принимаются меры к ограничению его величины.

Выражение (19-3) показывает, что, как и в других дифференциальных защитах, уменьшение тока небаланса в защите шин достигается уменьшением разности между намагничивающим током $I_{4нам}$ трансформаторов тока на присоединении с наибольшим током к. з. и суммой намагничивающих токов $I_{1нам} + I_{2нам} + I_{3нам}$ остальных присоединений. При равенстве обеих составляющих ток небаланса отсутствует.

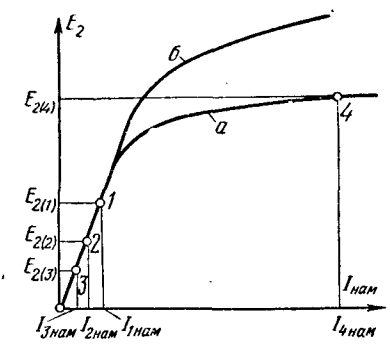


Рис. 19-4. Характеристика намагничивания трансформаторов тока дифференциальной защиты.

Как известно, ток намагничивания трансформаторов тока зависит от величины его вторичной э. д. с. E_2. Их взаимная связь $E_2 = f(I_{нам})$ характеризуется кривой намагничивания (рис. 19-4).

Чем больше ток к. з., проходящий через трансформаторы тока, тем больше будет E_2, а следовательно, и ток $I_{нам}$. При внешнем к. з. наибольший ток проходит через трансформатор тока поврежденного присоединения, поэтому его ток намагничивания будет максимальным. По трансформаторам тока остальных присоединений проходит лишь часть этого тока, благодаря чему их токи намагничивания зна-

чительно меньше. Особенно неблагоприятным является такое соотношение вторичных э. д. с., при котором трансформаторы тока поврежденного присоединения работают в насыщенной части (точка *4* на рис. 19-4), а все остальные — в прямолинейной части характеристики намагничивания (точки *1, 2* и *3*). При этих условиях разница токов намагничивания в выражении (19-3) имеет наибольшую величину. Поэтому для *уменьшения небаланса нужно обеспечить условия, при которых все трансформаторы тока работают при внешних к. з. в ненасыщенной части характеристики*. С этой целью необходимо:

а) *применять однотипные трансформаторы тока*, у которых насыщение происходит при возможно больших токах $I_к$; наилучшими с этой точки зрения являются трансформаторы тока класса Д, которые и рекомендуется применять для защиты шин;

б) *уменьшать кратность тока* $I_к$ к номинальному току трансформаторов тока, увеличивая их коэффициент трансформации $n_т$;

в) *уменьшать нагрузку на трансформаторы тока*, уменьшая $z_н$ и вторичный ток $I_в$; первое достигается за счет увеличения сечения и сокращения длины соединительных проводов, а второе — применением одноамперных трансформаторов тока или вспомогательных трансформаторов, понижающих ток в соединительных проводах.

Выбор трансформаторов тока и определение их загрузки производится по кривым 10%-ной погрешности.

б) Отстройка дифференциальных реле от тока небаланса

Хотя перечисленные выше мероприятия по снижению небаланса имеют существенное значение, в неустановившемся режиме токи небаланса все же могут достигать больших значений за счет влияния апериодической составляющей тока к. з., сильно намагничивающей сердечник трансформаторов тока.

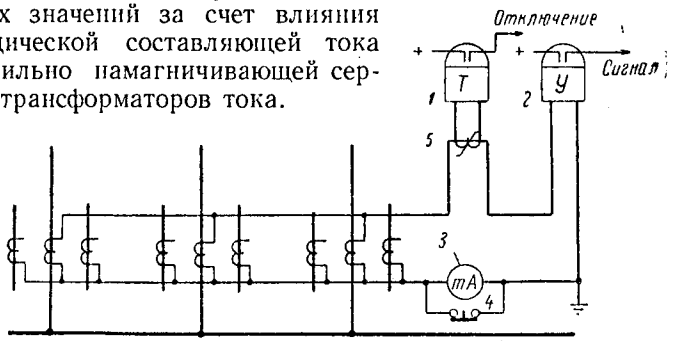


Рис. 19-5. Дифференциальная защита с реле *1*, включенным через быстронасыщающийся трансформатор *5* и с контролем исправности токовых цепей, при помощи сигнального реле *2* и миллиамперметра *3*.

Для улучшения отстройки от повышенных токов небаланса в неустановившемся режиме в дифференциальной защите шин, так же как и в других дифференциальных защитах, применяются реле

с быстронасыщающимися трансформаторами тока *5* (рис. 19-5). Последние не пропускают в реле апериодическую составляющую тока небаланса, вследствие чего дифференциальная защита отстраивается не от полного тока небаланса, а только от его периодической составляющей. Защита выполняется с помощью реле РНТ-567 со встроенным БНТ. Реле имеет две независимые рабочие обмотки w_1 и w_2, выполняется в двух модификациях — на 5 *а* и 1*а* вторичного номинального тока.

в) Контроль за исправностью токовых цепей

В случае обрыва или шунтирования фазы вторичной цепи трансформатора тока какого-нибудь присоединения ток от оборванной или зашунтированной фазы не поступает в дифференциальные реле. В результате этого баланс токов в реле нарушается, в них появляется избыточный ток, равный по величине и противоположный по направлению току оборванной или зашунтированной фазы.

Таким образом, при обрыве токовой цепи защита шин может неправильно сработать и отключить всю подстанцию или электростанцию, т. е. вызвать тяжелую аварию.

Для предупреждения неправильной работы защиты под влиянием тока нагрузки оборванной фазы дифференциальные реле отстраиваются от тока нагрузки наиболее загруженного присоединения.

Кроме того, в нулевом проводе дифференциальных реле устанавливается чувствительное токовое реле *2* (рис. 19-5).

При обрыве или шунтировании фазы вторичной цепи реле *2* с выдержкой времени выводит защиту из действия и подает предупредительный сигнал.

Реле *2* дополняется миллиамперметром *3*, при помощи которого можно обнаружить не только обрыв, но и ухудшение контакта в цепи какой-нибудь фазы или витковое замыкание в трансформаторе тока, вызывающее увеличение тока небаланса в нулевом проводе. Нажимая кнопку *4*, дежурный периодически измеряет ток небаланса, проверяя, таким образом, исправность токовой цепи.

19-4. ТОК СРАБАТЫВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ШИН С РЕЛЕ, ВКЛЮЧЕННЫМИ ЧЕРЕЗ БНТ [Л. 4]

Ток срабатывания выбирается, исходя из двух условий:

1. Защита не должна действовать при обрыве вторичной токовой цепи в нормальном режиме; для этого

$$I_{с.з} = k_{зап} I_{н.макс}, \qquad (19\text{-}6)$$

где $k_{зап}$ — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,2—1,25; $I_{н.макс}$ — максимальный ток нагрузки наиболее загруженного присоединения.

2. Защита не должна действовать от токов небаланса при внешних к. з., для этого

$$I_{с.з} = k_{зап} I_{нб.макс}. \qquad (19\text{-}7)$$

При включении реле через насыщающийся трансформатор ток срабатывания отстраивается от тока небаланса в установившемся режиме.

Величина установившегося $I_{\text{нб.макс}}$ оценивается приближенно. Предполагается, что работает с погрешностью только трансформатор тока, по которому проходит суммарный ток к. з. При этом условии ток небаланса будет равен погрешности ΔI этого трансформатора тока, которая в свою очередь равна его току намагничивания $I_{\text{нам}}$:

$$I_{\text{нб}} = \Delta I = I_{\text{нам}}.$$

Если ΔI при максимальном значении тока к. з. не превышает 10%, что проверяется по кривым 10%-ных погрешностей, то

$$I_{\text{нб.макс}} = 0{,}1 I_{\text{к.макс}}, \qquad (19\text{-}8)$$

где $I_{\text{к.макс}}$ — наибольший ток к. з. при внешних повреждениях.

Окончательно ток срабатывания принимается равным большему из двух полученных значений (19-6), (19-7).

Чувствительность защиты. Защита должна надежно работать при к. з. на защищаемых шинах при минимальном токе к. з. Чувствительность, как обычно, характеризуется коэффициентом

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}}{I_{\text{с.з}}}. \qquad (19\text{-}9)$$

Для надежного действия защиты необходимо иметь $k_{\text{ч}} \geqslant 2$.

19-5. РАЗНОВИДНОСТИ СХЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ШИН [Л. 4]

а) Схема дифференциальной защиты шин для подстанций с одной рабочей и второй резервной системами шин

Подстанция, изображенная на рис. 19-6, нормально работает на одной системе шин, на которую включены все присоединения. Шиносоединительный выключатель *В-3* отключен. Вторая система шин находится в резерве без напряжения. Защита шин подстанций такого типа выполняется по схеме, изображенной на рис. 19-6.

Схема защиты шин должна обеспечивать отключение повреждения не только в условиях нормального режима подстанции, но и во время перевода присоединений с рабочей системы шин на резервную. При переводе присоединений обе системы шин жестко связываются шиносоединительным выключателем *В-3,* образуя одно целое. В этом случае в зону действия защиты должны входить обе системы шин. Для выполнения этого условия трансформаторы тока шиносоединительного выключателя не подсоединяются к защите. В нор-

мальном режиме шиносоединительный выключатель отключен, и поэтому неподсоединение его трансформатора тока к защите не влияет на ее работу. При включении шиносоединительного выключателя резервная система шин попадает в зону действия защиты, поэтому если в момент опробования резервных шин на них окажется к. з., то защита шин сработает и отключит всю подстанцию, в то время как в данном случае было бы достаточно отключить один шиносоединительный выключатель, сохранив в работе рабочие шины. Чтобы устранить указанный недостаток, предусматривается б л о к и р о в к а, которая в момент опробования резервных шин прерывает действие защиты на отключение всех присоединений, кроме шиносоединительного выключателя. Благодаря этому при

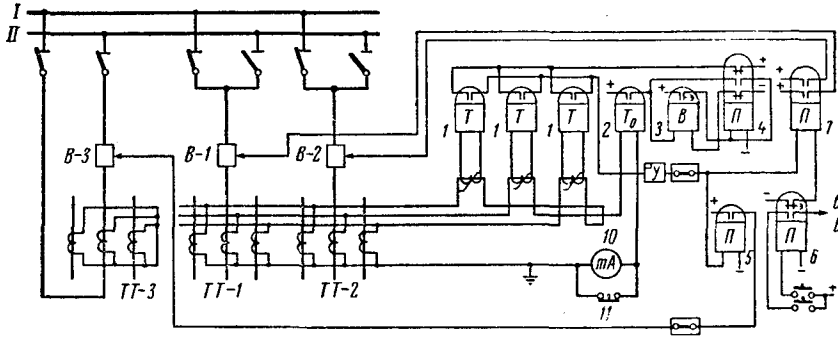


Рис. 19-6. Принципиальная схема дифференциальной защиты шин подстанции с рабочей и резервной системами шин.

опробовании защита шин может отключать только один шиносоединительный выключатель *В-3*.

После истечения времени $t_{бл}$, достаточного для включения шиносоединительного выключателя и обратного отключения его в случае к. з. на резервных шинах, блокировка восстанавливает нормальную схему защиты шин с действием на все выключатели.

Блокировка выполняется при помощи промежуточного реле *6* (рис. 19-6) с замедленным возвратом. Верхний контакт этого реле нормально замкнут, и через него проходит минус выходного промежуточного реле *7*, действующего на отключение всех выключателей, кроме шиносоединительного *В-3*. При включении *В-3* от ключа управления реле *6* приходит в действие и снимает минус с реле *7*. В качестве реле *6* часто применяется промежуточное реле типа РЭ-500 или РП-252, имеющее замедление на возврат порядка 1—2 *сек*.

Трансформаторы тока шиносоединительного выключателя подключаются к цепям защиты шин при выводе через шиносоединительный выключатель какого-либо присоединения.

