Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Амурский государственный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой энергетики
_____Ю.В. Мясоедов
«___»_____2012 г.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ

для специальностей

140203.65 *– Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем*
140204.65 *– Электрические станции*
140205.65 *– Электроэнергетические системы и сети*
140211.65 *– Электроснабжение*

форма обучения: ***очная*** (140203, 140204, 140205, 140211);
заочная (140205, 140211);
заочная ускоренная (140205, 140211).

Составители: А.Н.Козлов, Ю.В. Мясоедов

Благовещенск
2012

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
энергетического факультета
Амурского государственного университета

А. Н. Козлов, Ю.В. Мясоедов
Учебно-методический комплекс по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов очной формы обучения специальностей 140203.65 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», 140204.65 – «Электрические станции», 140205.65 – «Электроэнергетические системы и сети», 140211.65 – «Электроснабжение», а также заочной и заочной ускоренной формы обучения специальностей 140205 – «Электроэнергетические системы и сети» и 140211 – «Электроснабжение». – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2012, 329 с.

Учебно-методические рекомендации ориентированы на оказание помощи студентам очной, заочной и заочной ускоренной форм обучения указанных специальностей для формирования специальных знаний по двум основным модулям:

- модуль «Электромагнитные переходные процессы»: физика электромагнитных переходных процессов в синхронных и асинхронных машинах, трансформаторах, узлах комплексной нагрузки и электроэнергетической системе в целом; умение составлять расчетные схемы и соответствующие схемы замещения по отношению к токам прямой, обратной и нулевой последовательностей и определение параметров различных элементов этих схем разными методами; получение навыков расчетов переходных процессов при трехфазных и несимметричных коротких замыканиях, а также при обрывах фаз;

- модуль «Электромеханические переходные процессы»: основные характеристики режимов электрической системы и соотношения между их параметрами, практические критерии устойчивости, способы анализа динамической и статической устойчивости, переходные процессы и устойчивость в узлах нагрузки; особенности расчета переходных процессов в сложной системе при учете действия регуляторов возбуждения и скорости.

© ФГБОУ ВПО Амурский государственный университет, 2012
© А.Н. Козлов, Ю.В. Мясоедов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4
1. Типовая программа дисциплины 5
1.1. Типовая программа дисциплины для специальности 140204 – «Электрические станции» 5
1.2. Типовая программа дисциплины «Электромеханические переходные процессы» для специальности 140205 – «Электроэнергетические системы и сети» 11
2. Рабочие программы дисциплин 16
2.1. Переходные процессы в электроэнергетических системах (для специальности 140204.65) 16
2.2. Электромеханические переходные процессы (для специальности 140205.65) 44
3. Краткие конспекты лекций 62
3.1. Электромагнитные переходные процессы 62
3.2. Электромеханические переходные процессы 187
4. Методические рекомендации по выполнению курсовых работ 189
4.1. Методические рекомендации по выполнению курсовой работы «Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в электрических сетях энергосистем и энергообъектов» 189
4.2. Методические рекомендации по выполнению курсовой работы «Оценка устойчивости простейшей электроэнергетической системы» 260
5. Самостоятельная работа студентов 260
6. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ 278
7. Перечень программных продуктов, реально используемых в практике деятельности выпускников 295
8. Методические указания по применению современных информационных технологий 296
9. Методические указания по организации межсессионного контроля знаний студентов 296
10 Фонд тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний 297

ВВЕДЕНИЕ

Государственный образовательный стандарт предусматривает изучение переходных процессов в электроэнергетических системах для специальностей 140203, 140204, 140205, 140211 следующим образом:

- для специальности **140204.65** - основная профилирующая дисциплина специализации - «Переходные процессы в электроэнергетических системах» – шифр СД.Ф.01, в которой дидактически выделяются две части: «Электромагнитные переходные процессы» и «Электромеханические переходные процессы»;

- для специальности **140205.65** упомянутые выше две части изучаются как две специальные дисциплины: СД.Ф.01 «Электромагнитные переходные процессы» и СД.Ф.02 «Электромеханические переходные процессы»;

- для специальности **140203.65** – эти же две части изучаются как две основные профилирующие дисциплины специализации: СД.Ф.07 «Электромагнитные переходные процессы» и СД.Ф.08 «Электромеханические переходные процессы»;

- для специальности **140211.65** – эти же две части изучаются как дисциплины специализации: СД.Ф.07 «Электромагнитные переходные процессы» и СД.ДС.Ф.01 «Электромеханические переходные процессы в системах электроснабжения».

Анализ требований Государственных образовательных стандартов и утвержденных Министерством образования и науки России ***Примерных программ*** указанных выше дисциплин для направления подготовки 650900 «Электроэнергетика» показал, что лекции по значительному числу разделов можно прочитать для всех специальностей в общем потоке. Эта возможность была реализована при разработке рабочих учебных планов специальностей – общий блок лекций читается для студентов очной формы обучения:

- по модулю «Электромагнитные переходные процессы» - в шестом семестре в объеме 54 часа;

- по модулю «Электромеханические переходные процессы» - в седьмом семестре в объеме 32 часов.

На этом для специальностей 140203, 140204 и 140211 изучение курса будет завершено, а для специальности 140205 в восьмом семестре предусмотрено продолжение подготовки – лекции по второй части курса в объеме 30 часов.

За основу при компоновке учебно-методического комплекса дисциплины взяты материалы, разработанные для специальности 140205, как наиболее полные.

1. ТИПОВЫЕ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИН

Типовые программы дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах» приведены для специальности 140204, т.к. в этой типовой программе отражены методические материалы по двум частям курса, а также для специальности 140205, т.к. именно для этой специальности, как указывалось во введении, предусмотрено более углубленное изучение дисциплины.

1.1. Типовая программа дисциплины для специальности 140204 – «Электрические станции»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель Департамента образовательных программ и стандартов профессионального образования
_____ Л.С. Гребнев
"____" _____ 2001 г.

ПРИМЕРНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рекомендуется Минобразованием России для направления подготовки 650900- ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА специальности 140204 – «Электрические станции»

1. Цели и задачи дисциплины

Цель дисциплины состоит в том, чтобы дать будущим специалистам в области электроэнергетики теоретические знания и привить практические навыки анализа различных переходных процессов как в энергетической системе в целом, так и в отдельных ее элементах.

Задачей изучения дисциплины является освоение студентами математических моделей различных элементов электроэнергетической системы – синхронных генераторов, асинхронных электродвигателей, трансформаторов и др., - отражающих особенности переходных процессов в этих элементах, методов исследования переходных процессов, практических методов расчета токов короткого замыкания, особенностей расчетов токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях и обрывах фаз, практических критериев устойчивости, способов анализа динамической и статической устойчивости, методов расчета переходных процессов и устойчивости в узлах нагрузки, а также асинхронных режимов.

2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- иметь ясные представления о физике электромагнитных и электромеханических переходных процессов в синхронных и асинхронных машинах, узлах комплексной нагрузки и электроэнергетической системе в целом;
- уметь составлять расчетные схемы и соответствующие схемы замещения по отношению к токам прямой, обратной и нулевой последовательностей и определять параметры различных элементов этих схем разными методами;
- получить навыки расчетов переходных процессов при трехфазных и несимметричных коротких замыканиях, а также при обрывах фаз;
- знать методы анализа статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем, а также основные мероприятия по обеспечению статической, динамической и результирующей устойчивости систем.

3. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры	
Общая трудоемкость дисциплины	280	6	7
Аудиторные занятия	136	6	7
Лекции	68	6	7
Практические занятия (ПЗ)	34	6	7
Лабораторные работы (ЛР)	34	6	7
Самостоятельная работа	144	6	7
Курсовой проект (работа)	40	6	-
Расчетно-графические работы	60	6	7
Подготовка к ПЗ и ЛР	44	6	7
Вид итогового контроля		Зачет Экзамен	Зачет Экзамен

4. Содержание дисциплины

4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№	Раздел дисциплины	Лекции	ПЗ	ЛР
1	Общие сведения об электромагнитных переходных процессах. Составление схем замещения	*	*	
2	Переходные процессы в трехфазных цепях, подключенных к источнику синусоидального напряжения	*	*	*
3	Электромагнитные переходные процессы в электрических машинах	*	*	*
4	Методы расчета тока трехфазного короткого замыкания в начальный и произвольный моменты времени	*	*	
5	Переходные процессы при несимметричных коротких замыканиях и обрывах фаз	*	*	*
6	Статическая устойчивость электрической системы .Практические критерии устойчивости	*	*	*
7	Динамическая устойчивость электрической системы. Способы приближенного решения уравнения движения ротора генератора	*	*	*
8	Метод малых колебаний. Статическая устойчивость с учетом действия регулятора возбуждения	*	*	
9	Переходные процессы в узлах нагрузки системы. Устойчивость узлов нагрузки	*	*	*
10	Понятие результирующей устойчивости. Асинхронный режим. Изменения частоты в электрических системах	*	*	

4.2. Содержание разделов дисциплины

4.2.1. Общие сведения об электромагнитных переходных процессах. Составление схем замещения. Основные понятия. Причины возникновения переходных процессов. Требования к расчетам переходных процессов. Основные допущения, принимаемые при расчетах. Составление схем замещения. Использование системы относительных единиц. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов и сдвоенных реакторов.

4.2.2. Переходные процессы в трехфазных цепях, подключенных к источнику синусоидального напряжения. Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании (КЗ) в цепи без трансформаторов. Ударный ток КЗ. Методы определения ударного коэффициента. Особенности переходного процесса при КЗ в разветвленной цепи. Переходный процесс при включении в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Переходный процесс при КЗ за трансформатором.

4.2.3. Электромагнитные переходные процессы в электрических машинах. Математическая модель синхронной машины, отражающая основные закономерности электромагнитных переходных процессов в машине. Линейные преобразования дифференциальных уравнений переходного процесса. Уравнения Парка-Горева. Переходные процессы в синхронной машине без учета влияния демпферных контуров. Характеристическое уравнение и его корни. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов. Изменение тока якоря при трехфазном КЗ. Влияние системы возбуждения на переходный процесс. Переходные процессы при гашении магнитного поля синхронной машины и неуспешном повторном включении на КЗ. Переходные процессы в синхронной машине с учетом влияния демпферных контуров. Переходные процессы в контурах ротора при разомкнутой обмотке якоря. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов контуров ротора. Влияние на переходный процесс замкнутой обмотки якоря. Особенности переходных процессов в асинхронных машинах.

4.2.4. Методы расчета тока трехфазного короткого замыкания в начальный и произвольный моменты времени. Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины без учета и с учетом влияния демпферных контуров. Влияние асинхронных электродвигателей и комплексных нагрузок в начальный момент КЗ. Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ. Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых и методом спрямленных характеристик. Особенности расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В. Применение ЭВМ для расчета токов КЗ.

4.2.5. Переходные процессы при несимметричных коротких замыканиях и обрывах фаз. Условия, при которых допустимо применение метода симметричных составляющих для анализа несимметричных режимов в трехфазных цепях, содержащих синхронные машины. Параметры электрических машин, трансформаторов (автотрансформаторов), обобщенных нагрузок, воздушных линий электропередач и кабелей по отношению к токам разных последовательностей. Граничные условия и основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений при несимметричных КЗ и обрывах фаз. Векторные диаграммы напряжений и токов при несимметриях разного вида. Учет группы соединения трансформаторов (автотрансформаторов) при определении токов в разных ветвях и напряжений в произвольных точках расчетной схемы. Правило эквивалентности тока прямой последовательности при несимметричных режимах и его использование. Комплексные схемы замещения. Сравнение токов при несимметричных КЗ разного вида.

4.2.6. Статическая устойчивость электрической системы. Практические критерии устойчивости. Уравнение механического движения ротора генератора. Векторная диаграмма простейшей электрической системы. Выражения для мощностей через различные ЭДС генератора. Определение угловых характеристик мощности через собственные и взаимные сопротивления.

4.2.7. Динамическая устойчивость электрической системы. Способы приближенного решения уравнения движения ротора генератора. Динамическая устойчивость. Причины и характер больших возмущений в электроэнергетической системе. Энергетические соотношения, характеризующие движение ротора генератора. Способы площадей, допущения и область применения. Определение предельного угла отключения короткого замыкания. Представление процесса на фазовой плоскости. Численное решение уравнения движения ротора генератора. Метод последовательных интервалов. Влияние демпфирования. Анализ процессов с учетом форсировки возбуждения генератора. Особенности расчета переходных процессов в сложной системе.

4.2.8. Метод малых колебаний. Статическая устойчивость с учетом действия регулятора возбуждения. Математическое описание переходных процессов при анализе статической устойчивости. Метод малых колебаний. Необходимые и достаточные условия статической устойчивости. Статическая устойчивость и малые колебания в нерегулируемой системе. Нарушения устойчивости в виде сползания, самораскачивания и самовозбуждения и способы их подавления. Анализ статической устойчивости простейшей системы с учетом автоматического регулятора возбуждения пропорционального действия и регулятора сильного действия.

4.2.9. Переходные процессы в узлах нагрузки системы. Устойчивость узлов нагрузки. Переходные процессы в узлах нагрузки системы. Статические и динамические характеристики нагрузки. Уравнение движения асинхронного двигателя. Изменение условий статической устойчивости асинхронного двигателя при его работе от источника соизмеримой мощности. Лавина напряжения – причина возникновения и средства подавления. Практические критерии для узлов комплексных нагрузок. Статические характеристики и регулирующие эффекты мощности нагрузок по напряжению. Поведение нагрузки при больших возмущениях. Численное решение уравнения движения ротора асинхронного двигателя при больших возмущениях.

4.2.10. Понятие результирующей устойчивости. Асинхронный режим. Изменения частоты в электрических системах. Причины возникновения асинхронного режима. Понятие результирующей устойчивости. Процесс выпадения из синхронизма, необходимое условие ресинхронизации. Практические способы восстановления синхронного режима. Изменения частоты в электроэнергетических системах. Требования к частоте. Виды регулирования первичных двигателей. Статические характеристики нерегулируемых и регулируемых первичных двигателей. Определение динамических характеристик частоты в системе. Лавина частоты и способы ее предотвращения. Автоматическая частотная разгрузка. Мероприятия по обеспечению требуемого уровня частоты в системе.

5. Лабораторный практикум

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ
1	2	Переходные процессы в трансформаторе при включении в сеть с разомкнутой вторичной обмоткой и при коротком замыкании
2	3	Переходный процесс в синхронной машине без демпферных контуров при отключении и повторном включении на короткого замыкание
3	3	Переходный процесс в синхронной машине с демпферными контурами при коротком замыкании
4	5	Влияние трансформаторов и схем соединения их обмоток на токи нулевой последовательности
5	6	Статическая устойчивость электрической системы
6	7	Динамическая устойчивость электрической системы
7	9	Устойчивость асинхронной нагрузки

6. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

6.1. Рекомендуемая литература

а) основная литература:

Крючков И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: Учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2000.

Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1970.

Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985.

Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях/Под ред. В.А. Строева. М.: Высшая школа, 1999.

Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях. Учебное пособие для вузов /Под ред. В.А. Строева. М.: Знак,1996.

б) дополнительная литература:

1. Методы расчета токов короткого замыкания. Сборник задач/Под ред. И.П. Крючкова. М.: Изд-во МЭИ, 2000.

2. Зуев Э.Н., Строев В.А. Математическое описание элементов электрической системы. Учебное пособие по курсу "Переходные режимы в электрических системах". М.: Изд-во МЭИ, 1983.

3. Ульянов С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах: Учебное пособие для вузов. М.: Энергия, 1968.

6.2. Средства обеспечения освоения дисциплины

Расчетные компьютерные программы GUFAULTS, GUEXPERT, REGIM, MATHCAD.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Специализированные стенды и расчетные столы переменного тока

Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА подготовки инженеров специальности 140204 – «Электрические станции».

Программу составили
Крючков И.П., профессор , МЭИ (ТУ)
Федотова Н.В., доцент , МЭИ (ТУ)

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии по специальности
140204 – «Электрические станции»

Председатель УМК по специальности
140204 – «Электрические станции»
_____ В.А. Старшинов

Программа одобрена на заседании Учебно-методического совета по направлению 650900 – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

от " 15 " декабря 2000 г. Протокол № 3

Председатель совета УМС по
Направлению 650900- ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

_____ В.В. Жуков

Председатель Совета УМО
по образованию в области
энергетики

_____ Е.В. Аметистов

1.2. Типовая программа дисциплины «Электромеханические переходные процессы» для специальности 140205 – «Электроэнергетические системы и сети»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель Департамента образовательных программ и стандартов профессионального образования
_____ Л.С.Гребнев
"_____"_____2001г.

ПРИМЕРНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Рекомендуется Минобразованием России для направления подготовки специалистов 650900 - ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.
Специальность 100200 - Электроэнергетические системы и сети

1. Цели и задачи дисциплины.

Целью изучения дисциплины является получение теоретических и практических навыков анализа переходных электромеханических процессов при малых и больших возмущениях в электрических системах. При этом основное внимание уделяется методам анализа статической и динамической устойчивости и мероприятиям по их обеспечению.

Задачей изучения дисциплины является ознакомление студентов с основными характеристиками режимов электрической системы и соотношениям между их параметрами, практическими критериями устойчивости, способом площадей и методом малых колебаний при анализе динамической и статической устойчивости; ознакомление с особенностями расчетов переходных процессов в сложной системе при учете действия регуляторов возбуждения и скорости, при анализе переходных процессов и устойчивости в узлах нагрузки, а также в асинхронных режимах, возникающих в системе.

2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- получить теоретические знания и иметь ясное представление о физике переходных электромеханических процессов в синхронных и асинхронных машинах, узлах комплексной нагрузки и энергосистемы в целом;
- знать основные допущения и методы анализа статической и динамической устойчивости электрических систем, знать об особенностях протекания электромеханических процессов в системах электроснабжения и в асинхронных режимах;
- иметь практические навыки применения способа площадей и навыки численного интегрирования уравнения движения генератора при анализе динамической устойчивости с учетом различных способов регулирования возбуждения, как для простых, так и для сложных электрических систем; навыки применения метода малых колебаний при анализе статической устойчивости;
- знать теоретическое обоснование классификации основных мероприятий по обеспечению статической, динамической и результирующей устойчивости электрических систем.

3. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов	**Семестр**
Общая трудоемкость дисциплины	180	6
Аудиторные занятия	85	6
Лекции	51	6
Практические занятия (ПЗ)	17	6
Лабораторные работы (ЛР)	17	6
Самостоятельная работа	95	6
Типовой расчет	40	6
Подготовка к ПЗ и ЛР	55	6
Вид итогового контроля		Зачет Экзамен

4. Содержание дисциплины

4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции	ПЗ	ЛР
1	Статическая устойчивость электрической системы; практические критерии устойчивости.	*	*	*
2	Динамическая устойчивость электрической системы; способ площадей; анализ процессов с учетом форсировки возбуждения; способы приближённого решения уравнения движения ротора генератора.	*	*	*

Продолжение таблицы

3	Метод малых колебаний; статическая устойчивость с учетом действия регуляторов возбуждения и скорости.	*	*	
4	Переходные процессы в узлах нагрузки системы, устойчивость узлов нагрузки.	*	*	*
5	Понятие результирующей устойчивости; процесс выпадения генератора из синхронизма, условие ресинхронизации.	*		

4.2. Содержание разделов дисциплины.

4.2.1. Статическая устойчивость электрической системы; практические критерии устойчивости.

Основные понятия и определения электроэнергетических систем (ЭЭС). Классификация режимов ЭЭС и задачи управления ими. Переходные режимы и процессы. Существо электромеханических переходных процессов (ЭМПП). Устойчивость ЭЭС. Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора для анализа ЭМПП. Уравнение переходного процесса в обмотке возбуждения генератора. Уравнение механического движения ротора генератора. Векторная диаграмма простейшей электрической системы. Выражения для мощностей через различные ЭДС генератора. Определение угловых характеристик мощности через собственные и взаимные сопротивления.

4.2.2. Динамическая устойчивость электрической системы; способ площадей; анализ процессов с учетом форсировки возбуждения; способы приближённого решения уравнения движения ротора генератора.

Динамическая устойчивость. Причины и характер больших возмущений в электрической системе. Задачи исследования динамической устойчивости. Допущения, принимаемые при анализе динамической устойчивости. Энергетические соотношения, характеризующие движение ротора генератора. Способ площадей, допущения и область применения. Определение предельного угла отключения короткого замыкания. Представление процесса на фазовой плоскости. Обобщение способа площадей на схему двух станций.

Численное решение уравнения движения ротора генератора. Метод последовательных интервалов. Учет электромагнитных переходных процессов. Влияние демпфирования. Анализ процессов с учетом форсировки возбуждения генератора. Особенности расчета переходных процессов в сложной системе.

4.2.3. Метод малых колебаний; статическая устойчивость с учетом действия регуляторов возбуждения и скорости.

Статическая устойчивость ЭЭС. Задачи и методы исследования. Основные допущения и области применения. Математическое описание переходных процессов при анализе статической устойчивости. Метод малых колебаний. Необходимые и достаточные условия статической устойчивости. Статическая устойчивость и малые колебания в нерегулируемой системе. Нарушения устойчивости в виде сползания, самораскачивания и самовозбуждения и способы их подавления.

Регулирование возбуждения, его задачи. Ручное регулирование возбуждения, его влияние на статическую устойчивость и режимные характеристики ЭЭС. Анализ статической устойчивости простейшей ЭЭС с учетом автоматического регулятора возбуждения (АРВ) пропорционального действия. Статическая устойчивость ЭЭС с АРВ сильного действия.

4.2.4. Переходные процессы в узлах нагрузки системы, устойчивость узлов нагрузки.

Переходные процессы в узлах нагрузки ЭЭС. Задачи исследования. Статические и динамические характеристики нагрузки. Уравнение движения и схема замещения асинхронного двигателя (АД). Практический критерий статической устойчивости АД. Изменение условий статической устойчивости АД при его работе от источника соизмеримой

мощности. Лавина напряжения - причина возникновения и средства подавления. Общие принципы построения практических критериев. Практические критерии для узлов комплексных нагрузок. Статические характеристики и регулирующие эффекты мощности нагрузок по напряжению. Поведение нагрузки при больших возмущениях. Пуск АД, работа при толчкообразной нагрузке на валу, при резких снижениях напряжения на зажимах. Численное решение уравнения движения ротора АД при больших возмущениях. Поведение АД нагрузки при коротких замыканиях.

4.2.5. Понятие результирующей устойчивости; процесс выпадения генератора из синхронизма, условие ресинхронизации.

Асинхронные режимы в ЭЭС. Общая характеристика асинхронных режимов и основные задачи их исследования. Причины возникновения асинхронного режима. Понятие результирующей устойчивости. Процесс выпадения из синхронизма, необходимое условие ресинхронизации. Практические способы восстановления синхронного режима.

Изменения частоты в электроэнергетических системах. Причины и характер изменения частоты. Требования к частоте как к общесистемному показателю качества электроэнергии. Виды регулирования первичных двигателей. Статические характеристики нерегулируемых и регулируемых первичных двигателей в системе. Определение динамических характеристик частоты в системе. Лавина частоты и способы ее предотвращения. Автоматическая частотная разгрузка, мероприятия по обеспечению требуемого уровня частоты в ЭЭС.

Классификация мероприятий по обеспечению устойчивости ЭЭС.

5. Лабораторный практикум.

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ
1	1	Статическая устойчивость электрической системы.
2	2	Динамическая устойчивость электрической системы
3	4	Устойчивость асинхронной нагрузки электрической системы.

6. Учебно-методическое обеспечение дисциплины.

6.1. Рекомендуемая литература.

а) основная литература:

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М: Высшая. школа., 1985.
2. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях/ Под ред. В.А. Строева - М.: Высшая школа, 1999
3. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях. Учебное пособие для вузов. / Под ред. В.А.Строева. - М: Знак, 1996.

б) дополнительная литература:

1. Зуев Э.Н., Строев В.А. Математическое описание элементов электрической системы. Учебное пособие по курсу "Переходные режимы в электрических системах". - М: Изд-во МЭИ, 1983.

6.2. Средства обеспечения освоения дисциплины.

Расчетные компьютерные программы REGIM, MATHCAD.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины.

Специализированные расчетные столы переменного тока.

Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению подготовки специалистов 650900 - ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА специальности 100200 - Электроэнергетические системы и сети.

Программу составила:
Федотова Н.В., доцент, МЭИ (ТУ).

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии по специальности 100200 – Электроэнергетические системы и сети

Председатель Учебно-методического совета по специальности 100200- Электроэнергетические системы и сети

_____ Строев В.А.

Программа одобрена на заседании Учебно-методического совета по направлению 650900 – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
от " 15 "декабря 2000 г. Протокол № 3

Председатель Учебно-методического совета
по направлению 650900 – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

_____ Жуков В.В.

Председатель Совета УМО по образованию в области энергетики

_____ Аметистов Е.В.

2. РАБОЧИЕ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИН

Ниже приведены: рабочая программа дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для специальности 140204, в которой отражены методические материалы по двум частям курса, а также рабочая программа дисциплины «Электромеханические переходные процессы» для специальности 140205, т.к. именно для этой специальности, как указывалось во введении, предусмотрено более углубленное изучение дисциплины.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Переходные процессы в электроэнергетических системах

по специальности ***140204.65 – Электрические станции***

Квалификация (степень) выпускника		***специалист***		
Курс ***3, 4***	Семестр	***6, 7, 8***		
Лекции	Семестр **6**	**54** (час.)	Экзамен	- **6** ***семестр***
	Семестр **7**	**32** (час.)	Экзамен	- **7** ***семестр***
Практические занятия	Семестр **6**	**18** (час.)		
	Семестр **7**	**16** (час.)		
Самостоятельная работа		**100** (час.)		
в том числе	Семестр **6**	**60** (час.)		
	Семестр **7**	**40** (час.)	КСР	**30** (час.)
	Семестр **8**		КСР	**30** (час.)
Общая трудоемкость дисциплины	***280*** (час.),	в т.ч. ауд.	***120*** (час.)	
в том числе семестр 6	***162*** (час.),	в т.ч. ауд.	***72*** (час.)	
семестр 7	***118*** (час.),	в т.ч. ауд.	***48*** (час.)	
Курсовая работа	Семестр **7**			
	Семестр **8**			

Составители ***Ю.В. Мясоедов, профессор, канд. тех. наук***
А.Н. Козлов, доцент, канд. тех. наук

Факультет ***энергетический***

Кафедра ***энергетики***

2012

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах», ***модуль «Электромагнитные переходные процессы»***, являются формирование систематизированных знаний в области переходных процессов как в энергетической системе в целом, так и в отдельных ее элементах, приобретение студентами навыков их расчета при трехфазных и несимметричных коротких замыканиях, а также при обрывах фаз, навыков расчета и анализа переходных режимов электрических систем и узлов нагрузки с учётом действия систем автоматического регулирования и управления.

Эти знания позволят выпускникам успешно решать задачи в профессиональной деятельности, связанной с проектированием и функционированием электрических сетей энергообъектов и энергопредприятий.

Задачи дисциплины:

- освоение студентами математических моделей различных элементов электроэнергетической системы – синхронных генераторов, асинхронных электродвигателей, трансформаторов и др., - отражающих особенности переходных процессов в этих элементах;
- получение знаний в области методов исследования переходных процессов, практических методов расчета токов короткого замыкания;
- изучение методов и алгоритмов расчетов токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях и обрывах фаз, в том числе и с помощью промышленных программно-вычислительных комплексов;
- формирование системных и профессиональных компетенций по расчету переходных процессов и устойчивости в узлах нагрузки, а также асинхронных режимов.

Целью изучения дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах»***, модуль «Электромеханические переходные процессы»*** является получение теоретических и практических навыков анализа переходных электромеханических процессов при малых и больших возмущениях в электрических системах. При этом основное внимание уделяется методам анализа статической и динамической устойчивости и мероприятиям по их обеспечению.

Основными задачами изучения дисциплины является ознакомление студентов с основными характеристиками режимов электрической системы и соотношениям между их параметрами, практическими критериями устойчивости, способом площадей и методом малых колебаний при анализе динамической и статической устойчивости; ознакомление с особенностями расчетов переходных процессов в сложной системе при учете действия регуляторов возбуждения и скорости, при анализе переходных процессов и устойчивости в узлах нагрузки, а также в асинхронных режимах, возникающих в системе.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- получить теоретические знания и иметь ясное представление о физике переходных электромеханических процессов в синхронных и асинхронных машинах, узлах комплексной нагрузки и энергосистемы в целом;
- знать основные допущения и методы анализа статической и динамической устойчивости электрических систем, четко представлять особенности протекания электромеханических процессов в системах электроснабжения и в асинхронных режимах электроэнергетических систем;
- иметь практические навыки применения способа площадей и навыки численного интегрирования уравнения движения генератора при анализе динамической устойчивости с учетом различных способов регулирования возбуждения, как для простых, так и для сложных электрических систем; навыки применения метода малых колебаний при анализе статической устойчивости;

- знать теоретическое обоснование классификации основных мероприятий по обеспечению статической, динамической и результирующей устойчивости электрических систем.

Изучение основ электромеханических переходных процессов базируется на сведениях, излагаемых в дисциплинах «Электрические машины», «Математические задачи энергетики» (раздел «Методы численного интегрирования»), «Электромагнитные переходные процессы».

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО:

Государственный образовательный стандарт предусматривает изучение дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для специальности 140204.65 в качестве основной профилирующей дисциплины специализации – шифр СД.Ф.01.

В рабочем учебном плане дисциплина включат в себя два модуля.

Модуль «Электромагнитные переходные процессы» входит в цикл специальных дисциплин (СД) и относится к блоку дисциплин, формирующих специальные профессиональные знания и компетенции, необходимые при изучении дисциплин «Изоляция и перенапряжения», входящей в цикл ОПД, «Релейная защита и автоматика», «Электрическая часть электростанций и подстанций», «Надежность электроснабжения», «Качество электроэнергии», входящих в циклы СД и ДС, а также при выполнении дипломного проекта.

Материал модуля базируется на курсах цикла общих математических и общенаучных дисциплин (ЕН) «Математика», «Физика», «Математические задачи энергетики», читаемых в 1 – 5 семестрах, курсах «Электроэнергетика», «Теоретические основы электротехники», «Электромеханика», входящих в цикл общепрофессиональных дисциплин (ОПД) и читаемых в 3 – 5 семестрах.

Студенты, обучающиеся по данной дисциплине, должны знать и владеть следующими материалами:

Математика – алгебра, решение систем алгебраических уравнений, дифференциальные и интегральные исчисления, графы, теория функций комплексного переменного, вероятность и статистика;

Физика – электричество и магнетизм, явления сверхпроводимости, полупроводники, принципы неопределенности;

Математические задачи энергетики – методы решения систем линейных и нелинейных уравнений в электроэнергетических задачах, применение теории вероятностей и математической статистики к решению электроэнергетических задач, методы оптимизации;

Теоретические основы электротехники – уравнения электромагнитного поля, законы электрических цепей; трехфазные цепи; теория электромагнитного поля, поверхностный эффект и эффект близости; электромагнитное экранирование;

Электромеханика – типы электрических машин, трансформаторы, автотрансформаторы, их режимы работы, конструкции;

Электроэнергетика – основные сведения об электрических сетях, схемах станций и подстанций, общие сведения об электроэнергетике.

Модуль «Электромеханические переходные процессы».

Базовыми для данного модуля дисциплины являются курсы «Высшая математика» (раздел «Дифференциальное и интегральное исчисление»), «Теоретические основы электротехники», «Электрические машины», «Математические задачи энергетики» (раздел «Методы численного интегрирования»), «Электрические системы и сети» (разделы «Конструкция воздушных и кабельных линий», «Схемы замещения ВЛ и КЛ»), «Электромагнитные переходные процессы».

В свою очередь данная дисциплина является основой для изучения дисциплин «Автоматика электроэнергетических систем», «Оптимизация в электроэнергетических системах», «Эксплуатация электрических систем», «Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения».