б) Схема дифференциальной защиты шин для подстанций, работающих на двух системах шин с фиксированным распределением присоединений

Особенность таких подстанций состоит в том, что в работе находятся две системы шин, связанные секционным или шиносоединительным выключателем (рис. 19-7 и 19-8). Каждое присоединение включается на определенную систему шин, и это распределение остается неизменным, т. е. фиксируется. Для правильной ликвидации повреждений защита шин должна обеспечивать селективное

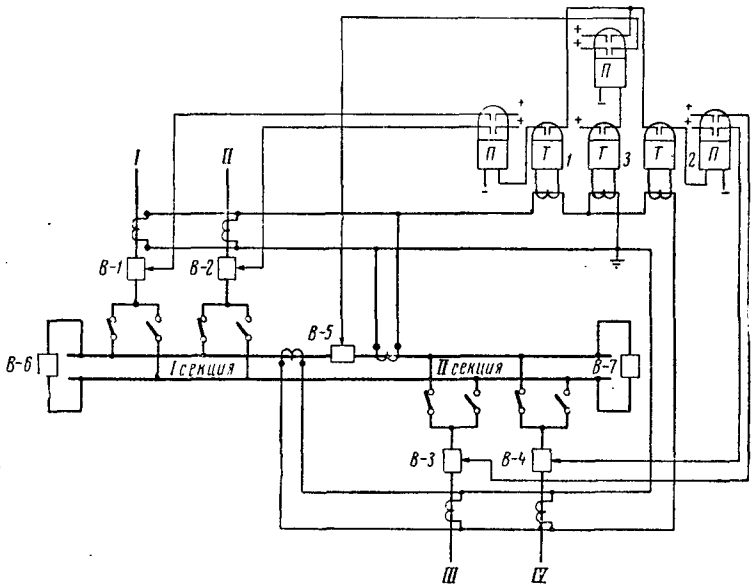


Рис. 19-7. Упрощенная схема дифференциальной защиты шин подстанции, работающей на двух системах шин (секциях) с фиксированным распределением присоединений.

отключение к. з. на каждой системе шин, отключая секционный выключатель и все присоединения, включенные на поврежденные шины. Селективность может быть достигнута применением двух самостоятельных защит, охватывающих каждую систему шин. Однако такая схема будет иметь два недостатка:

1. При включении всех присоединений на одну из систем шин защита шин будет работать неселективно при внешних к. з.

2. Защита шин не обеспечит селективности при внешних к. з. при вынужденном нарушении фиксации присоединений.

В обоих случаях защиту шин пришлось бы отключать во избежание ее неселективной работы.

С целью обеспечения селективности при внешних к. з. в указанных режимах применяется схема с тремя комплектами защиты (рис.

19-7 и 19-8). Комплект реле *1* предназначается для защиты первой секции. Он включается по дифференциальной схеме на трансформаторы тока всех присоединений, закрепленных за первой системой шин, и действует на их отключение. Комплект реле *2* служит для защиты второй секции. Его реле *2* питается от дифференциально соединенных трансформаторов тока присоединений, закрепленных за второй секцией, и действует на их отключение.

Комплект *3* является дифференциальной защитой обеих секций. Он включен на сумму токов, проходящих через реле ком-

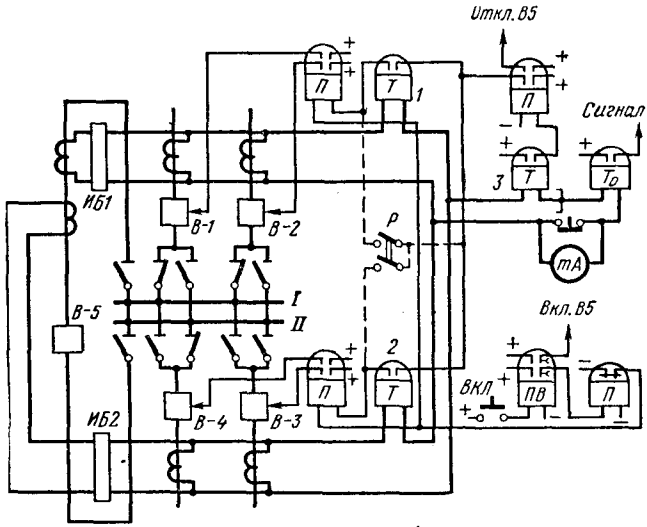


Рис. 19-8. Упрощенная (однофазная) схема дифференциальной защиты подстанции с двойной системой шин с фиксированным распределением присоединений между шинами.

плектов *1* и *2*, и оказывается, таким образом, дифференциально подключенным к трансформаторам тока всех присоединений. Комплект *3* действует при к. з. на шинах как первой, так и второй секции. При внешних к. з. он не работает независимо от того, как распределены по системам шин присоединения. Реле комплекта *3* подают плюс оперативного тока на реле комплектов *1* и *2* и производят отключение шиносоединительного выключателя.

В случае соблюдения принятой фиксации присоединений все три комплекта не работают при внешних к. з. При к. з. на шинах первой секции действуют комплекты *1* и *3*. Для комплекта *2* это к. з. является внешним, и поэтому он не работает. В случае к. з. на второй системе шин комплект *1* защиты не работает. Комплекты же *3* и *2* приходят в действие и отключают все присоединения второй (поврежденной) системы шин. Анализируя поведение защиты при нарушении фиксации, например если присоединение

В-2 переведено на вторую секцию (при помощи резервной системы шин и выключателя *В-7*), можно установить следующее: а) при сквозном к. з. токи в комплектах *1* и *2* не балансируются, в результате чего оба комплекта могут сработать, но так как в комплекте *3* токи уравновешиваются, то он не работает и не позволяет комплектам *1* и *2* произвести неправильные отключения; б) при к. з. на второй секции токи в комплекте *1* не балансируются, так как в этот комплект поступает избыточный ток от трансформатора тока присоединения *В-2*, которое включено на вторую секцию, поэтому на отключение срабатывают не только комплекты *3* и *2*, но и комплект *1*. *Следовательно, в случае нарушения принятой фиксации присоединений по шинам рассмотренная схема сохраняет селективность при внешних* к. з., *но теряет ее при к. з. на шинах*. Чтобы обеспечить селективность (в случае нарушения фиксации) при к. з. на шинах, следует переключить трансформаторы тока и оперативные цепи присоединений, переведенных на другую систему шин, на комплект защиты шин этой системы.

в) Схема дифференциальной защиты шин с двумя выключателями на каждом присоединении

Каждая система шин оборудуется отдельной дифференциальной защитой (рис. 19-9), действующей на отключение выключателей своих шин. При коротком замыкании на какой-либо системе шин срабатывает ее дифференциальная защита, отключая выключатели поврежденных шин. Защита другой (неповрежденной системы) не действует, благодаря чему все присоединения остаются в работе, питаясь от оставшейся системы шин. Каждая защита должна иметь устройство для контроля исправности токовых цепей, не показанное на схеме для упрощения (см. рис. 19-6).

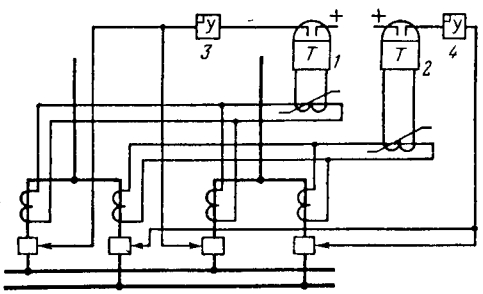


Рис. 19-9. Упрощенная (однофазная) схема дифференциальной защиты шин с двумя выключателями на каждом присоединении.

19-6. ОЦЕНКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ШИН И ОБЛАСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Главными достоинствами дифференциальной защиты шин являются быстрота действия, селективность и высокая чувствительность. Наряду с этим дифференциальная защита не действует при качаниях и перегрузке.

Опыт эксплуатации показывает, что при хорошем монтаже, правильном выборе трансформаторов тока и надежной отстройке от

токов небаланса защита работает вполне надежно и имеет весьма высокий процент правильного действия.

Дифференциальная защита широко применяется для защиты шин в сетях 110, 220, 330, 500 и 750 *кв*. В сетях более низкого напряжения дифференциальная защита применяется относительно редко.

19-7. НЕПОЛНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ШИН

На электростанциях и подстанциях с реактированными линиями и несколькими источниками питания применяется неполная дифференциальная защита по схеме, изображенной на рис. 19-10.

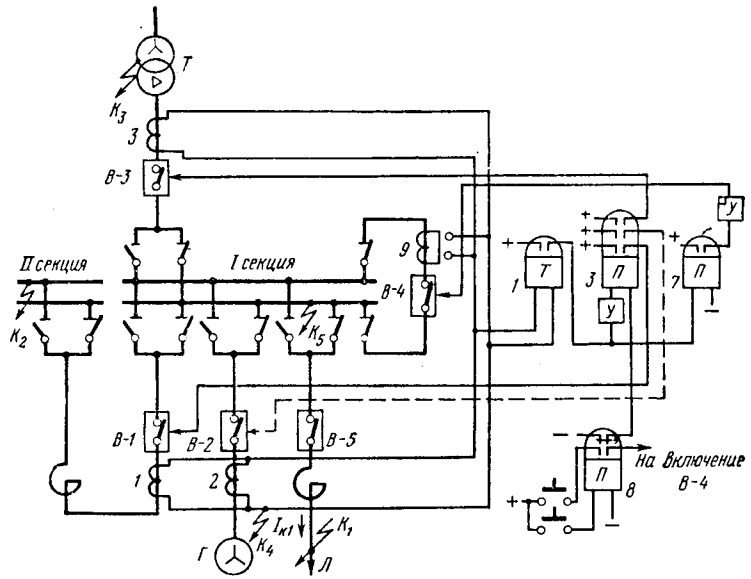


Рис. 19-10. Упрощенная (однофазная) схема неполной дифференциальной защиты шин 6—10 *кв*.

Дифференциальное токовое реле 1 включается на сумму токов всех источников питания, т. е. генератора Г, трансформатора Т и секционного выключателя В-1.

Трансформаторы тока линий Л к защите не подключаются, что упрощает схему и является преимуществом неполной схемы дифференциальной защиты по сравнению с полной. Коэффициенты трансформации трансформаторов тока, питающих неполную дифференциальную защиту, должны быть одинаковыми.

При к. з. на отходящих линиях *Л* (например, в точке $К_1$) токи к. з. и нагрузки, поступающие в реле *1*, не балансируются, так как токи, проходящие по линиям, не попадают в защиту, поэтому в реле *1* проходит сумма токов к. з. $\Sigma I_к = I_{к1}$, притекающих к месту повреждения от источников питания, и суммарный ток на-

грузки линий $I_{\text{нагр.л}}$, $\Sigma I_{\text{нагр.л}}$. Для того чтобы защита в этом случае не действовала, ее ток срабатывания должен удовлетворять условию

$$I_{\text{с.р}} = k_{\text{зап}} (I_{K1\text{макс}} + \Sigma I_{\text{нагр.л}}), \qquad (19\text{-}10)$$

где $k_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса, равный 1,2—1,3.

При к. з. на соседней секции, в генераторе или за трансформатором (в точках K_2, K_3 и K_4) токи к. з., притекающие и утекающие от шин, поступая в реле I, уравновешиваются благодаря дифференциальному принципу соединения трансформаторов тока источников питания, и поэтому защита не действует.

В нормальном режиме токи нагрузки, проходящие по отходящим линиям, не попадают в реле I. В результате этого токи в реле не балансируются и в нем проходит остаточный ток, равный сумме нагрузочных токов линий. Однако защита не действует, поскольку суммарный ток нагрузки меньше тока I_{K1}, от которого отстроена защита.

При к. з. на защищаемых шинах (точка K_5) в реле проходит сумма токов к. з., поступающих к месту повреждения от источников питания ($\Sigma I_{\text{к}} = I_{K5}$). Если $I_{K5} > I_{\text{с.з}}$ защиты, то она приходит в действие, отключая все источники питания, связывающие шины с системой (т. е. трансформаторы и секционный выключатель). Быстрое отключение генераторов необязательно, поэтому они могут отключаться своей защитой от внешних к. з.

По своему принципу работы защита не действует при внешних к. з. и поэтому может выполняться без выдержки времени.

Рассмотренная схема по существу является токовой отсечкой, включенной на сумму токов всех источников питания.

Достоинствами защиты являются ее быстрота действия и большая простота схемы по сравнению с полной дифференциальной защитой.

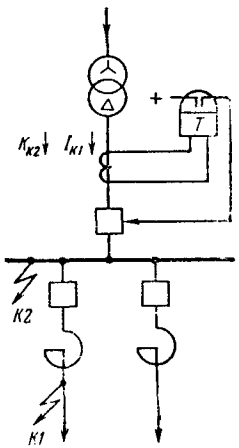


Рис. 19-11. Защита шин с помощью токовой отсечки.

19-8. ЗАЩИТА ШИН ПРИ ПОМОЩИ ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ

Шины подстанций 10 или 6 *кв*, питающие потребителей по кабельным линиям с реакторами (рис. 19-11), можно защищать токовой отсечкой, включенной на ток трансформатора, питающего подстанцию. Отсечка выполняется с двумя реле, включенными в две фазы, или одним реле, включенным на разность токов двух фаз. Ток срабатывания отсечки отстраивается от максимального тока к. з. $I_{K1\text{макс}}$ при повреждении за реактором отходящих линий в точке K_1:

$$I_{\text{ср}} = k_{\text{зап}} I_{K1\text{макс}},$$

где $k_{\text{зап}} = 1{,}3$.