2.1 Содержание дисциплины СД.Ф.01 «Переходные процессы в электроэнергетических системах» согласно ГОС ВПО по направлению 650900:

электромагнитные переходные процессы; математическая модель синхронной машины; линейные преобразования дифференциальных уравнений переходного процесса; переходные процессы в синхронной машине при трехфазных коротких замыканиях; переходные процессы при несимметричных коротких замыканиях в трехфазных цепях; расчет токов и напряжений при различных несимметричных коротких замыканиях; комплексные схемы замещения; особенности расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ; электромеханические переходные процессы; простейшая электрическая система и ее схема замещения; динамическая устойчивость; уравнения движения ротора генератора и способы его решения; статическая устойчивость; самораскачивание и самовозбуждение; изменение частоты в системах; переходные процессы в узлах нагрузки; асинхронные режимы в электрических системах.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате освоения ***модуля «Электромагнитные переходные процессы»*** обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1) Знать:

физику электромагнитных переходных процессов в синхронных и асинхронных машинах, трансформаторах, узлах комплексной нагрузки и электроэнергетической системе в целом особые режимы электрических сетей;

методы расчетов токов короткого замыкания (КЗ), токов и напряжений при продольной несимметрии и сложных видах повреждений.

2) Уметь:

составлять расчетные схемы замещения для расчета переходных процессов.

составлять расчетные схемы и соответствующие схемы замещения по отношению к токам прямой, обратной и нулевой последовательностей;

определять параметры различных элементов этих схем разными методами.

3) Владеть навыками:

расчетов переходных процессов при трехфазных и несимметричных коротких замыканиях, а также при обрывах фаз;

практических расчетов различных видов КЗ;

В результате изучения ***модуля «Электромеханические переходные процессы»*** студенты должны:

- **знать** физику переходных электромеханических процессов в синхронных и асинхронных машинах, основные допущения и методы анализа статической и динамической устойчивости электрических систем, теоретическое обоснование классификации основных мероприятий по обеспечению статической, динамической и результирующей устойчивости электрических систем;

- **уметь** применять способ площадей и методы численного интегрирования уравнения движения генератора при анализе динамической устойчивости с учетом различных способов регулирования возбуждения, как для простых, так и для сложных электрических систем;

- **владеть навыками** применения метода малых колебаний при анализе статической устойчивости.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 280 часов.

Модуль «Электромагнитные переходные процессы»

Общая трудоемкость модуля составляет 162 часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Формы текущего контроля успеваемости *(по неделям семестра)* Форма промежуточной аттестации *(по семестрам)*
				ЛК	ПЗ	СРС	
1	Переходные процессы в трехфазных цепях	6	1-8	24	8	22	1,3,5,7 недели – блиц-опрос на лекции; 2,4,6,8 недели – опрос на практике, защита индивидуального домашнего задания
2	Практические методы расчетов коротких замыканий	6	9-12	12	4	18	9, 11 недели - блиц-опрос на лекции; 10, 12 недели - опрос на практике, защита индивидуального домашнего задания; 9 неделя – коллоквиум
3	Поперечная и продольная несимметрии.	6	13-18	18	6	20	12, 14, 16, 18 недели - опрос на практике, защита индивидуального домашнего задания 14 неделя – контрольная работа 13, 15,17 недели – блиц-опрос на лекции
4	Промежуточная аттестация	6 7					Экзамен КП

Примечания: ЛК – лекции, ПЗ – практические занятия, СРС – самостоятельная работа студентов, КП – курсовой проект.

Модуль «Электромеханические переходные процессы»

Общая трудоемкость модуля составляет 118 часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Виды учебной работы				Формы текущего контроля
		Лекции (час.)	Практ. занят. (час.)	Лабор. работы (час.)	СРС (час.)	
Семестр 7						
1	***Раздел 1 «Статическая устойчивость электрической системы»*** 1.1 Введение 1.2 Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора для анализа ЭМПП. 1.3 Уравнение механического движения ротора генератора. 1.4 Угловые характеристики мощности	8	4		8	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ.

2	***Раздел 2 «Динамическая устойчивость электрической системы»*** 2.1 Понятие динамической устойчивости 2.2 Способ площадей, допущения и область применения. 2.3 Метод последовательных интервалов.	6	6		12	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ.
3	***Раздел 3 «Метод малых колебаний»*** 3.1 Задачи и методы исследования статической устойчивости ЭЭС 3.2 Виды нарушения устойчивости ЭЭС 3.3 Регулирование возбуждения, его задачи	6	2		4	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ.
4	***Раздел 4 «Переходные процессы в узлах нагрузки»*** 4.1 Переходные процессы в узлах нагрузки ЭЭС. Задачи исследования 4.2 Практические критерии для узлов комплексных нагрузок 4.3 Поведение нагрузки при больших возмущениях	6	4		8	Отчеты по выполнению практических работ.
5	***Раздел 5 «Понятие результирующей устойчивости энергосистемы»*** 5.1 Асинхронные режимы в электрических системах 5.2 Причины и характер изменения частоты в ЭЭС 5.3 Определение динамических характеристик частоты в системе.	6	-		8	Отчеты по выполнению практических работ.
Семестр 8						
	Выполнение и защита курсовой работы				30	Выполнение и защита курсовой работы

5 . СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 ЛЕКЦИИ

<u>Семестр 6</u>, модуль «Электромагнитные переходные процессы»

Раздел 1. Переходные процессы в трехфазных цепях

Тема 1. Введение в учение о переходных процессах в ЭЭС и СЭС. (4 часа)

Причины возникновения переходных процессов. Особенности электромагнитных переходных процессов. Схемы замещения основных силовых элементов. Схемы замещения трансформаторов и сдвоенных реакторов. Составление расчетных схем замещения.

Тема 2. Короткие замыкания в ЭЭС и СЭС. Системы единиц. (4 часа)

Виды коротких замыканий (к.з), причины их возникновения и последствия. Назначение расчётов переходных процессов и требования к ним. Основные допущения, принимаемые при расчетах. Общий порядок расчета к.з. Использование системы относительных единиц. Составление схемы замещения системы и определение её параметров.

Тема 3. Переходный процессы в трехфазных цепях, подключенных к источнику синусоидального напряжения. (4 часа)

Трёхфазное к.з. в неразветвлённой цепи, подключённой к источнику синусоидального напряжения. Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании (КЗ) в цепи без трансформаторов. Физическая сущность возникновения составляющих тока к.з. Ударный ток к.з. и условия его возникновения. Методы определения ударного коэффициента. Особенности переходного процесса при КЗ в разветвленной цепи. Переходный процесс при включении в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Переходный процесс при КЗ за трансформатором.

Тема 4. Установившейся режим трёхфазного к.з. (4 часа)

Основные параметры синхронной машины (СМ). Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора. Влияние АРВ на установившейся режим к.з. Расчёт установившегося тока к.з. в сложных системах.

Тема 5. Начальный момент внезапного нарушения режима. (4 часа)

Переходные и сверхпереходные параметры синхронного генератора. Схема замещения синхронной машины в начальный момент к.з. Расчёт начального сверхпереходного тока в сложных системах. Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины без учета и с учетом влияния демпферных контуров. Влияние асинхронных электродвигателей и комплексных нагрузок в начальный момент КЗ. Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ.

Тема 6. Уравнения электромагнитного переходного процесса СМ. (4 часа)

Математическая модель синхронной машины, отражающая основные закономерности электромагнитных переходных процессов в машине. Линейные преобразования дифференциальных уравнений переходного процесса. Уравнения Парка-Горева.

Переходные процессы в синхронной машине при трехфазных коротких замыканиях без учета влияния демпферных контуров. Характеристическое уравнение и его корни. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов. Изменение тока якоря при трехфазном КЗ. Влияние системы возбуждения на переходный процесс. Переходные процессы при гашении магнитного поля синхронной машины и неуспешном повторном включении на КЗ.

Переходные процессы в синхронной машине с учетом влияния демпферных контуров. Переходные процессы в контурах ротора при разомкнутой обмотке якоря. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов контуров ротора. Влияние на переходный процесс замкнутой обмотки якоря. Особенности переходных процессов в асинхронных машинах.

Раздел 2. Практические методы расчетов коротких замыканий

Тема 7. Расчет токов к.з. в электроустановках напряжением выше 1000 В. (6 часов)

ГОСТ и РД по расчету токов к.з. Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых и методом спрямленных характеристик.

Тема 8. Расчет токов к.з. в электроустановках напряжением до 1000 В. (6 часов)

ГОСТ и РД по расчету токов к.з. Особенности расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ. Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых и методом спрямленных характеристик.

Раздел 3. Поперечная и продольная несимметрии.

Тема 9. Несимметричные короткие замыкания. (10 часов)

Переходные процессы при несимметричных коротких замыканиях в трехфазных цепях. Условия, при которых допустимо применение метода симметричных составляющих для анализа несимметричных режимов. Параметры электрических машин, трансформаторов (автотрансформаторов), обобщенных нагрузок, воздушных линий электропередач и кабелей по отношению к токам разных последовательностей. Граничные условия и основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений. Векторные

диаграммы напряжений и токов. Расчет токов и напряжений при различных несимметричных коротких замыканиях. Учет группы соединения трансформаторов (автотрансформаторов) при определении токов в разных ветвях и напряжений в произвольных точках расчетной схемы. Правило эквивалентности тока прямой последовательности. Комплексные схемы замещения. Сравнение токов при несимметричных КЗ разного вида.

Тема 10. Неполнофазные режимы. (8 часов)

Граничные условия и основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений при обрывах фаз. Векторные диаграммы напряжений и токов при продольных несимметриях разного вида. Учет группы соединения трансформаторов (автотрансформаторов) при определении токов в разных ветвях и напряжений в произвольных точках расчетной схемы. Правило эквивалентности тока прямой последовательности при продольной несимметрии и его использование. Комплексные схемы замещения.

<u>Семестр 7,</u> модуль «Электромеханические переходные процессы»

Раздел 1 «Статическая устойчивость электрической системы»

Тема 1. Введение. Основные понятия и определения электроэнергетических систем (ЭЭС). Классификация режимов ЭЭС и задачи управления ими. Переходные режимы и процессы. Существо электромеханических переходных процессов (ЭМПП). Устойчивость ЭЭС. Рекомендуемая литература.

Тема 2. Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора для анализа ЭМПП. Схема замещения и векторная диаграмма синхронного турбогенератора и гидрогенератора при анализе ЭМПП. Уравнение переходного процесса в обмотке возбуждения генератора.

Тема 3. Уравнение механического движения ротора генератора. Простейшая электрическая система и ее схема замещения. Векторная диаграмма. Выражения для мощностей через различные ЭДС генератора.

Тема 4. Угловые характеристики мощности. Определение угловых характеристик мощности через собственные и взаимные сопротивления.

Раздел 2 «Динамическая устойчивость электрической системы»

Тема 5. Понятие динамической устойчивости. Причины и характер больших возмущений в электрической системе. Задачи исследования динамической устойчивости. Допущения, принимаемые при анализе динамической устойчивости. Энергетические соотношения, характеризующие движение ротора генератора.

Тема 6. Способ площадей, допущения и область применения. Способ площадей, допущения и область применения. Определение предельного угла отключения короткого замыкания. Представление процесса на фазовой плоскости. Обобщение способа площадей на схему двух станций.

Тема 7. Метод последовательных интервалов. Уравнения движения ротора генератора и способы его решения. Метод последовательных интервалов. Учет электромагнитных переходных процессов. Влияние демпфирования. Анализ процессов с учетом форсировки возбуждения генератора. Особенности расчета переходных процессов в сложной системе.

Раздел 3 «Метод малых колебаний»

Тема 8. Задачи и методы исследования статической устойчивости ЭЭС. Статическая устойчивость ЭЭС. Задачи и методы исследования. Основные допущения и области применения. Математическое описание переходных процессов при анализе статической устойчивости. Метод малых колебаний. Необходимые и достаточные условия статической устойчивости. Статическая устойчивость и малые колебания в нерегулируемой системе.

Тема 9. Виды нарушения устойчивости ЭЭС. Нарушения устойчивости в виде сползания, самораскачивания и самовозбуждения и способы их подавления.

Тема 10. Регулирование возбуждения, его задачи. Ручное регулирование возбуждения, его влияние на статическую устойчивость и режимные характеристики ЭЭС. Анализ статической устойчивости простейшей ЭЭС с учетом автоматического регулятора возбуждения (АРВ) пропорционального действия. Статическая устойчивость ЭЭС с АРВ сильного действия.

Раздел 4 «Переходные процессы в узлах нагрузки»

Тема 11. Переходные процессы в узлах нагрузки ЭЭС. Задачи исследования. Статические и динамические характеристики нагрузки. Уравнение движения и схема замещения асинхронного двигателя (АД). Практический критерий статической устойчивости АД. Изменение условий статической устойчивости АД при его работе от источника соизмеримой мощности. Лавина напряжения - причина возникновения и средства подавления. Общие принципы построения практических критериев.

Тема 12. Практические критерии для узлов комплексных нагрузок. Статические характеристики и регулирующие эффекты мощности нагрузок по напряжению.

Тема 13. Поведение нагрузки при больших возмущениях. Пуск АД, работа при толчкообразной нагрузке на валу, при резких снижениях напряжения на зажимах. Численное решение уравнения движения ротора АД при больших возмущениях. Поведение АД нагрузки при коротких замыканиях.

Раздел 5 «Понятие результирующей устойчивости энергосистемы»

Тема 14. Асинхронные режимы в электрических системах. Общая характеристика асинхронных режимов и основные задачи их исследования. Причины возникновения асинхронного режима. Понятие результирующей устойчивости. Процесс выпадения из синхронизма, необходимое условие ресинхронизации. Практические способы восстановления синхронного режима.

Тема 15. Причины и характер изменения частоты в ЭЭС. Изменения частоты в электроэнергетических системах. Причины и характер изменения частоты. Требования к частоте как к общесистемному показателю качества электроэнергии. Виды регулирования первичных двигателей. Статические характеристики нерегулируемых и регулируемых первичных двигателей в системе.

Тема 16. Определение динамических характеристик частоты в системе. Лавина частоты и способы ее предотвращения. Автоматическая частотная разгрузка, мероприятия по обеспечению требуемого уровня частоты в ЭЭС.

<u>Семестр 8</u>

Выполнение и защита курсовой работы по Электромеханическим переходным процессам.

5.2 ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Модуль «Электромагнитные переходные процессы»

Практические занятия проводятся с целью закрепления знаний, полученных при изучении теоретического курса.

Тематика практических занятий приведена в табл.

№ п.п.	Наименование темы	Кол-во часов
1.	Система относительных единиц. Схемы замещения и их параметры. Способы преобразования схем замещения.	2
2.	Переходные процессы в сети с источником бесконечной мощности. Влияние нагрузки на ток к.з. Пуск двигателей как короткое замыкание. Взаимное влияние двигателей при пуске.	2
3.	Определение составляющих тока к.з. в начальный момент времени. Расчет ударного тока	2

	короткого замыкания.	
4.	Метод типовых кривых. Определение токов к.з. для заданного момента времени.	2
5.	Способы ограничения токов к.з. Выбор параметров токоограничивающих реакторов.	2
6.	Граничные условия и векторные диаграммы при несимметричныхк.з. Расчет токов несимметричных к.з. Сопоставление несимметричных и трехфазных к.з. Комплексные схемы замещения при поперечной несимметрии.	4
7.	Переходные процессы при продольнойнесимметрии. Комплексные схемы замещения при продольной несимметрии.	4

Модуль «Электромеханические переходные процессы»

На практических занятиях решают задачи по оценке устойчивости простейшей электроэнергетической системы при различных возмущениях. Должны быть рассмотрены:

1. Составление схемы замещения и определение параметров исходного режима для различных видов АВР.
2. Векторная диаграмма синхронного генератора.
3. Статическая устойчивость. Пределы мощности и пределы устойчивости.
4. Определение предельного угла отключения короткого замыкания.
5. Определение площадок ускорения и торможения, критического угла, запаса динамической устойчивости.
6. Метод последовательных интервалов для системы с нерегулируемым генератором.
7. Уточненный расчет методом последовательных интервалов - для системы с регулируемым генератором.
8. Характеристики и устойчивость нагрузки.

6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

6.1. *Модуль «Электромагнитные переходные процессы»*

№ п/п	№ раздела дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоёмкость в часах
1	1	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию	10 12
2	2	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию	8 10
3	3	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию	8 10

Курсовой проект

Отдельным видом самостоятельной работы студентов является курсовая работа (7 семестр), на выполнение которой отводится учебным планом 30 часов.

Для закрепления теоретических знаний, полученных при изучении дисциплины, приобретения навыков пользования справочной литературой, практических навыков по расчету симметричных и несимметричных коротких замыканий в заданной точке схемы, предусмотрена курсовая работа на тему: «Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в энергосистемах».

Графическая часть проекта включает в себя: подробную однолинейную электрическую схему электрической сети; схемы замещения сети для прямой, обратной и нулевой последовательностей, основные этапы преобразования схемы замещения и результаты расчетов симметричных и несимметричных коротких замыканий.

Ниже приведен типовой бланк задания на курсовую работу, содержание которого заполняется индивидуально для каждого студента.

ЗАДАНИЕ № ___
на курсовую работу по дисциплине
«Переходные процессы» модуль «Электромагнитные переходные процессы»
Студент _____группа _____ Дата выдачи задания «___» _____ 20__
Задание выдал _____ Задание принял(а) _____
ФИО руководителя проекта, подпись *Подпись студента*
Тема работы: «Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в электрической сети»

Для приведенной схемы электрической сети определить следующие расчетные величины:

действующее значение периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания в месте КЗ в начальный момент возникновения повреждения;

ударный ток и мощность трёхфазного короткого замыкания в начальный момент возникновения повреждения;

амплитудное и действующее значения апериодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания и полный ток трёхфазного короткого замыкания в месте КЗ в начальный момент возникновения повреждения;

начальные значения токов отдельных последовательностей для заданного вида несимметричного короткого замыкания в месте короткого замыкания;

начальное значение полного тока для заданного вида несимметричного короткого замыкания в месте короткого замыкания;

напряжения отдельных последовательностей в точке КЗ и на шинах ВН станции 1;

построить диаграммы токов и напряжений в месте КЗ и напряжений на шинах станции 1;

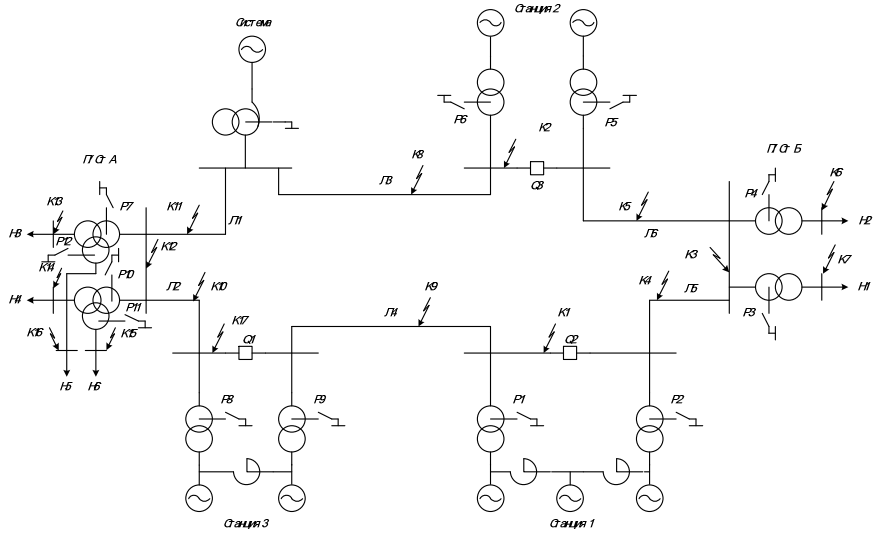
токи через выключатель в заданный момент времени при трёхфазном и несимметричном КЗ.

Курсовая работа защищается студентом после устранения всех замечаний. При защите студент должен уметь ответить на вопросы, приведённые в конце пособия.

Согласно задания расчёт симметричного и несимметричного КЗ предусматривается в одной точке заданной схемы. При расчётах считать, что на каждую секцию шин станции 1 приходится одинаковое число блоков n/2. Точки кз находятся в середине соответствующих линий. При расчёте ударного тока активные сопротивления нагрузок и системы считать равным нулю.

Молниезащита воздушных линий 1 и 2 выполнена тросами марки АС, линий 3 и 4 – стальными тросами, а на линии 5 тросовая защита не установлена.

Исходная схема электрической сети



Исходные данные к курсовойработе

Таблица 1

Станция 1									Трансформаторы			
№ В-та	$P_{н}, МВт$	$cos(\varphi_{н})$	X_{d}	X''_{d}	X_{2}	X''_{d}/R	$X_{р}$	$X_{р}/R$	$S_{ном}, МВА$	$U_{ВН}, кВ$	$U_{к}, \%$	X/R
1	60	0.8	0.6	0.182	0,195	100	0.35	30	80	220	14	40

Продолжение таблицы 1

№ В-та	$P_{н}, МВт$	$cos(\varphi_{н})$	X_{d}	X''_{d}	X_{2}	X''_{d}/R	$X_{р}$	n	$S_{ном}, МВА$	$U_{ВН}, кВ$	$U_{к}, \%$	X/R
1	63	0,9	1,65	0,12	0,15	100	0.35	4	80	220	14	40

Продолжение таблицы 1

Станция 1									Трансформаторы			
№ В-та	$P_{н}, МВт$	$cos(\varphi_{н})$	X_{d}	X''_{d}	X_{2}	X''_{d}/R	$X_{р}$	$X_{р}/R$	$S_{ном}, МВА$	$U_{ВН}, кВ$	$U_{к}, \%$	X/R
1	60	0.8	2,64	0,153	0,195	100	0.35	30	80	220	10,5	40

Продолжение таблицы 1

№ В-та	Автотрансформатор						Система
	$S_{ном}, МВА$	$U_{СН}, кВ$	$U_{кВН}, \%$	$U_{кВС}, \%$	$U_{кСН}, \%$	X/R	$S_{к}, МВА$
1	135	220	18	10,5	7	20	2500

Продолжение таблицы 1

№ В-та	П/Ст А						Нагрузка			
	Трансформаторы						$S_{ном}, МВА$			
	$S_{ном}, МВА$	$U_{ВН}, кВ$	$U_{кВН}, \%$	$U_{кВС}, \%$	$U_{кСН}, \%$	X/R	*Н3*	*Н4*	*Н5*	*Н6*
1	80	220	18	10,5	7	10	13	9	7	23

Продолжение таблицы 1

№ В-та	П/Ст Б				Нагрузка		Линии					
	Трансформаторы				$S_{ном}, МВА$		Длины, км					
	$S_{ном}, МВА$	$U_{ВН}, кВ$	$U_{к}, \%$	X/R	*Н1*	*Н2*	*Л1*	*Л2*	*Л3*	*Л4*	*Л5*	*Л6*
1	80	220	11	10	48	50	80	90	254	90	157	163

Таблица 2 - Состояние нейтрали трансформаторов

N	***P1***	***P2***	***P3***	***P4***	***P5***	***P6***	***P7***	***P8***	***P9***	***P10***	***P11***	***P12***
1	***x***	***x***	***x***	-	-	***x***	***x***	-	***x***	-	-	***x***
2	-	***x***	-	***x***	***x***	-	-	***x***	-	***x***	***x***	-
3	***x***	-	-	***x***	-	***x***	***x***	-	***x***	-	-	-
4	-	***x***	***x***	***x***	-	***x***	-	***x***	-	***x***	-	-

6.2. *Модуль «Электромеханические переходные процессы»*

Включает изучение лекционного материала и литературы по дисциплине при подготовке к практическим занятиям а также активный поиск новой информации в Интернете по заданию лектора или руководителя практических занятий.

№ п/п	№ раздела (темы) дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоемкость в часах
Семестр 7			
1	***Раздел 1 «Статическая устойчивость электри-ческой системы»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	8
2	***Раздел 2 «Динамическая устойчивость электри-ческой системы»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	12
3	***Раздел 3 «Метод малых колебаний»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	4

4	***Раздел 4 «Переходные процессы в узлах нагрузки»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	8
5	***Раздел 5 «Понятие результирующей устойчиво-сти энергосистемы»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	8
Семестр 8			
		Выполнение и защита курсовой работы.	30

6.2.1 КУРСОВАЯ РАБОТА

Примерная тема курсовой работы: «Оценка устойчивости простейшей электроэнергетической системы».

Целью курсовой работы является приобретение студентами практических навыков применения способа площадей и навыков численного интегрирования уравнения движения генератора при анализе динамической устойчивости с учетом различных способов регулирования возбуждения, как для простых, так и для сложных электрических систем; навыков применения метода малых колебаний при анализе статической устойчивости. Вариант задания приведен ниже. Обязательным приложением к пояснительной записке является один лист графической части.

6.2.2. Вариант задания на курсовую работу по модулю «Электромеханические переходные процессы»:

Курс: четвертый
Специальность: 140204
Группа: 842
Студент: ***Голубцов А.А.***

Вариант 01

Срок сдачи курсовой работы на проверку: 11 апреля 2012 г.

1. Для заданной схемы электропередачи определить запас статической устойчивости по пределу передаваемой мощности, при передаче от генератора в систему мощности $P_н$ для следующих случаев:

- неявнополюсный генератор без АРВ ($X_d = X_q$);
- неявнополюсный генератор с АРВ пропорционального типа ($E'_q = const$);
- неявнополюсный генератор с АРВ СД ($U_г = const$).

2. Построить векторную диаграмму генератора в исходном режиме.

3. Выполнить расчет динамической устойчивости в соответствии с алгоритмом развития аварии при к.з. в заданной точке в следующей последовательности:

- рассчитать и построить угловые характеристики мощности нормального, аварийного и послеаварийного режимов при $E' = const$;
- произвести численный расчет и построить зависимость изменения угла δ и ускорения ротора a от времени (приближенный расчет);
- в случае нарушения устойчивости определить предельные угол и время отключения к.з., необходимые для сохранения устойчивости;
- при сохранении устойчивости определить коэффициент запаса динамической устойчивости;
- выполнить уточненный расчет динамического перехода с учетом реакции якоря и действия АРВ и построить зависимости δ , E'_q , E_q , E_{qe} от времени.

4. Проверить, будет ли устойчива нагрузка H после отключения выключателя $Q6$ и определить коэффициент запаса устойчивости по напряжению в случаях:

- отсутствия АРВ у генератора;
- генератор снабжен АРВ ПТ;
- генератор снабжен АРВ СД.

5. Определить допустимое время перерыва электроснабжения по условиям устойчивости эквивалентной асинхронной нагрузки.

Алгоритм развития аварии: В точке К2 – трехфазное кз, сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обоих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{с.з.} = 0$, $t_{О.В.} = 0{,}1$ с; выключатель Q2 (со стороны Т2) – второй ступенью дистанционной защиты: $t_{с.з.} = 0{,}05$ с, $t_{О.В.} = 0{,}1$ с. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0{,}15$ с, $t_{В.В.} = 0{,}05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0{,}1$ с, $t_{В.В.} = 0{,}05$ с. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?

Руководитель курсовой работы _____ *Козлов А.Н.*

7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Модуль «Электромагнитныее переходные процессы»

При реализации дисциплины «Переходные процессы» модуль «Электромагнитные переходные процессы», используются традиционные и современные образовательные технологии. Из современных образовательных технологий применяются информационные и компьютерные технологии с привлечением к преподаванию мультимедийной техники и интерактивной доски, технологии активного обучения, проблемного обучения. Применяются следующие активные и интерактивные формы проведения занятий: проблемные ситуации, компьютерные симуляции, деловые игры, разбор конкретных ситуаций по расчету коротких замыканий на примере электроэнергетической системы Дальнего Востока. В рамках дисциплины предусмотрены встречи с представителями энергетических компаний Дальнего Востока.

Самостоятельная работа студентов подразумевает работу под руководством преподавателя: консультации и помощь при выполнении курсовойработы, индивидуального домашнего задания, консультации по разъяснению материала, вынесенного на самостоятельную проработку, индивидуальную работу студента в компьютерном классе ЭФ или в библиотеке.

Модуль «Электромеханические переходные процессы»

Наилучшей гарантией глубокого и прочного усвоения материала модуля является заинтересованность студентов в приобретении знаний. Поэтому для поддержания интереса студентов к материалу дисциплины необходимо использовать различные образовательные технологии и задействовать все атрибуты процесса научного познания.

При преподавании дисциплины «Переходные процессы в электрических системах (электромеханические)» используется технология блочного обучения.

При чтении лекций по данной дисциплине используется такой неимитационный метод активного обучения, как «Проблемная лекция». Перед изучением раздела обозначается проблема, на решение которой будет направлен весь последующий материал раздела.

При выполнении практических и лабораторных работ используется прием интерактивного обучения «Кейс-метод»: задание студентам для подготовки к выполнению лабораторной работы имитирует реальное событие; с преподавателем обсуждаются цели работы и ход ее выполнения; при защите работы - обсуждение и анализ полученных результатов; обсуждение теоретических положений, справедливость которых была установлена в процессе выполнения лабораторной работы.

8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

8.1. Модуль «Электромагнитные переходные процессы»

Система оценочных средств и технологий для проведения текущего контроля успеваемости по дисциплине включает вопросы для блиц-опроса на лекциях, индивидуальные домашние задания, задания для курсовой работы и контрольных работ, проводимых на практических занятиях, вопросы для двух коллоквиумов.

Тематика вопросов блиц-опроса на лекциях совпадает с тематикой лекций.

Темы индивидуальных домашних заданий:

Преобразования схем замещения.

Расчет пуска двигателей.

Определение составляющих тока к.з. Расчет ударного тока короткого замыкания. Определение токов к.з. для заданного момента времени.

Построение векторных диаграмм при несимметричных к.з..

Промежуточная аттестация осуществляется в виде защиты курсовой работы и сдачи экзамена. Система оценочных средств и технологий для проведения промежуточной аттестации по дисциплине включает вопросы к коллоквиуму, тестовые задания (в качестве примера приведен один вариант тестов в приложении 1), контрольные вопросы и задания к экзамену.

Вопросы к защите курсовой работы

1. Какие основные допущения приняты при решении задач, поставленных в работе?
2. Какие основные допущения положены в основу понятия об "источнике бесконечной мощности"?
3. Отличия в приближённом и точном приведении?
4. Как определить ток КЗ от системы бесконечной мощности?
5. В чём условность понятия "мощность короткого замыкания"?
6. Сформулировать правило эквивалентности прямой последовательности.
7. Изменится ли напряжение прямой последовательности в месте КЗ при несимметричных КЗ на землю после разземлениянейтралей части трансформаторов?
8. записать соотношения между отдельными составляющими токов и напряжений при несимметричном КЗ вида К(n).
9. Записать соотношения между полным током КЗ и током прямой последовательности для КЗ вида К (n).
10. Как влияют тросы на индуктивное сопротивление нулевой последовательности для ЛЭП?
11. Как изменится сопротивление нулевой последовательности линии при отключении одной цепи?
12. Как определяется дополнительное индуктивное сопротивление ΔX(n) при КЗ вида К(n)?
13. Записать операторы поворота a в алгебраической форме.
14. Изобразить векторную диаграмму токов для КЗ вида К(n).
15. Изобразить векторную диаграмму напряжений для КЗ вида К(n).
16. Что такое "эквивалентная постоянная времени"?
17. Как изменятся напряжения отдельных последовательностей по мере удаления от точки несимметричного КЗ?
18. Чему равен ток, протекающий в земле, при несимметричных КЗ на землю?
19. В чём отличие способов эквивалентирования схемы замещения при определении тока в начальный и в заданный моменты времени?
20. В чём сущность метода типовых кривых?

Защита курсовой работы может проходить в виде доклада студента и ответов на поставленные вопросы членами комиссии по приему курсовойработы, либо в виде деловой игры.