Если нагрузка неповрежденных линий $\Sigma I_{нагр}$ соизмерима с $I_{К1макс}$, защита отстраивается от суммарного тока ($I_{К1макс} + \Sigma I_{нагр}$).

Выдержка времени отсечки принимается, как правило, равной 0,5 *сек* для отстройки от мгновенных дифференциальных защит трансформаторов или синхронных компенсаторов, питающихся от защищаемых шин. При отсутствии необходимости такого согласования отсечка может выполняться мгновенной.

19-9. ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ШИН

Дистанционная защита применяется для защиты шин 6 и 10 *кв*, питающих реактированные линии.

Защита устанавливается на трансформаторах *Т*, связывающих защищаемые шины с системой (рис. 19-12), и питается от трансформатора тока *ТТ-1* и трансформатора напряжения *ТН*. Защита состоит из пускового органа, выполненного с помощью токовых реле *1*, и дистанционного органа *2*, осуществленного с помощью реле сопротивления *С*. Обычно применяется односистемная схема, рассмотренная в § 11-17.

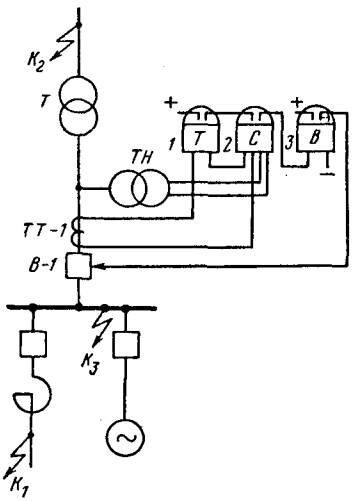


Рис. 19-12. Схема дистанционной защиты шин.

Сопротивление срабатывания дистанционного органа *2* выбирается меньшим сопротивлений реакторов линии и трансформатора $z_р$ и $z_т$:

$$z_{с.з} < z_р \quad и \quad z_{с.з} < z_т.$$

При этом условии защита не работает при к. з. за реактором линии или трансформатором связи (в точках $К_1$ и $К_2$), так как сопротивление на зажимах дистанционного органа в этих случаях превышает его сопротивление срабатывания.

При металлическом к. з. на защищаемых шинах напряжение, а вследствие этого и сопротивление на зажимах омметра падают до нуля. Защита приходит в действие и отключает трансформатор, отделяя тем самым поврежденные шины от системы.

При к. з. на выводах генератора дистанционная защита действует так же, как и при к. з. на шинах. Чтобы обеспечить селективность при таких повреждениях, на защите шин устанавливается выдержка времени $t_{з.ш}$ на ступень выше времени действия дифференциальной защиты генераторов. Практически выдержка времени защиты шин принимается равной:

$$t_{з.ш} = 0{,}5 \div 0{,}6 \ сек.$$

В случае к. з. до реактора или в реакторе линий защита шин действует быстрее, чем максимальная защита этих линий. Такая неселективность допускается, так как линейные выключатели не рассчитываются на к. з. до реактора.

Дистанционная защита шин генераторного напряжения применяется в тех случаях, когда к. з. на шинах необходимо отключать быстрее, чем это может сделать максимальная защита трансформатора.

19-10. ЗАЩИТА ШИН 110—500 *кв* С ТРАНСФОРМАТОРАМИ ТОКА, ИМЕЮЩИМИ ПОВЫШЕННУЮ ПОГРЕШНОСТЬ

В тех случаях, когда погрешность трансформаторов тока не удается ограничить и она выходит за пределы 10%, рассмотренная выше простая дифференциальная защита шин (§ 19-2) оказывается

недостаточно чувствительной и надежной. В этих случаях могут применяться дифференциальные защиты с торможением или дифференциально-фазные защиты. Разработке и освоению этих защит за последнее время уделяется значительное внимание.

Дифференциальная защита шин с торможением. Защита работает так же, как и аналогичная защита трансформаторов (см. § 16-4). Реагирующий орган защиты выполняется с помощью дифференциального реле с торможением, у которого рабочий ток срабатывания ($I_{р.с.р.}$) зависит от величины тормозного тока ($I_т$), т. е. $I_{р.с.р} = f(I_т)$ (рис. 19-13,*а*). Наличие торможения позволяет допускать значительно большие (чем при простых реле) токи небаланса, возникающие в тех случаях, когда погрешность трансформаторов тока не превышает 10%.

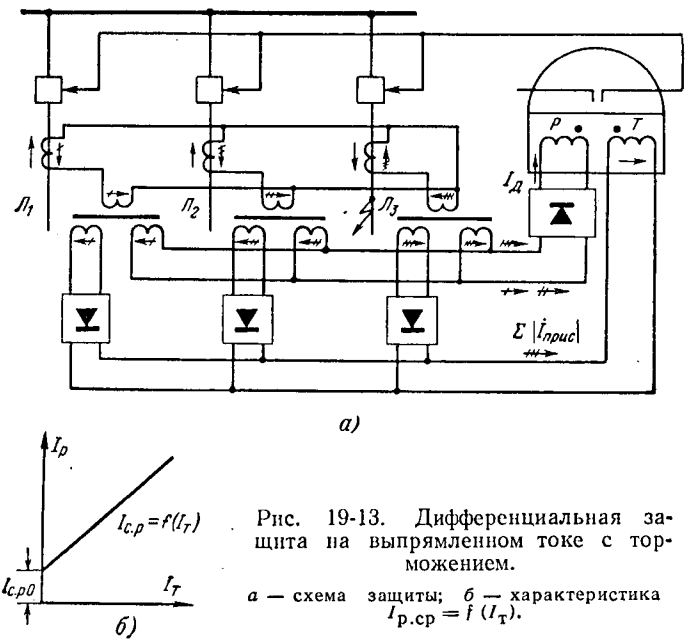


Рис. 19-13. Дифференциальная защита на выпрямленном токе с торможением.

а — схема защиты; *б* — характеристика $I_{р.ср} = f(I_т)$.

Токовые цепи защиты соединяются, как правило, по дифференциальной схеме, при этом токи плеч используются в качестве тормозных токов $I_т$, а дифференциальный ток, равный геометрической сумме токов всех присоединений $\sum_{1}^{n} I_{прис}$, является рабочим током $I_р$ защиты.

Если в качестве реагирующего органа применяются электромеханические реле, питающиеся переменным током трансформаторов тока, то число тормозных обмоток реле в общем случае должно быть

равно числу присоединений, отходящих от защищаемых шин. Такие защиты получаются сложными и применяются редко.

Защита значительно упрощается при выполнении ее на выпрямленном токе. В этом случае реагирующий орган может осуществляться с помощью поляризованных и магнитоэлектрических реле или на полупроводниках.

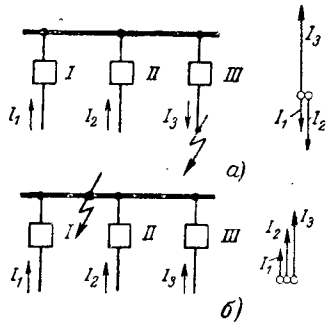


Рис. 19-14. Распределение и фазы токов присоединений при к. з. вне шин (*а*) и на шинах (*б*).

Простейшая схема с поляризованным реле, наиболее наглядно поясняющая принцип выполнения дифференциальной защиты с торможением, показана на рис. 19-13,*а*.

Тормозная обмотка реле T включена на сумму выпрямленных токов присоединений: $I_т = \sum_1^n I_{прис}$. В этом случае тормозной ток равен арифметической сумме токов всех присоединений ($Л_1$, $Л_2$,..., $Л_n$).

Рабочая обмотка питается выпрямленным дифференциальным током $I_д$. Принцип действия такой защиты не требует пояснений. Описание подобной защиты дано в [Л. 104].

Дифференциально-фазная защита шин. Принцип действия защиты основан на сравнении фаз токов присоединений при внешнем к. з. и при к. з. на шинах (рис. 19-14).

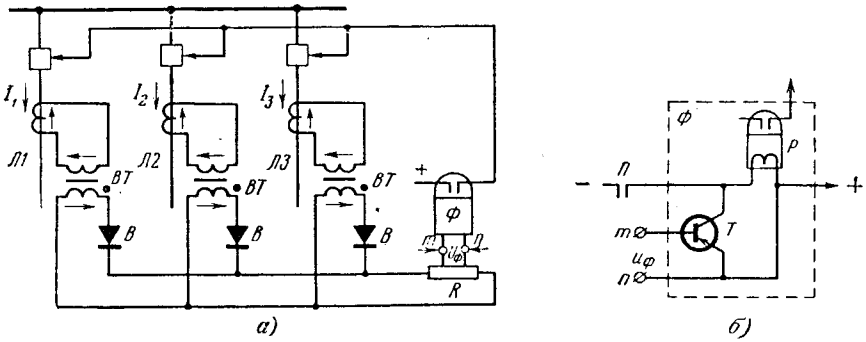


Рис. 19-15. Принцип выполнения дифференциально-фазной защиты шин (*а*), упрощенная схема реле сравнения фаз (фазного органа) (*б*).

Пренебрегая фазными сдвигами первичных токов, можно считать, что в первом случае (при внешнем к. з., рис. 19-14, *а*) токи, притекающие к шинам и утекающие от них, имеют противоположные фазы (т. е. сдвинуты на 180°), а во втором (рис. 19-14, *б*) — токи всех присоединений совпадают по фазе.

В соответствии со сказанным реагирующий орган дифференциально-фазной защиты должен сравнивать между собой углы сдвига фаз токов всех присоединений. *При совпадении фаз токов всех присоединений реагирующий орган должен работать, а при наличии тока хотя бы одного присоединения, сдвинутого на 180°, — не действовать.* Такое сравнение можно осуществить с помощью схемы, показанной на рис. 19-15,*а*, характеризующей общий принцип выполнения подобного фазного органа.

Вторичные обмотки вспомогательных трансформаторов *ВТ*, установленных на каждом присоединении, соединяются одноименными зажимами на параллельную работу через однополупериодные выпрямители *В*, пропускающие только положительные полуволны питающего их тока.

К выходу этого контура подключен фазный орган *Ф*, реагирующий на сдвиг фаз между первичными токами присоединений I_1, I_2,...,I_n.

Поскольку выпрямители *В* всех присоединений соединены параллельно, из всех токов присоединений (совпадающих по фазе) через выпрямители будет проходить только один ток, положительная полуволна которого имеет наибольшее значение $I_{макс}$. Выпрямители *В* на остальных присоединениях (с меньшими токами) будут закрыты обратным напряжением, создаваемым выпрямителем, пропускающим ток $I_{макс}$.

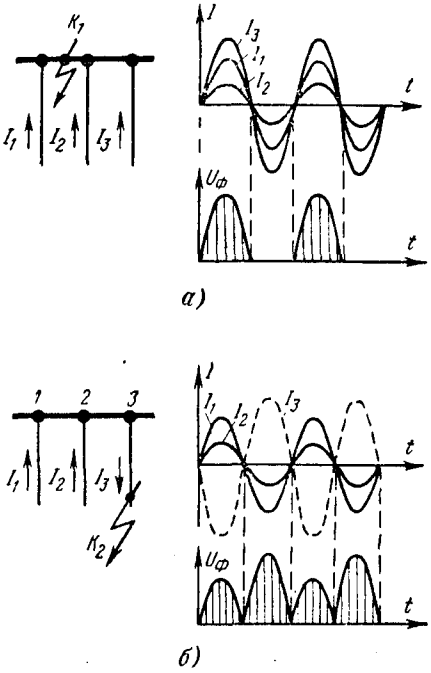


Рис. 19-16. Диаграммы токов в фазном органе защиты.

а — при к. з. на шинах; *б* — при к. з. вне шин.

Таким образом, к органу сравнения фаз *Ф* подводится напряжение $U_ф = kI_{макс}R$.

При к.з. на защищаемых шинах (в K_1 на рис. 19-16, *а*) токи по всем присоединениям, имеющим источники питания, направлены к месту к. з. ., т. е. к шинам, и совпадают по фазе, если не учитывать различие в углах сопротивлений присоединений и фаз э. д. с. источников питания. В этих условиях положительные полуволны первичного тока всех присоединений совпадают. Ток присоединения, по которому проходит наибольший ток к. з., пропускается соответствующим выпрямителем, проходит по сопротивлению *R* и воздействует на реагирующий орган *Ф*.