Вопросы на коллоквиум №1

1. Чем вызываются ПП? Система и близкое КЗ
2. Продольная, поперечная и сложная несимметрия
3. Относительное значение величин. Как выбираются базисные условия
4. Понятие приближенного и точного приведения
5. Действия при наличии симметрии в схеме при расчете КЗ
6. Что такое КЗ? Назначения расчетов КЗ
7. Замена трехлучевой Y на двухлучевую, Y с n лучами на Y с n-1 лучом
8. Для чего используется система ОЕ. Шкала средних напряжений
9. Простое замыкание. Двойное замыкание на землю
10. Основные допущения при расчете КЗ
11. Относительное значение величин E, U, I, Z, S и их приведенные значения
12. Рассечение ветвей в узле с ЭДС. Принцип составления схемы замещения
13. Оборванный провод ЛЭП лежит на земле – вид несимметрии и ее причины
14. К чему приводит ток КЗ. Путь тока при простом КЗ
15. Базисные величины выбираются для всех ступеней напряжения или нет?
16. Как проводится расчет КЗ при наличии в схеме Системы и Генераторов
17. Металлическое КЗ. Самоустраняющиеся КЗ
18. Наиболее опасные последствия КЗ. Результат сворачивания схемы замещения
19. Когда можно объединять между собой генерирующие источники
20. Как приводятся E,U,I,Z к основной ступени при точном приведении в ОЕ
21. Переходное сопротивление КЗ, его составляющие
22. Для чего применяется АПВ. Что называется расчетом ЭМПП
23. Приближенное приведение E,U,I,Z к основной ступени в ИЕ
24. Преобразование Y с лучами, содержащими ЭДС
25. Сопротивление генератора, ВЛ и КЛ, трансформатора, реактора при точном приведении в ОЕ. Система и удаленное КЗ.
26. Сложное КЗ. Основная причина ЭМПП
27. Необходимость точного и приближенного учета расчетных условий
28. Как приводятся E,U,I,Z к основной ступени при точном приведении в ИЕ
29. Использование замены нагрузочных ветвей генерирующими ветвями с E=0
30. Сопротивление генератора, ВЛ и КЛ, трансформатора, реактора при приближенном приведении в ОЕ. Понятие точного приведения
31. Виды КЗ. Преднамеренное КЗ. Преобразование Δ в Y
32. Понятие расчетных условий. Преобразование YвΔ
33. Как приводятся E,U,I,Z к основной ступени при приближенном приведении в ОЕ. Рассечение схемы в узле с точкой КЗ
34. Сопротивление генератора, ВЛ и КЛ, трансформатора, реактора при точном приведении в ИЕ. Понятие ударного коэффициента

Вопросы на коллоквиум №2

1. Вероятность возникновения КЗ. Последствия КЗ
2. Расчетные условия при выборе выключателей. Мощность КЗ
3. Что понимается под коэффициентом трансформации при приведении элементов. Симметричные и несимметричные КЗ
4. Сопротивление генератора, ВЛ и КЛ, трансформатора, реактора при приближенном приведении в ИЕ. Использование таблицы значений x/r
5. Расчетные условия при выборе средств РЗ и А

6. Сопротивления двухобмоточного и трехобмоточного трансформатора, автотрансформатора
7. Принцип наложения собственно аварийного режима на предшествующий
8. Применение собственных и взаимных проводимостей
9. Практические методы расчета ЭМПП. Общие замечания
10. Допущения для практических методов расчета
11. Ошибки практических методов расчета
12. Влияние нагрузки на ток к.з. Ударный ток к.з.
13. Приближенный учет системы. Система бесконечной мощности
14. Расчет для выбора выключателя по отключающей способности
15. Метод типовых кривых
16. Метод расчетных кривых
17. Основные положения в несимметричных ЭМПП
18. Синхронные машины. x_2и x_0
19. Кабели, реакторы, ВЛ. x_2 и x_0
20. Трансформаторы. x_2и x_0
21. Обобщенная нагрузка. x_2 и x_0. Учет сопротивления заземления нейтрали
22. Схемы прямой и обратной последовательности
23. Схемы нулевой последовательности
24. Начало и конец схемы последовательности
25. Результирующая ЭДС и сопротивление продольной и поперечной несимметрии
26. Однократная поперечная несимметрия
27. Двухфазное к.з.
28. Двухфазное к.з. на землю
29. Векторные диаграммы для различных видов несимметричных к.з.
30. Учет переходного сопротивления в месте к.з.
31. Правило эквивалентирования прямой последовательности
32. Комплексные схемы замещения
33. Практические методы расчета при однократной поперечной несимметрии
34. Однократная продольная несимметрия

Контрольные вопросы и задания к экзамену

Вопросы к экзамену:

1. Основные понятия об электромагнитных и электромеханических переходных процессах в электрической системе.
2. Основные виды коротких замыканий. Относительная вероятность их возникновения в электрических системах.
3. Какие виды нарушения режима относятся к продольной и поперечной несимметрии.
4. Основные допущения при расчете электромагнитных переходных процессов.
5. Преимущества и недостатки системы относительных единиц по сравнению с системой именованных единиц.
6. Приведение ЭДС и сопротивлений элементов схемы к выбранным базисным условиям.
7. Составление схемы замещения при расчете в относительных единицах. Точное и приближенное приведение.
8. Составление схемы замещения при расчете в именованных единицах. Точное и приближенное приведение.
9. Преобразование схем замещения.
10. Процесс трехфазногок.з. в неразветвленной цепи. Кривые изменения тока и ее слагающие.
11. Условия, определяющие максимальное значение апериодическойсоставдяющей тока.
12. Условия возникновения максимума мгновенного значения полного тока. Ударный ток и ударный коэффициент.

13. Определение эквивалентной постоянной времени апериодической составляющей тока в разветвленной цепи.
14. Действующие значения полных величин и их отдельных слагающих. Основные упрощения.
15. Определение установившегося режима к.з. Основные характеристики и параметры синхронной машины.
16. Схема замещения неявнополюсной синхронной машины в установившемся режиме.
17. Векторные диаграммы неявнополюсных и явнополюсных синхронных машин.
18. Приведение цепи ротора к статору.
19. Как учитывается в расчетах влияние нагрузки на режим к.з.
20. Расчет при отсутствии автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Влияние АРВ.
21. Баланс магнитных потоков синхронной машины в нормальном установившемся режиме и в момент возникновения к.з.
22. Переходные ЭДС и сопротивление. Схема замещения СМ без демпферных контуров в начальный момент внезапного нарушения режима. Векторная диаграмма.
23. Сверхпереходные ЭДС и сопротивление. Схема замещения СМ с демпферными обмотками в начальный момент нарушения режима в осях **d** и **q**. Векторная диаграмма.
24. Сравнение реактивностей синхронной машины.
25. Характеристика двигателей и нагрузки.
26. Практический расчет начального сверхпереходного и ударного токов при к.з., несинхронном включении генераторов, пуске двигателей.
27. Внезапное к.з. СМ без демпферных обмоток.
28. Влияние и приближенный учет демпферных обмоток.
29. Влияние АРВ при внезапном к.з.
30. Основные допущения при практических методах расчета к.з.
31. Различия между практическими методами.
32. Метод расчетных и типовых кривых. Порядок расчета по общему изменению.
33. Порядок расчета по индивидуальному изменению. Приближенный учет системы.
34. Учет электродвигателей при расчете токов к.з.
35. Расчет токов к.з. в сетях до 1000 В.
36. Высшие гармоники при несимметричном режиме синхронной машины.
37. Метод симметричных составляющих при расчете токов к.з.
38. Сопротивления элементов схемы для токов обратной и нулевой последовательности.
39. Схемы отдельных последовательностей, определение результирующих ЭДС и сопротивлений.
40. Граничные условия, соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений в месте поперечной несимметрии.
41. Векторные диаграммы токов и напряжений для места несимметрии.
42. Комплексные схемы замещения для различных видов поперечной несимметрии.
43. Правило эквивалентности прямой последовательности для поперечной несимметрии.
44. Сравнение видов короткого замыкания.
45. Применение практических методов к расчету переходного процесса при однократной поперечной несимметрии.
46. Однократная продольная несимметрия.
47. Граничные условия, соотношения между симметричными составляющими токов при продольной несимметрии.
48. Векторные диаграммы токов в месте разрыва чисто индуктивной цепи, комплексные схемы замещения.
49. Способы и технические средства ограничения токов к.з.
50. Координация уровней токов к.з.

Задания для экзамена сформированы в виде инженерных задач, включающих в себя расчеты различных видов коротких замыканий в электрических сетях, построение векторных диаграмм, использование практических приемов для ускорения расчетов коротких замыканий на ПЭВМ, представление схем замещения электрической сети и ее параметров для расчета на ПЭВМ коротких замыканий, анализ неполнофазных и особых режимов электрических сетей.

8.2. Модуль «Электромеханические переходные процессы»

В процессе изучения материала модуля предусмотрены следующие виды промежуточного контроля знаний студентов:

- экспресс-опрос лектора по итогам изучения разделов курса (образцы тестовых заданий для экспресс-опроса приведены ниже);
- выполнение и защита отчетов по практическим занятиям.

Тестовые задания для экспресс-опроса:

Вариант 1.

1. Какое из нижеприведенных определений отвечает понятию «статическая устойчивость»?
   а) Это способность системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние, или состояние, близкое к исходному (допустимое по условиям эксплуатации системы);
   б) Это способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения, или, если возмущение не снято – режим, близкий к исходному;
   в) Это способность системы после нарушения устойчивости и допустимого по условиям эксплуатации асинхронного хода восстанавливать синхронную работу.

2. Что из нижеперечисленного относится к параметрам режима?
   а) активная, реактивная, полная мощность, ток, напряжение, частота;
   б) изменение электромагнитных явлений в электрических цепях, изменение механических явлений во вращающихся машинах;
   в) полные, активные и реактивные сопротивления и проводимости элементов, коэффициенты трансформации, постоянные времени.

3. Можно ли для явнополюсной машины составить традиционную схему замещения с неизменными сопротивлением и ЭДС?
   а) да;
   б) нет;
   в) затрудняюсь ответить.

4. С чем связан уровень частоты в системе?
   а) с балансом реактивной мощности;
   б) с балансом активной мощности;
   в) затрудняюсь ответить.

5. Основное допущение при использовании метода последовательных интервалов?
   а) на каждом интервале приращение угла δ неизменно;
   б) в течение каждого интервала неизменно эквивалентное сопротивление системы;
   в) в течение каждого интервала неизменно ускорение ротора, определенное в начале интервала.

6. В чем особенность регуляторов пропорционального действия – АРВ-ПД?
   а) затрудняюсь ответить;
   б) работа этих регуляторов возможна только с запаздыванием и требует наличия зоны нечувствительности;
   в) эти регуляторы могут реагировать на изменение режима практически без запаздывания.

7. Какой из приведенных ниже критериев позволяет определить зону возможного изменения параметров настройки регуляторов?
   а) критерий Михайлова;
   б) метод D-разбиения;
   в) критерий Гурвица.

8. Что такое «электрический центр системы»?
   а) точка баланса активной мощности;
   б) место подключения двух и более источников питания;
   в) точка в системе, в которой напряжение при асинхронном ходе источников питания снижается до нуля.

Вариант 2.

1. Какое из нижеприведенных определений отвечает понятию «динамическая устойчивость»?
   а) Это способность системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние, или состояние, близкое к исходному (допустимое по условиям эксплуатации системы);
   б) Это способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения, или, если возмущение не снято – режим, близкий к исходному;
   в) Это способность системы после нарушения устойчивости и допустимого по условиям эксплуатации асинхронного хода восстанавливать синхронную работу.

2. Что из нижеперечисленного относится к параметрам системы?
   а) активная, реактивная, полная мощность, ток, напряжение, частота;
   б) изменение электромагнитных явлений в электрических цепях, изменение механических явлений во вращающихся машинах;
   в) полные, активные и реактивные сопротивления и проводимости элементов, коэффициенты трансформации, постоянные времени.

3. Какой параметр не меняется в первый момент изменения режима и служит связующим для режимов «до» и «после» возмущения?
   а) E'_q;
   б) E_q;
   в) E'.

4. С чем связан уровень напряжения в системе?
   а) с балансом реактивной мощности;
   б) с балансом активной мощности;
   в) затрудняюсь ответить.

5. В чем основная трудность определения изменения угла δ во времени?

а) необходим большой объем счетной работы;
б) уравнение движения ротора не имеет аналитического решения;
в) требуются тщательные графические построения.

6. Почему мощность турбины при расчете электромеханических переходных процессов можно принимать неизменной?
а) это постоянство обеспечивает оперативный персонал турбинного и котельного цехов;
б) это обеспечивается высокой инерционностью ротора турбины;
в) постоянные времени регуляторов турбины заметно превышают время собственно переходного процесса.

7. Какой из приведенных ниже критериев позволяет определить зону возможного изменения параметров настройки регуляторов?
а) метод D-разбиения;
б) критерий Гурвица;
в) критерий Михайлова.

8. Какова причина опрокидывания двигателей нагрузки?
а) электрический момент двигателя становится меньше момента механизма;
б) в двигателе происходит короткое замыкание;
в) перегорают предохранители в цепи статора.

Вариант 3.

1. Какое из нижеприведенных определений отвечает понятию «результирующая устойчивость»?
а) Это способность системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние, или состояние, близкое к исходному (допустимое по условиям эксплуатации системы);
б) Это способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения, или, если возмущение не снято – режим, близкий к исходному;
в) Это способность системы после нарушения устойчивости и допустимого по условиям эксплуатации асинхронного хода восстанавливать синхронную работу.

2. Что из нижеперечисленного относится к параметрам процесса?
а) активная, реактивная, полная мощность, ток, напряжение, частота;
б) изменение электромагнитных явлений в электрических цепях, изменение механических явлений во вращающихся машинах;
в) полные, активные и реактивные сопротивления и проводимости элементов, коэффициенты трансформации, постоянные времени.

3. Какие параметры системы изменяются с изменением режима?
а) активные сопротивления и проводимости;
б) реактивные сопротивления и проводимости;
в) коэффициенты трансформации, постоянные времени.

4. Что такое «осуществимость режима»?
а) наличие баланса активной мощности;
б) наличие баланса реактивной мощности;
в) наличие обоих условий

5. Как определяется предельный угол отключения короткого замыкания?
   а) из графических построений угловых характеристик системы;
   б) из равенства площадок ускорения и торможения;
   в) аналитическим решением уравнения движения ротора в общем виде.

6. В чем особенность регуляторов сильного действия – АРВ-СД?
   а) затрудняюсь ответить;
   б) работа этих регуляторов возможна только с запаздыванием и требует наличия зоны нечувствительности;
   в) эти регуляторы могут реагировать на изменение режима практически без запаздывания.

7. Какой из приведенных ниже критериев позволяет определить зону возможного изменения параметров настройки регуляторов?
   а) критерий Гурвица;
   б) критерий Михайлова;
   б) метод D-разбиения.

8. Представляет ли опасность для двигателя режим опрокидывания?
   а) нет, режим аналогичен отключению машины от сети;
   б) да, поскольку из-за перегрева обмоток двигатель выходит из строя;
   б) затрудняюсь ответить.

Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение

- Регуляторы возбуждения синхронных генераторов.
- Регуляторы скорости первичных двигателей.
- Способы повышения динамической устойчивости ЭЭС.
- Методы оценки устойчивости сложных ЭЭС.
- Управляемые линии электропередачи
- Гибкие линии электропередачи
- Вставки постоянного тока

Экзаменационные вопросы

Семестр 7 – зимняя сессия. Основные блоки вопросов по дисциплине «Переходные процессы в электрических системах (электромеханические)»

1. Понятие устойчивости работы электрической системы. Виды устойчивости
2. Характеристика мощности простейшей электрической системы.
3. Векторная диаграмма неявнополюсного синхронного генератора
4. Векторная диаграмма явнополюсного генератора
5. Характеристики мощности синхронного генератора, получаемые из векторной диаграммы.
6. Характеристика мощности простейшей системы с регулируемыми генераторами
7. Устойчивость работы генератора, имеющего АРВ без зоны нечувствительности
8. Устойчивость работы генератора, имеющего АРВ с зоной нечувствительности.
9. Практические критерии статической устойчивости.
10. Характеристика мощности при сложной связи генератора с приемной системой.
11. Устойчивость многомашинной системы
12. Оценка динамической устойчивости простейшей электрической системы
13. Уравнение движения ротора. Метод последовательных интервалов.

14. Способы повышения динамической устойчивости.
15. Электрическое торможение как способ повышения динамической устойчивости
16. Импульсная разгрузка как метод повышения динамической устойчивости
17. Регулирующий эффект нагрузки и его влияние на устойчивость
18. Влияние регулирующего эффекта нагрузки на устойчивость работы генератора
19. Понятие электрического центра системы
20. Устойчивость узлов нагрузки
21. Критерии устойчивости узлов нагрузки. Лавина напряжения
22. Характеристика элементов нагрузки
23. Процессы в узлах нагрузки при больших возмущениях
24. Обеспечение устойчивости двигателей при набросе мощности
25. Пуск двигателей
26. Самозапуск двигателей

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

Модуль «Электромагнитные переходные процессы»

а) основная литература:

1. Короткие замыкания и несимметричные режимы электроустановок [Текст] : учеб.пособие / И. П. Крючков [и др.]. - 2-е изд., стер. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2011. - 472 с.
2. Переходные процессы в электроэнергетических системах [Текст] : учеб.пособие : доп. Мин. обр. РФ / И. П. Крючков [и др.] ; под ред. И. П. Крючкова. - 2-е изд., стер. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2009. - 415 с. - Библиогр. : с. 397.

б) дополнительная литература:

1. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования [Текст] : учеб. пособие: рек.Мин. обр. РФ / под ред. И. П. Крючкова, В. А. Старшинова. - М. : Академия, 2005,2006 - 412 с. : рис. - (Высшее проф. образование. Энергетика). - Библиогр.: с. 406.
2. Буре, И. Г. Расчет параметров систем промышленного электроснабжения в переходных режимах [Текст] : учеб. пособие / И. Г. Буре, Л. С. Родина . - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2005. - 32 с. : рис. - Библиогр.: с. 30.
3. Куликов, Ю. А. Переходные процессы в электрических системах [Текст] : учеб.пособие: Рек. Мин. обр. РФ / Ю.А. Куликов. - Новосибирск : Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та ; М. : Мир : АСТ, 2002,2003 - 284 с. : рис., табл. - Библиогр.: с. 265-266.
4. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования [Текст] : учеб.пособие для вузов: Рек. Мин. обр. РФ / Под ред. О.Д. Гольдберга. - М. :Высш. шк., 2001. - 512 с. : рис., табл. - Библиогр.: с. 512.
5. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования [Текст] : РД 153-34.0-20.527-98 / под ред. Б. Н. Неклепаева. - М. : НЦ ЭНАС, 2001, 2004. - 152с.
6. Мясоедов, Ю. В. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения [Текст] : учеб.-метод. пособие / Ю. В. Мясоедов, Л. Б. Гоголева ; АмГУ. Эн.Ф. - Благовещенск : Изд-во Амур.гос. ун-та, 2002. - 64 с.

в) периодические издания (журналы):

1. Электричество;
2. Известия РАН. Энергетика;
3. Электрические станции;
4. Энергетик;
5. Электрика;
6. Вестник МЭИ;
7. Промышленная энергетика;
8. Энергетика. Сводный том;
9. Вестник ИГЭУ;
10. IEEE Transaction on Power Systems;
11. International Journal of Electrical Power & Energy Systems.

г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	http://www.iqlib.ru	Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания
2	http://www.twirpx.com/files/tek/	Twirpx.com - это служба, обеспечивающая с помощью веб-интерфейса, расположенного только по адресу http://www.twirpx.com, и специализированного аппаратно-программного обеспечения хранение, накопление, передачу и обработку материалов Пользователей, представленной в электронном виде в публичный доступ. Интернет-библиотека, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания
3	Консультант +	Справочно-правовая система. Содержит законодательную базу, нормативно-правовое обеспечение, статьи.

На практических занятиях и в самостоятельной работе студентов используется система компьютерной математики Mathcad, ПВК TKZ-3000 и графический редактор VISIO.

Модуль «Электромеханические переходные процессы»

а) **основная литература**:

1. Куликов, Юрий Алексеевич. Переходные процессы в электрических системах [Текст] : Учеб. пособие: Рек. Мин. обр. РФ / Ю.А. Куликов, 2003. - 284 с.

2 Строев, Владимир Андреевич. Исследование переходных процессов и устойчивости сложных регулируемых электроэнергетических систем [Текст] : учеб. пособие: лаборатор. практикум / В. А. Строев, Н. Г. Филиппова, Т. И. Шелухина, 2003. - 68 с.

3. Переходные процессы в электроэнергетических системах [Текст] : учеб. пособие : доп. Мин. обр. РФ / И. П. Крючков [и др.] ; под ред. И. П. Крючкова, 2009. - 415 с.

б) **дополнительная литература:**

1. Электромеханические переходные процессы [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец.140203, 140204, 140205, 140211 / АмГУ, Эн.ф., 2007. - 84 с.

2. Куликов, Юрий Алексеевич. Переходные процессы в электрических системах [Текст] : Учеб. пособие / Ю.А.Куликов, 2002. - 284 с.

3. Веников, Валентин Андреевич. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст] : учеб.: доп. Мин. высш. образ. / В. А. Веников, 1978. - 415 с.

4. Чемборисова, Наиля Шавкатовна. Основы анализа переходных режимов ЭЭС [Текст] : Учеб. пособие / Н. Ш. Чемборисова, 2002. - 40 с.

в) **периодические издания:**

1. «Электричество».
2. «Электрические станции».
3. «Энергетик».
4. «Промышленная энергетика».
5. «Электротехника».
6. «Электрика».
7. «Энергохозяйство за рубежом».
8. «Electrical Power and Energy Systems».
9. «IEEE Transactions. Power systems».
10. «Energy Policy».
11. «Вестник ИГЭУ».
12. «Вестник Московского энергетического института».
13. «Известия вузов. Электромеханика».
14. «Известия РАН. Энергетика».
15. «Новости электротехники»
16. «Амурский дилижанс».
17. «Вестник Амурского государственного университета».
18. «Энергетика. Сводный том».
19. «Электротехника. Сводный том»

г) **программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	http://www.iqlib.ru/	Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знаний.

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

№ п/п	Наименование лабораторий, ауд.	Основное оборудование
1	2	3
1	508 (6) Лаборатория переходных процессов	Лабораторно-практический комплекс на базе стендов производства ООО Инженерно-производственный центр «Учебная техника», г. Челябинск.

11. РЕЙТИНГОВАЯ ОЦЕНКА ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Рейтинговая оценка деятельности студентов осуществляется в соответствии с технологической картой дисциплины о рейтинговой системе обучения, принятой на заседании кафедры энергетики.

Текущий контроль качества освоения отдельных тем и модулей дисциплины осуществляется на основе рейтинговой системы. Этот контроль проводится ежемесячно в течение семестра и качество усвоения материала (выполнения задания) оценивается в баллах, в соответствии с рейтинг планом дисциплины.

Экзамен проводится в конце семестра и оценивается по 5-ти балльной системе. Допуск к экзамену осуществляется по итоговому рейтингу текущего контроля, который определяется суммированием баллов по всем видам текущего контроля. Максимальный балл составляет 100, в том числе: индивидуальные домашние задания – 60, коллоквиум – 30, другие виды текущего контроля – 10 баллов. Допуск к экзамену соответствует 56…100 баллам.

Приложение 1

Аннотация к тестам по дисциплине
«Переходные процессы» модуль «Электромагнитные переходные процессы»

Представлено 6 вариантов тестовых заданий. Каждый вариант включает 20 заданий. При разработке тестов использовались следующие формы:

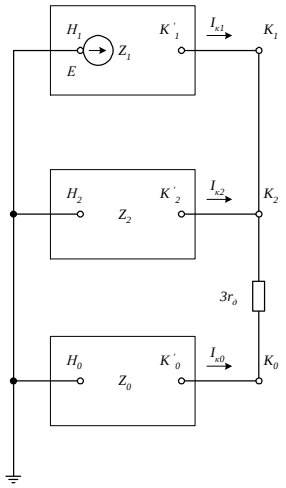
а) открытого типа "Дополнить";
б) закрытая с одним правильным ответом;
в) на установление правильной последовательности;
г) задание с несколькими правильными ответами типа: "Подчеркнуть относящиеся к…".

Время, отводимое на выполнение всех заданий, составляет два часа аудиторных занятий или 1 час 30 мин астрономического времени тестирования.

При оценке результатов студентов оценка:
"отлично" соответствует более 15 правильных ответов;
"хорошо" - более 10 до 15 включительно правильных ответов;
"удовлетворительно" - 10 правильных ответов;
"неудовлетворительно" - менее 10 правильных ответов;

Вариант № 1

1. Одной из причин возникновения электромагнитных переходных процессов в электроэнергетической системе является …
   а) регулирование напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой;
   б) возникновение местной несимметрии;
   в) проведение оперативных переключений персоналом энергопредприятий;
   г) резкое увеличение электрической нагрузки энергосистемы.
2. Наиболее распространенным видом КЗ в энергосистемах при глухозаземленной нейтрали является …
   а) трехфазное; б)двухфазное; в)двухфазное на землю; г)однофазное.
3. Одной из целей расчета электромагнитных переходных процессов является …
   а) выбор и проверка электрических аппаратов и проводников;
   б) выбор мощности силовых трансформаторов;
   в) выбор количества проводов в расщепленной фазе;
   г) определение допустимого расстояния между фазным проводом ЛЭП и землей.
4. Дополнить средний ряд напряжений 515; … 230; 115; … 20; 18; … 6,3; 3,15 кВ
   а) 340; 37; 24; 15,75; 13,8 б) 330; 35; 27; 15; 13



в) 330; 37,5; 24; 15,75; 13,8 г) 340; 37,5; 24; 15,75; 13

5. Для синхронной машины при чисто индуктивной цепи статора поперечная составляющая начального значения периодической слагающей тока возникшего переходного процесса или так называемого начального сверхпереходного тока определяется …

а) $I''_{q|0|}=\dfrac{E''_{d|0|}}{x''_{q|0|}+x_{вн}}$; *б)* $I''_{q|0|}=\dfrac{E''_{q|0|}}{x''_{q|0|}+x_{вн}}$; *в)* $I''_{d|0|}=\dfrac{E''_{q|0|}}{x''_{d|0|}+x_{вн}}$; *г)* $I''_{q|0|}=\dfrac{E''_{q|0|}}{x''_{q|0|}}$.

6. ДОПОЛНИТЬ:Основные допущения, применяемые при расчете электромагнитных переходных процессов, – это … _____

7. ДОПОЛНИТЬ:Начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ определяется по выражению …_____

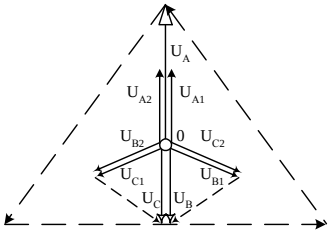
8. ДОПОЛНИТЬ:Ударный коэффициент при трехфазном КЗ определяется по выражению … _____и зависит от … _____

9. ДОПОЛНИТЬ:Мощность КЗ определяется по выражению …_____

10. ДОПОЛНИТЬ:Короткое замыкание - это … _____

11. Приведенная комплексная схема замещения соответствует случаю …
    а) двухфазного замыкания на землю через дугу;б) двухфазного замыкания через дугу;
    в) однофазного замыкания через дугу;г)при наличии сопротивления в одной фазе;
    д) при наличии одинаковых сопротивления в двух фазах.

12. Данная векторная диаграмма напряжений в месте короткого замыкания соответствует
    а)однофазному КЗ;б) двухфазному КЗ;в) двухфазному КЗ на землю.



13. Для случая однофазного КЗ выбрать дополнительное сопротивление $\Delta x^{(n)}$

$$а)\ \Delta x^{(n)}=x_{2\Sigma};\qquad б)\ \Delta x^{(n)}=x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma};\qquad в)\ \Delta x^{(n)}=\frac{x_{2\Sigma}\cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma}}.$$

и значение коэффициента $m^{(n)}$

$$а)\ m^{(n)}=\sqrt{3};\qquad б)\ m^{(n)}=3;\qquad в)\ m^{(n)}=\sqrt{3}\sqrt{1-\frac{x_{2\Sigma}\cdot x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma})^2}}.$$

14. Началом схемы нулевой последовательности считается точка, в которой …
    а) объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей;
    б) возникла рассматриваемая несимметрия;
    в) объединены ветви с нулевым потенциалом.

15. Сопротивление, через которое заземленанейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, в схему нулевой последовательности …
    а) не вводится;б) вводится своей величиной;
    в) должно быть введено утроенной величиной.

16. Схема обратной последовательности является …

а) обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима или процесса, генераторы и нагрузки введены в нее соответствующими реактивностями и ЭДС, а остальные элементы - неизменными сопротивлениями;

б) обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима или процесса, генераторы и нагрузки введены в нее соответствующими реактивностями и ЭДС, равными нулю, а остальные элементы - неизменными сопротивлениями;

в) схемой, которая в значительной мере определяется соединением обмоток участвующих трансформаторов и прочих элементов.

17. Представленная ниже последовательность расчета периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени

1) Составление схемы замещения, в которую источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями;

2) Преобразование схемы замещения с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;

3) Нахождение расчетного сопротивления по выражению

$$x_{расч} = x_{\Sigma}\frac{S_{н\Sigma}}{U_{ср}^2} \text{ или } x_{расч} = x_{*\Sigma}\frac{S_{н\Sigma}}{S_{б}}.$$

4) Выбор соответствующих кривых и нахождение для заданного момента времени относительной величины тока I*nt.

5) Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени $I_{nt} = I_{*nt}\cdot I_{н\Sigma}$, где $I_{н\Sigma} = \frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_{ср}}$.

относится к …

а) методу расчетных кривых при храсч≤ 3;
б) методу расчетных кривых при храсч≥ 3;
в) методу типовых кривых при наличии в схеме только источников конечной мощности;
г) методу типовых кривых при наличии в схеме источников конечной мощности и системы.

18. Для метода типовых кривых при наличии в схеме только источников конечной мощности выбрать правильную последовательность действий …

Составление схемы замещения, в которую источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями;

Преобразование схемы замещения с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;

Преобразование схемы замещения с выделением двух групп источников с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;

Определение начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ$I_{к,0}$;

Определение начального значения периодической составляющей тока в генераторной ветви $I_{Г,0} = \frac{E''_{Г,0} - I_{к,0}x_{к}}{x_{Г}}$;

Нахождение отношения тока по выражению $I_{*Г,0} = \frac{I_{Г,0}}{I_{Гном}}$ *или* $I_{*Г,0} = \frac{I_{*Г,0[б]}}{I_{*Гном[б]}}$, *а также* $\frac{I_{Г,0}}{I_{к,0}}$.

Нахождение отношения тока по выражению $I_{*Г,0} = \frac{I_{Г,0}}{I_{Гном}}$ *или* $I_{*Г,0} = \frac{I_{*Г,0[б]}}{I_{*Гном[б]}}$.

Выбор соответствующих кривых и нахождение для заданного момента времени в зависимости от $I_{*Г,0}$ относительной величины $\gamma_t = \frac{I_{Гt}}{I_{Г,0}}$.

Выбор соответствующих кривых и нахождение для заданного момента времени относительной величины γ_t, а затем, для заданного момента времени находится $\gamma_{кt} = \frac{I_{кt}}{I_{к,0}}$.

Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени $I_{Г,t} = \gamma_t \cdot I_{Г,0} = \gamma_t \cdot I_{*Г,0}I_{н\Sigma}$, где $I_{н\Sigma} = \frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_{ср}}$.

Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени $I_{к,t} = \gamma_{к,t}\cdot I_{Г,0} = \gamma_t \cdot I_{к,0}$.

19. ДОПОЛНИТЬ: Для составления схемы замещения нулевой последовательности следует выявить возможные пути циркуляции токов нулевой последовательности на каждой ступени напряжения, начиная от точки КЗ, при этом необходимо руководствоваться следующим … 1) … 2) … 3) …

20. ДОПОЛНИТЬ: Основные уравнения второго закона Кирхгофа при поперечной несимметрии отдельно для каждой последовательности будут иметь вид …
1) … 2) … 3) …

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Амурский государственный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____В.В. Проказин
«__» _____ 20___г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Электромеханические переходные процессы

по специальности ***140205.65 – Электроэнергетические системы и сети***

Квалификация (степень) выпускника			***специалист***		
Курс ***4***		Семестр	***7, 8***		
Лекции		Семестр **7**	**32** (час.)	Экзамен	- **7** ***семестр***
		Семестр **8**	**30** (час.)	Зачет	- **8** ***семестр***
Практические занятия		Семестр **7**	**16** (час.)		
		Семестр **8**	**15** (час.)		
Самостоятельная работа		Семестр **7,8**	**54** (час.)	КСР	**30** (час.)
Общая трудоемкость дисциплины		***177*** (час.),	в т.ч. ауд.	***93*** (час.)	
Курсовая работа		Семестр **8**			

Составитель ***А.Н. Козлов, доцент, канд. тех. наук***

Факультет ***энергетический***

Кафедра ***энергетики***

2012

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта ВПО по направлению подготовки дипломированного специалиста 140200 – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры энергетики
« 29 » июня 2012г., протокол № 13
Заведующий кафедрой_____ Ю.В. Мясоедов

Рабочая программа одобрена на заседании учебно-методического совета направления подготовки дипломированного специалиста 140200 – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

« 29 » июня 2012г., протокол № 13
Председатель _____ Ю.В. Мясоедов
(подпись, И.О.Ф)

Рабочая программа переутверждена на заседании кафедры от _____протокол № _____
«___»_____ 20__г., протокол № _____
Заведующий кафедрой_____ _____
(подпись, дата) И.О.Ф.

СОГЛАСОВАНО
Учебно-методическое управление
_____
«___»_____20___ г.

СОГЛАСОВАНО
Председатель учебно-методического совета факультета
_____Ю.В. Мясоедов
« 29 » июня 2012г.

СОГЛАСОВАНО
Заведующий выпускающей кафедрой
_____ Ю.В. Мясоедов

« 29 » июня 2012г.

СОГЛАСОВАНО
Директор научной библиотеки
_____Л.А. Проказина

«___»_____20__г.

4. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения дисциплины является получение теоретических и практических навыков анализа переходных электромеханических процессов при малых и больших возмущениях в электрических системах. При этом основное внимание уделяется методам анализа статической и динамической устойчивости и мероприятиям по их обеспечению.

Основными задачами изучения дисциплины является ознакомление студентов с основными характеристиками режимов электрической системы и соотношениям между их параметрами, практическими критериями устойчивости, способом площадей и методом малых колебаний при анализе динамической и статической устойчивости; ознакомление с особенностями расчетов переходных процессов в сложной системе при учете действия регуляторов возбуждения и скорости, при анализе переходных процессов и устойчивости в узлах нагрузки, а также в асинхронных режимах, возникающих в системе.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- получить теоретические знания и иметь ясное представление о физике переходных электромеханических процессов в синхронных и асинхронных машинах, узлах комплексной нагрузки и энергосистемы в целом;
- знать основные допущения и методы анализа статической и динамической устойчивости электрических систем, четко представлять особенности протекания электромеханических процессов в системах электроснабжения и в асинхронных режимах электроэнергетических систем, знать об особенностях протекания электромеханических процессов с учетом условий региона и основных мероприятий по обеспечению статической, динамической и результирующей устойчивости электрических систем;
- иметь практические навыки применения способа площадей и навыки численного интегрирования уравнения движения генератора при анализе динамической устойчивости с учетом различных способов регулирования возбуждения, как для простых, так и для сложных электрических систем; навыки применения метода малых колебаний при анализе статической устойчивости, применения математического моделирования переходных процессов и анализа складывающейся в энергосистеме схемно-режимной ситуации;
- уметь разбираться в принципах действия и влиянии устройств регулирования и управления на электромеханические переходные процессы и послеаварийные установившиеся режимы работы электроэнергетических систем.

Изучение основ электромеханических переходных процессов базируется на сведениях, излагаемых в дисциплинах «Электрические машины», «Математические задачи энергетики» (раздел «Методы численного интегрирования»), «Электромагнитные переходные процессы».

5. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО:

Государственный образовательный стандарт предусматривает изучение вопросов устойчивости и переходных электромеханических процессов для специальности 140205.65 следующим образом:

- для специальности 140205.65 изучение дисциплины «Электромеханические переходные процессы» предусматривается в качестве специальной дисциплины – шифр СД.Ф.02.

Базовыми для данной дисциплины являются курсы «Высшая математика» (раздел «Дифференциальное и интегральное исчисление»), «Теоретические основы электротехники», «Электрические машины», «Математические задачи энергетики» (раздел «Методы численного интегрирования»), «Электрические системы и сети» (разделы «Конструкция воздушных и кабельных линий», «Схемы замещения ВЛ и КЛ»), «Электромагнитные переходные процессы».

В свою очередь данная дисциплина является основой для изучения дисциплин «Автоматика электроэнергетических систем», «Оптимизация в электроэнергетических

системах», «Эксплуатация электрических систем», «Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения».

2.1 Содержание дисциплины СД.Ф.02 «Электромеханические переходные процессы» согласно ГОС ВПО по направлению 650900:

статическая устойчивость электрической системы; практические критерии устойчивости; метод малых колебаний; статическая устойчивость с учетом действия регуляторов возбуждения и скорости; переходные процессы в узлах нагрузки системы, устойчивость узлов нагрузки; динамическая устойчивость электрической системы; способ площадей; анализ процессов с учетом форсировки возбуждения; способы приближенного решения уравнения движения ротора генератора; понятие результирующей устойчивости; процесс выпадения генератора из синхронизма, условие ресинхронизации.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- **знать** физику переходных электромеханических процессов в синхронных и асинхронных машинах, основные допущения и методы анализа статической и динамической устойчивости электрических систем, теоретическое обоснование классификации основных мероприятий по обеспечению статической, динамической и результирующей устойчивости электрических систем;

- **уметь** применять способ площадей и методы численного интегрирования уравнения движения генератора при анализе динамической устойчивости с учетом различных способов регулирования возбуждения, как для простых, так и для сложных электрических систем;

- **владеть навыками** применения метода малых колебаний при анализе статической устойчивости, применения математического моделирования переходных процессов и анализа складывающейся в энергосистеме схемно-режимной ситуации.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 177 часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Виды учебной работы				Формы текущего контроля
		Лекции (час.)	Практ. занят. (час.)	Лабор. работы (час.)	СРС (час.)	
Семестр 7						
1	***Раздел 1 «Статическая устойчивость электрической системы»*** 1.2 Введение 1.2 Схема замещения и векторная диаграмма СГ для анализа ЭМПП. 1.3 Уравнение механического движения ротора генератора. 1.4 Угловые характеристики мощности	8	4		4	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ.
2	***Раздел 2 «Динамическая устойчивость электрической системы»*** 2.1 Понятие динамической устойчивости	6	6		8	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических

	2.2 Способ площадей, допущения и область применения. 2.3 Метод последовательных интервалов.					работ.
3	***Раздел 3 «Метод малых колебаний»*** 3.1 Задачи и методы исследования статической устойчивости ЭЭС 3.2 Виды нарушения устойчивости ЭЭС 3.3 Регулирование возбуждения, его задачи	6	2		4	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ.
4	***Раздел 4 «Переходные процессы в узлах нагрузки»*** 4.1 Переходные процессы в узлах нагрузки системы. Задачи исследования 4.2 Практические критерии для узлов комплексных нагрузок 4.3 Поведение нагрузки при больших возмущениях	6	4		8	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ.
5	***Раздел 5 «Понятие результирующей устойчивости энергосистемы»*** 5.1 Асинхронные режимы в ЭЭС 5.2 Причины и характер изменения частоты в ЭЭС 5.3 Определение динамических характеристик частоты в системе.	6	-		8	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ.
Семестр 8						
	Раздел 6. «ЭЭС как объект противоаварийного управления» 6.1 Характер аварийных режимов в ЭЭС 6.2 Поведение системы на границе области устойчивости 6.3 Возможности автоматического управления режимами 6.4 Влияние устройств ПА на динамическую устойчивость.	8	6		6	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ.

	Раздел 7. «Регулирование частоты и мощности в ЭЭС» 7.1 Автоматическое регулирование частоты и мощности 7.2 Управление режимами в темпе процесса 7.3 Противоаварийное управление Зейской ГЭС 7.4 Расчетные схемы	8	6		6	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ.
	Раздел 8. «Организация автоматической системы противоаварийного управления» 8.1 Структура АСПУ 8.2 Алгоритмы организации ЦСПУ 8.3 Координация на уровнях управления 8.4 Диспетчерские тренажеры	8	3		6	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ.
	Раздел 9. «Разбор системных аварий» 9.1 Разбор аварий в США и России 9.2 Экономические последствия аварий 9.3 Воздействие на элементы ЭЭС в аварийных ситуациях	6	-		4	Посещение лекций. Отчеты по выполнению практических работ. Выполнение и защита курсовой работы

5 . СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 ЛЕКЦИИ

Семестр 7

Раздел 1 «Статическая устойчивость электрической системы»

Тема 1. Введение. Основные понятия и определения электроэнергетических систем (ЭЭС). Классификация режимов ЭЭС и задачи управления ими. Переходные режимы и процессы. Существо электромеханических переходных процессов (ЭМПП). Устойчивость ЭЭС. Практические критерии устойчивости. Рекомендуемая литература.

Тема 2. Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора для анализа ЭМПП. Схема замещения и векторная диаграмма синхронного турбогенератора и гидрогенератора при анализе ЭМПП. Уравнение переходного процесса в обмотке возбуждения генератора.

Тема 3. Уравнение механического движения ротора генератора. Векторная диаграмма простейшей электрической системы. Выражения для мощностей через различные ЭДС генератора.

Тема 4. Угловые характеристики мощности. Определение угловых характеристик мощности через собственные и взаимные сопротивления.

Раздел 2 «Динамическая устойчивость электрической системы»

Тема 5. Понятие динамической устойчивости. Причины и характер больших возмущений в электрической системе. Задачи исследования динамической устойчивости. Допущения, принимаемые при анализе динамической устойчивости. Энергетические соотношения, характеризующие движение ротора генератора.

Тема 6. Способ площадей, допущения и область применения. Способ площадей, допущения и область применения. Определение предельного угла отключения короткого замыкания. Представление процесса на фазовой плоскости. Обобщение способа площадей на схему двух станций.

Тема 7. Метод последовательных интервалов. Способы приближенного решения уравнения движения ротора генератора. Метод последовательных интервалов. Учет электромагнитных переходных процессов. Влияние демпфирования. Анализ процессов с учетом форсировки возбуждения генератора. Особенности расчета переходных процессов в сложной системе.

Раздел 3 «Метод малых колебаний»

Тема 8. Задачи и методы исследования статической устойчивости ЭЭС. Статическая устойчивость ЭЭС. Задачи и методы исследования. Основные допущения и области применения. Математическое описание переходных процессов при анализе статической устойчивости. Метод малых колебаний. Необходимые и достаточные условия статической устойчивости. Статическая устойчивость и малые колебания в нерегулируемой системе. Статическая устойчивость с учетом действия регуляторов возбуждения и скорости.

Тема 9. Виды нарушения устойчивости ЭЭС. Нарушения устойчивости в виде сползания, самораскачивания и самовозбуждения и способы их подавления.

Тема 10. Регулирование возбуждения, его задачи. Ручное регулирование возбуждения, его влияние на статическую устойчивость и режимные характеристики ЭЭС. Анализ статической устойчивости простейшей ЭЭС с учетом автоматического регулятора возбуждения (АРВ) пропорционального действия. Статическая устойчивость ЭЭС с АРВ сильного действия.

Раздел 4 «Переходные процессы в узлах нагрузки»

Тема 11. Переходные процессы в узлах нагрузки системы. Задачи исследования. Статические и динамические характеристики нагрузки. Уравнение движения и схема замещения асинхронного двигателя (АД). Практический критерий статической устойчивости АД. Изменение условий статической устойчивости АД при его работе от источника соизмеримой мощности. Лавина напряжения - причина возникновения и средства подавления. Общие принципы построения практических критериев.

Тема 12. Практические критерии для узлов комплексных нагрузок. Статические характеристики и регулирующие эффекты мощности нагрузок по напряжению. Устойчивость узлов нагрузки.

Тема 13. Поведение нагрузки при больших возмущениях. Пуск АД, работа при толчкообразной нагрузке на валу, при резких снижениях напряжения на зажимах. Численное решение уравнения движения ротора АД при больших возмущениях. Поведение АД нагрузки при коротких замыканиях.

Раздел 5 «Понятие результирующей устойчивости энергосистемы»

Тема 14. Асинхронные режимы в ЭЭС. Общая характеристика асинхронных режимов и основные задачи их исследования. Причины возникновения асинхронного режима. Понятие результирующей устойчивости. Процесс выпадения генератора из синхронизма, необходимое условие ресинхронизации. Практические способы восстановления синхронного режима.

Тема 15. Причины и характер изменения частоты в ЭЭС. Изменения частоты в электроэнергетических системах. Причины и характер изменения частоты. Требования к

частоте как к общесистемному показателю качества электроэнергии. Виды регулирования первичных двигателей. Статические характеристики нерегулируемых и регулируемых первичных двигателей в системе.

Тема 16. Определение динамических характеристик частоты в системе. Лавина частоты и способы ее предотвращения. Автоматическая частотная разгрузка, мероприятия по обеспечению требуемого уровня частоты в ЭЭС.

Семестр 8

Раздел 6. «ЭЭС как объект противоаварийного управления»

Тема 17. Характер аварийных режимов в ЭЭС. Основные определения. Характер аварийных режимов в ЭЭС. Качество переходного режима. Задачи противоаварийного управления энергосистемой.

Тема 18. Поведение системы на границе области устойчивости. Устойчивость установившегося режима ЭЭС. Общая характеристика устойчивости. Виды устойчивости. Поведение системы на границе области устойчивости. Методы оценки устойчивости применительно к задачам энергетики.

Тема 19. Возможности автоматического управления режимами. Динамическая устойчивость в ЭЭС и влияние на нее устройств противоаварийного управления. Математические основы теории оптимального управления режимами энергосистем.

Тема 20. Влияние устройств ПА на динамическую устойчивость. Оценка влияния на устойчивость автоматического повторного включения линий, импульсной разгрузки генераторов, отключения части генераторов. Работа делительной автоматики в ЭЭС.

Раздел 7. «Регулирование частоты и мощности в ЭЭС»

Тема 21. Автоматическое регулирование частоты и мощности. Автоматическое регулирование частоты и мощности в ЭЭС. Анализ переходных режимов с учетом влияния АРЧМ.

Тема 22. Управление режимами в темпе процесса. Регулирование реактивной мощности. Частотная разгрузка и ограничение напряжения в узлах системы. Влияние их работы на электромеханический процессы в ЭЭС.

Тема 23. Противоаварийное управление Зейской ГЭС. Выбор характерных режимов для анализа работы устройств противоаварийного управления.

Тема 24. Расчетные схемы. Основные расчетные схемы. Принципы действия и уставки устройств противоаварийного управления.

Раздел 8. «Организация автоматической системы противоаварийного управления»

Тема 25. Структура АСПУ. Структура автоматической системы противоаварийного управления. Локальные устройства управления. Определение объема воздействия. Централизованные устройства управления.

Тема 25. Алгоритмы организации ЦСПУ. Алгоритмы организации адаптивной и неадаптивной централизованной системы управления.

Тема 27. Координация на уровнях управления. Иерархическая система противоаварийной автоматики. Алгоритмы ее организации.

Тема 28. Диспетчерские тренажеры. Диспетчерские тренажеры: виды, назначение, основные функции.

Раздел 9. «Разбор системных аварий»

Тема 29. Разбор аварий в США и России. Оценка правильности действия автоматических устройств и учет человеческого фактора.

Тема 30. Экономические последствия аварий. Сравнительная оценка эффективности и обоснование применения средств противоаварийного управления.

Тема 31. Воздействие на элементы ЭЭС в аварийных ситуациях. Средства противоаварийного управления энергосистемой.

5.2 ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

На практических занятиях решают задачи по оценке устойчивости простейшей электроэнергетической системы при различных возмущениях. Должны быть рассмотрены:

В седьмом семестре:

1. Составление схемы замещения и определение параметров исходного режима для различных видов АВР.
2. Векторная диаграмма синхронного генератора.
3. Статическая устойчивость. Пределы мощности и пределы устойчивости.
4. Определение предельного угла отключения короткого замыкания.
5. Определение площадок ускорения и торможения, критического угла, запаса динамической устойчивости.
6. Метод последовательных интервалов для системы с нерегулируемым генератором.
7. Уточненный расчет методом последовательных интервалов - для системы с регулируемым генератором.
8. Характеристики и устойчивость нагрузки.

В восьмом семестре:

1. Определение динамической устойчивости системы с учетом АРВ и АПВ численными методами.
2. Оценка устойчивости ЭЭС после отключения части генераторов или их импульсной разгрузке.
3. Исследование эффективности различных способов противоаварийного управления режимами ЭЭС.
4. Определение устойчивости послеаварийного режима с использованием упрощенного алгоритма расчета.
5. Исследование устойчивости нагрузки по практическим критериям устойчивости, влияния компенсации реактивной мощности нагрузки на устойчивость нагрузки системы
6. Выбор оптимального управляющего воздействия.

6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

Включает изучение лекционного материала и литературы по дисциплине при подготовке к практическим занятиям а также активный поиск новой информации в Интернете по заданию лектора или руководителя практических занятий.

№ п/п	№ раздела (темы) дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоемкость в часах
Семестр 7			
1	***Раздел 1 «Статическая устойчивость электрической системы»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	4
2	***Раздел 2 «Динамическая устойчивость электрической системы»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	8
3	***Раздел 3 «Метод малых***	Подготовка отчетов по выполнению	4

	колебаний»	практических работ.	

4	***Раздел 4 «Переходные процессы в узлах нагрузки»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	8
5	***Раздел 5 «Понятие результирующей устойчивости энергосистемы»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	8
Семестр 8			
6	***Раздел 6. «ЭЭС как объект противоаварийного управления»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	6
7	***Раздел 7. «Регулирование частоты и мощности в ЭЭС»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	6
8	***Раздел 8. «Организация автоматической системы противоаварийного управления»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ.	6
9	***Раздел 9. «Разбор системных аварий»***	Подготовка отчетов по выполнению практических работ. Выполнение и защита курсовой работы	4

6.1. КУРСОВАЯ РАБОТА

Примерная тема курсовой работы: «Оценка устойчивости простейшей электроэнергетической системы».

Целью курсовой работы является приобретение студентами практических навыков применения способа площадей и навыков численного интегрирования уравнения движения генератора при анализе динамической устойчивости с учетом различных способов регулирования возбуждения, как для простых, так и для сложных электрических систем; навыков применения метода малых колебаний при анализе статической устойчивости. Вариант задания приведен ниже. Обязательным приложением к пояснительной записке является один лист графической части.

6.1.1. Вариант задания на курсовую работу по дисциплине «Электромеханические переходные процессы»:

Курс: четвертый
Специальность: 140205
Группа: 843
Студент: ***Соболев А.А.***

Вариант 01

Срок сдачи курсовой работы на проверку: 16 апреля 2012 г.

1. Для заданной схемы электропередачи определить запас статической устойчивости по пределу передаваемой мощности, при передаче от генератора в систему мощности $P_н$ для следующих случаев:

- неявнополюсный генератор без АРВ ($X_d = X_q$);
- неявнополюсный генератор с АРВ пропорционального типа ($E'_q = const$);
- неявнополюсный генератор с АРВ СД ($U_г = const$).

2. Построить векторную диаграмму генератора в исходном режиме.

3. Выполнить расчет динамической устойчивости в соответствии с алгоритмом развития аварии при к.з. в заданной точке в следующей последовательности:

- рассчитать и построить угловые характеристики мощности нормального, аварийного и послеаварийного режимов при $E' = const$;
- произвести численный расчет и построить зависимость изменения угла δ и ускорения ротора a от времени (приближенный расчет);
- в случае нарушения устойчивости определить предельные угол и время отключения к.з., необходимые для сохранения устойчивости;
- при сохранении устойчивости определить коэффициент запаса динамической устойчивости;
- выполнить уточненный расчет динамического перехода с учетом реакции якоря и действия АРВ и построить зависимости δ, E'_q, E_q, E_{qe} от времени.

4. Проверить, будет ли устойчива нагрузка H после отключения выключателя $Q6$ и определить коэффициент запаса устойчивости по напряжению в случаях:

- отсутствия АРВ у генератора;
- генератор снабжен АРВ ПТ;
- генератор снабжен АРВ СД.

5. Определить допустимое время перерыва электроснабжения по условиям устойчивости эквивалентной асинхронной нагрузки.

Алгоритм развития аварии: В точке К2 – трехфазное кз, сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обоих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{с.з.} = 0$, $t_{О.В.} = 0{,}1$ с; выключатель Q2 (со стороны Т2) – второй ступенью дистанционной защиты: $t_{с.з.} = 0{,}05$ с, $t_{О.В.} = 0{,}1$ с. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0{,}15$ с, $t_{В.В.} = 0{,}05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0{,}1$ с, $t_{В.В.} = 0{,}05$ с. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?

Руководитель курсовой работы _____ *Козлов А.Н.*

7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Наилучшей гарантией глубокого и прочного усвоения дисциплины «Электромеханические переходные процессы» является заинтересованность студентов в приобретении знаний. Поэтому для поддержания интереса студентов к материалу дисциплины необходимо использовать различные образовательные технологии и задействовать все атрибуты процесса научного познания.

При преподавании дисциплины «Электромеханические переходные процессы» используется технология блочного обучения.

При чтении лекций по данной дисциплине используется такой неимитационный метод активного обучения, как «Проблемная лекция». Перед изучением раздела обозначается проблема, на решение которой будет направлен весь последующий материал раздела.

При выполнении практических и лабораторных работ используется прием интерактивного обучения «Кейс-метод»: задание студентам для подготовки к выполнению лабораторной работы имитирует реальное событие; с преподавателем обсуждаются цели работы и ход ее выполнения; при защите работы - обсуждение и анализ полученных результатов; обсуждение теоретических положений, справедливость которых была установлена в процессе выполнения лабораторной работы.

8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

В процессе изучения дисциплины «Электромеханические переходные процессы» предусмотрены следующие виды промежуточного контроля знаний студентов:

- экспресс-опрос лектора по итогам изучения разделов курса (образцы тестовых заданий для экспресс-опроса приведены ниже);
- выполнение и защита отчетов по практическим занятиям.

8.1. Тестовые задания для экспресс-опроса по дисциплине «Электромеханические переходные процессы»:

Вариант 1.

9. Какое из нижеприведенных определений отвечает понятию «статическая устойчивость»?
   а) Это способность системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние, или состояние, близкое к исходному (допустимое по условиям эксплуатации системы);
   б) Это способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения, или, если возмущение не снято – режим, близкий к исходному;
   в) Это способность системы после нарушения устойчивости и допустимого по условиям эксплуатации асинхронного хода восстанавливать синхронную работу.

10. Что из нижеперечисленного относится к параметрам режима?
    а) активная, реактивная, полная мощность, ток, напряжение, частота;
    б) изменение электромагнитных явлений в электрических цепях, изменение механических явлений во вращающихся машинах;
    в) полные, активные и реактивные сопротивления и проводимости элементов, коэффициенты трансформации, постоянные времени.

11. Можно ли для явнополюсной машины составить традиционную схему замещения с неизменными сопротивлением и ЭДС?
    а) да;
    б) нет;
    в) затрудняюсь ответить.

12. С чем связан уровень частоты в системе?
    а) с балансом реактивной мощности;
    б) с балансом активной мощности;
    в) затрудняюсь ответить.

13. Основное допущение при использовании метода последовательных интервалов?
    а) на каждом интервале приращение угла δ неизменно;
    б) в течение каждого интервала неизменно эквивалентное сопротивление системы;
    в) в течение каждого интервала неизменно ускорение ротора, определенное в начале интервала.

14. В чем особенность регуляторов пропорционального действия – АРВ-ПД?
    а) затрудняюсь ответить;

б) работа этих регуляторов возможна только с запаздыванием и требует наличия зоны нечувствительности;

в) эти регуляторы могут реагировать на изменение режима практически без запаздывания.

15. Какой из приведенных ниже критериев позволяет определить зону возможного изменения параметров настройки регуляторов?

а) критерий Михайлова;

б) метод D-разбиения;

в) критерий Гурвица.

16. Что такое «электрический центр системы»?

а) точка баланса активной мощности;

б) место подключения двух и более источников питания;

в) точка в системе, в которой напряжение при асинхронном ходе источников питания снижается до нуля.

Вариант 2.

9. Какое из нижеприведенных определений отвечает понятию «динамическая устойчивость»?

а) Это способность системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние, или состояние, близкое к исходному (допустимое по условиям эксплуатации системы);

б) Это способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения, или, если возмущение не снято – режим, близкий к исходному;

в) Это способность системы после нарушения устойчивости и допустимого по условиям эксплуатации асинхронного хода восстанавливать синхронную работу.

10. Что из нижеперечисленного относится к параметрам системы?

а) активная, реактивная, полная мощность, ток, напряжение, частота;

б) изменение электромагнитных явлений в электрических цепях, изменение механических явлений во вращающихся машинах;

в) полные, активные и реактивные сопротивления и проводимости элементов, коэффициенты трансформации, постоянные времени.

11. Какой параметр не меняется в первый момент изменения режима и служит связующим для режимов «до» и «после» возмущения?

а) E'_q;

б) E_q;

в) E'.

12. С чем связан уровень напряжения в системе?

а) с балансом реактивной мощности;

б) с балансом активной мощности;

в) затрудняюсь ответить.

13. В чем основная трудность определения изменения угла δ во времени?

а) необходим большой объем счетной работы;

б) уравнение движения ротора не имеет аналитического решения;

в) требуются тщательные графические построения.

14. Почему мощность турбины при расчете электромеханических переходных процессов можно принимать неизменной?
    а) это постоянство обеспечивает оперативный персонал турбинного и котельного цехов;
    б) это обеспечивается высокой инерционностью ротора турбины;
    в) постоянные времени регуляторов турбины заметно превышают время собственно переходного процесса.

15. Какой из приведенных ниже критериев позволяет определить зону возможного изменения параметров настройки регуляторов?
    а) метод D-разбиения;
    б) критерий Гурвица;
    в) критерий Михайлова.

16. Какова причина опрокидывания двигателей нагрузки?
    а) электрический момент двигателя становится меньше момента механизма;
    б) в двигателе происходит короткое замыкание;
    в) перегорают предохранители в цепи статора.

Вариант 3.

9. Какое из нижеприведенных определений отвечает понятию «результирующая устойчивость»?
    а) Это способность системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние, или состояние, близкое к исходному (допустимое по условиям эксплуатации системы);
    б) Это способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения, или, если возмущение не снято – режим, близкий к исходному;
    в) Это способность системы после нарушения устойчивости и допустимого по условиям эксплуатации асинхронного хода восстанавливать синхронную работу.

10. Что из нижеперечисленного относится к параметрам процесса?
    а) активная, реактивная, полная мощность, ток, напряжение, частота;
    б) изменение электромагнитных явлений в электрических цепях, изменение механических явлений во вращающихся машинах;
    в) полные, активные и реактивные сопротивления и проводимости элементов, коэффициенты трансформации, постоянные времени.

11. Какие параметры системы изменяются с изменением режима?
    а) активные сопротивления и проводимости;
    б) реактивные сопротивления и проводимости;
    в) коэффициенты трансформации, постоянные времени.

12. Что такое «осуществимость режима»?
    а) наличие баланса активной мощности;
    б) наличие баланса реактивной мощности;
    в) наличие обоих условий

13. Как определяется предельный угол отключения короткого замыкания?
    а) из графических построений угловых характеристик системы;
    б) из равенства площадок ускорения и торможения;
    в) аналитическим решением уравнения движения ротора в общем виде.

14. В чем особенность регуляторов сильного действия – АРВ-СД?
    а) затрудняюсь ответить;
    б) работа этих регуляторов возможна только с запаздыванием и требует наличия зоны нечувствительности;
    в) эти регуляторы могут реагировать на изменение режима практически без запаздывания.

15. Какой из приведенных ниже критериев позволяет определить зону возможного изменения параметров настройки регуляторов?
    а) критерий Гурвица;
    б) критерий Михайлова;
    б) метод D-разбиения.

16. Представляет ли опасность для двигателя режим опрокидывания?
    а) нет, режим аналогичен отключению машины от сети;
    б) да, поскольку из-за перегрева обмоток двигатель выходит из строя;
    б) затрудняюсь ответить.

8.2. Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение

- Регуляторы возбуждения синхронных генераторов.
- Регуляторы скорости первичных двигателей.
- Способы повышения динамической устойчивости ЭЭС.
- Методы оценки устойчивости сложных ЭЭС.
- Управляемые линии электропередачи
- Гибкие линии электропередачи
- Вставки постоянного тока

8.3 Вопросы к экзамену

Семестр 7 – зимняя сессия. Основные блоки вопросов по дисциплине «Электромеханические переходные процессы»

27. Понятие устойчивости работы электрической системы. Виды устойчивости
28. Характеристика мощности простейшей электрической системы.
29. Векторная диаграмма неявнополюсного синхронного генератора
30. Векторная диаграмма явнополюсного генератора
31. Характеристики мощности синхронного генератора, получаемые из векторной диаграммы.
32. Характеристика мощности простейшей системы с регулируемыми генераторами
33. Устойчивость работы генератора, имеющего АРВ без зоны нечувствительности
34. Устойчивость работы генератора, имеющего АРВ с зоной нечувствительности.
35. Практические критерии статической устойчивости.
36. Характеристика мощности при сложной связи генератора с приемной системой.
37. Устойчивость многомашинной системы
38. Оценка динамической устойчивости простейшей электрической системы
39. Уравнение движения ротора. Метод последовательных интервалов.
40. Способы повышения динамической устойчивости.
41. Электрическое торможение как способ повышения динамической устойчивости
42. Импульсная разгрузка как метод повышения динамической устойчивости
43. Регулирующий эффект нагрузки и его влияние на устойчивость
44. Влияние регулирующего эффекта нагрузки на устойчивость работы генератора
45. Понятие электрического центра системы

46. Устойчивость узлов нагрузки
47. Критерии устойчивости узлов нагрузки. Лавина напряжения
48. Характеристика элементов нагрузки
49. Процессы в узлах нагрузки при больших возмущениях
50. Обеспечение устойчивости двигателей при набросе мощности
51. Пуск двигателей
52. Самозапуск двигателей

8.4 Вопросы к зачету

Семестр 8 – летняя сессия. Основные блоки вопросов по дисциплине «Электромеханические переходные процессы»

1. ЭЭС как объект противоаварийного управления. Задачи противоаварийного управления режимами ЭЭС.
2. Характер аварийных режимов в ЭЭС. Требования предъявляемые к режимам. Надежность. Живучесть ЭЭС. Переходные режимы ЭЭС. Качество переходного процесса.
3. Устойчивость установившегося режима ЭЭС. Виды устойчивости. Определение устойчивости по Ляпунову. Поведение системы на границе устойчивости. Методы оценки устойчивости в задачах энергетики.
4. Постановка задачи об анализе устойчивости ЭЭС. Устойчивость ЭЭС при малых возмущениях. Метод малых колебаний.
5. Анализ устойчивости ЭЭС по виду корней характеристического уравнения.
6. Алгебраические критерии устойчивости. Критерий Гурвица. Оценка статической устойчивости ЭЭС по упрощенным критериям устойчивости.
7. Оценка качества переходных процессов в ЭЭС.
8. Устойчивость ЭЭС при больших возмущениях. Методы оценки устойчивости системы при больших возмущениях.
9. Способы воздействия на элементы ЭЭС в аварийных ситуациях. Сравнительная характеристика и эффективность способов.
10. Способы воздействия на ЭЭС для повышения уровня статической устойчивости. Нормирование уровня устойчивости электроэнергетической системы.
11. Способы воздействия на ЭЭС для сохранения динамической устойчивости ЭЭС. Средства противоаварийного управления, применяемые для сохранения устойчивости.
12. Последствия нарушения устойчивости ЭЭС. Асинхронный ход. Результирующая устойчивость. Способы сохранения результирующей устойчивости.
13. Переходные процессы в узлах нагрузки в электрических системах при малых и больших возмущениях.
14. Оптимальное управление переходными режимами ЭЭС. Критерии оптимального управления.
15. Оптимальное управление аварийными режимами ЭЭС как технико-экономическая задача.
16. Автоматические системы противоаварийного управления энергосистемой. Структура автоматической системы противоаварийного управления.
17. Иерархическая система противоаварийного управления режимами объединенной и единой систем управления. Алгоритмы ее организации.
18. Иерархическая структура системы противоаварийной автоматики ЕЭС России.
19. Диспетчерские тренажеры: виды, назначение.

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ»

а) **основная литература**:

1. Куликов, Юрий Алексеевич. Переходные процессы в электрических системах [Текст] : Учеб. пособие: Рек. Мин. обр. РФ / Ю.А. Куликов, 2003. - 284 с.

2 Строев, Владимир Андреевич. Исследование переходных процессов и устойчивости сложных регулируемых электроэнергетических систем [Текст] : учеб. пособие: лаборатор. практикум / В. А. Строев, Н. Г. Филиппова, Т. И. Шелухина, 2003. - 68 с.

3. Переходные процессы в электроэнергетических системах [Текст] : учеб. пособие : доп. Мин. обр. РФ / И. П. Крючков [и др.] ; под ред. И. П. Крючкова, 2009. - 415 с.

б) **дополнительная литература:**

5. Электромеханические переходные процессы [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец.140203, 140204, 140205, 140211 / АмГУ, Эн.ф., 2007. - 84 с.