В отрицательные полупериоды тока присоединений диоды выпрямителей B заперты и ток в фазном контуре отсутствует. В результате этого напряжение $U_ф$ на входе фазного органа имеет прерывистый характер, как показано на рис. 19-16, *а*.

Фазный орган устроен так, что при наличии разрыва («скважности») в кривой входного напряжения он срабатывает.

П р и в н е ш н е м к. з. токи, идущие к шинам и уходящие от них к месту к. з., сдвинуты на 180°.

В результате этого ток в фазном контуре течет непрерывно, соответственно этому кривая $U_ф$ имеет также непрерывный характер (рис. 19-16,*б*). При наличии *сплошного импульса на входе фазный орган Ф не работает.*

Фазная характеристика реле $Ф$, определяющая зависимость его $I_{с.р} = f(\varphi)$ приведена на рис. 19-17. С учетом угловых погрешностей, возникающих из-за различия в фазах э. д. с. источников питания, углов сопротивлений присоединений и угловой погрешности трансформаторов тока ширина зоны действия фазного органа принимается приблизительно равной 140°.

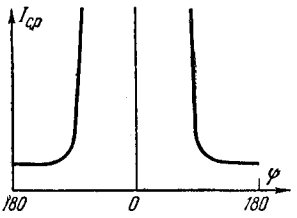


Рис. 19-17. Зависимость тока срабатывания дифференциально-фазной защиты от угла φ сдвига фаз токов присоединений.

В ряде защит [Л. 77, 79] орган сравнения фаз $Ф$ выполняется с помощью транзистора T, управляющего работой электромагнитного реле P, как показано на рис. 19-15,*б*. При наличии напряжения $U_ф$ триод открыт и шунтирует реле P, не позволяя ему работать. При отсутствии $U_ф$ триод T закрывается и реле может работать.

Специальные испытания показывают, что дифференциально-фазные защиты, обладая достаточной чувствительностью при к. з. на шинах, могут быть надежно отстроены от небалансов при выполнении защиты на трансформаторах тока с погрешностью, достигающей в установившемся режиме 20—30%.

Дифференциально-фазная защита может выполняться односистемной, для того чтобы вспомогательные трансформаторы BT были выполнены в виде сумматоров или комбинированных фильтров.

В СССР применяются дифференциально-фазные защиты, разработанные Грузэнерго [Л. 78], Белорусэнерго, использовавшими опыт применения подобных защит в Чехословакии [Л. 76, 78] и Институтом автоматики Министерства приборостроения.

Оценка защит. Оба варианта дифференциальной защиты (с торможением и фазным органом) чувствительнее простой дифференциальной защиты шин, более надежно отстраиваются от внешних к. з., позволяют снизить требования к точности трансформаторов тока и уменьшить сечение контрольного кабеля в токовой цепи защиты.

Общим недостатком обеих защит является отсутствие мер по отстройке от повышенных погрешностей трансформаторов тока в переходных режимах, обусловленных апериодической составляющей тока к. з.

Дальнейшие разработки и опыт эксплуатации этих защит позволят полнее оценить оба варианта новых защит и целесообразность их широкого применения.

Глава двадцатая

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

20-1. НЕОБХОДИМОСТЬ И СПОСОБЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Статистика показывает, что при автоматической ликвидации повреждений отмечаются отдельные случаи отказа в действии релейной защиты или выключателей.

Несмотря на относительную редкость таких случаев, с ними нельзя не считаться, поскольку отказ защиты или выключателя означает неотключение к. з. со всеми вытекающими из этого последствиями (длительное прохождение токов к. з. и снижение напряжения в сети).

Подобные отказы могут вызывать тяжелые аварии, сопровождающиеся массовым повреждением оборудования (не рассчитанного на длительное прохождение сверхтоков к. з.) и нарушением электроснабжения потребителей из-за понижения напряжения и нарушения устойчивости энергосистем. Наряду с принятием мер по повышению надежности и безотказности действия релейной защиты и выключателей особо важное значение приобретает резервирование отключения повреждений в случае отказа выключателя или действующей на него защиты.

Известны и применяются два способа резервирования:

1) резервирование, осуществляемое защитами смежных участков (*дальнее резервирование*);

2) резервирование, осуществляемое защитами и выключателями той подстанции, где произошел отказ.

В этом случае для резервирования защиты на каждом присоединении устанавливаются *две защиты* (*основная и резервная*), взаимно резервирующие друг друга. Для резервирования выключателя предусматривается специальное устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ). Это устройство пускается от защит отказавшего выключателя и действует на отключение всех присоединений данной подстанции, непосредственно питающих неотключившееся к. з.

Этот способ резервирования именуется *местным, или ближним, резервированием*.

Первый способ резервирования предусматривает, что в зону действия защиты смежного участка должен входить не только свой, но и следующий за ним участок (рис. 20-1). Тогда при отказе защиты *В* или выключателя *В* следующего участка защита смежного участка *А* приходит в действие и отключает к. з. своим выключателем *А*.

В тех случаях, когда по условиям быстродействия линия оборудуется дифференциальной или высокочастотной защитой, для целей резервирования предусматривается дополнительная, так называемая резервная защита, способная действовать при к. з. на следующем участке. Одновременно эта же резервная защита действует при отказе основной защиты своего участка.

В качестве резервных защит используются токовые защиты нулевой последовательности для отключения к. з. на землю и макси-

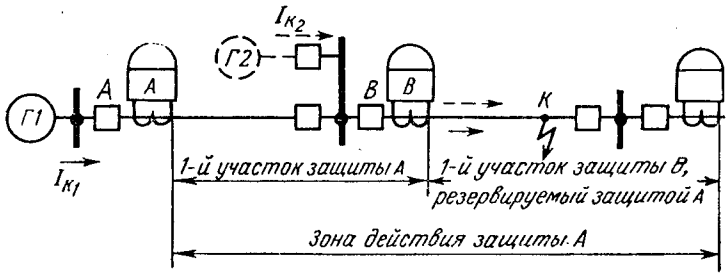


Рис. 20-1. Принцип дальнего резервирования отказа в работе выключателей или защиты с помощью защит предыдущего участка сети.

мальные токовые или дистанционные защиты для ликвидации междуфазных к. з.

В целях упрощения установка резервных защит от междуфазных к. з. допускается не на всех линиях, а лишь в отдельных точках сети, выбираемых с учетом ответственности подстанций и последствий неселективного отключения нескольких участков.

Принципиальным преимуществом дальнего резервирования является его высокая надежность. Резервируемые и резервирующие защиты и выключатели находятся на разных подстанциях, и, следовательно, неисправности и неполадки, возникшие на резервируемой подстанции, не могут повлиять на работу резервирующих устройств.

Однако в сложных сетях с протяженными и сильно загруженными линиями при наличии параллельных ветвей и мощных подпиток (например, от источника *Г2* на рис. 20-1) *резервные защиты (А* на рис. 20-1) *оказываются недостаточно чувствительными* даже и в тех случаях, когда они выполняются посредством защиты нулевой последовательности и дистанционной защиты.

Этот недостаток дальнего резервирования ограничивает его применение и вынуждает искать другие пути, обеспечивающие большую чувствительность резервирования.

Второй способ резервирования получил значительное распространение на подстанциях, где дальнее резервирование ока-

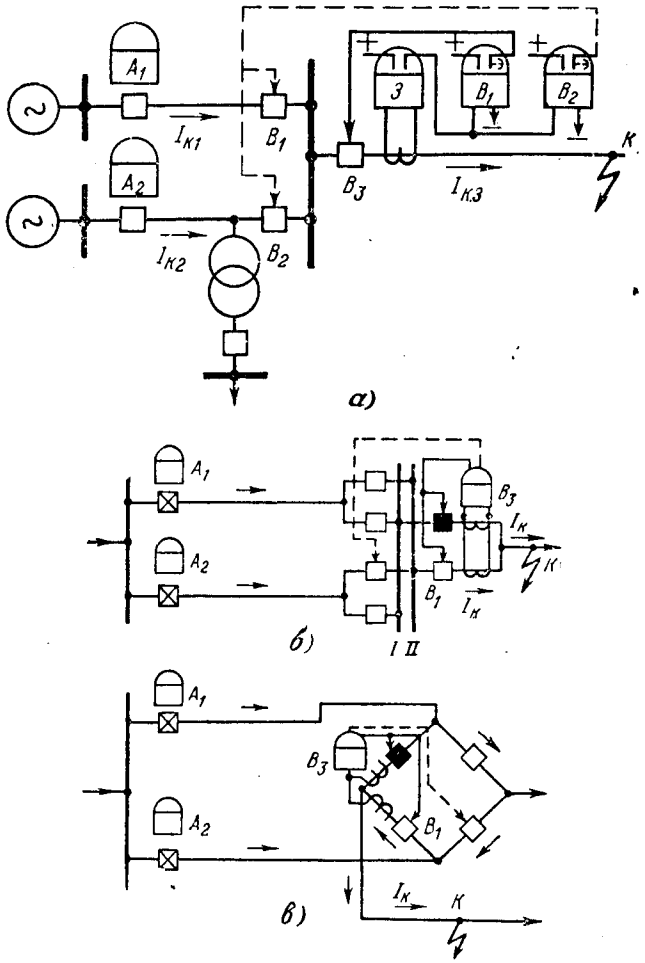


Рис. 20-2. Принцип ближнего резервирования с помощью устройства резервирования отказа выключателей (УРОВ).

а — принцип действия УРОВ; *б* — для схемы с двумя выключателями на присоединении; *в* — ближнее резервирование для схемы четырехугольника.

■ — выключатель, отключившийся при к. з. на присоединении; ⊠ — выключатель, отключаемый резервной защитой предыдущего участка. Пунктиром показаны цепи отключения от устройства УРОВ.

зывается нечувствительным или неселективным. Принцип действия УРОВ очень прост (рис. 20-2,*а*).

В случае отказа выключателя B_3 его защита *З* по истечении времени, достаточного для прекращения к. з., при нормальной работе

выключателя и защиты поврежденного присоединения (B_3 и $З$) действует на отключение всех выключателей, через которые продолжается питание повреждения (B_1 и B_2 на рис. 20-2,*а*).

Очевидно, что УРОВ не может резервировать отказ самой защиты $З$. Поэтому его применение предполагает необходимость второго (дублирующего) комплекта защиты для резервирования отказа основной защиты. Обе защиты должны выполняться независимыми друг от друга, так чтобы неисправности в цепях и устройствах одной не могли вызывать отказ второй. Для этой цели каждая защита включается на отдельные трансформаторы тока, оперативные цепи каждой защиты должны питаться от разных предохранителей и иметь разные выходные промежуточные реле.

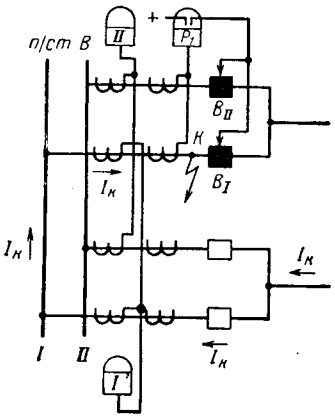


Рис. 20-3. Действие УРОВ при к. з. между выключателем и трансформатором тока.

■ — выключатели, отключившиеся при к. з. в точке $К$.

Устройство резервирования отказа выключателя обладает высокой чувствительностью, так как пусковым органом его является основная защита присоединения, обычно имеющая достаточную чувствительность в пределах защищаемого элемента. Помимо того, УРОВ имеет определенные преимущества по сравнению с первым способом резервирования (дальним) в части селективности. Так, на подстанциях с двумя выключателями на присоединение, а также на подстанциях, выполненных по схеме многоугольника (рис. 20-2, *б* и *в*), при к. з. на линии и отказе выключателей B_1 УРОВ позволяет сохранить в работе подстанцию и все линии, кроме поврежденной, в то время как дальнее резервирование с помощью защит A_1 и A_2 предыдущей линии приводит к отключению всей подстанции (рис. 20-2, *б*, *в*). Это преимущество имеет существенное значение на мощных станциях и узловых ответственных подстанциях особенно в тех случаях, когда через них передается большая транзитная мощность, а также при наличии на линиях ответвлений, как показано на рис. 20-2,*а*.