6. Электромеханические переходные процессы [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 140205 - Электроэнергетические системы и сети, 140203 - Релейная защита и автоматизация. Ч. 2 / АмГУ, Эн.ф., 2007. - 54 с.

7. Куликов, Юрий Алексеевич. Переходные процессы в электрических системах [Текст] : Учеб. пособие / Ю.А.Куликов, 2002. - 284 с.

8. Веников, Валентин Андреевич. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст] : учеб.: доп. Мин. высш. образ. / В. А. Веников, 1978. - 415 с.

9. Чемборисова, Наиля Шавкатовна. Основы анализа переходных режимов ЭЭС [Текст] : Учеб. пособие / Н. Ш. Чемборисова, 2002. - 40 с.

10. Чемборисова, Наиля Шавкатовна. Управление переходными режимами в ЭЭС [Текст] : учеб.- метод. пособие к курсовой работе / Н. Ш. Чемборисова, В. А. Гаврилов, А. В. Пешков, 1998. - 42 с.

в) **периодические издания:**

20. «Электричество».
21. «Электрические станции».
22. «Энергетик».
23. «Промышленная энергетика».
24. «Электротехника».
25. «Электрика».
26. «Энергохозяйство за рубежом».
27. «Electrical Power and Energy Systems».
28. «IEEE Transactions. Power systems».
29. «Energy Policy».
30. «Вестник ИГЭУ».
31. «Вестник Московского энергетического института».
32. «Известия вузов. Электромеханика».
33. «Известия РАН. Энергетика».
34. «Новости электротехники»
35. «Амурский дилижанс».
36. «Вестник Амурского государственного университета».
37. «Энергетика. Сводный том».
38. «Электротехника. Сводный том»

г) **программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	http://www.iqlib.ru/	Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знаний.

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ»

№ п/п	Наименование лабораторий, ауд.	Основное оборудование
1	2	3
1	508 (6) Лаборатория переходных процессов	Лабораторно-практический комплекс на базе стендов производства ООО Инженерно-производственный центр «Учебная техника», г. Челябинск.

3. Краткий конспект лекций

3.1. Электромагнитные переходные процессы

Тема 1. Введение в учение о переходных процессах в ЭЭС и СЭС. (4 часа)

Задачи курса. Понятие о переходном режиме. Причины возникновения переходных процессов. Основные понятия. Особенности электромагнитных переходных процессов. Схемы замещения основных силовых элементов. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов и сдвоенных реакторов. Составление расчетных схем замещения.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Основные определения

Из всего многообразия электромагнитных переходных процессов в электрической системе наиболее распространенными являются процессы, вызванные:

а) включением и отключением двигателей и других приемников электроэнергии;

.6) коротким замыканием в системе, а также повторным включением и отключением (одновременным или каскадным) короткозамкнутой цепи;

в) возникновением местной несимметрии в системе (например, отключение одной фазы линии передачи);

г) действием форсировки возбуждения синхронных машин, а также их развозбуждением (т. е. гашением их магнитного поля);

д) несинхронным включением синхронных машин.

К о р о т к и м з а м ы к а н и е м называют всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в системах с заземленными нейтралями (или четырехпроводных) — также замыкание одной или нескольких фаз на землю (или на нулевой провод).

В системах с незаземленными нейтралями или с нейтралями, заземленными через специальные компенсирующие устройства, замыкание одной из фаз на землю называют простым замыканием. При этом виде повреждения прохождение тока обусловлено главным образом емкостью фаз относительно земли.

При возникновении короткого замыкания в электрической системе сопротивление цепи уменьшается (степень уменьшения зависит от положения точки короткого замыкания в системе), что приводит к увеличению токов в отдельных ветвях системы по сравнению с токами нормального режима. В свою очередь это вызывает снижение напряжений в системе, которое особенно велико вблизи места короткого замыкания.

Обычно в месте замыкания образуется некоторое переходное сопротивление, состоящее из сопротивления возникшей электрической дуги и сопротивлений прочих элементов пути тока от одной фазы к другой или от фазы на землю. Электрическая дуга возникает или с самого начала происшедшего повреждения как, например, при перекрытии или пробое изоляции, или через некоторое время, когда перегорит элемент, вызвавший замыкание. При замыканиях между фазами переходное сопротивление определяется главным образом сопротивлением электрической дуги.

Когда токи достаточно велики (сотни ампер и более), сопротивление дуги приблизительно постоянно и по своему характеру почти чисто активное. С уменьшением тока и увеличением длины дуги, что имеет место в течение переходного процесса, ее сопротивление возрастает.

В ряде случаев переходные сопротивления могут быть столь малы, что практически ими можно пренебречь. Такие замыкания называют м е т а л л и ч е с к и м и.

Естественно, при прочих равных условиях ток при металлическом замыкании больше, чем при наличии переходного сопротивления. Поэтому, когда требуется найти возможные наибольшие величины токов, исходят из наиболее тяжелых условий, считая, что в месте замыкания отсутствуют какие-либо переходные сопротивления .

В трехфазных системах с заземленной нейтралью различают следующие основные виды коротких замыканий в одной точке:

а) трехфазное;

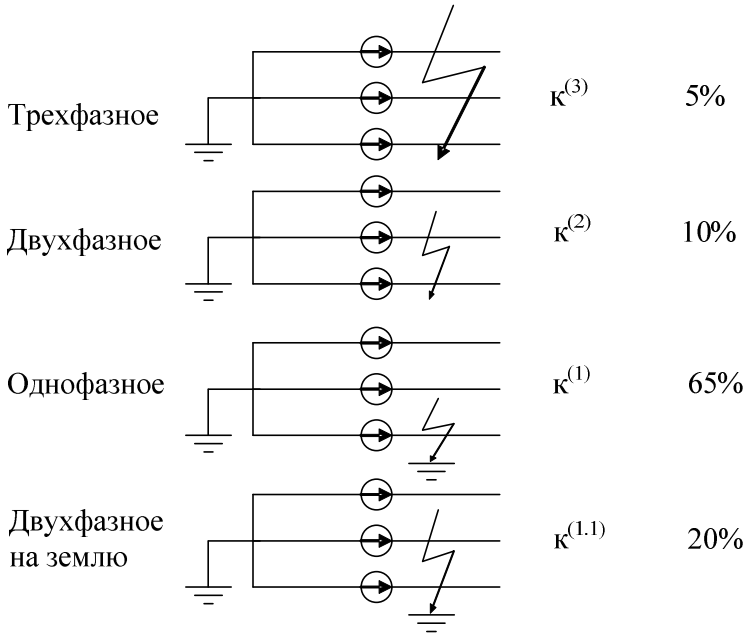
б) двухфазное;

в) однофазное;

г) двухфазное на землю, т. е. замыкание между двумя фазами с одновременным замыканием той же точки на землю.

Трехфазное короткое замыкание является симметричным, так как при нем все фазы остаются в одинаковых условиях. Напротив, все остальные виды коротких замыканий являются несимметричными поскольку при каждом из них фазы находятся, уже в неодинаковых условиях; поэтому системы токов и напряжений при этих видах короткого замыкания в той или иной мере искажены.

Многолетняя аварийная статистика по энергосистемам показывает, что при глухозаземленной нейтрали относительная вероятность различных основных видов короткого замыкания характеризуется относительной вероятностью возникновения (в %):



Как видно, подавляющее число коротких замыканий связано с замыканием на землю, в то время как трехфазное короткое замыкание является очень редким. Однако отсюда было бы неправильным делать вывод, что трехфазное короткое замыкание можно вообще оставить без внимания. Поскольку оно все же возможно, с ним следует считаться, тем более что оно иногда может быть решающим для окончательного суждения относительно возможности работы в условиях короткого замыкания. Хотя трехфазные замыкания являются редкими, однако расчет систем ведут по трехфазным к.з., т.к. это к.з. симметричное и является наиболее тяжелым случаем. Изучение 3-х фазного к.з. важно в связи с тем, что применение метода симметричных составляющих позволяет величины токов и напряжений прямой последовательности любого несимметричного к.з. определять как соответственные величины при условных 3-х фазных замыканиях.

Здесь нелишне также отметить, что процесс включения любого трехфазного приемника или невозбужденного синхронного генератора или двигателя можно рассматривать как короткое замыкание за некоторым сопротивлением.

Несимметричные короткие замыкания, а также несимметричные нагрузки по существу представляют раз. личные виды поперечной несимметрии.

Нарушение симметрии какого-либо промежуточного элемента трехфазной цепи (например, отключение одной фазы линии передачи и т. п.) называют п р о д о л ь н о й н е с и м м е т р и е й.

Возможны случаи, когда одновременно возникает несколько несимметрий одинакового или различного вида. Так, например, при обрыве провода воздушной линии один его конец, расположенный близко к точке подвеса, остается изолированным, а другой, упав на землю, образует однофазное короткое замыкание. Здесь одновременно возникают продольная и поперечная несимметрии.

В качестве другого примера, когда возникают несимметрии одного вида, может служить так называемое д в о й н о е з а м ы к а н и е н а з е м л ю, т.е. одновременное замыкание на землю разных фаз в различных точках сети, работающей с изолированной нейтралью.

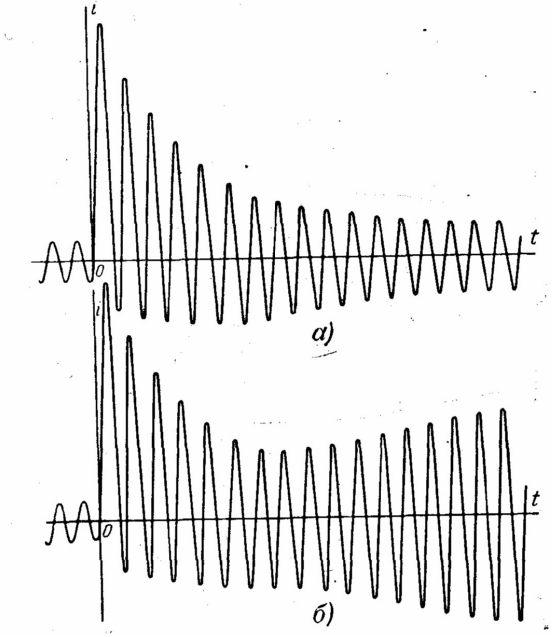
Все виды повреждений, сопровождающихся многократной несимметрией, называют с л о ж н ы м и. К ним, очевидно, относится также любое несимметричное короткое замыкание в сети, работающей в неполнофазном режиме.

Практикой эксплуатации электрических систем установлено, что большая часть возникающих повреждений, особенно на воздушных линиях, имеет проходящий характер, т.е. повреждения самоустраняются после отключения поврежденного участка и не возникают вновь при обратном включении его. Примером такого самоустраняющегося повреждения может служить обычное перекрытие по поверхности гирлянды изоляторов линии, вызванное грозовым разрядом. После отключения линии электрическая прочность воздушного промежутка восстанавливается в течение небольшого отрезка времени, необходимого для деионизации воздуха в месте перекрытия.

В соответствии с этим широкое применение нашло (АПВ) цепей и особенно воздушных линии. Поскольку на последних преобладают замыкания одной фазы, у них производят иногда отключение только поврежденной фазы с последующим однофазным автоматическим повторным включением (ОАПВ) - Наконец, помимо однократного выполняют также многократное автоматическое повторное включение с соответствующими интервалами времени его действия.

Форсировка возбуждения синхронных машин, которую обеспечивают специальные устройства автоматического регулирования возбуждения (АРВ), происходит при снижении напряжения; обычно оно вызвано каким-либо нарушением нормального режима машины. Следовательно, здесь также на возникший переходный процесс накладывается дополнительный переходный процесс нарастания возбуждения машины.

При повреждении обмоток синхронной машины помимо отключения последней от сети производят быстрое ее развозбуждение путем гашения магнитного поля.



Осциллограммы токов при внезапном КЗ: а) при отсутствии АРВ; б) при наличии АРВ

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы

Схема замещения трехобмоточного трансформатора и автотрансформатора, имеющего обмотку низшего напряжения, представляет собой трехлучевую звезду (табл.). Индуктивные сопротивления ее ветвей в относительных единицах при номинальных условиях этого трансформатора соответственно равны:

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= \frac{u_{\text{кВ}}}{100} = 0{,}005(u_{\text{кВ–Н}} + u_{\text{кВ–С}} - u_{\text{кС–Н}});\\ X_{*\,\text{С(ном)}} &= \frac{u_{\text{кВ}}}{100} = 0{,}005(u_{\text{кВ–С}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–Н}});\\ X_{*\,\text{Н(ном)}} &= \frac{u_{\text{кВ}}}{100} = 0{,}005(u_{\text{кВ–Н}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–С}}), \end{aligned}\right\}$$

где $u_{\text{кВ-Н}}$, $u_{\text{кВ-С}}$, $u_{\text{кС-Н}}$ - напряжения короткого замыкания соответствующих пар обмоток, %.

Схема замещения двухобмоточного трансформатора, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на две ветви, также представляет собой трехлучевую звезду (табл.). Индуктивные сопротивления ее ветвей в относительных единицах при номинальных условиях следует определять по формулам

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= 0{,}01(u_{\text{кВ–Н}} - 0{,}25u_{\text{кН1–Н2}});\\ X_{*\,\text{Н(ном)}} &= X_{*\,\text{Н2(ном)}} = 0{,}005u_{\text{кН1–Н2}}, \end{aligned}\right\}$$

где $u_{\text{кВ-Н}}$ - напряжение КЗ между обмоткой высшего напряжения и параллельно соединенными ветвями обмотки низшего напряжения;

$u_{\text{кН1-Н2}}$ - напряжение КЗ между ветвями обмотки низшего напряжения (измеряется при разомкнутой обмотке высшего напряжения).

При отсутствии данных о напряжении КЗ $u_{\text{кН1-Н2}}$ допускается для трехфазных трансформаторов принимать

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= 0{,}00125u_{\text{кВ–Н}};\\ X_{*\,\text{Н1(ном)}} &= X_{*\,\text{Н2(ном)}} = 0{,}0175u_{\text{кВ–Н}}. \end{aligned}\right\}$$

Схема замещения двухобмоточного трансформатора, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на n ветвей, представляет собой $(n + 1)$-лучевую звезду (табл.). Индуктивные сопротивления ее ветвей в относительных единицах при номинальных условиях трансформатора следует определять по формулам

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= 0{,}01\left(u_{\text{кВ–Н}} - \frac{u_{\text{кН1–Н2}}}{2n}\right);\\ X_{*\,\text{Н1(ном)}} &= X_{*\,\text{Н2(ном)}} = \ldots = X_{*\,\text{Нn(ном)}} = 0{,}005u_{\text{кН1–Нn}}, \end{aligned}\right\}$$

где $u_{\text{кН1-Нn}}$ - напряжение КЗ, измеренное между выводами H_1 и H_n обмотки низшего напряжения (при разомкнутой обмотке высшего напряжения).

Схема замещения автотрансформатора, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на две ветви, отличается от схемы замещения автотрансформатора с нерасщепленной обмоткой низшего напряжения тем, что вместо сопротивления $X_{\text{Н}}$ содержит трехлучевую звезду с ветвями $X'_{\text{Н}}$, $X_{\text{Н1}}$ и $X_{\text{Н2}}$ (табл.). Индуктивные сопротивления элементов схемы в относительных единицах при номинальных условиях автотрансформатора следует определять по формулам

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= 0{,}005(u_{\text{кВ–С}} + u_{\text{кВ–Н}} - u_{\text{кС–Н}});\\ X_{*\,\text{С(ном)}} &= 0{,}005(u_{\text{кВ–С}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–Н}});\\ X_{*\,\text{Н1(ном)}} &= X_{*\,\text{Н2(ном)}} = 0{,}005u_{\text{кН1–Н2}};\\ X'_{*\,\text{Н(ном)}} &= X_{*\,\text{Н(ном)}} - 0{,}0025u_{\text{кН1–Н2}}, \end{aligned}\right\}$$

где $X_{*\,\text{Н(ном)}} = 0{,}005(u_{\text{кВ–Н}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–С}})$.

Схемы замещения трансформаторов, автотрансформаторов и сдвоенных реакторов

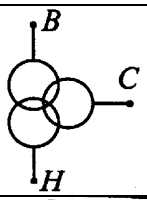
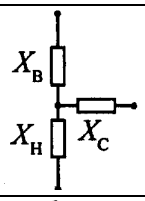
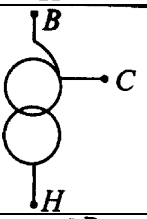
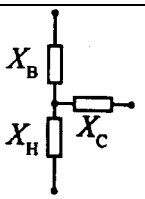
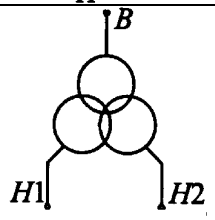
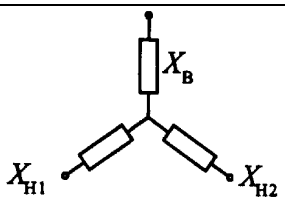
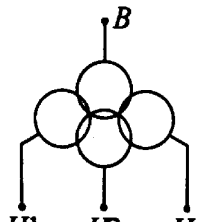
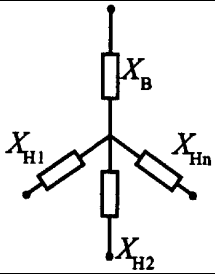
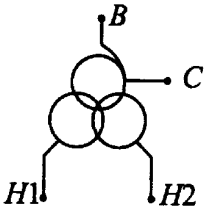
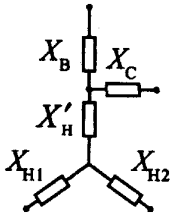
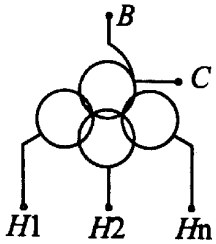
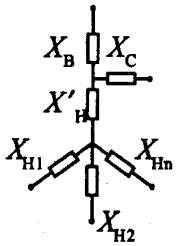
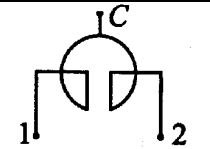
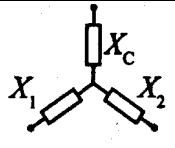
Наименование	Исходная схема	Схема замещения	Расчетные выражения
Трехобмоточный трансформатор			$X_В = 0{,}005(u_{кВ\text{-}Н} + u_{кВ\text{-}С} - u_{кС\text{-}Н})$ $X_С = 0{,}005(u_{кВ\text{-}С} + u_{кС\text{-}Н} - u_{кВ\text{-}Н})$ $X_Н = 0{,}005(u_{кВ\text{-}Н} + u_{кС\text{-}Н} - u_{кВ\text{-}С})$
Автотрансформатор			$X_В = 0{,}005(u_{кВ\text{-}Н} + u_{кВ\text{-}С} - u_{кС\text{-}Н})$ $X_С = 0{,}005(u_{кВ\text{-}С} + u_{кС\text{-}Н} - u_{кВ\text{-}Н})$ $X_Н = 0{,}005(u_{кВ\text{-}Н} + u_{кС\text{-}Н} - u_{кВ\text{-}С})$
Двухобмоточный трансформатор с обмоткой низшего напряжения, расщепленной на две ветви			$X_В = 0{,}01(u_{кВ\text{-}Н} - 0{,}25u_{кН1\text{-}Н2})$ $X_{Н1} = X_{Н2} = 0{,}005u_{кН1\text{-}Н2}$
Двухобмоточный трансформатор с обмоткой низшего напряжения, расщепленной на n ветвей			$X_В = 0{,}01\left(u_{кВ\text{–}Н} - \frac{u_{кН1\text{–}Нn}}{2n}\right)$ $X_{Н1} = X_{Н2} = ... = X_{Нn} =$ $= 0{,}005u_{кН1\text{-}Нn}$
Автотрансформатор с обмоткой низшего напряжения, расщепленной на две ветви			$X_В = 0{,}005(u_{кВ\text{-}С} + u_{кВ\text{-}Н} - u_{кС\text{-}Н})$ $X_С = 0{,}005(u_{кВ\text{-}С} + u_{кС\text{-}Н} - u_{кВ\text{-}Н})$ $X_Н = 0{,}005(u_{кВ\text{-}Н} + u_{кС\text{-}Н} - u_{кВ\text{-}С})$ $X_{Н1} = X_{Н2} = 0{,}005u_{кН1\text{-}Н2}$ $X'_Н = X_Н - 0{,}0025u_{кН1\text{-}Н2}$
Автотрансформатор с обмоткой низшего напряжения, расщепленной на л ветвей			$X_В = 0{,}005(u_{кВ\text{-}Н} + u_{кВ\text{-}С} - u_{кС\text{-}Н})$ $X_С = 0{,}005(u_{кВ\text{-}С} + u_{кС\text{-}Н} - u_{кВ\text{-}Н})$ $X_Н = 0{,}005(u_{кВ\text{-}Н} + u_{кС\text{-}Н} - u_{кВ\text{-}С})$ $X_{Н1} = X_{Н2} = ... = X_{Нn} =$ $= 0{,}005u_{кН1\text{-}Нn}$ $X'_Н = X_Н - 0{,}01\frac{u_{кН1\text{–}Нn}}{2n}$
Сдвоенный реактор			$X_С = - K_{св}X_р$ $X_1 = X_2 = (1 + K_{св})X_р$

Схема замещения автотрансформатора, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на n ветвей, отличается от схемы замещения автотрансформатора с нерасщепленной обмоткой низшего напряжения тем, что вместо сопротивления $X_Н$ содержит $(n + 1)$-лучевую звезду с ветвями $X'_Н$, $X_{Н1}$ ... $X_{Нn}$ (табл.). Индуктивные сопротивления элементов схемы в относительных единицах при номинальных условиях автотрансформатора следует определять по формулам

$$\left.\begin{aligned}
&\underset{*}{X}_{\text{В(ном)}} = 0{,}005(u_{\text{кВ–С}} + u_{\text{кВ–Н}} - u_{\text{кС–Н}});\\
&\underset{*}{X}_{\text{С(ном)}} = 0{,}005(u_{\text{кВ–С}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–Н}});\\
&\underset{*}{X}_{\text{Н1(ном)}} = \underset{*}{X}_{\text{Н2(ном)}} = \ldots = \underset{*}{X}_{\text{Нn(ном)}} = 0{,}005u_{\text{кН1–Нn}};\\
&\underset{*}{X}'_{\text{Н(ном)}} = \underset{*}{X}_{\text{Н(ном)}} - 0{,}01\frac{u_{\text{кН1–Нn}}}{2n},
\end{aligned}\right\}$$

где $\underset{*}{X}_{\text{Н(ном)}} = 0{,}005(u_{\text{кВ–Н}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–С}})$.

Суммарное активное сопротивление обеих обмоток двухобмоточного трансформатора в относительных единицах при номинальных условиях этого трансформатора следует определять по формуле

$$\underset{*}{R}_{\text{(ном)}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} 10^{-3}}{S_{\text{ном}}},$$

где $\Delta P_{\text{к}}$ - потери короткого замыкания, кВт;

$S_{\text{ном}}$ - номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

Активные сопротивления отдельных обмоток трехобмоточных трансформаторов и ветвей схемы замещения автотрансформаторов, имеющих обмотку низшего напряжения, в относительных единицах при номинальных условиях этих трансформаторов и автотрансформаторов следует определять по формулам

$$\left.\begin{aligned}
&\underset{*}{R}_{\text{В(ном)}} = \frac{0{,}5\cdot 10^{-3}}{S_{\text{ном}}}(\Delta P_{\text{кВ–С}} + \Delta P_{\text{кВ–Н}} - \Delta P_{\text{кС–Н}});\\
&\underset{*}{R}_{\text{С(ном)}} = \frac{0{,}5\cdot 10^{-3}}{S_{\text{ном}}}(\Delta P_{\text{кВ–С}} + \Delta P_{\text{кС–Н}} - \Delta P_{\text{кВ–Н}});\\
&\underset{*}{R}_{\text{Н(ном)}} = \frac{0{,}5\cdot 10^{-3}}{S_{\text{ном}}}(\Delta P_{\text{кВ–Н}} + \Delta P_{\text{кС–Н}} - \Delta P_{\text{кВ–С}}).
\end{aligned}\right\}$$

Токоограничивающие реакторы

Схема замещения сдвоенного токоограничивающего реактора представляет собой трехлучевую звезду (табл.). Индуктивное сопротивление луча со стороны среднего зажима (т.е. зажима, обращенного в сторону источника энергии) следует определять по формуле

$$X_{\text{с}} = -K_{\text{св}} X_{\text{р}},$$

где $K_{\text{св}}$ - коэффициент связи между ветвями реактора;

$X_{\text{р}}$ - номинальное индуктивное сопротивление реактора (т.е. сопротивление одной ветви реактора при отсутствии тока в другой ветви).

Индуктивные сопротивления двух других лучей схемы замещения одинаковы и определяются по формуле

$$X_1 = X_2 = (1 + K_{\text{св}})X_{\text{р}}.$$

Активное сопротивление фазы одинарного реактора, Ом, следует определять по формуле

$$R = \frac{\Delta P}{I^2_{\text{ном}}} 10^3,$$

где ΔP - номинальные потери мощности на фазу реактора, кВт;

$I_{\text{ном}}$ - номинальный ток реактора, А.

Активное сопротивление каждой ветви сдвоенного реактора, Ом, следует определять по формуле

$$R = \frac{\Delta P}{2I^2_{\text{ном}}} 10^3,$$

Воздушные линии электропередачи

Значения удельного индуктивного сопротивления прямой последовательности и удельного активного сопротивления воздушных линий следует принимать по справочным

таблицам, исходя из материала и сечения проводов и среднего геометрического расстояния между фазами. При отсутствии сведений о среднем геометрическом расстоянии между фазами удельное индуктивное сопротивление прямой последовательности может быть определено приближенно по табл. Приложения, которые составлены для усредненных значений среднего геометрического расстояния между фазами.

Если отсутствуют данные о сечениях проводов, допустимо удельное индуктивное сопротивление прямой последовательности воздушных линий напряжением до 220 кВ принимать равным 0,4 Ом/км, линий напряжением 330 кВ - равным 0,325 Ом/км и линий напряжением 500 кВ - равным 0,307 Ом/км.

Чтобы определить расчетный ток КЗ с целью выбора или проверки электрических аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания, необходимо предварительно выбрать расчетные условия, отвечающие требованиям ПУЭ, в частности расчетную схему электроустановки. Выбор этой схемы следует производить с учетом возможных электрических схем соответствующей электроустановки при различных продолжительных режимах ее работы, включая ремонтные и послеаварийные режимы, а также с учетом электрической удаленности различных источников энергии (генераторов, синхронных компенсаторов и электродвигателей) от расчетной точки КЗ.

В соответствии с ГОСТ 26522-85 все короткие замыкания подразделяются на удаленные и близкие. КЗ считается удаленным, если амплитуды периодической составляющей тока статора данной электрической машины в начальный и произвольный моменты КЗ практически одинаковы, и близким, если эти амплитуды существенно отличаются. Обычно под электрической удаленностью расчетной точки КЗ от какого-либо источника энергии понимают приведенное к номинальной мощности и номинальному напряжению источника внешнее сопротивление, которое оказывается включенным между источником и точкой КЗ в момент возникновения КЗ. Однако такой способ оценки удаленности применим лишь в тех случаях, когда различные источники энергии связаны с расчетной точкой КЗ независимо друг от друга. Более универсальной величиной, которая в полной мере характеризует электрическую удаленность расчетной точки КЗ от произвольного источника энергии и может быть сравнительно легко определена в схеме любой конфигурации и при любом числе источников энергии, является отношение действующего значения периодической составляющей тока источника энергии (генератора, синхронного компенсатора, электродвигателя) в начальный момент КЗ к его номинальному току. В отечественной и международной практике КЗ принято считать близким, если это отношение равно двум или больше двух. При меньших значениях указанного отношения КЗ следует считать удаленным.

В тех случаях, когда решаемая задача ограничивается приближенной оценкой значения тока в месте КЗ, для генератора или синхронного компенсатора КЗ допустимо считать удаленным, если расчетная точка КЗ находится по отношению к синхронной машине за двумя и более трансформаторами или за реактором (кабельной линией), сопротивление которого превышает сверхпереходное сопротивление генератора или синхронного компенсатора более чем в 2 раза. Для синхронного или асинхронного электродвигателя КЗ допустимо считать удаленным, если расчетная точка КЗ находится на другой ступени напряжения сети (т.е. за трансформатором) или за реактором, кабелем и т.д., сопротивление которого в 2 раза и более превышает сверхпереходное сопротивление электродвигателя.

Если параметры генераторов, трансформаторов и других элементов наиболее удаленной от точки КЗ части электроэнергетической системы неизвестны, то эту часть системы допускается представлять на исходной расчетной схеме в виде одного источника энергии с неизменной по амплитуде ЭДС и результирующим эквивалентным индуктивным сопротивлением. Электродвигатели, для которых расчетное КЗ является удаленным, в расчетную схему не вводятся. Учет или неучет в расчетной схеме других элементов энергосистемы зависит от требуемой точности расчетов тока КЗ, расчетного времени КЗ, используемого метода расчета и других факторов.

Тема 2. Короткие замыкания в ЭЭС и СЭС. Системы единиц. (6 часов)

Виды коротких замыканий (к.з), причины их возникновения и последствия. Назначение расчётов переходных процессов и требования к ним. Основные допущения, принимаемые при расчетах. Общий порядок расчета к.з. Использование системы относительных единиц. Составление схемы замещения системы и определение её параметров в именованных единицах. Определение параметров схемы замещения в относительных единицах.

Основными причинами возникновения электромагнитных переходных процессов являются к.з., в результате:

1. нарушения изоляции электрооборудования из-за ее старения;
2. перенапряжения;
3. непосредственные механические повреждения;
4. перекрытия токоведущих частей животными или птицами.

В схемах понизительных подстанции используют специальные аппараты – короткозамыкатели (одно или двухфазные) для создания преднамеренного к.з. Принцип работы: при возникновении повреждения на трансформаторе понижающей подстанции, релейная защита дает сигнал на включение короткозамыкателя. Это искусственно созданное к.з. служит причиной отключения выключателя на питающем конце линии. В бестоковую паузу на ПС, отделитель отключает поврежденный элемент, а затем срабатывает АПВ и линия вновь под нагрузкой. Т.о. преднамеренное к.з. позволяет быстро отключить ранее возникшее повреждение, не прерывая надолго питание других потребителей.

В зависимости от места повреждения и продолжительности повреждения, **последствия** могут иметь местный характер или отразиться на всей системе.

При к.з. в удаленной точке Iк.з. составляет незначительную долю от Iном генераторов, и такое к.з. воспринимается как небольшое увеличение их нагрузки. В местах близких к месту к.з. напряжение уменьшается сильно, а токи значительно возрастают. Следовательно, при нормальных условиях опасные последствия к.з. проявляются лишь в ближайших к месту к.з. частях схемы.

Аналогичная картина, но не столь резко выраженная, наблюдается при пуске крупных двигателей, СК, генераторов, при включении способом самосинхронизации, или при несинхронном включении. Разрыв слабонагруженной фазы сети не вызывает заметных последствий в остальной части схемы. В загруженной наоборот наблюдается существенное изменение токов и напряжений.

Ток к.з., даже если он мал по сравнению с номинальным током генератора, обычно во много раз повреждает ток самой поврежденной ветви. Он вызывает дополнительный нагрев токоведущих элементов выше допустимого. Кроме теплового действия ток к.з вызывает между проводниками большие динамические усилия, особенно значительные в начальный момент переходного процесса.

Глубокое снижение напряжения и резкое искажение его симметрии, возникающие при КЗ и продольной несимметрии, вредно отражаются на работе потребителей электроэнергии. Есть потребители вообще не допускающих (даже кратковременных) перерывов в подаче энергии.

При замыканиях на землю и продольной несимметрии возникают неуравновешенные системы токов. Они создают магнитные потоки, наводящие в параллельно проходящих линиях связи и сигнализации ЭДС, величины которых могут быть опасны для обслуживающего персонала и аппаратуры этих линий.

Наконец, при задержке отключения КЗ сверх допустимой продолжительности может наступить одно из наиболее опасных его последствий – нарушение устойчивости работы системы электроснабжения.

Расчетом электромагнитного переходного процесса называется вычисление токов и напряжений в рассматриваемой схеме при заданных условиях.

В зависимости от назначении расчетов, токи и напряжения находят для заданного момента времени или в течении всего переходного процесса. Решение проводят для одной или нескольких точек схемы.

К числу **задач**, для которых требуется расчет переходных процессов, относятся:

1. сопоставление, оценка и выбор схем эл. соединений;
2. выявление условий работы потребителей при аварийных режимах;
3. выбор аппаратов и проводников и их проверка по условиям работы при к.з.
4. проектирование и настройка устройств релейной защиты и автоматики;
5. определение влияния ЛЭП на провода связи;
6. проектирование защитных заземлений;
7. подбор характеристик разрядников для защиты от перенапряжений;
8. определение параметров устройств гашения поля С.М.
9. выбор систем возбуждения С.М.
10. проведение различных испытаний.

Для решения задач эксплуатации требуется точный учет конкретных условий. Напротив при проектировании пользуются приближенными данными о переходном процессе.

Основные допущения.

Учет всех условии при расчете переходного процесса делает задачу не решаемой. Поэтому вводят ряд допущений. Они зависят от характера задачи. Допущения могут быть различны. Рассмотрим основные, характерные для большинства задач:

1. Отсутствие насыщения магнитных систем. Т.е. нелинейную систему заменяют линейной, что позволяет использовать принцип наложения.
2. Отсутствие намагничивающих токов у трансформаторов и автотрансформаторов. Это допущение справедливо во всех случаях, за исключением когда 3-х стержневой трансформатор с соединением Yo/Yo включен на напряжение нулевой последовательности.
3. Отсутствие несимметрии 3-х фазной системы.
4. Пренебрежение емкостными проводимостями. Это допущение справедливо, если в схеме нет продольной компенсации, а также сверхдальних линий передач с напряжением более 220 кВ. При рассмотрении замыкания на землю это допущение не приемлемо.

5. Приближенный учет нагрузок. В зависимости от стадии переходного процесса нагрузку заменяют постоянным сопротивлением (обычно индуктивным).

6. Отсутствие активных сопротивлений. Это допущение не приемлемо для низковольтных сетей. Оно используется для определения расчетных величин в начале и конце переходного процесса, при этом приближенный учет активных сопротивлений используется при оценке постоянных времени затухания свободных составляющих рассматриваемых величин.

7. Отсутствия качаний генераторов в течении 0.1-0.2 сек. с начала процесса (т.е. с момента нарушения режима) до отключения повреждения, если задача ограничена лишь начальной стадией процесса. Такое допущение не дает погрешности. Но если при повреждении возникают существенные качания – их необходимо учитывать.

В соответствии с назначением расчетов переходных процессов устанавливают различные **расчетные условия**. Они могут быть весьма разнообразны.

Например, для работы выключателя по условиям его работы при к.з., необходимо знать наибольшее значение токов к.з. При этом исходят, что при к.з. работает наибольшее число генераторов, к.з. металлическое и происходит на зажимах выключателя. Сюда относится и установление расчетного времени размыкания контактов.

Для расчетов релейной защиты необходимо знать наименьшее значение Iк.з. При этом применяются другие расчетные условия.

При определении токов, влияющих на провода связи, решающим является указание о размещении заземленных нейтралей в системе.

При выборе схемы гашения поля с.м. необходимые расчеты проводят как для режима к.з. так и х.х.

Система относительных единиц.

Представление особых физических величин не в обычных именованных единицах, а в относительных, безразмерных единицах позволяет существенно упростить практические расчеты и придать им большую наглядность. Это позволяет быстрее оценивать порядок определяемых величин. Благодаря этому система относительных единиц широко используется, хотя на первый взгляд она кажется несколько искусственной и даже излишней.

Под относительным значением какой-либо величины понимают ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения. Для выражения отдельных величин в относительных единицах нужно выбрать те величины, которые должны служить базисными.

Примем за базисные величины некоторые произвольные значения тока Iб и напряжения Uб.

Тогда базисная мощность трехфазной системы будет

$$S_б = \sqrt{3} \cdot U_б \cdot I_б$$

базисное сопротивление

$$z_б = \frac{U_б}{\sqrt{3} \cdot I_б}$$

т.е. оно подчинено закону Ома, чтобы обеспечить тождественную запись этого закона как в именованных, так и в относительных единицах. Как видно, из четырех базисных единиц Iб, Uб, Sб, Zб только две могут быть выбраны произвольно, две другие получаются из указанных соотношений. Фазные и линейные базисные напряжения и

токи связаны между собой известными соотношениями для симметричной трехфазной системы. Следует отметить, что базисные единицы служат для определения как полных величин, так и их составляющих (активных, реактивных и пр.).

Таким образом, при выбранных базисных условиях относительные значения э.д.с., напряжения, тока, мощности и сопротивления будут:

$$E_{*б} = \frac{E}{U_б}; \qquad U_{*б} = \frac{U}{U_б}; \qquad I_{*б} = \frac{I}{I_б}; \qquad S_{*б} = \frac{S}{S_б}; \qquad z_{*б} = \frac{z}{z_б}$$

где звездочка (*) указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс (б) – что она приведена к базисным условиям.

За единицу измерения угловых скоростей как правило принимают синхронную угловую скорость ω_c, тогда относительная угловая скорость определится:

$\omega_{*(б)} = \omega/\omega_б = \omega/\omega_c$;

Соответственно: $L_б = z_б /\omega_б = z_б /\omega_c$;

Для потокосцепления: $\Psi_б = U_б /\omega_б = U_б /\omega_c$;

При указанных базисных единицах и неизменной угловой скорости равной синхронной, имеем:

$X_{*(б)} = \omega_c L_{*(б)} = L_{*(б)}$;

$E_{*(б)} = \omega_{c*} \Psi_{*(б)} = \Psi_{*(б)}$;

Т.е. индуктивное сопротивление численно равно индуктивности, ЭДС численно равно потокосцеплению. В этом преимущество системы о.е. время также можно выражать в о.е.

Как правило за единицу принимают время в течении которого ротор машины при синхронной скорости вращения повернется на 1 электрический радиан, т.е.: $t_б = 1/\omega_c$; при f = 50 Гц $t_б = 1/314$ сек.

Относительные фазные и линейные напряжения численно одинаковы. Представим формальное определение относительного сопротивления в следующем виде:

$$z_{*б} = \frac{z}{z_б} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_б z}{U_б}$$

или

$$z_{*б} = z \frac{S_б}{U_б^2}$$

где Z – заданное сопротивление в именованных единицах, Ом; Iб – базисный ток, кА; Uб – базисное линейное напряжение, кВ; Sб – базисная мощность, МВА.

Поэтому $z_{*(б)}$ численно равно падению напряжения в элементе, при прохождении через него $I_б$, или $S_б$.

Поскольку выбор базисных условий произволен, то одна и та же действительная величина может иметь разные численные значения при выражении ее в относительных единицах (т.е. при Iн, Uн, Sн). Их величины определяются следующим образом:

$$z_{*_н} = \frac{z}{z_н} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_н z}{U_н}$$

или

$$z_{*_н} = z \frac{S_н}{U_н^2}$$

Иногда вместо долевых единиц выражают значения в %, z% = 100 z*.

Для выполнения расчета в относительных единицах необходимо все ЭДС и сопротивления элементов схемы выразить в относительных базисных единицах. Если ЭДС и сопротивления заданы в именованных единицах, то для перевода их в относительные базисные единицы следует воспользоваться приведенными выше выражениями. Когда же они заданы в относительных номинальных единицах, то их пересчет к базисным условиям необходимо производить по следующим соотношениям:

$$E_{*б} = E_{*н} \frac{U_н}{U_б}$$

$$z_{*б} = \frac{z_{*н} \cdot z_н}{z_б} = z_{*н} \cdot \frac{I_б U_н}{I_н U_б}$$

или

$$z_{*б} = z_{*н} \cdot \frac{S_б U^2{}_н}{S_н U^2{}_б}$$

При выборе базисных условий следует руководствоваться соображениями, чтобы вычислительная работа была по возможности проще, а порядок числовых значений относительных базисных величин был удобен для работы с ними. Поэтому берут круглое число 100, 1000 или часто встречающуюся в схеме номинальную мощность генераторов или трансформаторов. В качестве базисного часто берут номинальное напряжение.

При Uб = Uн пересчет относительных ЭДС вообще отпадает (Е*б= Е*н), а выражения для пересчета относительных сопротивлений принимают более простой вид:

$$z_{*б} = z_{*н} \cdot \frac{I_б}{I_н}$$

или

$$z_{*б} = z_{*н} \cdot \frac{S_б}{S_н}$$

Условие $U_б = U_н$ вообще-то соблюдается для части элементов, т.к. $U_н$ элементов одной и той же цепи в общем случае различны, однако это различие составляет не более 10%, как правило такой погрешностью пренебрегают и расчет ведут для $U_{ср}$ значения заданной ступени напряжения. Исключение составляют реакторы, поскольку они составляют значительную часть общего сопротивления, определять которое всегда необходимо более точно. Когда реакторы установлены не на свое номинальное напряжение (6кВ вместо 10кВ), то пересчет их относительных сопротивлений обязателен.

При наличии трансформаторов в расчетной схеме системы электроснабжения для упрощения проводимых расчетов такую схему заменяют схемой замещения, в которой магнитные связи заменяются электрическими.

Составление исходной схемы замещения

При расчете токов КЗ аналитическим методом следует предварительно по исходной расчетной схеме составить соответствующую схему замещения. При этом сопротивления всех элементов схемы и ЭДС источников энергии могут быть выражены как в именованных, так и в относительных единицах.

Если известны фактические при принятых исходных условиях коэффициенты трансформации всех трансформаторов и автотрансформаторов расчетной схемы, то составление схемы замещения следует производить с учетом этих коэффициентов. Если же фактические коэффициенты трансформации части трансформаторов и автотрансформаторов неизвестны, то допускается при составлении схемы замещения указанные коэффициенты учитывать приближенно.

Расчеты проводятся на основании замены реальноq схемы схемой замещения. Ее составление сводится к привидению параметров элементов различных ступеней трансформация к одной ступени, которую принимаем за основную. Приведение осуществляется на основе общей теории трансформаторов. Если электрическая цепь некоторой ступени напряжения связана с выбранной в этой схеме основной ступенью рядом трансформаторов с коэффициентами трансформации κ_1, κ_2, κ_n, то приведенные к основной ступени напряжения, отдельные величины определяются (о - индекс приведенного значения).

$\overset{o}{E}_* = (\kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot,\ldots,\cdot \kappa_n) \cdot E$;

$\overset{o}{U}_* = (\kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot,\ldots,\cdot \kappa_n) \cdot U$;

$\overset{o}{I}_* = I /(\kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot,\ldots,\cdot \kappa_n)$;

$\overset{o}{z}_* = (\kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot,\ldots,\cdot \kappa_n)^2 \cdot z$.

При этом полагается, что под коэффициентами трансформации понимается отношение линейного напряжения холостого хода обмотки трансформатора обращенной в сторону основной ступени напряжения, к напряжению его другой обмотки элементы которой подлежат приведению.

Если ЭДС источника энергии и сопротивление какого-либо элемента расчетной схемы выражены в относительных единицах при номинальных условиях (т.е. ЭДС при номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$, а сопротивление - при номинальном напряжении и номинальной мощности S), то значения соответствующей ЭДС и сопротивления, приведенные к основной ступени напряжения сети, следует определять по формулам

$$\overset{\circ}{E} = \underset{*}{E}_{(\text{ном})} U_{\text{ном}}\, n_1 n_2 \ldots n_m ;$$

$$\overset{\circ}{\underline{Z}} = \underset{*}{\underline{Z}}_{(\text{ном})} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}\, n_1^2 n_2^2 \ldots n_m^2 ,$$

где $\underset{*}{E}_{(\text{ном})}$ и $\underset{*}{\underline{Z}}_{(\text{ном})}$ - значения ЭДС источника энергии и сопротивления элемента расчетной схемы в относительных единицах при номинальных условиях; n_1, n_2, ... , n_m — коэффициенты трансформации трансформаторов или автотрансформаторов, включенных каскадно между ступенью напряжения сети, где находятся элементы с подлежащими приведению ЭДС E и сопротивлением $\underline{Z}$, и основной ступенью напряжения.

Перевод сопротивлений из относительных единиц в именованные:

$z = z_{*(н)}\, U_н / \sqrt{3}\, I_н$; *[Ом]* *или* $z = z_{*(н)}\, U_н^2 / S_н$; *[Ом]*

Рассмотренное нами приведение по действительным коэффициентам трансформации называется точным приведением в именованных единицах.

При выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в относительных единицах с приведением параметров различных элементов исходной

расчетной схемы к базисным условиям и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов необходимо:

1) задаться базисной мощностью $S_б$ и для одной из ступеней напряжения исходной расчетной схемы, принимаемой за основную, выбрать базисное напряжение $U_{б.осн}$;

2) определить базисные напряжения других ступеней напряжения расчетной схемы, используя формулу

$$U_{бN} = \frac{1}{n_1 n_2 ... n_m} U_{б.осн},$$

где n_1, n_2, ... n_m — коэффициенты трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, включенных каскадно между основной и N-й ступенями напряжения;

3) найти искомые значения ЭДС источников энергии и сопротивлений всех элементов схемы замещения в относительных единицах при выбранных базисных условиях, используя формулы

$$\underset{*}{E}_{(б)} = E / U_{бN} \text{ или } \underset{*}{E}_{(б)} = \underset{*}{E}_{(ном)} \frac{U_{ном}}{U_{бN}};$$

$$\underset{*}{Z}_{(б)} = \underline{Z} \frac{S_б}{U_{бN}^2} \quad \text{или} \quad \underset{*}{Z}_{(б)} = \underset{*}{Z}_{(ном)} \frac{S_б}{S_{ном}} \frac{U_{ном}^2}{U_{бN}^2},$$

где $U_{бN}$ - базисное напряжение той ступени напряжения исходной расчетной схемы, на которой находится элемент, подлежащий приведению.

Первые формулы следует использовать в тех случаях, когда значения ЭДС источника энергии и приводимое сопротивление заданы в именованных единицах, а вторые формулы - когда значения этих величин заданы в относительных единицах при номинальных условиях.

Обычно в именованных единицах задано сопротивление воздушных линий, кабелей и реакторов, а в относительных единицах при номинальных условиях - сопротивление генераторов и синхронных компенсаторов. Сопротивление неподвижного электродвигателя (сопротивление КЗ) и сопротивление трансформатора в относительных единицах при номинальных условиях определяют по формулам

$$\underset{*}{Z}_{к(ном)} = \frac{1}{\underset{*}{I}_{п}}; \quad \underset{*}{Z}_{(ном)} = \frac{u_к\%}{100},$$

где $\underset{*}{I}_{п}$ - кратность пускового тока по отношению к номинальному току;

$u_к\%$ - напряжение короткого замыкания трансформатора в процентах.

Рассмотренное нами приведение по действительным коэффициентам трансформации называется точным приведением в относительных единицах.

В практических расчетах часто используют приближенное приведение. Расчет в этом случае проще. В тех случаях, когда отсутствуют данные о фактически используемых в условиях эксплуатации коэффициентах трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, допустимо их принимать равными отношению средних номинальных напряжений сетей, связанных этими трансформаторами и автотрансформаторами. При этом рекомендуется использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений сетей Uср.ном, кВ: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 27; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175. При этом считаем, что номинальные напряжения всех элементов данной ступени одинаковы и равны $U_{ср}$, а при каскадном включении трансформаторов равен отношению крайних ступеней.

При выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в именованных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к выбранной основной ступени напряжения, используя при этом приближенный способ учета коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, приведенные значения ЭДС источников энергии и сопротивления различных элементов схемы следует определять по формулам

$$\overset{\circ}{E} = E\frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{срN}}};\quad \overset{\circ}{\underline{Z}} = \underline{Z}\frac{U^2_{\text{ср.осн}}}{U^2_{\text{срN}}},$$

где $U_{\text{ср.осн}}$ — среднее номинальное напряжение той ступени напряжения сети, которая принята за основную;

$U_{\text{срN}}$ — среднее номинальное напряжение той ступени напряжения сети, на которой находится элемент с подлежащими приведению параметрами.

Если ЭДС источника энергии и сопротивление какого-либо элемента расчетной схемы выражены в относительных единицах при номинальных условиях, то при приближенном учете коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов их значения, приведенные к основной ступени напряжения сети, следует находить по формулам

$$\overset{\circ}{E} = \underset{*}{E}_{\text{(ном)}}U_{\text{ср.осн}};\quad \overset{\circ}{\underline{Z}} = \underset{*}{\underline{Z}}_{\text{(ном)}}\frac{U^2_{\text{ср.осн}}}{S_{\text{ном}}}.$$

При выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в относительных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к базисным условиям, используя при этом приближенный способ учета коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, базисная мощность выбирается произвольно, а в качестве базисного напряжения любой ступени напряжения сети следует принимать среднее номинальное напряжение соответствующей ступени. В этом случае искомые значения ЭДС источников энергии и сопротивлений элементов схемы замещения в относительных единицах следует определять по формулам

$$\underset{*}{E}_{\text{(б)}} = \frac{E}{U_{\text{срN}}} \quad \text{или} \quad \underset{*}{E}_{\text{(б)}} = \underset{*}{E}_{\text{(ном)}};$$

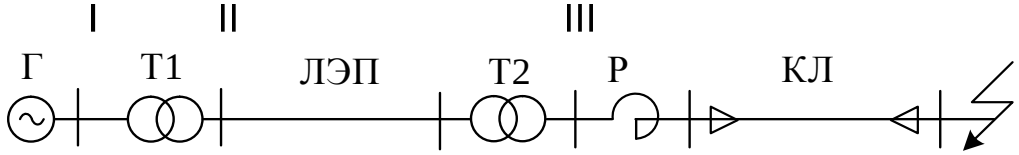
$$\underset{*}{\underline{Z}}_{\text{(б)}} = \underset{*}{\underline{Z}}\frac{S_{\text{б}}}{U^2_{\text{срN}}} \quad \text{или} \quad \underset{*}{\underline{Z}}_{\text{(б)}} = \underset{*}{\underline{Z}}_{\text{(ном)}}\frac{S_{\text{(б)}}}{S_{\text{ном}}}.$$

Приближенное приведение вносит некоторую погрешность, поэтому его надо использовать с осторожностью, особенно если имеются трансформаторы с глубокой регулировкой напряжения.

Найденные токи и напряжения являются реальными только для той части схемы, ступень напряжения принимается за основную. В других участках схемы – путем обратного пересчета.

Независимо от принятого способа составления схемы замещения прямой последовательности (в именованных или относительных единицах, с учетом фактических коэффициентов трансформации трансформаторов или при приближенном учете этих коэффициентов) в этой схеме должны быть представлены все элементы исходной расчетной схемы, причем источники энергии (генераторы, синхронные компенсаторы, а также электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если они не отделены от расчетной точки КЗ токоограничивающим реактором или трансформатором) и обобщенные нагрузки узлов должны быть введены в схему ЭДС и индуктивными сопротивлениями, соответствующими рассматриваемому моменту времени. Так, при расчете начального значения периодической составляющей они должны быть представлены в исходной схеме замещения сверхпереходными ЭДС и сверхпереходными индуктивными сопротивлениями. Все остальные элементы исходной расчетной схемы должны быть представлены в схеме замещения сопротивлениями прямой последовательности. Трехобмоточные трансформаторы, автотрансформаторы, трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения, а также сдвоенные реакторы должны быть представлены своими схемами замещения. Эти схемы, а также расчетные выражения для определения их параметров приведены в табл. 1 темы.

Пример 1: Составить расчетную схему замещения для схемы.



Sн = 30 МВА; Uн = 10.5 кВ; $x''_{*d} = 0.25$; - переходное сопротивление для начального момента к.з. Ed = 11 кВ; Здесь I, II, III – ступени напряжения

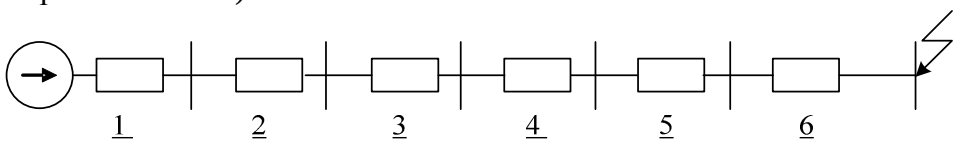
Т-1	ЛЭП	Т-2	Р
Sт.ном = 31.5 МВА	80 км	$S_{Т-2}$ = 15 МВА	Uн = 6 кВ
10,5/121 кВ	$x_л$ =0,4 Ом/км	110/6.6 кВ	Iн = 300 А
Uк = 10.5 %		Uк = 10.5 %	$x_р$ = 5%

Кабельная линия: 2,5 км; $x_л$ = 0,08 Ом/км.

Определить $I_{кз}$.

Решение приведем в относительных и именованных единицах с точным и приближенным приведением схемы.

Прежде всего составим схему замещения (т.е. все элементы схемы представим своими сопротивлениями).



В числителе номер соответствующего сопротивления, в знаменателе его величина в именованных или в относительных единицах.

I. ТОЧНОЕ ПРИВЕДЕНИЕ В ИМЕНОВАННЫХ ЕДИНИЦАХ.

1. За основную ступень напряжения принимаем первую, т.е. 10,5 кВ. U_I = 10.5 кВ.

Для генератора: $x_1 = x_{*(н)} \cdot \frac{U_н^2}{S_н} = 0{,}25 \cdot \frac{10{,}5^2}{30} = 0{,}96$ Ом;

Для трансформатораТ-1: $x_2 = x_{*(н)} \cdot \frac{U_н^2}{S_н} = 0{,}105 \cdot \frac{10{,}5^2}{31{,}5} = 0{,}31$ Ом;

где $x_{*(н)} = U_к(l_к)$;

Для ЛЭП: $x_3 = (к_1 к_2 \cdots к_п)^2 \cdot x_л = \left(\frac{10{,}5}{121} -\right) \cdot 0{,}4 \cdot 80 = 0{,}24$ Ом;

Для трансформатора Т-2:

$$x_4 = (к_1 к_2 \cdots к_п)^2 \cdot x_{*(н)} \cdot \frac{U^2{}_н}{S_н} = \left(\frac{10{,}5}{121}\right)^2 \cdot 0{,}105 \frac{110^2}{15} = 0{,}64 \text{ Ом;}$$

Для реактора:

$$x_5 = x_{р*(н)} \cdot \frac{U_н}{\sqrt{3} \cdot I_н} \cdot \left(\frac{U_{II}}{U_{III}} \cdot \frac{U_I}{U_{II}}\right)^2 = 0.05 \cdot \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0.3} \cdot \left(\frac{110}{6.6} \cdot \frac{10.5}{121}\right)^2 = 1.21 \text{ Ом;}$$

Для кабельной линии: $x_6 = x_{кл}(к_1 к_2 \cdots к_п)^2 = 0.08 \cdot 2.5 \cdot \left(\frac{110}{6.6} \cdot \frac{10.5}{121}\right) = 0.42$ Ом;

2. Определим результирующее сопротивление x_Σ:

$$x_{\Sigma} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 3.84 \text{ Ом};$$

3. Определим ток к.з. генератора: $I_{к.з.ген} = \frac{E_d}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma}} = \frac{11}{\sqrt{3} \cdot 3.84} = 1.65$ кА;

4. Определим ток к.з. в месте замыкания : $I_{к.з} = I_{к.з.ген} \cdot \left(\frac{10,5}{121} \cdot \frac{110}{6,6} \right) = 2,4$ кА;

II. ПРИБЛИЖЕННОЕ ПРИВЕДЕНИЕ В ИМЕНОВАННЫХ ЕДИНИЦАХ.

Принимаем Uср для каждой ступени. $Uср_I$ = 10.5 кВ; $Uср_{II}$ = 115 кВ; $Uср_{III}$ = 6,3 кВ;
Расчетная I-я ступень.
Сопротивления генератора и трансформатора Т-1 не изменятся: x_I=0.96Ом; x_{II}=0.37Ом;

$$x_3 = x_л \cdot \left(\frac{U_{срI}}{U_{срII}} \right)^2 = 0.4 \cdot 80 \cdot \left(\frac{10.5}{115} \right)^2 = 0.27 \text{ Ом};$$

$$x_4 = x_{*(н)} \cdot \frac{U_н^2}{S_н} \left(\frac{U_{срI}}{U_{срIII}} \right)^2 = 0.105 \cdot \frac{6.6^2}{15} \cdot \left(\frac{10.5}{6.3} \right)^2 = 0.77 \text{ ом};$$

$$x_5 = x_{р*(н)} \cdot \frac{U_н}{\sqrt{3} I_н} \left(\frac{U_{срI}}{U_{срIII}} \right)^2 = 0.05 \cdot \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0.3} \cdot \left(\frac{10.5}{6.3} \right)^2 = 1.68 \text{ Ом};$$

$$x_6 = x_{кл} \cdot \left(\frac{U_{срI}}{U_{срIII}} \right)^2 = 0.08 \cdot 2.5 \cdot \left(\frac{10.5}{6.3} \right)^2 = 0.5 \text{ Ом};$$

Расчетное сопротивление $x_{\sigma} = 4.6$ Ом (получили завышенное значение на 20%);

$$I_{к.з.ген} = \frac{11}{\sqrt{3} \cdot 4,6} = 1,38 \text{ кА; (ошибка на 16,5%);}$$

$$I_{к.з.} = I_{к.з.ген} \cdot \left(\frac{U_{ср.I}}{U_{ср.III}} \right) = 1.38 \cdot \left(\frac{10.5}{6.3} \right) = 2.3 \text{ кА;}$$

III. ТОЧНОЕ ПРИВЕДЕНИЕ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ

Принимаем Sб=100 МВА; Uб=10,5 кВ. (Можно любую мощность, например, генератор, но чаще круглую цифру, как в данном случае).

1. Определяем базисное напряжение на других ступенях.

$$U_{бII} = U_{бII} \cdot \left(\frac{U_{II}}{U_I} \right) = 10.5 \cdot \left(\frac{121}{10.5} \right) = 121 \text{ кВ; аналогично } U_{бIII} = 121 \cdot \left(\frac{6.6}{110} \right) = 7.26 \text{ кА;}$$

2. Определим базисные токи на каждой ступени напряжения $I_б = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_б}$;

$$I_{бI} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 5.5 \text{ кА; } I_{бII} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 121} = 0.48 \text{ кА; } \quad I_{бIII} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 7.26} = 7.95 \text{ кА;}$$

3. Определим сопротивления в относительных базисных единицах.

$$x_1 = x_{*(н)} \cdot \frac{S_б}{S_н} \cdot \left(\frac{U_н}{U_б} \right)^2 = 0,25 \cdot \frac{100}{30} = 0,87$$

$$x_2 = x_{*(н)} \cdot \frac{S_б}{S_н} \cdot (1)^2 = 0{,}105 \cdot \frac{100}{31{,}5} = 0{,}33$$

$$x_3 = x_л \cdot \frac{S_б}{U_б^2} \cdot = 0{,}4 \cdot 80 \cdot \frac{100}{121^2} = 0{,}22$$

$$x_4 = x_{*(н)} \cdot \frac{S_б}{S_н} \cdot \left(\frac{U_н}{U_б}\right)^2 = 0{,}105 \cdot \frac{100}{15} \cdot \left(\frac{110}{121}\right)^2 = 0{,}58$$

$$x_5 = x_{р*(н)} \cdot \frac{I_б}{I_н} \cdot \frac{U_н}{U_б} = 0{,}25 \cdot \frac{100}{30} = 1{,}09$$

$$x_6 = x_{кл} \cdot \frac{S_б}{U_б^2} \cdot = 0{,}08 \cdot 2{,}5 \cdot \frac{100}{7{,}26^2} = 0{,}38$$

$$x_\Sigma = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 3.43$$

4. Определим в относительных единицах Э.Д.С. или напряжение

$$E_{*(б)} = \frac{E}{E_б} = \frac{E}{U_{бI}} = \frac{11}{10.5} = 1.05$$

Сделаем переход к определению тока к.з. генератора и в месте к.з.

$$I_{к.з.ген} = I_{*(б)к.з} \cdot I_{бI} = 0.306 \cdot 5.5 = 1.68 \text{ кА};$$

$$I_{к.з.} = I_{*(б)к.з} \cdot I_{бIII} = 0.306 \cdot 4.95 = 2.43 \text{ кА};$$

IV. ПРИБЛИЖЕННОЕ ПРИВЕДЕНИЕ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ

$U_{бI}$, $I_{бI}$, $S_б$ – остаются неизменными.

1. Определим базисные напряжения и токи наII –III ступенях.

$$U_б = U_б \cdot \left(\frac{1}{к1...к_n}\right);\ U_{бII} = 10.5 \cdot \left(\frac{115}{10.5}\right) = 115 \text{ кВ};\ U_{бIII} = 115 \cdot \left(\frac{6.3}{115}\right) = 6.3 \text{ кВ};$$

$$I_{бII} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{бII}} = 0.5 \text{ кА};\ I_{IIIб} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6.3} = 9.2 \text{ кА}.$$

Перейдем к относительным единицам в определенном сопротивлении. x1,x2 и Еб остаются неизменными.

$$x_3 = x_л \cdot \frac{S_б}{U_б^2} = 0{,}4 \cdot 80 \cdot \frac{100}{115} = 0{,}24;\ x_4 = x_{*(н)} \cdot \frac{S_б}{S_н} \cdot (1)^2 = 0{,}105 \cdot \frac{100}{15} = 0{,}7;$$

$$x_5 = x_{р*(н)} \cdot \frac{I_б}{I_н} = 0{,}05 \cdot \frac{9{,}2}{0{,},3} = 1{,}53;\ x_6 = x_{кл} \cdot \frac{S_б}{U_{IIIб}^2} \cdot = 0{,}08 \cdot 2{,}5 \cdot \frac{100}{6.3^2} = 0{,}51;$$

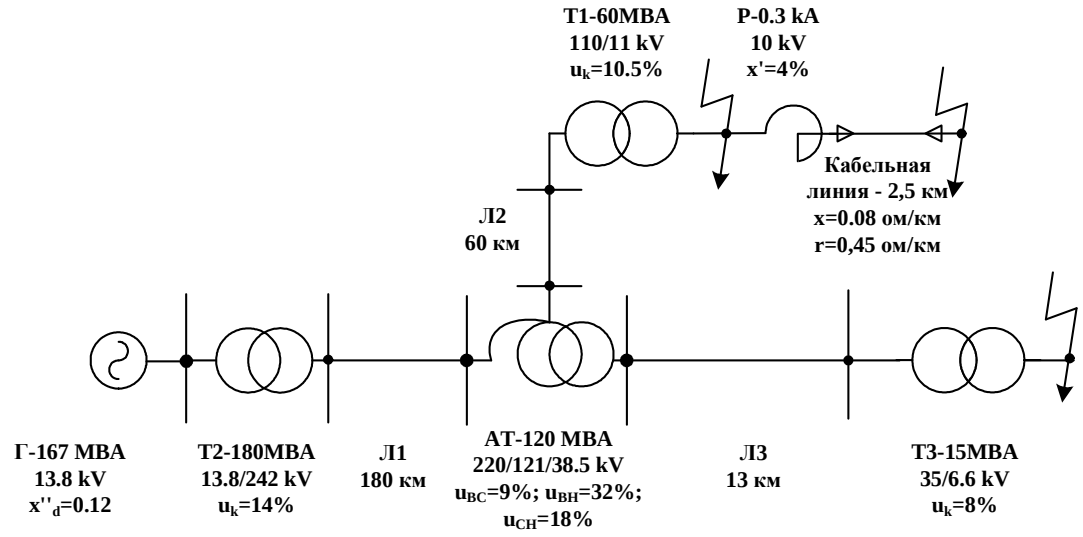
$$x_\Sigma = 4.18.$$

$$\boldsymbol{I_{*(б)к.з.} = \frac{E_{*(б)}}{x_\Sigma} = \frac{1.05}{4.18} = 0.25}$$

$$I_{к.з.ген} = I_{*(б)к.з} \cdot I_{бI} = 0.25 \cdot 5.5 = 1.38$$

$$I_{к.з.} = I_{*(б)к.з} \cdot I_{бIII} = 0.25 \cdot 9.2 = 2.3$$

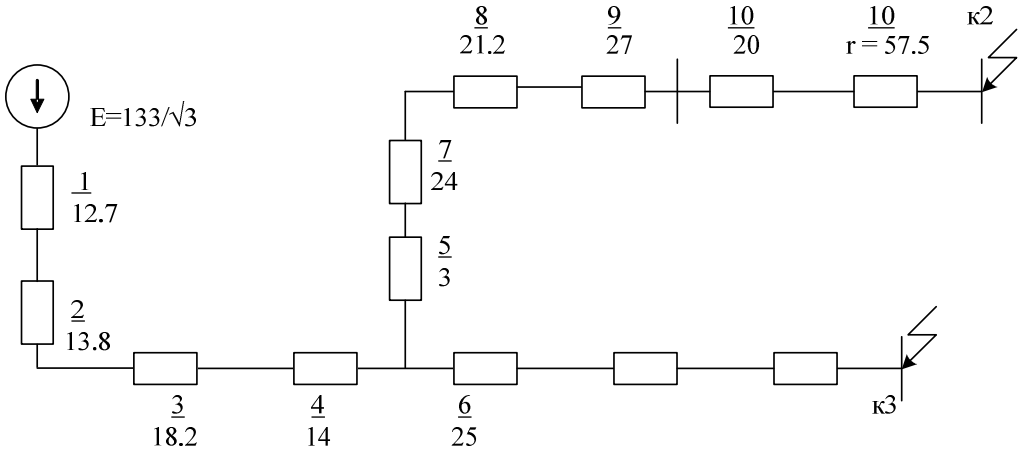
ПРИМЕР 2:



Составить схему замещения, выразив элементы схемы в именованных и относительных единицах. Решение провести с точным и приближенным произведением схемы. Оценить значение периодической составляющей Iк.з. при 3-х фазном к.з. в точках к-1 к-2, считая, что генератор работает на ХХ с номинальным напряжением.