Кроме резервирования отказа отключения выключателей, специальное УРОВ обеспечивает быстрое отключение повреждений на участке между выключателем и его трансформаторами тока, когда последние устанавливаются только с одной стороны выключателя (рис. 20-3). При к. з. на этом участке, например в точке $К$, защита P_1 поврежденного присоединения хотя и подействует на отключение выключателя B_1, но не сможет отделить повреждения от шин подстанции $В$, защита же шин I и II этой подстанции не работает, так как к. з. в точке $К$ находится вне зоны ее действия. Отклю-

чение к. з. производится в данном случае резервными защитами, установленными на противоположных концах присоединений, питающих подстанцию *В*. В тех случаях, когда выдержка времени этих защит значительна или их действие приводит к неселективному отключению всей подстанции, при схеме коммутации, допускающей отключение ее части (например, при схеме многоугольника или с двумя выключателями), для ликвидации указанных повреждений целесообразно применение указанного выше специального устройства резервирования (УРОВ).

20-2. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ УСТРОЙСТВА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ОТКАЗА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ (УРОВ)

Из принципа действия УРОВ следует, что при срабатывании оно должно отключать все присоединения одной секции или системы шин подстанции или электростанции. Поэтому ложное действие УРОВ может вызывать полное или частичное нарушение работы подстанции или электростанции с тяжелыми, как правило, последствиями для энергосистемы и ее потребителей. В то же время вероятность ложной работы УРОВ больше, чем у других защит. Это объясняется тем, что пуск УРОВ осуществляется от защит всех присоединений. Вследствие этого неисправность в защите любого присоединения или ошибка обслуживающего персонала при их проверке может привести к неправильной работе УРОВ.

Для исключения ложной работы схема УРОВ выполняется с двумя независимыми друг от друга пусковыми органами. Одним — является защита присоединения, как было показано на рис. 20-2,*а*, вторым — дополнительное пусковое устройство, контролирующее наличие к. з. в зоне действия УРОВ. Второй пусковой орган не позволяет работать УРОВ при отсутствии к. з. и предупреждает таким образом его ложную работу из-за неисправности защит присоединения или ошибочных действий персонала.

Второй пусковой орган выполняется с помощью реле напряжения или тока, реагирующих на появление к. з. в сети (рис. 20-4,*а* и *б*). Контрольные пусковые реле должны надежно действовать при к. з. в пределах защищаемого присоединения.

Схема контроля с реле напряжения показана на рис. 20-4,*а*. Она состоит из реле минимального напряжения H, включенного на междуфазное напряжение и реагирующего на трехфазные к. з., и двух реле, реагирующих на несимметричные к. з. Одно реле H_2 включено на напряжение обратной последовательности; второе H_0 питается напряжением $3U_0$. При действии реле H, H_2 или H_0 срабатывает промежуточное реле $РП_к$, которое замыкает свои контакты и разрешает выходному реле защиты $РН_з$ пустить УРОВ (рис. 20-4,*в*).

На рис. 20-4, *б* показан контроль наличия к. з. с помощью токового реле $Т_к$. В качестве последнего применяется трехфазное токовое реле типа РТ-40/Р или три однофазных токовых реле. Трехфазное реле

$T_к$, показанное на рис. 20-4,*б*, работает при всех видах к. з. При срабатывании реле $T_к$ замыкает свои контакты, разрешая работать УРОВ.

Принципиальная схема УРОВ приведена на рис. 20-4, *в* и *г*. При к. з. на защищаемом присоединении срабатывает выходное реле защиты $РП_з$, замыкая цепь отключения выключателя присоединения и цепь пуска УРОВ.

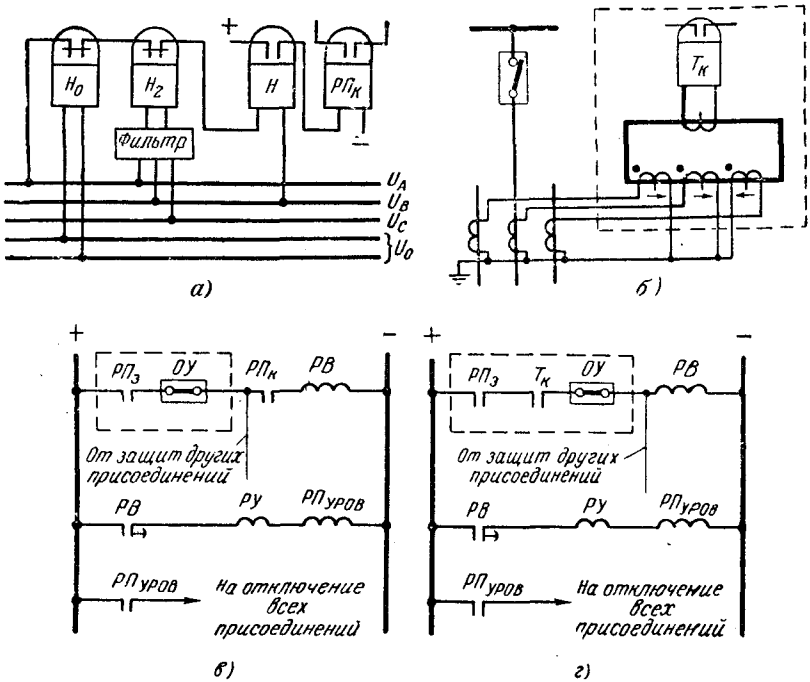


Рис. 20-4. Принципиальная схема устройства резервирования отказа выключателей (УРОВ).

а, б — цепи устройства контроля неотключившегося к. з.; *в, г* — оперативные цепи УРОВ.

Если выключатель не подействовал и к. з. продолжается, то реле контроля $РП_к$ в схеме на рис. 20-4, *в* и реле $T_к$ в схеме на рис. 20-4, *г* разрешает сработать реле времени *РВ* и выходному реле УРОВ. Последнее подает импульс на отключение всех присоединений, продолжающих питать к. з. При ошибочном пуске защиты срабатывает реле $РП_з$, но УРОВ не действует, так как контакты реле, контролирующего наличие к. з. ($РП_к$ или $T_к$), остаются разомкнутыми.

В цепи пуска УРОВ на защите каждого присоединения устанавливается отключающее устройство *ОУ*, позволяющее при проверке защиты или ее неисправности разомкнуть цепь, по которой подается импульс на пуск УРОВ.

На подстанциях, оборудованных защитой шин, в качестве выходных реле УРОВ могут использоваться выходные реле защиты шин. Контроль наличия к. з. с помощью токовых реле применяется на подстанциях, выполненных по полуторной схеме, по схеме многоугольника, или с двумя системами шин и двумя выключателями на присоединение.

При таких схемах каждое присоединение отключается двумя выключателями. Поэтому устройство контроля наличия к. з. должно обладать способностью определять, какой из двух выключателей присоединения отказал. Эту задачу легко разрешить, установив

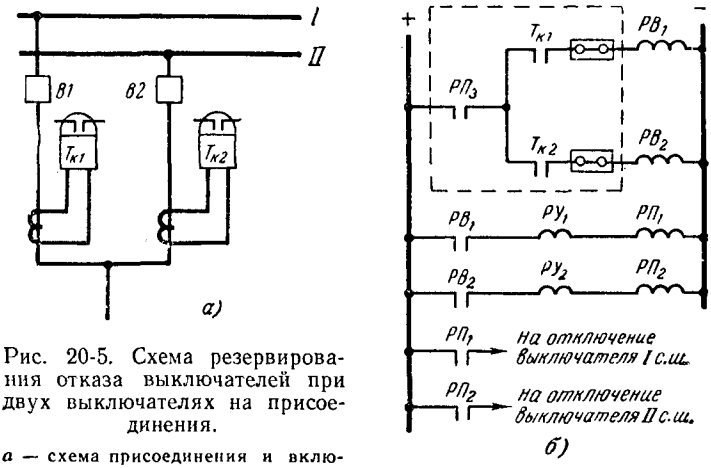


Рис. 20-5. Схема резервирования отказа выключателей при двух выключателях на присоединения.

а — схема присоединения и включения контрольных пусковых реле $Т_{к1}$ и $Т_{к2}$; *б* — оперативные цепи.

в цепи каждого выключателя присоединения токовые реле $Т_{к1}$ и $Т_{к2}$, фиксирующие прохождение тока по выключателю (рис. 20-5, *а*).

В отключившемся выключателе ток пропадает, в отказавшем — остается. В зависимости от этого работает реле $Т_{к1}$ или $Т_{к2}$, разрешая отключать те присоединения подстанции, которые продолжают питать к. з. при отказе данного выключателя (рис. 20-5, *б*)

Выбор уставок на реле устройства. Время действия УРОВ ($t_{УРОВ}$) должно быть больше времени действия защиты на отключение ($t_{откл}$) на некоторую величину $\Delta t = t_{УРОВ} - t_{откл}$. Это время устанавливается на дополнительном реле времени УРОВ (на рис. 20-4 оно обозначено *РВ*).

Защита подает импульс на выключатель и реле времени УРОВ одновременно. Для предупреждения действия УРОВ при нормальном отключении выключателя необходимо выбрать

$$t_{УРОВ} = t_{откл.в} + t_{воз.з} + t_{ошРВ} + t_{зап}, \qquad (20\text{-}1)$$

где $t_{откл.в}$ — время отключения выключателя; $t_{воз.з}$ — время, необходимое для возврата защиты, пускающей УРОВ; $t_{ош.РВ}$ — время

ошибки реле времени УРОВ в сторону ускорения действия; $t_{зап}$ — запас по времени.

Чтобы предупредить действие защит на смежных подстанциях при действии УРОВ, необходимо выбирать выдержки времени на резервных ступенях защит этих подстанций с учетом $t_{УРОВ}$. Это замедляет выдержку времени на резервных защитах смежных участков на $\Delta t = t_{УРОВ}$.

Уставки на реле напряжения и тока устройств, контролирующих наличие к. з., выбираются с учетом надежного действия этих реле при к. з. в конце резервируемого присоединения и из условия возврата после отключения к. з.

20-3. ОЦЕНКА УСТРОЙСТВ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Устройство резервирования отказа отключения выключателя в коммутационном отношении является сложным устройством, так как в нем сходятся цепи отключения всех выключателей и оперативные цепи защит. Этим определяется большая ответственность устройств резервирования.

С учетом сложности и ответственности специальные устройства резервирования имеют ограниченное применение. Их следует предусматривать в тех случаях, когда резервные защиты не могут обеспечить резервирование следующих участков, а неотключенное к. з. из-за отказа выключателя сопровождается резким и опасным для системы снижением напряжения.

Устройства резервирования целесообразно также применять на особо ответственных подстанциях с тремя выключателями на два присоединения, с двумя выключателями на присоединение или на подстанциях, соединенных по схеме многоугольника для отключения при отказе выключателей не всей подстанции, а ее части.

Приложение

МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Защита предназначена для линий 6—10 *кв*, разработана ВНИИэлектропривод на типовых функциональных и логических элементах серии «Логика», изготавливается заводом ЧЭАЗ. Структурная схема защиты представлена на рис. П-1. Защита выполняется двухфазной, она состоит из двух измерительных органов $ИО_A$ и $ИО_C$, один из которых реагирует на ток фазы *А*, а второй — фазы *С*, и логической части *ЛЧ*, включающей в себя логический элемент ИЛИ, элемент времени *В*, усилитель *У* и выходное промежуточное реле *РП*. Измерительный орган представляет собой токовое реле на выпрямленном токе, состоящее из промежуточного трансформатора тока *ПТ*, выпрямителя *ВМ* и усилителя *Р*,

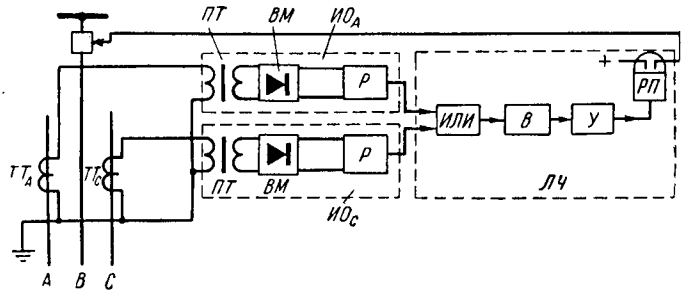


Рис. П-1. Структурная схема максимальной защиты на полупроводниках.

работающего в релейном режиме (триггера). Вторичный ток $I_в$ (рис. П-2) трансформаторов тока поступает в промежуточный трансформатор *ПТ*, который уменьшает его до допустимого для элементов схемы значения. С помощью выпрямителя *В* вторичный ток трансформатора *ПТ* $I'_в$ выпрямляется и подводится на вход (точка *М*) релейного элемента *Р* типа ЭТ-ФО5. При токе в линии $I_л > I_{с.з}$ на выходе релейного элемента *Р* появляется напряжение $U_р$, которое воздействует на элемент времени *В* типа ЭТ-ВО6. Этот элемент является конденсаторным реле времени, создающим необходимую выдержку времени защиты. Элемент времени *В* работает при действии любого из двух реле *Р* и связан с ними с помощью схемы ИЛИ. По истечении установленной выдержки времени на выходе *В* появляется напряжение, которое подводится на вход однокаскадного усилителя *У*

типа Т-402. Последний усиливает сигнал, полученный от *В*, и замыкает цепь выходного промежуточного реле *РП*. Реле *РП* срабатывает и подает импульс на отключение защищаемой линии.

Полные схемы измерительного органа и логической части защиты показаны на рис. П-2 и П-3. Питание электродов транзисторов в каждом элементе этих схем (*Р*, *В*, *У*) осуществляется от специальных шинок (+), (—) и (0), на которые подается стабилизированное напряжение от блока питания, не показанного на схеме. Потенциал шинки (+) равен +6 *в*, шинки (—) —12 *в* и шинки (0) — нулю.

Рассмотрим схему измерительного органа и логической части и покажем, что устройство в целом действует как максимальная токовая защита.

Измерительный орган (рис. П-2). Как уже было отмечено, ток линии $I_л$ трансформируется с помощью трансформаторов тока *ТТ* и промежуточного трансформатора *ПТ*, выпрямляется выпрямительным мостом *ВМ* и подводится на вход (в точку *М*) релейного элемента *Р*. Релейный элемент является реагирующим элементом измерительного органа; он представляет собой трехкаскадный усилитель постоянного тока с положительной обратной связью. Обратная связь обеспечивает

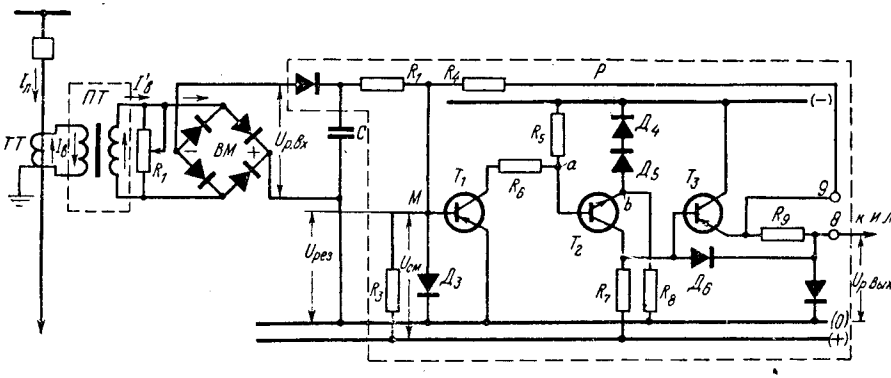


Рис. П-2. Измерительный орган защиты (Р).

лавинообразный процесс нарастания выходного напряжения (сигнала) $U_{р.вых}$, т. е. скачкообразное его изменение, при появлении входного сигнала $U_{р.вх}$ больше определенного значения, которое можно назвать напряжением срабатывания реле $U_{с.р}$.

Как видно из рис. П-2, на базу триода T_1 (точку *М*) через сопротивление R_3 подается положительное напряжение смещения $U_{см}$, а через сопротивление R_1 — напряжение $U_{р.вх}$, получаемое с зажимов выпрямителя *ВМ*. Результирующее напряжение на базе *Т* равно:

$$U_{рез} = U_{см} - U_{р.вх}. \qquad (П\text{-}1)$$

Напряжение $U_{см}$ = пост., поэтому знак и величина $U_{рез}$ зависят от величины $U_{р.вх}$, которое определяется током $I_л$. Пограничным условием начала работы элемента *Р*, а следовательно, и измерительного органа является равенство $U_{р.вх} = U_{см}$, чему соответствует определенная величина тока $I_л$. Этот ток является током срабатывания защиты $I_{с.з}$. При $I_л < I_{с.з}$ напряжение $U_{рез}$ на базе транзистора T_1 имеет (согласно (П-1)) положительный знак, при этом триод T_1 закрыт, а его коллектор и точка *а*, к которой подключена база T_2, имеют отрицательный потенциал — 12 *в*. Триод T_2 представляет собой транзистор типа *n-p-n*. Как известно, такой транзистор открывается при положительном смещении и закрывается при отрицательном. Следовательно, при закрытом триоде T_1 триод T_2 также закрыт, так как потенциал точки *а* (базы T_2) ниже потенциала точки *b* (эмиттера T_2) на величину падения напряжения в сопротивлениях диодов $Д_4$ и $Д_5$, по которым проходит ток цепи, образованной сопротивлением *R* и рассматриваемыми диодами. При закрытом триоде T_2 на базу триода T_3 подается положи-

тельное напряжение смещения через сопротивление R_7, которое при закрытом триоде T_2 равно 6 *в*, если пренебречь сопротивлением открытых диодов $Д_6$ и $Д_7$. При этих условиях триод T_3 закрыт, а напряжение на выходе элемента *Р* в точке *8* $U_{Рвых} = 0$, так как эта точка связана с нулевой шинкой открытым диодом $Д_7$. *Из сказанного следует, что при* $I_л < I_{с.з}$ *выходной сигнал измерительного органа равен нулю, это означает, что измерительный орган не действует.*

При появлении тока $I_л > I_{с.з}$ напряжение $U_{рез}$ на базе триода T_1 изменяет знак на отрицательный и триод T_1 начинает открываться. Открытие триода T_1 вызывает появление положительного потенциала на базе триода T_2. Последний открывается и подает на базу T_3 отрицательный потенциал, триод T_3 начинает открываться, при этом потенциал точки *9* меняется. Он становится по мере уменьшения сопротивления триода T_3 более отрицательным, приближаясь к —12 *в*. По обратной связи с зажима *9* через сопротивление R_4 на базу T_1 дается дополнительный ток, способствующий открытию T_1, T_2 и T_3. Процесс носит лавинообразный характер. При полном открытии всех триодов на выходе *8* появляется отрицательный сигнал $U_{Рвых} = -12$ *в*, это означает, что реагирующий

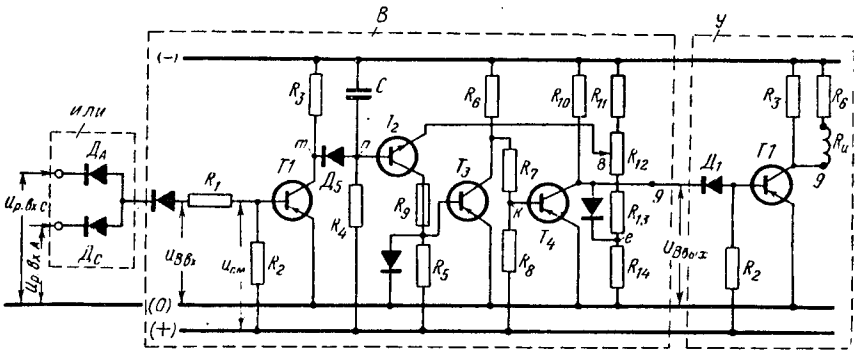


Рис. П-3. Логическая часть защиты (ИЛИ, В и У).

элемент *Р* измерительного органа сработал. *Сказанное показывает, что рассмотренный измерительный орган ведет себя как реле максимального тока.* Регулирование $I_{с.з}$ приводится с помощью делителя R_1. Выходной сигнал с зажима *8* измерительного элемента подается на схему ИЛИ.

Логическая часть защиты (рис. П-3). Все элементы логической части (ИЛИ, В, У) питаются так же, как и измерительный орган от трех шинок (—), (+) и (0), имеющих те же потенциалы (—12 *в*, +6 *в*, 0 *в*).

Элемент ИЛИ образуется двумя диодами $Д_A$ и $Д_C$, с выхода которых сигнал поступает через диод *Д* и сопротивление R_1 на вход элемента времени *В* (базу триода T_1).

Элемент времени имеет четыре триода: T_1, T_3, T_4 типа *р-п-р* и T_2 типа *п-р-п*. Для создания выдержки времени служит конденсатор *С*. При отсутствии выходного сигнала на измерительном органе сигнал на входе элемента времени $U_{Bвх} = 0$. В этом случае триод T_1 закрыт, так как по сопротивлению R_2 на базу T_1 подается смещение $U_{см} = +6$ *в*. Сопротивление $R_4 \geqslant R_3$ (в 100 раз), поэтому напряжение на конденсаторе *С*, равное падению напряжения на R_3, при закрытом триоде T_1 будет близко к нулю, вследствие чего конденсатор *С* разряжен. Как видно из схемы, база триода T_2 (триод типа *п-р-п*) имеет отрицательное смещение, поэтому триод T_2 закрыт. На базу T_3 по сопротивлению R_5 подается смещение +6 *в*, поэтому T_3 также закрыт. По делителю, образованному сопротивлениями R_6, R_7, R_8, на базу транзистора T_4 подается отрицательный сигнал ($\approx -2{,}35$ *в*). Триод T_4 открыт и подает на зажим *9*, являющийся выходом элемента *В*, потенциал нулевой шинки, который равен нулю. В результате этого напряжение $U_{Bвых} = 0$,

т. е. выходной сигнал отсутствует. Таким образом, при отсутствии входного сигнала элемент *В* не работает.

У с и л и т е л ь (*У*). Потенциал с выхода *9* элемента *В* подается на усилитель *У*. При нулевом потенциале на входе усилителя база триода T_1 имеет положительное смещение $+6$ *в* по сопротивлению R_2 и он закрыт. При этом цепь катушки выходного реле *РП* разомкнута и реле не работает.

После срабатывания измерительного органа фазы *А* или *С* или обоих вместе на выходе элемента ИЛИ появляется сигнал отрицательного знака —12 *в*, поступающий на вход элемента времени *В*, на базу триода T_1 этого элемента. Результирующее напряжение на базе T_1 в этом случае равно разности $U_{см} - U_{Bвх}$ и имеет отрицательный знак, так как $U_{Bвх} > U_{см}$. При отрицательном напряжении на базе триод T_1 открывается. После открытия T_1 потенциал точки *m* становится больше потенциала точки *n* и диод $Д_5$ закрывается. Под действием разности напряжения (18 *в*) между шинками (+) и (—) конденсатор *С* начинает заряжаться. Зарядный ток проходит по контуру R_4C. Через время *t*, определяемое постоянной $T = 1/R_4C$, потенциал базы T_2 (точки *n*) сравняется с потенциалом зажима *8*. Тогда триод T_2 открывается и на базе T_3 возникает отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал. Триод T_3 открывается, подавая в точку *К* потенциал нулевой шины (0). При этом база триода T_4 получает положительный потенциал и закрывается. На выходе элемента *В* (зажим *9*) появляется отрицательный сигнал через диод $Д_4$, получаемый с точки *l* делителя $R_{11} — R_{12} — R_{13} — R_{14}$. Отрицательный сигнал с зажима *9* элемента *В* поступает на вход усилителя *У*. Триод усилителя T_1 открывается, замыкая цепь выходного реле *РП*, последнее срабатывает и посылает импульс на отключение. После отключения защищаемой линии ток $I_л$ пропадает и все триоды схемы возвращаются в первоначальное состояние, в связи с чем выходные сигналы элементов *Р*, *В* и *У* становятся равными нулю, ток в реле *РП* исчезает и оно прекращает свою работу. Регулирование времени действия элемента *В* осуществляется изменением емкости конденсатора *С* и сопротивления R_4.

Из приведенного анализа работы схем измерительного органа и логической части следует вывод, что защита реагирует на величину тока и срабатывает при токе $I_л > I_{с.з}$ с заданной выдержкой времени, т. е. ведет себя как токовая максимальная защита с независимой характеристикой.