1. ТОЧНОЕ ПРИВЕДЕНИЕ В ИМЕНОВАННЫХ ЕДИНИЦАХ

В качестве основной выбираем ступень II, где включена линия Л-2.
Составляем схему замещения:



$$x_I = 0.12 \cdot \frac{13.8^2}{167} \cdot \left(\frac{242}{13.8} \cdot \frac{121}{220}\right)^2 = 12.7 \text{ Ом}; \quad x''_d \cdot \frac{U^2}{S_н} \cdot (к_1 к_2 ...)$$

$$e = \frac{13{,}8}{\sqrt{3}} \cdot \frac{242}{13{,}8} \cdot \frac{121}{220} = \frac{133}{\sqrt{3}} \text{ кВ}; \quad E = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot k_1 k_2$$

(Т -2) $$x_2 = \frac{14}{100} \cdot \frac{242}{180} \cdot \left(\frac{121}{220}\right)^2 = 13.8 \text{ Ом}; \quad x = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{U^2}{S} \cdot k^2$$

(Л - 1) $$x_3 = 0.4 \cdot 180 \cdot \left(\frac{121}{220}\right)^2 = 18.2 \text{ Ом};$$

(АТ) у которого $U_в = 0{,}5 \cdot (U_{вс} + U_{вн} + U_{сн})$;

$U_в = 0{,}5(9+32-18) = 11{,}5$ %

$U_с = 9\text{-}11.5 = -2.5$ %

$U_н = 32\text{-}11{,}5 = 20{,}5$ % соответственно

$x_4 = \frac{11.5}{100} \cdot \frac{121^2}{120} = 14$ Ом; $x_5 = -3$ Ом; $x_6 = 25$ Ом; $\frac{U_к}{100} \cdot \frac{U^2}{S}$

(Л-2) $x_7 = 0.4*60 = 24$ Ом;

(Т-1) $x_8 = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{110^2}{60} = 21.2$ Ом;

(Р) $x_9 = \frac{4}{100} \cdot \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0.3} \cdot \left(\frac{110}{11}\right)^2 = 77$ Ом;

(каб.) $x_{10} = 0{,}08 \cdot 2{,}5 \cdot \left(\frac{110}{11}\right)^2 = 20$ Ом;

$r_{10} = 0{,}45 \cdot 2{,}5 \cdot \left(\frac{110}{11}\right)^2 = 113$ Ом;

При к.з. в точке к-1 $x_\Sigma = 12.7 + 13.8 + 18.2 + 14 - 3 + 24 + 21.2 \approx 101$ Ом;

Величины токов:

В линии Л – 2 $I = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot 101} = \frac{133}{\sqrt{3} \cdot 101} = 0.76$ кА;

В месте к.з. $I_{к.з.} = 0{,}76 \cdot \frac{110}{10} = 7{,}6$ кА;

В линии Л – 2 $I = 0.76 \cdot \frac{121}{220} = 0.42$ кА;

При к.з. в точке к – 2:

$x_\Sigma = 101 + 70 + 20 = 198$ Ом;

$z_\Sigma = \sqrt{x_\Sigma^2 + r_\Sigma^2} = 228$ Ом;

Ток в линии Л –2 $I = \frac{133}{\sqrt{3} \cdot 228} = 0.34$ кА;

В месте к.з. $I_k = 0.34 \cdot \frac{110}{11} = 3.4$ кА;

ТОЧНОЕ ПРИВЕДЕНИЕ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ

Принимаем: $S_б$=1000МВА и на 2 ступени (основной) $U_{б_2}$ =115кВ, тогда $I_{б_2} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115}$ =5(кА);

на других ступенях базисные напряжения и токи будут:

$U_{б_1} = 115 \cdot \frac{11}{110} = 11{,}5$ кВ; $I_{б_1} = 5 \cdot \frac{110}{11} = 50$ (кА);

$U_{б_3} = 115 \cdot \frac{220}{121}$ =209 кВ; $I_{б_3} = 5 \cdot \frac{121}{220}$ = 2,75 (кА);

$U_{б_4} = 209 \cdot \frac{13,8}{242}$ = 11,9 кВ $I_{б_4} = 2,75 \cdot \frac{242}{13,8}$ = 48,3 (кА);

Пользуясь соответствующими выражениями, находим величины сопротивления:

(Г) $x_1 = x''_d \frac{S_б}{S}\left(\frac{U}{U_{б_4}}\right)^2 = 0,12 \cdot \frac{1000}{167} \cdot \left(\frac{13,8}{11,9}\right)^2 = 0,97;$

(Т - 2) $x_2 = 0,14 \cdot \frac{1000}{180} \cdot \left(\frac{242}{209}\right)^2 = 1,04;$ $\frac{U_к}{100} \cdot \frac{S_б}{S} \cdot \frac{U^2}{U_3^2}$

(Л – 2) $x_3 = 0,4 \cdot 180 \cdot \frac{1000}{209^2} = 1,37;$ $x_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U^2_{б_3}}$

(АГ) $x_4 + x_5 = 0,09 \cdot \frac{1000}{120} \cdot \left(\frac{220}{209}\right)^2 = 0,83;$ $U_{вс} \cdot \frac{S_б}{S} \cdot \left(\frac{U}{U_{б_3}}\right)^2$

(А - 2) $x_7 = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,82;$ $x_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U^2_б}$

(Т – 1) $x_8 = 0,105 \cdot \frac{1000}{60} \cdot \left(\frac{110}{115}\right)^2 = 1,6;$ $\frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_б}{S} \cdot \left(\frac{U}{U_{б_2}}\right)^2$

(Р) $x_9 = 0,04 \cdot \frac{50}{0,3} \cdot \frac{10}{11,5} = 5,8$

(каб.) $x_{10} = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \frac{1000}{11,5^2} = 1,51$ аналогично $r_{10} = 8,5$

Относительная э .д. с $\dot{E} = \frac{13,8}{11,9} = 1,16$

При коротком замыкании $x_\Sigma = 0,97+1,04+1,37+0,83+1,82+1,6 = 7,63.$

Относительный ток $I_x = \frac{E}{x_\Sigma} = \frac{1,16}{7,63} = 0,152$

Величины токов на следующих ступенях напряжения будут
$I_{Л\text{-}2} = I_н \cdot I_{б2} = 0,76$ (кА); в месте кз. $I_{Л\text{-}1} = 0,152 \cdot 2,75 = 0,42$ (кА);

<u>При к. з в точке к – 2.</u> $X_\Sigma = 7,63+5,8+1,51 = 14,94;$ $Z_\Sigma = \sqrt{14,94^2 + 8,5^2} = 17,2.$

Относительный ток $I_K = \frac{1,16}{17,2} = 0,068;$

Величины токов: (Л – 2) $I = 0,068 \cdot 5 = 0,34$ (кА); в месте к. з. $I_{к.з.} = 0,068 \cdot 50 = 3,4$ (кА), т.е. совпадают с теми величинами, которые были найдены при точном решении в именованных единицах.

ПРИБЛИЖЕННОЕ ПРИВЕДЕНИЕ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ.

Сохраняя $S_б$ = 1000 МВА, $U_{б\,2}$ = 115 кВ, и следовательно, $I_{б\,2}$ = 5 кА, для других ступеней в соответствии с рекомендованной шкалой напряжений имеем:

$U_{б1}$ = 10,5 кВ, $I_{б1}$ = 54,8 кА

$U_{б3}$ = 230 кВ, $I_{б3}$ = 2,5 кА

$U_{б4}$ = 13,8 кВ, $I_{б4}$ = 41,8 кА

$I_б$ рассчитывается также как и для точного приведения.

Относительная базисная реактивность (сопротивление) линии Л–2 сохранится той же, что и в предыдущем подсчете x_7 = 1,82, для остальных элементов по выражениям для упрощенного приведения в относительных единицах имеем:

$$x_1 = 0{,}12 \cdot \frac{1000}{167} = 0{,}72;$$

$$x_2 = U_к \cdot \frac{S_б}{S_н} = 0{,}14 \cdot \frac{1000}{180} = 0{,}78;$$

$$x_3 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U^2} = 0{,}4 \cdot 180 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1{,}13;$$

$$x_4 + x_5 = U_{вс} \cdot \frac{S_б}{S_н} = 0{,}09 \cdot \frac{1000}{120} = 0{,}75;$$

$$x_8 = U_к \cdot \frac{S_б}{S_н} = 0{,}105 \cdot \frac{1000}{60} = 1{,}75;$$

$$x_9 = x\% \cdot 0{,}001 \cdot \frac{S_{б_1}}{I_н} \cdot \frac{U_н}{U_{б_1}} = 0{,}04 \cdot \frac{54{,}8}{0{,}3} \cdot \frac{10}{10{,}5} = 6{,}95;$$

$$x_{10} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_б^2} = 0{,}08 \cdot 2{,}5 \cdot \frac{1000}{10{,}5^2} = 1{,}82; \quad r_{10} = 10{,}2;$$

Относительная э.д.с. $\dot{E} = \frac{13{,}8}{13{,}8} = 1;$

к.з. в точке к-1 $x_\Sigma = 0{,}72+0{,}78+1{,}13+0{,}75+1{,}82+1{,}75 = 6{,}95;$

относительный ток $I_* = \frac{E_*}{x_\Sigma} = \frac{1}{6{,}95} = 0{,}144$

Величины токов:

(Л-2) $I = 0{,}144 \cdot 5 = 0{,}72$ (кВ);

в месте к. з. $I = 0{,}144 \cdot 54{,}8 = 7{,}9$ (кА);

(Л-1) $I = 0{,}144 \cdot 2{,}5 = 0{,}36$ (кА);

к. з. в точке К-2 $x_\Sigma = 6{,}95+6{,}95+1{,}82 = 15{,}72$ кА.

$Z_\Sigma = \sqrt{15{,}72^2 + 10{,}2^2} = 18{,}7$

Относительный ток $I_* = \frac{1}{18{,}7} = 0{,}054;$

Величины токов:

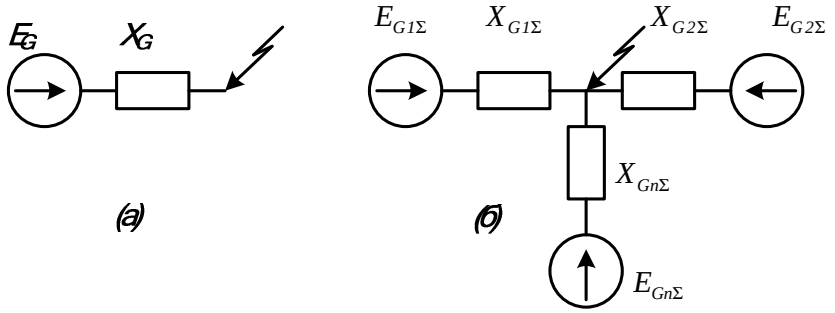
(Л-2) $I = 0{,}054 \cdot 5 = 0{,}27$ кА;

в месте к. з. $I = 0{,}054 \cdot 54{,}8 = 2{,}95$ кА.

Преобразование исходной схемы замещения в эквивалентную результирующую

При аналитических расчетах токов КЗ исходные схемы замещения, в которых представлены различные элементы исходных расчетных схем, следует путем последовательных преобразований приводить к эквивалентным результирующим схемам замещения, содержащим эквивалентную ЭДС (в схемах прямой последовательности), эквивалентное результирующее сопротивление соответствующей последовательности и источник напряжения одноименной последовательности, а при трехфазном КЗ — точку КЗ.

Цель преобразования схемы замещения - приведение ее к простейшему виду.



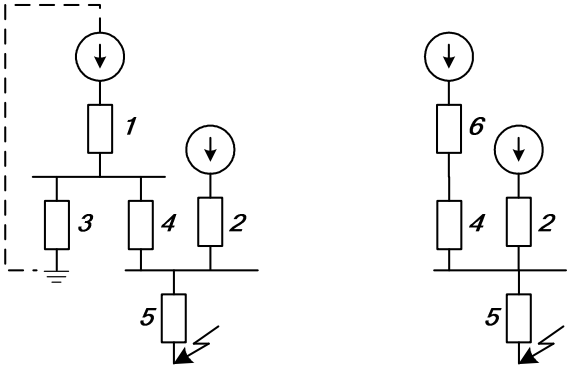
Преобразование схемы замещения при одной группе источников (а) и n-групп (б)

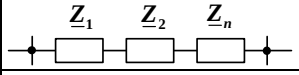
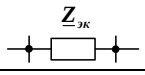
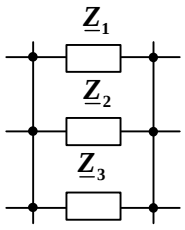
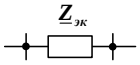
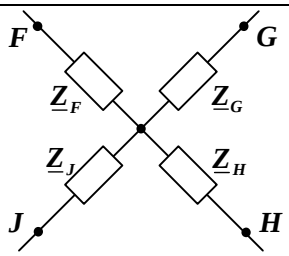
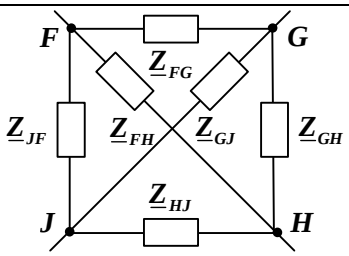
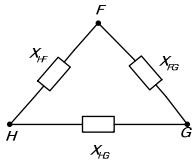
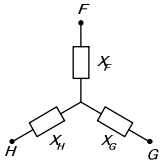
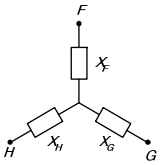
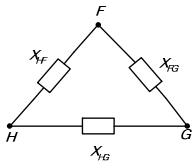
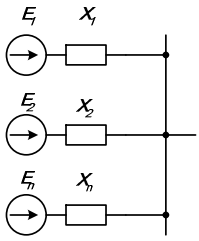
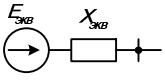
Если схема замещения содержит источники со значительно отличающимися параметрами, то они объединяются так, чтобы каждая группа содержала источники с близкими параметрами. Тогда простейшая схема, к которой приводится любая схема замещения, будет иметь вид, показанный на рисунке (а).

Если исходная схема замещения не содержит замкнутых контуров, то она легко преобразуется в эквивалентную результирующую схему путем последовательного и параллельного соединения элементов и путем замены нескольких источников, имеющих разные ЭДС и разные сопротивления, но присоединенных в одной точке, одним эквивалентным источником. При более сложных исходных схемах замещения для определения эквивалентного результирующего сопротивления следует использовать известные способы преобразования, такие как преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений, звезду сопротивлений в эквивалентный треугольник сопротивлений, многолучевую звезду сопротивлений в полный многоугольник сопротивлений и т.д. Каждая схема должна быть преобразована до одного результирующего сопротивления соответствующей последовательности относительно точки к.з. Формулы для таких преобразований приведены в табл.

При выполнении упрощающих преобразований исходной схемы следует применить следующие приемы:

1. Первоочередной задачей расчета к.з. является нахождение тока непосредственно в аварийной ветви или в месте короткого замыкания. Поэтому преобразование схемы нужно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразований. С целью, например, при расчете установившегося режима к.з., концы нагрузочных ветвей, э.д.с. которых принимаются равными нулю, не следует соединять с точкой к.з., а лучше объединять эти ветви с генераторами в параллельные ветви (рис.)

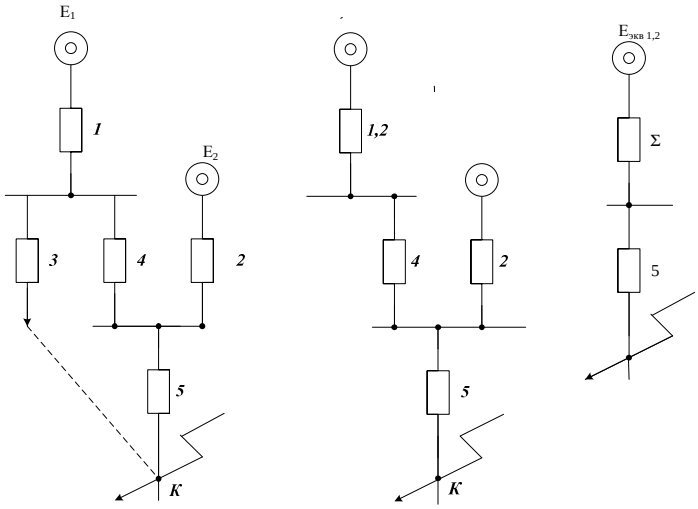


Вид преобразования	Исходная схема	Преобразованная схема	Сопротивление элементов преобразованной схемы
Последовательное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + ... + \underline{Z}_n$
Параллельное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}}$, где $\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}$; $\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2}$; $\underline{Y}_n = \frac{1}{\underline{Z}_n}$ При двух ветвях $\underline{Z}_{эк} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F \underline{Z}_G \sum \underline{Y}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G \underline{Z}_H \sum \underline{Y}$ ....., где $\sum \underline{Y} = \underline{Y}_F + \underline{Y}_G + \underline{Y}_H + \underline{Y}_J$ Аналогично и при большем числе ветвей
Преобразование треугольника в звезду			$X_F = \frac{X_{FG} \cdot X_{HF}}{X_{FG} + X_{HF} + X_{GH}}$, $X_G = \frac{X_{FG} \cdot X_{GH}}{X_{FG} + X_{HF} + X_{GH}}$ $X_H = \frac{X_{HF} \cdot X_{GH}}{X_{FG} + X_{HF} + X_{GH}}$
Преобразование звезды в треугольник			$X_{FG} = X_F + X_G + \frac{X_F X_G}{X_H}$, $X_{HG} = X_H + X_G + \frac{X_H X_G}{X_F}$, $X_{HF} = X_F + X_H + \frac{X_F X_H}{X_G}$.
Замена нескольких источников эквивалентным			$E_{экв} = \frac{1}{Y_{экв}} \sum_{K=1}^{n} Y_K E_K$, *где* $Y_{экв} = Y_1 + Y_2 + ... + Y_n$, $Y_1 = \frac{1}{X_1}; Y_2 = \frac{1}{X_2}; ....; Y_n = \frac{1}{X_n}$ *При двух ветвях* $E_{экв} = \frac{E_1 X_2 + E_2 X_1}{X_1 + X_2}$

2. Когда трехфазное к.з. находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, этот узел можно разрезать, сохранив к.з. на конце каждой образовавшейся ветви. Далее полученную схему нетрудно преобразовать относительно любой из точек к.з., как указывалось ранее, учитывая другие ветви с к.з. как нагрузочные ветви, с э.д.с., равными нулю (рис.).

Использование замены нагрузочных ветвей генерирующими с *E = 0.*

Обычно концы нагрузочных ветвей, объединяют с таким к.з. (как показано штриховой линией на рис.). Но при этом получается замкнутый контур, (элементы 3, 4, 5) и расчет схемы усложняется (т. к. отмечалось выше необходимо выделить ветвь к. з. отдельно).



Более простым решением является предположение, что у нагрузочной ветви (3) имеется источник с *E = 0*, и эту ветвь объединить с генератором в эквивалентные ветви. Схемы преобразуются следующим образом:

1) **параллельно складываем ветви 1, 3. Получаем 2б.**
2) **определяем эквивалентное сопротивление (1, 3+4) на рис. 2б обведено пунктиром.**
3) **окончательно получаем 2в.**

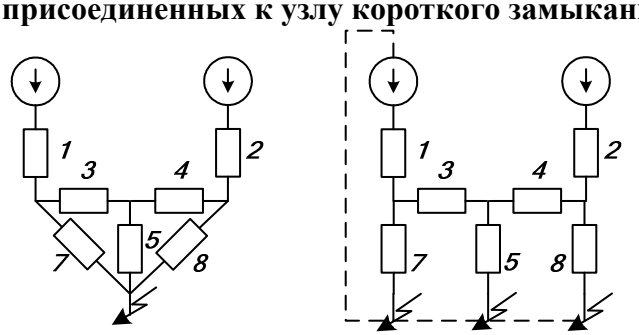
Т.е. получили классическую схему.

Рассечение схемы в узле с точкой к. з.

Когда трехфазное к.з. находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, этот узел можно разрезать, сохранив такое же к.з. на конце каждой образовавшейся ветви.

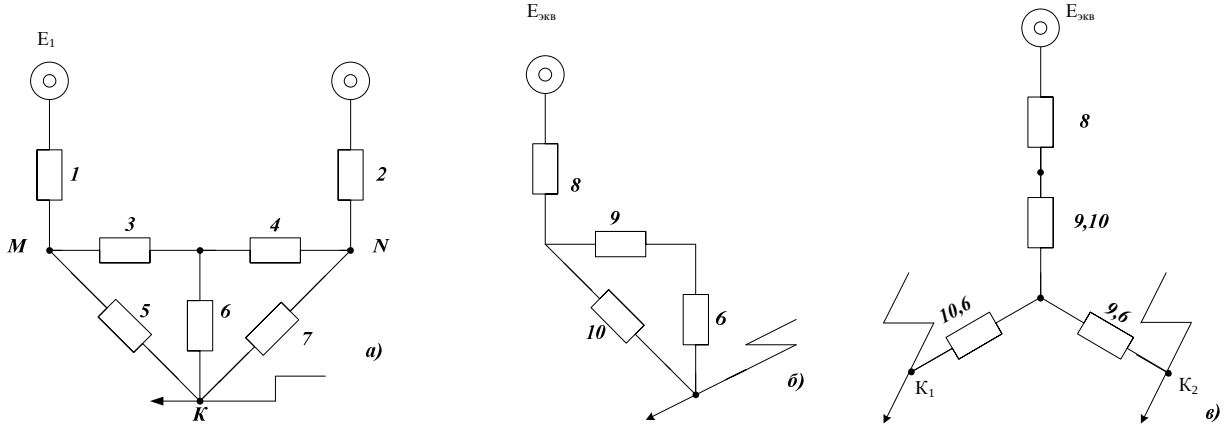
Дальше полученная схема преобразуется относительно любой из точек к. з., учитывая другие ветви с короткими замыканиями как обычные загрузочные ветви с э. д. с. равными нулю. Суммарный ток к. з., т. е. ток к. з. в узле определится: $I_к = I_{к1} + I_{к2} + I_{к3}$

Рассечение схемы в узле с точкой к. з. особенно эффективно, когда нужно найти ток в одной из ветвей, присоединенных к узлу короткого замыкания (т. е. $I_{к1}$, $I_{к2}$, $I_{к3}$).

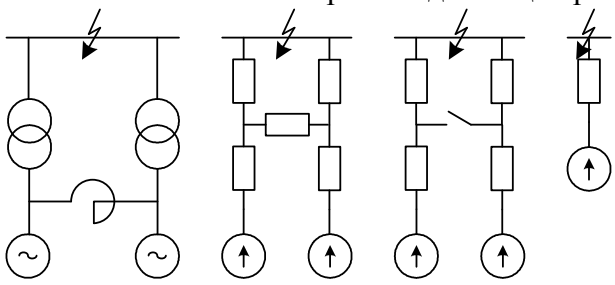


3. В тех случаях, когда исходная расчетная схема симметрична относительно точки КЗ или какая-либо ее часть симметрична относительно некоторой промежуточной точки, то задачу определения эквивалентного результирующего сопротивления можно существенно облегчить путем соединения на исходной расчетной схеме (и соответственно на исходной схеме замещения) точек, имеющих одинаковые потенциалы, и исключения из схемы тех элементов, которые при КЗ оказываются обесточенными.

Например, пусть в схеме рис. элементы расположены симметрично относительно элемента 6 – одинаковы. Следовательно, одинаковы и потенциалы узлов M и N, что позволяет закоротить названные узлы, а образовавшиеся параллельные ветви 1 и 2; 3 и 4; 5 и 7 заменить эквивалентными. Схема замещения упростилась – вместо двух контуров она теперь содержит один. Преобразуем *Δ* в *Y*. И дальше схема легко преобразуется к элементарному виду.



4. Преобразования схем прямой, обратной и нулевой последовательности при расчете несимметричного к.з. целесообразно вести таким образом, чтобы ветвь, отделяющая точку к.з. от узла, в котором требуется построить векторную диаграмму напряжений (шины СН автотрансформатора), по возможности была сохранена до конца преобразований.



5. Трудности преобразования схем замещения в значительной степени определяются выбранным порядком выполнения операций по упрощению схемы. Поэтому при преобразовании схем следует придерживаться такого порядка расчетов и записи результатов, который обеспечивает легкую проверку получаемых результатов.

6. В результате преобразований должна быть получена эквивалентная расчетная схема, несколько вариантов которой приведены на рис.

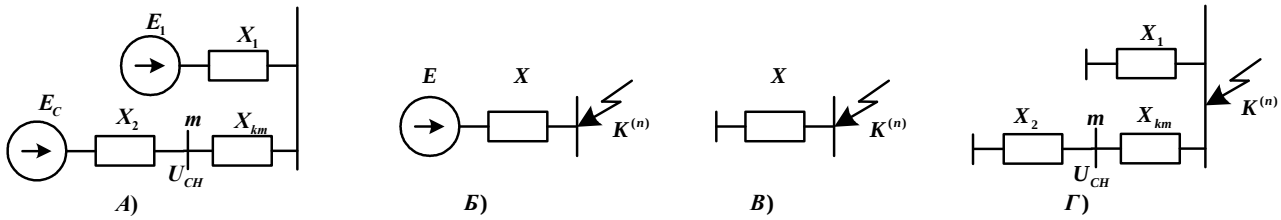
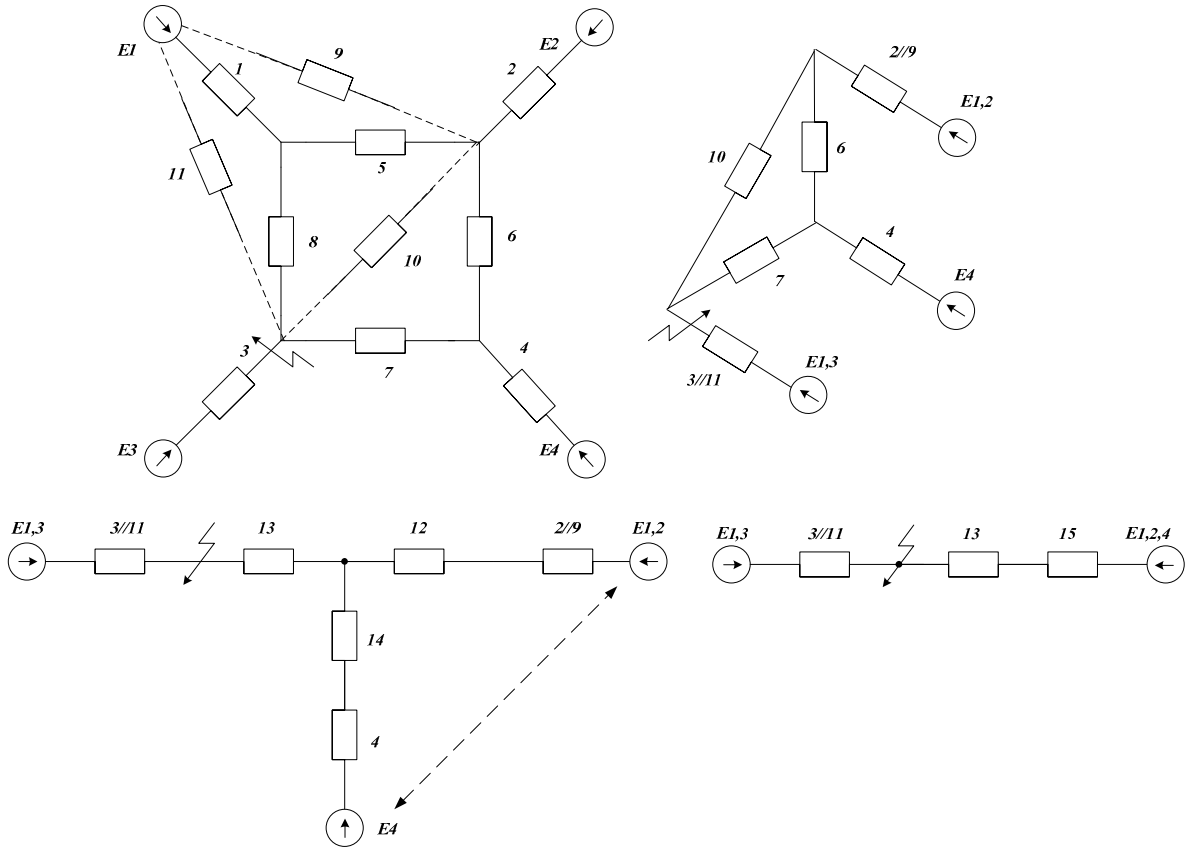


Схема А удобна при определении составляющей прямой последовательности напряжения на шинах СН автотрансформатора (узел m), схема Б – для расчетов сверхпереходного и установившего токов к.з. и определении результирующего сопротивления прямой последовательности $X_{1\Sigma}$, а схема В – при определении результирующих сопротивлений обратной последовательности $X_{2\Sigma}, X_{0\Sigma}$. Схема Г аналогична схеме А, но без источников э.д.с. и удобна для определения составляющих прямой и обратной последовательностей напряжения на шинах СН автотрансформатора.

Эквивалентная схема может иметь и другой вид, но основным ее достоинством должна оставаться простота определения токов в ее ветвях.

7. Если в исходной схеме замещения одним из лучей трехлучевой звезды сопротивлений является сопротивление источника энергии, то в ряде случаев целесообразно звезду сопротивлений заменить на треугольник и затем последний разрезать по вершине, к которой приложена ЭДС, подключив при этом на каждом из оказавшихся свободными концов ветвей ту же ЭДС.

<u>Расчет замкнутых или кольцевых схем.</u> При расчете замкнутых или кольцевых схем широко используется эквивалентные преобразования *Δ* в *Y* и *Y* в *Δ* и рассечение схем в точках с к. з. или в точках с одинаковыми потенциалами. Рассмотрим схему рис.