Для удобства промышленного производства и эксплуатации рассмотренная схема максимальной защиты выполняется в виде единого блока, называемого по терминологии, принятой в электронной технике, м о д у л е м. Все элементы схемы: транзисторы, диоды, сопротивления, конденсаторы — размещаются на платах с печатным монтажом и заливаются эпоксидным компаундом, защищающим элементы модуля от повреждения. В случае появления неисправностей модуль заменяется новым. Подобные схемы находятся в эксплуатации и работают достаточно надежно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок, изд. 4-е, изд-во «Энергия», 1965.
2. Руководящие указания по релейной защите, вып.1. Защита генераторов, работающих на сборные шины, Госэнергоиздат, 1961.
3. Руководящие указания по релейной защите, вып. 2. Ступенчатая токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110—220 *кв*, Госэнергоиздат, 1961.
4. Руководящие указания по релейной защите, вып. 3. Защита шин 6—220 *кв* станций и подстанций, Госэнергоиздат, 1961.
5. Руководящие указания по релейной защите, вып. 4. Защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов, Госэнергоиздат, 1962.
6. Руководящие указания по релейной защите, вып. 5. Защита блоков генератор — трансформатор и генератор — автотрансформатор, Госэнергоиздат, 1963.
7. ГОСТ 7524-62. Обозначения условные графические для электрических схем, Изд-во стандартов, 1965.
8. Сыромятников И. А., Преимущества применения переменного оперативного тока, «Электрические станции», 1954, № 1.
9. Ступель Ф. А., Электромеханические реле, изд. Харьковского университета, 1956.
10. Беркович М. А., Вавин В. Н. и др., Справочник по релейной защите, Госэнергоиздат, 1963.
11. Овчинников В. В., Электромагнитные реле тока и напряжения, изд-во «Энергия», 1965.
12. Елфимов В. М., Реле направления мощности, изд-во «Энергия», 1966.
13. Федосеев А. М., Основы релейной защиты, Госэнергоиздат, 1961.
14. Дыкин А. В., Электронные и полупроводниковые приборы, изд-во «Энергия», 1965.
15. Федотов Я. А., Основы физики полупроводниковых приборов, изд-во «Советское радио», 1963.
16. Каганов И. Л., Промышленная электроника, Госэнергоиздат, 1961.
17. Полупроводники в технике релейной защиты, книги 1 и 2, НТОЭП, 1968.
18. Применение полупроводников в устройствах релейной защиты и системной автоматики, под ред. И. И. Соловьева и А. М. Федосеева, изд-во «Высшая школа», 1962.
19. Барзилович В. М., Высоковольтные трансформаторы тока, изд. 2-е, Госэнергоиздат, 1962.
20. Бачурин Н. И., Трансформаторы тока, изд-во «Энергия», 1964.
21. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты, Госэнергоиздат, 1960.
22. Авербух А. М. и Рыбак Х. А., Задачи по релейной защите и методы их решения, Госэнергоиздат, 1961.

23. Атабеков Г. И., Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей, Госэнергоиздат, 1957.
24. Голембиовский П. С., Гресь И. М., Малаховский Е. И., Мельник П. М., Синельников В. Я., Релейная защита и устройства автоматики на переменном оперативном токе, изд-во «Техника», Киев, 1964.
25. Опыт наладки релейной защиты на переменном оперативном токе в Мосэнерго, Госэнергоиздат, 1963.
26. Кожин А. И., Релейная защита линий 3—10 *кв* на переменном оперативном токе, Госэнергоиздат, 1960.
27. Беркович М. А. и Семенов В. С., Основы техники и эксплуатации релейной защиты, изд. 4-е, изд-во «Энергия», 1965.
28. Наладка и эксплуатация блоков питания серий БП, изд-во «Энергия», 1964.
29 Мансуров Н. Н., Попов В. С., Теоретическая электротехника, изд-во «Энергия», 1965.
30. Плетнев Л. Ф., Реле прямого действия, их наладка и проверка, Госэнергоиздат, 1961.
31 Беркович М. А. и Семенов В. А., Основы автоматики энергосистем, изд-во «Энергия», 1968.
32. Ульянов С. А., Электромагнитные переходные процессы в электрических системах, изд-во «Энергия», 1964.
33. Барзам А. Б., Общие вопросы учебного проектирования релейной защиты и автоматики, изд-во «Энергия», 1969.
34. Электрические сети и станции, под ред. Л. Н. Баптиданова, Госэнергоиздат, 1963.
35. Воскресенский А. А., Токи небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока, «Электрические станции», 1950, № 2.
36. Лихачев Ф. А., Выбор, установка и эксплуатация дугогасящих аппаратов, Госэнергоиздат, 1955.
37. Сирота И. М., Защита от замыканий на землю в электрических системах, Изд-во АН УССР, 1955.
38. Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях, Сб. статей под ред. В. И. Иоэльсона, Госэнергоиздат, 1962.
39. Дарченко В. Е., Степнов Т. В., Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях, «Электричество», 1956, № 2.
40. Кискачи В. М., Селективная чувствительная защита от замыканий на землю в сетях с малыми емкостными токами типа ЗЗП-1, «Электрические станции», 1966, № 3.
41. Попов И. Н., Чувствительное магнитное (бесконтактное) реле защиты, Труды ЦНИЭЛ, вып.1, Госэнергоиздат, 1953.
42. Андреев В. А., Фабрикант В. Л., Релейная защита распределительных электрических сетей, изд-во «Высшая школа», 1965.
43. Руководящие указания по наладке, проверке и эксплуатации продольной дифференциальной защиты линий типа ДЗЛ, Госэнергоиздат, 1962.
44. Гаевенко Ю. А., Новые типы дистанционных защит линий электропередач, Госэнергоиздат, 1955.
45. Гаевенко Ю. А., Новые реле защиты на полупроводниках, Государственное издательство технической литературы УССР, 1962.
46. Атабеков Г. И., Применение магнитоэлектрических и поляризованных реле в схемах релейной защиты, «Электричество», 1956, № 7.
47. Левиуш А. И., Сапир Е. Д., Полупроводниковые реле сопротивления с эллиптической характеристикой срабатывания, «Электричество», 1962, № 5.
48. Альтшуллер В. А., Карцев В. Л., Мурашко Н. В., Петров С. Я., Трехступенчатая дистанционная защита, «Электрические станции», 1964, № 8.
49. Инструкция по наладке и проверке дистанционной защиты типа ПЗ-153, Госэнергоиздат, 1959.

50. Савостьянов А. И., Реле сопротивления КРС-131, КРС-132, изд-во «Энергия», 1969.
51. Мамонтов О. В., Методы кибернетики в теории электронных защит, 1962.
52. Гельман Г. А., Соскин Э. А., Бесконтактные элементы в схемах и устройствах автоматики, изд-во «Энергия», 1966.
53. Васильева Н. П. и Гашковец И., Логические элементы в промышленной автоматике, Госэнергоиздат, 1962.
54. Гиршберг В. В., Кутлер Н. П. и др., Транзисторные логические и функциональные элементы единой серии ЭТ для систем промышленной автоматики, «Электротехника», 1965, № 4.
55. Труды ЦНИЭЛ, вып. 1, Госэнергоиздат, 1953.
56. Труды ВНИИЭ, вып. XVI, Госэнергоиздат, 1963.
57. Руководящие указания по наладке, проверке и эксплуатации релейной части дифференциально-фазной высокочастотной защиты типа ДФЗ-2, Госэнергоиздат, 1957.
58. Микуцкий Г. В., Высокочастотные каналы релейной защиты, Госэнергоиздат, 1959.
59. Дальние электропередачи 500 *кв*, Сб. статей под ред. А. М. Некрасова и С. С. Рокотяна, изд-во «Энергия», 1964.
60. Кочетов В. В., Сапир Е. Д., Якубсон Г. Г., Наладка и эксплуатация релейной части дифференциально-фазных высокочастотных защит линий 400—500 *кв*, Госэнергоиздат, 1962.
61. Труды ЦНИЭЛ, вып. 2, Госэнергоиздат, 1954.
62. Голубев М. Л., Релейная защита и автоматика подстанций с короткозамыкателями и отделителями, изд-во «Энергия», 1965.
63. Гогичайшвили П. Ф., Подстанции без выключателей на высшем напряжении, изд-во «Высшая школа», 1965.
64. Дорофеев В. И., Дифференциально-фазная высокочастотная и дифференциальная продольная защита на линиях с ответвлениями, «Электрические станции», 1960, № 7.
65. Дроздов А. Д., Насыщающиеся трансформаторы тока с короткозамкнутыми витками для релейной защиты, «Электричество», 1953, № 10.
66. Дроздов А. Д., Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите, изд-во «Энергия», 1965.
67. Царев М. И., Применение реле с быстронасыщающимися трансформаторами в дифференциальных защитах, «Электрические станции», 1948, № 8.
68. Инструкция по наладке, проверке и эксплуатации дифференциальных реле типов РНТ-562 и РНТ-563, Госэнергоиздат, 1963.
69. Костров М. Ф., Соловьев И. И., Федосеев А. М., Основы техники релейной защиты, Госэнергоиздат, 1944.
70. Федосеев А. М., Релейная защита электрических систем, Госэнергоиздат, 1952.
71. Смертин Н. Т., Багинский Л. В., Хомутов Б. А., К вопросу о защите мощных турбогенераторов от токов обратной последовательности, «Электрические станции», 1964, № 8.
72. Инструкция по проверке реле серии ДЗТ с магнитным торможением, изд-во «Энергия», 1965.
73. Грек Г. Т. и Рибель Н. Е., Защита от замыканий на корпус в электрических установках, «Электрические станции», 1960, № 10.
74. Булитко Д. Д., Накладные трансформаторы тока, «Электрические станции», 1957, № 8.
75. Сыромятников И. А., Режимы работы асинхронных двигателей, Госэнергоиздат, 1950.
76. Коваленский И. В., Релейная защита электродвигателей высокого напряжения, изд-во «Энергия», 1964.
77. Иржи Берман, Дифференциально-фазная защита шин в Чехословакии, «Электрические станции», 1960, № 10.
78. Госвияни Б. И. и Долидзе Г. Ф., Дифференциально-фазная защита сборных шин, «Электрические станции», 1961, № 4.

79. Соколик Л. И., Дифференциально-фазная защита шин, «Электрические станции», 1966, № 2.
80. Гельфанд Я. С., Голубев М. Л., Царев М. И., Релейная защита и электроавтоматика на переменном оперативном токе, изд-во «Энергия», 1966.
81. Руководящие указания по релейной защите, вып. 7, Дистанционная защита линий 35—330 *кв*, изд-во «Энергия», 1966.
82. Гиршберг В. В. и др., Единая серия полупроводниковых логических и функциональных элементов (ЭТ), изд-во «Энергия», 1966.
83. Барзам А. Б., Системная автоматика, изд-во «Энергия», 1964.
84. Семенов В. А., О возможности повышения чувствительности продольной дифференциальной защиты генераторов, «Электрические станции», 1958, № 6.
85. Инструкция по наладке и проверке релейной части дифференциально-фазной высокочастотной защиты ДФЗ-2, изд-во «Энергия», 1966.
86. Релейная защита и автоматика энергосистем, изд-во «Энергия», 1966.
87. Фабрикант В. Л., Глухов В. П., Паперно Л. Б., Элементы устройств релейной защиты и автоматики энергосистем и их проектирование, изд-во «Высшая школа», 1968.
88. Казанский В. Е., Трансформаторы тока в схемах релейной защиты, изд-во «Энергия», 1969.
89. Вавин В. Н., Трансформаторы тока, изд-во «Энергия», 1966.
90. Вавин В. Н., Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи, изд-во «Энергия», 1967.
91. Кожин А. Н., Рубинчик В. А., Релейная защита линий с ответвлениями, изд-во «Энергия», 1967.
92. Гусев В. С., Соколова Р. Н., Блокировка защит линий 330—750 *кв* при нарушениях в цепях напряжения, «Электрические станции», 1967, № 6.
93. Федосеев М. А., Вопросы защиты мощных синхронных генераторов от сверхтоков при несимметричных режимах, Труды ВНИИЭ, вып. XXVI, изд-во «Энергия», 1966.
94. Лысенко Е. В., Токовая защита обратной последовательности для мощных генераторов, сб. статей «Опыт эксплуатации релейной защиты и электроавтоматики в энергосистемах», вып. 1, изд-во «Энергия», 1968.
95. Атабеков Г. И., Основы теории цепей, изд-во «Энергия», 1969.
96. Карцев В. Л., Дистанционная защита для линий 110—330 *кв* с использованием магнитоэлектрических реле, сб. статей «Опыт эксплуатации релейной защиты и электроавтоматики в энергосистемах», вып. 1, изд-во «Энергия», 1968.
97. Федорова М. Ф., Дистанционные защиты с магнитоэлектрическим реле для сетей с малым током замыкания на землю, сб. статей «Опыт эксплуатации релейной защиты и электроавтоматики в энергосистемах», вып. 1, изд-во «Энергия», 1968.
98. Коковин В. Е., Фильтры симметричных составляющих в релейной защите, изд-во «Энергия», 1968.
99. Руководящие указания по релейной защите, вып. 6, изд-во «Энергия», 1966.
100. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей, изд-во «Энергия», 1968.
101. Какуевицкий Л. И. и др., Справочник релейной защиты и автоматики, изд-во «Энергия», 1968.
102. Голубев М. Л., Расчет уставок релейной защиты и предохранителей, изд-во «Энергия», 1969.
103. Эксплуатационный циркуляр № Э-11/65, издание БТИ ОРГРЭС, 1966.
104. Грек Г. Т. и Петров С. Я., Дифференциальная защита шин с торможением, «Электричество», 1970, № 10.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

Глава первая. **Общие понятия о релейной защите** 5

1-1. Назначение релейной защиты 5
1-2. Повреждения в электроустановках. 6
1-3. Ненормальные режимы 10
1-4. Основные требования, предъявляемые к релейной защите . . . 11
1-5. Элементы защиты, реле и их разновидности 15
1-6. Способы изображения реле и схем защиты на чертежах 17
1-7. Способы включения реле 18
1-8. Способы воздействия защиты на выключатель 18
1-9. Источники оперативного тока 20

Глава вторая. **Реле** 27

2-1. Общие принципы выполнения реле 27
2-2. Электромеханические реле 28
2-3. Электромагнитные реле 28
2-4. Электромагнитные реле тока и напряжения 36
2-5. Электромагнитные промежуточные реле 38
2-6. Указательные реле 43
2-7. Реле времени 44
2-8. Поляризованные реле 47
2-9. Индукционные реле 49
2-10. Индукционные реле тока и напряжения 52
2-11. Токовое индукционное реле серии РТ-80 и РТ-90 56
2-12. Индукционные реле направления мощности 58
2-13. Магнитоэлектрические реле 64
2-14. Реле с использованием полупроводников 66
2-15. Реле на выпрямленном токе, реагирующие на одну электрическую величину 67
2-16. Реле на сравнении абсолютных значений двух напряжений U_I и U_{II} 70
2-17. Реле на непосредственном сравнении фаз двух электрических величин U_I и U_{II} 80

Глава третья. **Трансформаторы тока и схемы их соединений** 92

3-1. Погрешности трансформатора тока 92
3-2. Параметры, влияющие на уменьшение намагничивающего тока 94
3-3. Требования к точности трансформаторов тока и их выбор 96
3-4. Обозначение выводов 99

3-5. Изображение векторов вторичных токов 100
3-6. Типовые схемы соединений трансформаторов тока 101
3-7. Нагрузка трансформаторов тока 111
3-8. Фильтры симметричных составляющих токов 113

Глава четвертая. **Максимальная токовая защита** 117

4-1. Принцип действия токовых защит 117
4-2. Защита линий с помощью максимальной токовой защиты . . 117
4-3. Схемы защиты 118
4-4. Поведение максимальной защиты при двойных замыканиях на землю 123
4-5. Ток срабатывания защиты 125
4-6. Выдержка времени защиты 128
4-7. Максимальная токовая защита с пуском (блокировкой) от реле минимального напряжения 130
4-8. Максимальные защиты на переменном оперативном токе . . . 133
4-9. Максимальная защита с реле прямого действия 145
4-10. Общая оценка и область применения максимальной токовой защиты 147

Глава пятая. **Токовые отсечки** 147

5-1. Принцип действия токовых отсечек 147
5-2. Схемы отсечек 148
5-3. Отсечки мгновенного действия на линиях с односторонним питанием 149
5-4. Неселективные отсечки 151
5-5. Отсечки на линиях с двусторонним питанием 152
5-6. Отсечки с выдержкой времени 153
5-7. Токовая трехступенчатая защита 154
5-8. Оценка токовых отсечек 155

Глава шестая. **Трансформаторы напряжения и схемы их соединений** 155

6-1. Основные сведения 155
6-2. Погрешности трансформатора напряжения 156
6-3. Схемы соединений трансформаторов напряжения. 158
6-4. Повреждения в цепях трансформаторов напряжения и контроль за их исправностью 163
6-5. Емкостные делители напряжения 168
6-6. Фильтр напряжения обратной последовательности. 169

Глава седьмая. **Токовая направленная защита** 172

7-1. Необходимость направленной защиты в сетях с двусторонним питанием 172
7-2. Схема и принцип действия токовой направленной защиты . . 175
7-3. Схемы включения реле направления мощности 176
7-4. Поведение реле мощности, включенных на ток неповрежденной фазы 180
7-5. Блокировка максимальной направленной защиты при замыканиях на землю 183
7-6. Выбор уставок защиты 184
7-7. Мертвая зона 186
7-8. Токовые направленные отсечки 188
7-9. Краткая оценка токовых направленных защит 189

Глава восьмая. **Защита от замыканий на землю в сети с большим током замыкания на землю** 189

8-1. Общие сведения 189
8-2. Максимальная токовая защита нулевой последовательности 193

8-3. Токовые направленные защиты нулевой последовательности 197
8-4. Отсечки нулевой последовательности 203
8-5. Ступенчатая защита нулевой последовательности 208
8-6. Питание поляризующей обмотки реле мощности нулевой последовательности от трансформаторов тока 209
8-7. Оценка и область применения защиты 210

Глава девятая. **Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю** 211
9-1. Токи и напряжения при однофазном замыкании на землю . . 211
9-2. Основные требования к защите 216
9-3. Принципы выполнения защиты от замыканий на землю 217
9-4. Защиты, реагирующие на искусственно созданные токи нулевой последовательности 218
9-5. Защиты, реагирующие на остаточные токи компенсированной сети 228
9-6. Защиты, реагирующие на токи неустановившегося режима . . 229

Глава десятая. **Дифференциальная защита линий** 232
10-1. Назначение и виды дифференциальных защит 232
10-2. Принцип действия продольной дифференциальной защиты 232
10-3. Токи небаланса в дифференциальной защите 236
10-4. Общие принципы выполнения дифференциальной защиты линий 240
10-5. Устройство контроля исправности соединительных проводов 246
10-6. Продольная дифференциальная защита линий типа ДЗЛ 248
10-7. Оценка продольной дифференциальной защиты 254
10-8. Принцип действия и виды поперечных дифференциальных защит параллельных линий 254
10-9. Токовая поперечная дифференциальная защита 255
10-10. Направленная поперечная дифференциальная защита 258
10-11. Направленная поперечная дифференциальная защита нулевой последовательности 268
10-12. Направленная поперечная дифференциальная защита с раздельными комплектами от междуфазных и однофазных к. з. 269
10-13. Способы повышения чувствительности пусковых органов поперечной дифференциальной защиты. 270
10-14. Оценка направленных поперечных дифференциальных защит 271
10-15. Токовая балансная защита 271

Глава одиннадцатая. **Дистанционная защита**. 271
11-1. Назначение и принцип действия 271
11-2. Характеристики выдержки времени дистанционных защит 273
11-3. Элементы дистанционной защиты и их взаимодействие 274
11-4. Характеристики срабатывания дистанционных реле и их изображение на комплексной плоскости 276
11-5. Принципы выполнения реле сопротивления и основные требования к их конструкциям 281
11-6. Реле сопротивления на выпрямленном токе, выполняемые с помощью полупроводниковых приборов 282
11-7. Электромеханические реле сопротивления 295
11-8. Точность работы реле сопротивления и ток точной работы 306
11-9. Дистанционные органы защиты 307
11-10. Упрощенные схемы с уменьшенным числом дистанционных органов 313
11-11. Причины, искажающие работу дистанционных органов . . . 316
11-12. Пусковые органы дистанционной защиты 319
11-13. Схемы дистанционных защит 325
11-14. Схемы защит на полупроводниках 328
11-15. Выбор уставок дистанционной защиты 346
11-16. Краткие выводы 352

Глава двенадцатая. **Высокочастотные защиты** 353

12-1. Назначение и виды высокочастотных защит 353
12-2. Принцип действия направленной защиты с высокочастотной блокировкой 354
12-3. Высокочастотная часть защиты 356
12-4. Направленная защита с высокочастотной блокировкой 359
12-5. Разновидности направленных высокочастотных защит и их схемы 363
12-6. Дифференциально-фазная высокочастотная защита 368
12-7. Дифференциально-фазная высокочастотная защита типа ДФЗ-2 373
12-8. Выбор уставок дифференциально-фазной высокочастотной защиты 381
12-9. Оценка высокочастотных защит 384

Глава тринадцатая. **Предотвращение неправильных действий защиты при качаниях** 385

13-1. Характер изменения тока, напряжения и сопротивления на зажимах реле при качаниях 385
13-2. Поведение защиты при качаниях 388
13-3. Меры по предотвращению неправильных действий защиты при качаниях 390
13-4. Устройство блокировки защиты при качаниях, реагирующее на ток или напряжение обратной последовательности 391
13-5. Устройство блокировки защиты при качаниях, реагирующее на скорость изменения тока, напряжения или сопротивления 397

Глава четырнадцатая. **Защита линий сверхвысокого напряжения и защита линий с ответвлениями** 399

14-1. Защита линий сверхвысокого напряжения 399
14-2. Защита линий с ответвлениями 409

Глава пятнадцатая. **Защита генераторов** 417

15-1. Повреждения и ненормальные режимы работы генераторов, основные требования к защите генераторов 417
15-2. Защита от междуфазных коротких замыканий в обмотке статора 424
15-3. Защита от замыканий между витками одной фазы 437
15-4. Защита от замыкания обмотки статора на корпус (на землю) 441
15-5. Защита от сверхтоков при внешних к. з. и перегрузках . . . 454
15-6. Защита гидрогенераторов от повышения напряжения 469
15-7. Защита ротора 470
15-8. Полная схема защиты генератора 476
15-9. Защита синхронных компенсаторов 478

Глава шестнадцатая. **Защита трансформаторов и автотрансформаторов** 481

16-1. Повреждения и ненормальные режимы работы трансформаторов и автотрансформаторов, виды защит и требования к ним 481
16-2. Защита от сверхтоков при внешних коротких замыканиях 485
16-3. Защита от перегрузки 497
16-4. Токовая отсечка 499
16-5. Дифференциальная защита 501
16-6. Токи небаланса в дифференциальной защите трансформаторов и автотрансформаторов 506
16-7. Токи намагничивания силовых трансформаторов при включении под напряжение 510
16-8. Схемы дифференциальных защит 512
16-9. Краткая оценка дифференциальных защит трансформаторов 525

16-10. Газовая защита трансформаторов 525
16-11. Токовая защита от замыканий на корпус (кожух) трансформатора 531
16-12. Особенности защиты трансформаторов без выключателей на стороне высшего напряжения 532
16-13. Защита вольтодобавочных регулировочных трансформаторов 540

Глава семнадцатая. **Защита блоков генератор—трансформатор и генератор—трансформатор—линия** 543

17-1. Особенности защиты блоков 543
17-2. Защита блока генератор—трансформатор 545
17-3. Особенности защиты блоков генератор—трансформатор—линия 558

Глава восемнадцатая. **Защита электродвигателей** 559

18-1. Общие требования к защите электродвигателей 559
18-2. Основные виды защит, применяемых на электродвигателях 560
18-3. Некоторые свойства асинхронных электродвигателей 561
18-4. Защита электродвигателей от коротких замыканий между фазами 564
18-5. Защита электродвигателей от замыканий одной фазы на землю 567
18-6. Защита электродвигателей от перегрузки 568
18-7. Защита электродвигателей от понижения напряжения 572
18-8. Защита электродвигателей напряжением ниже 1000 *в* 575
18-9. Расчет токов самозапуска электродвигателей и остаточного напряжения на их зажимах 577
18-10. Защита синхронных электродвигателей 580

Глава девятнадцатая. **Защита сборных шин** 584

19-1. Виды защит шин и требования к ним 584
19-2. Дифференциальная защита шин 586
19-3. Мероприятия по повышению надежности дифференциальной защиты шин 588
19-4. Ток срабатывания дифференциальной защиты шин с реле, включенными через БНТ 590
19-5. Разновидности схем дифференциальной защиты шин 591
19-6. Оценка дифференциальной защиты шин и области ее применения 595
19-7. Неполная дифференциальная защита шин 596
19-8. Защита шин при помощи токовой отсечки 597
19-9. Дистанционная защита шин 598
19-10. Защита шин 110—500 *кв* с трансформаторами тока, имеющими повышенную погрешность 598

Глава двадцатая. **Резервирование действия релейной защиты и выключателей** 603

20-1. Необходимость и способы резервирования 603
20-2. Принципы выполнения устройства резервирования отказа выключателей (УРОВ) 607
20-3. Оценка устройств резервирования 610

Приложение. Максимальная токовая защита на полупроводниковых приборах 611

Литература 615

Чернобровов Николай Васильевич
Релейная защита

Редакторы: *М. А. Беркович, И. П. Березина*
Переплет художника *А. М. Кувшинникова*
Технический редактор *Л. М. Фридкин*
Корректор *З. Б. Шлайфер*

Сдано в набор 29/IX 1970 г. Подписано к печати 19/V 1971 г. Т-06282. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 39,0. Уч.-изд. л. 43,1. Тираж 90 000 экз. Цена 1 р. 65 к. Зак. № 1405.

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, г. Ленинград, Гатчинская ул., 26.