1. **Преобразуем *звезду* с лучами (1, 5, 8) в *треугольник* со сторонами (9, 10, 11).**
2. **Рассечем ветви (9, 11) сходящиеся в узле E_1 и проведем сложение рассеченных ветвей с ветвями E_3 и E_2. При этом от схемы с 4 – мя источниками приходим к схеме с 3 источниками э. д. с.**
3. **Преобразуем *треугольник* со сторонами (6,7,10) в эквивалентную *звезду* с лучами (12,13,14).**
4. **Заменив параллельные лучи с $E_{2,1}$ и E_4 с эквивалентным $E_{2,1,4}$, переходим к схеме с двумя источниками.**

Применение принципа наложения

Для определения токов КЗ в произвольной ветви расчетной схемы в ряде случаев целесообразно использовать принцип наложения, в соответствии с которым ток в этой ветви можно получить путем суммирования (наложения) токов разных режимов, каждый из которых определяется действием одной или нескольких ЭДС, когда все остальные ЭДС принимаются равными нулю, а все элементы схемы остаются включенными. Каждый из таких условных режимов решается более просто, однако при большом числе различных э.д.с. в схеме, использование принципа наложения в такой обычной форме становится громоздким. Поэтому на практике используют следующие формы принципа наложения:

а) <u>Наложение собственно аварийного режима на предшествующий.</u>

Если предположить, что в точке к. з. приложены две равные, но взаимно противоположные э. д. с., то условия 3-х фазного к. з. не изменятся. На этом предположении и основано применение данной формы принципа наложения. Величина взаимно противоположных э. д. с. может быть произвольной, но обычно ее берут равной напряжению, которое было в точке до возникновения к. з., т. к генераторы, как правило, вводятся в схему своими э. д. с., которые были у них до возникновения к. з., то после возникновения к. з. режим удобно представить состоящим из 2-х режимов. Один из них целесообразно получить, учитывая все э. д. с. и дополнительно введенную в точку короткого замыкания э. д. с., равную + $U_{ко}$**. Одновременное действие этих э. д. с., очевидно, дает предшествующий режим в данной схеме. Второй режим получается от действия только одной э. д. с., приложенной в точке короткого замыкания и равной -** $U_{ко}$**. Его называют собственно аварийным режимом, а получающиеся при нем токи и напряжения — аварийными составляющими соответственно токов и напряжений.**

Таким образом при значительном числе ЭДС решение упрощаем, используя теорему об активном двухполюснике. В соответствии с этой теоремой ток в месте КЗ можно найти как сумму предшествующего тока $I_{\alpha|0|}$ и аварийной составляющей тока $I_{к\alpha}$, получаемой от действия одной ЭДС, приложенной в точке КЗ и равной $U_{\alpha|0|}$, где $U_{\alpha|0|}$ напряжение, которое было до возникновения КЗ в расчетной точке КЗ.

Аварийная составляющая тока в месте КЗ равна $\dot{I}_{к\alpha} = -\dfrac{\dot{U}_{\alpha|0|}}{jX_{вх}}$,

где $X_{вх}$ - входное сопротивление схемы относительно расчетной точки КЗ при условии, что все остальные ЭДС равны нулю.

Действительные величины тока и напряжения при 3-х фазном к. з. получаются суммированием соответствующих предшествующих величин и найденных собственно аварийных составляющих, тогда ток в произвольной ветви *j* расчетной схемы при КЗ в точке α равен $\dot{I}_j = \dot{I}_{j|0|} + \dot{I}_{кj}$**, где** $\dot{I}_{j|0|}$ **- нагрузочная составляющая тока в ветви *j*, т.е. ток ветви *j* в режиме, предшествующем КЗ;** $\dot{I}_{кj}$ **- аварийная составляющая тока в ветви *j* при КЗ в точке α. Эта составляющая равна** $\dot{I}_{кj} = \dot{I}_{к\alpha} K_{j\alpha}$**, где** $K_{j\alpha}$ **- коэффициент распределения тока для ветви *j* при КЗ в точке α.**

Использование такой формы наложения целесообразно главным образом в случае, когда известен нормальный предшествующий режим. В практических расчетах можно допускать наложение собственно аварийного режима, полученного для чисто индуктивной схемы, на предшествующий режим, соответствующий схеме с полными сопротивлениями элементов. Такое допущение хотя и вносит погрешность в расчет, однако она незначительна (можно пренебречь), (пример рассмотреть в учебнике).

б) <u>Применение собственных и взаимных сопротивлений к проводимости.</u>

Из курса *ТОЭ* известно, что в схеме с произвольным числом генераторов с э. д. с. $\overset{0}{E}_1, \overset{0}{E}_2, ..., \overset{0}{E}_n$**, для тока, например у генератора *I* (приняв за положительное направление тока от генераторов к внешней сети генератора по принципу наложения.**

Имеем:

$$\dot{I} = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12} - \dot{I}_{13} - ... - \dot{I}_{1n} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{11}} - \frac{\dot{E}_2}{Z_{12}} - \frac{\dot{E}_3}{Z_{13}} - ... - \frac{\dot{E}_n}{Z_{1n}} = У_{11}\dot{E}_1 - У_{12}\dot{E}_2 - У_{13}\dot{E}_3 - ... - У_{1n}\dot{E}_n$$

$\dot{I}_{11} = \dfrac{\dot{E}_1}{Z_{11}} = У_{11}\dot{E}_1$ **- собственный ток генератора *I*, созданный только его э. д. с.** E_1.

$\dot{I}_{12} = \dfrac{\dot{E}_2}{Z_{12}} = У_{12}\dot{E}_2$ **- взаимный ток генератора *I*, созданный его э. д. с. E_2 и т. д.**

Здесь Z_{11}, Z_{12}, Z_{1n} и $У_{11}$, $У_{12}$, …, $У_{1n}$ – собственные и взаимные сопротивления и проводимости генератора I.

Аналогично ток в месте к. з. определится по выражению:

$\dot{I}_1 = \dfrac{\dot{E}_1}{Z_{1k}} + \dfrac{\dot{E}_2}{Z_{2k}} + ... + \dfrac{\dot{E}_n}{Z_{nk}} = У_{1k}\dot{E}_1 + У_{2k}\dot{E}_2 + ... + У_{nk}\dot{E}_n$**, здесь: Z_{1k}, Z_{2k}, … , Z_{nk} и $У_{1к}$, $У_{2к}$, …, $У_{nк}$ – взаимные сопротивления и проводимости между каждым из генераторов и точкой к. з.**

Определение взаимных сопротивлений между источниками и точкой короткого замыкания

Если исходная расчетная схема содержит *m* узлов с источниками энергии и узел α, в котором требуется определить ток КЗ, то следует предварительно составить схему замещения в виде полного (*m* + 1)-угольника. Искомый ток КЗ в узле α равен

$$\dot{I}_\alpha = \sum_{\beta=1}^{m} \dot{E}_\beta \underline{Y}_{\beta\alpha} = \sum_{\beta=1}^{m} \dot{E}_\beta \overline{\underline{Y}}_{\beta\alpha},$$

где $\dot{E}_\beta$ - ЭДС, подключенная в узле β; $\underline{Y}_{\beta\alpha}$ - взаимная проводимость между узлами β и α; $\overline{\underline{Y}}_{\beta\alpha}$ - проводимость ветви полного (*m* + 1)-угольника, непосредственно соединяющей узлы β и α.

Из формулы следует, что при любом числе узлов в исходной расчетной схеме проводимости ветвей схемы замещения, представленной в виде полного многоугольника, могут быть определены по формуле $\overline{\underline{Y}}_{\beta\alpha} = \dfrac{\dot{I}_{к\alpha}}{\dot{E}_\beta}$, где $\dot{I}_{к\alpha}$ - ток в узле α при условии, что в схеме действует только одна ЭДС $\dot{E}_\beta$, приложенная в узле β, а все остальные ЭДС равны нулю.

Таким образом, взаимное сопротивление между произвольным источником ЭДС и точкой КЗ $\underline{Z}_{\beta\alpha} = \dfrac{\dot{E}_\beta}{\dot{I}_{к\alpha}}$.

Собственные и взаимные сопротивления или проводимости находят с помощью так называемого способа токораспределения или путем постепенного преобразования заданной схемы. Оба эти приема иногда целесообразно использовать совместно, т. е. вначале произвести ряд преобразований схемы, а затем применить способ токораспределения. Сущность и применение этих приемов ниже иллюстрировано на конкретном примере.

В расчетах коротких замыканий часто приходится определять только взаимные сопротивления между точкой короткого замыкания и отдельными источниками (или группами их). для этого удобно использовать следующий прием. Приняв ток в месте короткого замыкания за единицу и считая все приведенные э. д. с. одинаковыми, нужно произвести распределение этого тока (равного единице) в заданной схеме. Полученные доли этой единицы для отдельных источников: C1, C2, ..., Cn, называемые коэффициентами распределения, при отсутствии нагрузок в схеме характеризуют долю участия каждого источника в питании короткого замыкания. Далее, если результирующее сопротивление схемы относительно места короткого замыкания Z_Σ, то, очевидно, можно записать равенства: $C_1 Z_{1k} = C_2 Z_{2k} = ... = C_n Z_{nk} = 1 \cdot Z_\Sigma$, откуда искомое взаимное сопротивление между точкой короткого замыкания и соответствующим источником будет: $Z_{nk} = \dfrac{Z_\Sigma}{C_n}$.

Нетрудно убедиться, что для нахождения собственного сопротивления каждого источника достаточно сложить параллельно все его взаимные сопротивления.

Мощности короткого замыкания

Отключающую способность выключателей при номинальном напряжении $U_н$ принято характеризовать номинальным отключаемым током $I_{отк\ ном}$ или пропорциональной ему номинальной отключаемой мощностью: $\boldsymbol{S_{отк\ ном} = \sqrt{3}\, U_н I_{отк\ ном}}$

Эта мощность сопоставляется с мощностью к. з. (при выборе по отключаемой мощности $S_{отк\ ном}$ должна сопоставляться мощности к. з.), которая независимо от вида к. з. определятся: $\boldsymbol{S_{kt} = \sqrt{3}\, U_н I_{kt}}$, где I_{kt} – ток к. з. в момент размыкания контактов выключается; $U_н$ – номинальное напряжение ступени, для которой найден ток к. з.

Т. к. при одних и тех же базисных условиях численное значение относительного тока равно численному значению относительной мощности $\boldsymbol{S_{*кб} = I_{*кб}}$, то расчет можно вести непосредственно для мощности к. з. При этом необходимо иметь в виду что отключаемая мощность выключателя не постоянна, и зависит от напряжения, при котором он работает.

Тема 3. Переходный процессы в трехфазных цепях, подключенных к источнику синусоидального напряжения. (4 часа)

Трёхфазное к.з. в неразветвлённой цепи, подключённой к источнику синусоидального напряжения. Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании (КЗ) в цепи без трансформаторов. Физическая сущность возникновения составляющих тока к.з. Ударный ток к.з. и условия его возникновения. Методы определения ударного коэффициента. Особенности переходного процесса при КЗ в разветвленной цепи. Переходный процесс при включении в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Переходный процесс при КЗ за трансформатором.

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ПРОСТЕЙШИХ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

1.Постановка задачи и ее ограничения.

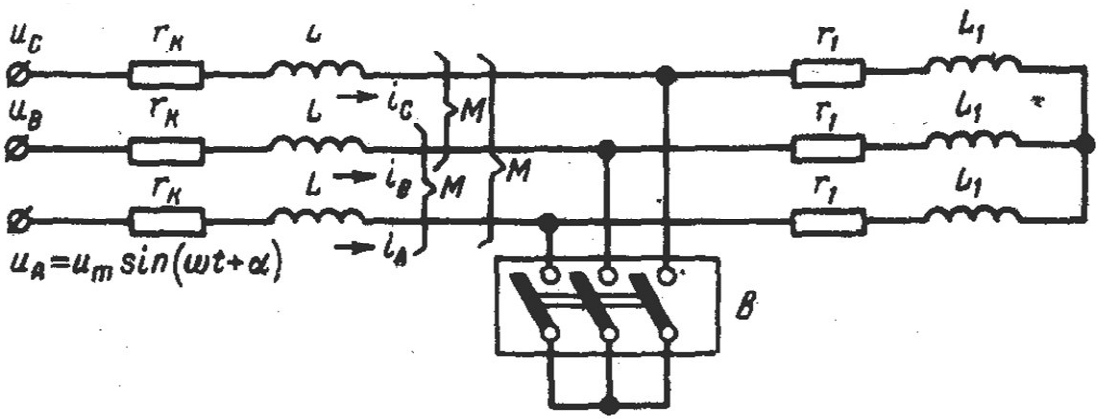
Простейшей трехфазной цепью будим называть симметричную трехфазную цепь с сосредоточенными активными сопротивлениями и индуктивностями при отсутствии в ней трансформаторных связей.

Рассмотрим переходный процесс в простейшей цепи при условии, что она питается от источника неограниченной мощности. *Источник неограниченной мощности –* источник, собственное сопротивление которого равно 0, а напряжение источника имеет постоянную амплитуду. Практически это соответствует рассмотрению переходного процесса в относительно маломощных электрических установках при питании последних от крупных энергетических систем.

Исследование подобных процессов проходят в курсе *ТОЭ*, поэтому вспомним, что учили и отметим особенности многофазной цепи по сравнению с однофазной, рассмотрим некоторые упрощенные приемы расчета.

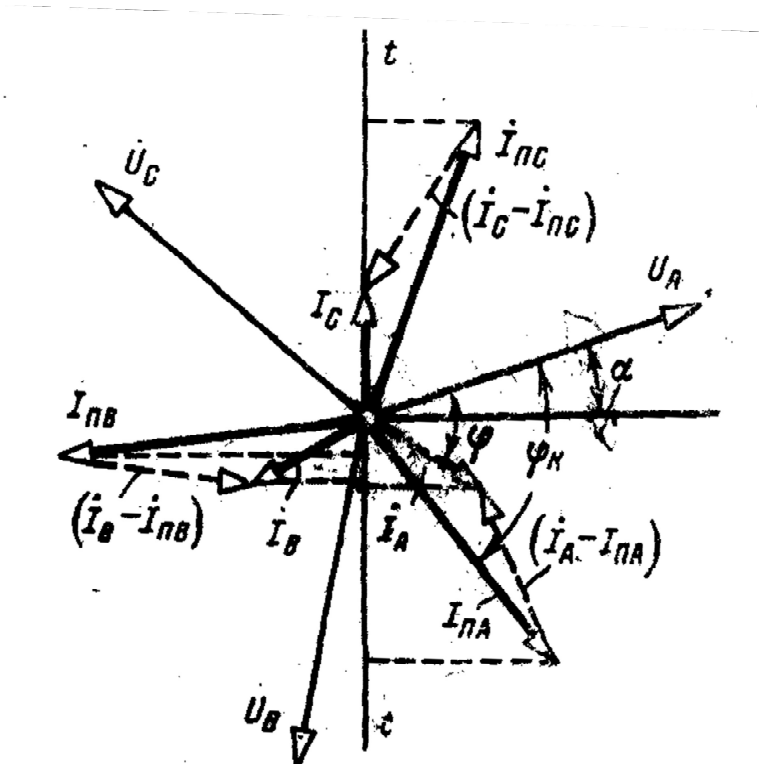
ТРЕХФАЗНОЕ К. З. В НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ.

Рассмотрим схему простейшей симметричной трехфазной сети.



В схеме условно принято, что на одном участке имеется взаимоиндукция *(M)*, а на другом нет. Цепь питается от источника синусоидального напряжения с неизменной амплитудой и частотой. Рассмотрим переходный процесс, вызванный включением выключателя В, за которым сделана закоротка, что равносильно возникновению металлического трехфазного короткого замыкания между двумя участками данной цепи.

Пусть векторы $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ (рис.) характеризуют предшествующий режим рассматриваемой цепи, а вертикаль tt и является неподвижной линией времени, т. е. мгновенные значения отдельных величин определяются проекциями на эту линию соответствующих вращающихся векторов. Момент возникновения короткого замыкания будем фиксировать значением угла α (т. е. фазой включения) между вектором напряжения фазы А и горизонталью.



Векторная диаграмма для начального момента трехфазного короткого замыкания.

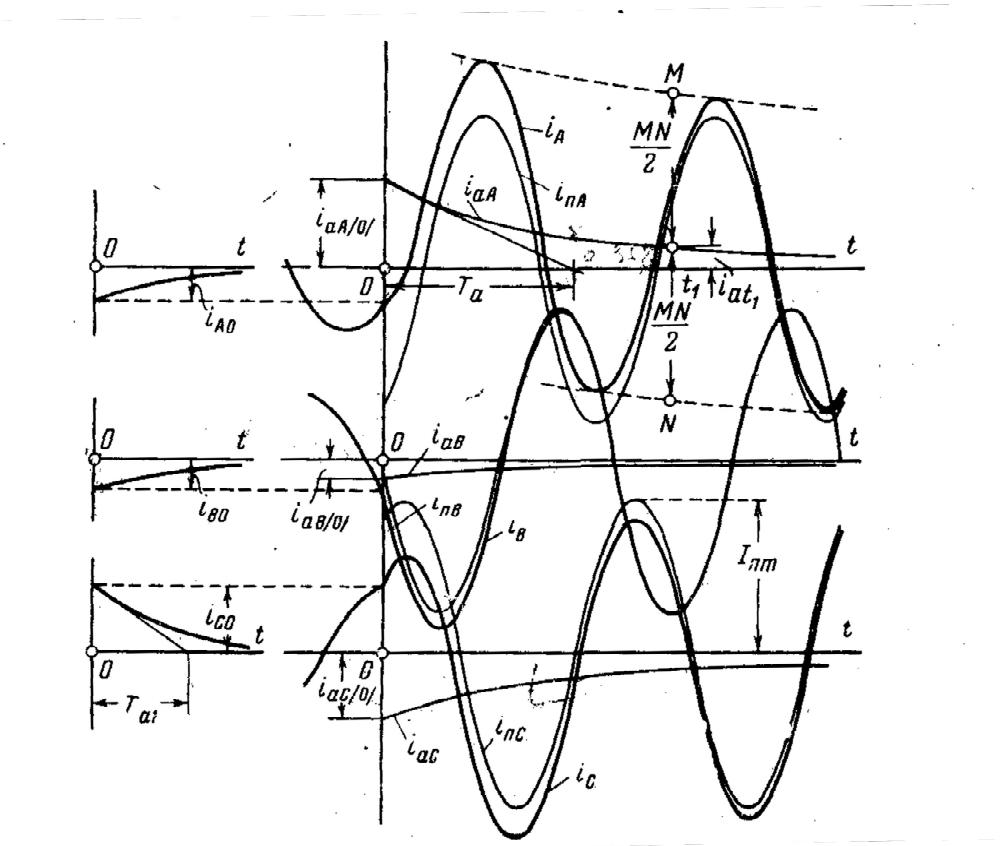
После возникновения к. з. схема распадается на две независимые друг от друга цепи, одна из которой остается присоединенной к источнику, а вторая превращается в короткозамкнутый контур L_1, r_1. В короткозамкнутом контуре ток поддерживается пока запасенная энергия магнитного потока в индуктивности L_1 не перейдет в тепло поглощаемое активным сопротивлением и этого контура r_1. Процесс описывается для любой из фаз этого контура следующим дифференциальным уравнением: $0 = ir_1 + L_1 \frac{di}{dt}$.

Решение этого уравнения общеизвестно $i = i_0 e^{-\frac{t}{T_{a_1}}}$. Решение показывает, что в данном контуре есть только свободный ток, который затухает с постоянной времени: $T_{a1} = \frac{L_1}{r_1} = \frac{x_1}{r_1 \omega_1}$.

Начальное значение свободного тока в каждой фазе зашунтированного участка цепи, очевидно, равно мгновенному значению тока, поскольку в цепи с

индуктивностью не может произойти внезапного (скачком) изменения тока. В общем случае свободные токи в фазах различны, хотя их затухание, разумеется, происходит с одной и той же постоянной времени. В одной из фаз свободный ток может вообще отсутствовать, если в момент возникновения короткого замыкания предшествовавший ток в этой фазе проходил через нуль; при этом свободные токи в двух других фазах будут одинаковы по величине, но противоположны по направлению.

На рис. слева приведены кривые изменения фазных токов в зашунтированном участке рассматриваемой цепи, с учетом того, что к.з. произошло в момент, отвечающий положению векторов на векторной диаграмме.



Осциллограммы токов в фазах при внезапном трехфазном коротком замыкании в простейшей электрической цепи.

Рассмотрим левую часть схемы, которая после к. з. осталась присоединенной к источнику э. д. с.. Здесь кроме свободного тока будет новый принужденный ток (величина которого больше предыдущего – уменьшение сопротивления способствует увеличению тока и изменению фазы φ).

На ВД новому установившемуся режиму на участке цепи с э. д. с. соответствуют векторы $I_{ПА}$, $I_{ПВ}$, $I_{ПС}$, и соответствует угол $\varphi_к$. Для любой фазы, например фазы А, переходный процесс запишется дифференциальным уравнением:

$$U_A = i_A r_k + L\frac{di_A}{dt} + M\frac{di_B}{dt} + M\frac{di_c}{dt} \quad (1)$$

имея ввиду, что $(i_B + i_C) = -i_A$, то для любой фазы (опуская индекс фазы) имеем: $U = ir_k + L_k\frac{di}{dt}$, где $L_k = (L - M)$ – результирующая индуктивность фазы, другими словами индуктивность с учетом влияния двух других фаз.

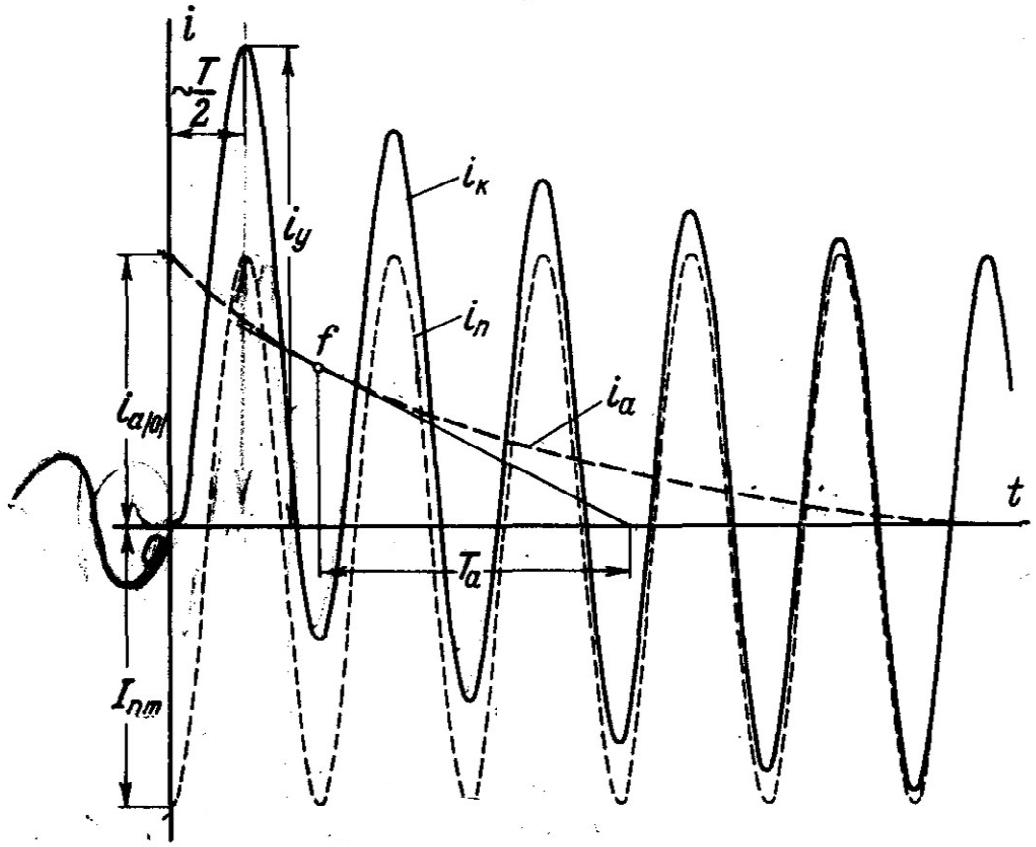
Решение этого уравнения (уравнение 1) имеет вид: $i = \frac{U_m}{Z_k}\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{a|0|}e^{-\frac{t}{Ta}}$, здесь – Z_k – полное сопротивление цепи к. з. (сопротивление цепи присоединенной к источнику э. д. с.); $\varphi_к$ – угол сдвига тока в этой цепи; T_a – постоянная времени цепи ($T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{r_k \omega_k}$; сек.). Первый член уравнения – периодическая слагающая тока к. з. (принужденный ток с постоянной амплитудой $I_{Пm} = \frac{U_m}{Z_k}$ на ВД это соответствует векторам $I_{ПА}$, $I_{ПБ}$, $I_{ПС}$), второй член – апериодическая слагающая, свободный ток, который затухает по экспоненте. Начальное значение апериодической слагающей определяется из начальных условий $i_{|0|} = i_{A|0|} + i_{ПA|0|}$, откуда после подстановки соответствующих выражений получим $i_{a/0/} = I_m sin(\alpha - \varphi) - I_{Пm} sin(\alpha - \varphi_k)$.

Поскольку токи $i_П$ и i_0 являются проекциями векторов на линию времени, то ток $i_{A|0|}$ также можно рассматривать как проекцию вектора (I_m - $I_{Пm}$) на ту же линию (ВД). В зависимости от фазы включения α начальное значение тока $i_{A|0|}$ может изменяться от возможной наибольшей величины, когда вектор (I_m - $I_{Пm}$) параллелен линии времени, до нуля, когда этот вектор нормален ей.

Эти частные случаи в 3-х фазной системе могут наблюдаться естественно только в одной из фаз.

На осциллограмме справа представлены кривые изменения токов в фазах рассматриваемого участка при трехфазном коротком замыкании. Как видно чем больше апериодическая слагаемая тока, тем больше смещение кривой полного тока относительно оси времени. Эту слагающую можно рассматривать как криволинейную ось симметрии кривой полного тока, из которой ее легко выделить. для этого нужно сначала провести огибающие по максимальным положительным и отрицательным значениям заданной кривой тока (см. пунктирные линии у кривой тока фазы А на осциллограмме). Каждая точка кривой. апериодической слагающей лежит посредине вертикального отрезка между этими слагающими.

Из ВД следует, что наибольшее значение апериодической составляющей от которой зависит ток к. з. в начальный момент времени определяется не только фазой включения, но также предшествующим режимом цепи. Так, если в рассматриваемой цепи перед моментом возникновения к. з. отсутствует ток, то величина апериодической слагающей тока может достигнуть амплитуды периодической слагающей, если в момент к. з. эта слагающая проходит через свой максимум (отрицательный или положительный). Обычно этот случай рассматривается как расчетный (рис.).



Осциллограмма тока короткого замыкания при наибольшей апериодической слагающей.

Важно отметить, что фаза включения, при которой возникает наибольшее значение апериодической слагающей, еще не предопределяет того, что именно при ней будет максимум мгновенного значения полного тока. В самом деле, из $i = \frac{U_m}{Z_k}\sin(\omega t+\alpha-\varphi_k)+i_{a|0|}e^{-\frac{t}{Ta}}$ и $i_{a/0/} = I_m sin(\alpha-\varphi) - I_{Пm} sin(\alpha - \varphi_k)$ при отсутствии предшествующего тока (I_m=0) следует, что полный ток в цепи короткого замыкания является функцией двух независимых переменных: времени t и фазы включения α и выражается уравнением $i=I_{Пm}[sin(\omega t+\alpha-\varphi_k)-sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{t}{Ta}}]$.

Приравняв нулю частные производные этого уравнения,

$$\frac{\partial i}{\partial t} = \omega \cos(\omega t + \alpha - \varphi_к) + \frac{1}{T_a}\sin(\alpha - \varphi_к)\, e^{-t/T_a} = 0;$$

$$\frac{\partial i}{\partial \alpha} = \cos(\omega t + \alpha - \varphi_к) - \cos(\alpha - \varphi_к)\, e^{-t/T_a} = 0,$$

и совместно решив эти уравнения, найдем, что максимум тока наступает при

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_к) = -\omega T_a = -\frac{x_к}{r_к} = \operatorname{tg}(-\varphi_к),$$

т. е. при α=0.

Следовательно, в предварительно разомкнутой цепи с r и L максимум мгновенного значения полного тока при коротком замыкании наступает, если в момент возникновения короткого напряжение источника проходит через нуль. Для цепей с преобладающей индуктивностью φ_k=90°, поэтому условие возникновения наибольшей апериодической слагающей и условие, при котором достигается максимум мгновенного значения полного тока, очень близки друг к другу. Поэтому в практических расчетах максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания, которое называют ударным током короткого замыкания $i_{уд}$, обычно находят при наибольшем значении апериодической слагающей (рис.),

считая, что он наступает приблизительно через полпериода, что при f=50 Гц составляет около 0,01 сек с возникновения короткого замыкания. Т.е. он может быть оценен как сумма значения периодической составляющей тока и апериодической составляющей в момент времени 0,01 сек.

Таким образом, выражение для ударного тока короткого замыкания можно записать в следующем виде: $i_{уд} = i_{Пt\ 0,01(c)} + i_{at\ 0,01(c)} = I_{Пm} + I_{Пm} \cdot e^{-\frac{0.01}{T_a}} = I_{Пm}\ (1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}) = K_y\ I_{Пm}$, где

$K_{уд} = (1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}})$ – ударный коэффициент, который показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагающей. Значение $К_{уд}$ находятся в пределах $1 < K_{уд} < 2$, что соответствует предельным значениям Та, т. е. Та=0 (при L_k=0) и Та=∞ (при r_k=0).

Естественно, что чем меньше постоянная времени Та, тем быстрее затухает апериодическая слагающая и тем соответственно меньше $К_{уд}$. Влияние апериодической слагающей тока к. з. сказывается в начальной стадии переходного процесса и практически совершенно исчезает через 0,1 – 0,3 сек.

По значению ударного тока проверяются электрические аппараты, т. е. случай максимального значения полного тока к. з. является расчетным.

Действующие значения полных величин и их отдельных слагающих.

Действующее значение тока – среднеквадратическое значение тока за один период *(T)*, в середине которого находится рассматриваемый момент. Поэтому если известна зависимость $i = i(t)$, то действующее значение тока в момент времени *t*, определяется как:

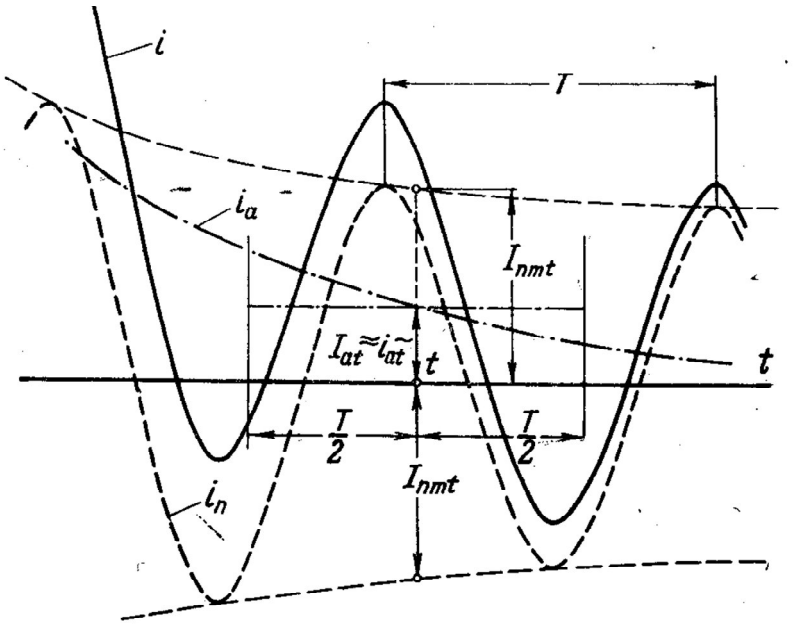
$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i^2 dt}\ .$$

Зависимость $i = f(t)$ в общем случае очень сложна. Поэтому для практических расчётов принимаются следующие допущения:

1. За рассматриваемый период Т обе слагающие не изменяются, т.е. не меняются их амплитуды, каждая из которых равна своему значению в рассматриваемый момент.

Такое допущение относительно периодической слагающей делают когда источником является генератор конечной мощности; для условий рассмотренных ранее (т.е. питание цепи от системы неограниченной мощности) постоянство амплитуды соблюдается.

В общем случае (например, при питании от генератора конечной мощности) периодическая составляющая тока к.з. меняет свою амплитуду во времени. Такой общий случай рассмотрен на рис. поясняющим определения действующего значения тока при переходном процессе.



К определению действующего значения тока при переходном процессе.

Для заданного момента времени t, амплитуда периодической составляющей определяется по сгибающей (пунктир), а действующее значение в этот момент времени определим:

$$I_{nt} = I_{nmt}/\sqrt{2}.$$

Соответственно действующее значение апериодической слагающей за один период при принятом допущении равно ее мгновенному значению в момент, находящийся посредине данного периода (рис.), т. е.

$$I_{at} = i_{at}.$$

Тогда действующее значение полного тока в рассматриваемый момент времени равно:

$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2},$$

Для поверки оборудования по токам к.з. необходимо знать наибольшее действующее значение полного тока $i_{уд}$, которое будет иметь место в первом периоде после возникновения к.з. (при условии $i_{a|0|} = I_{П\,m}$).

Его можно выразить через ударный коэффициент

$$I_y = \sqrt{I_п^2 + [(k_y - 1)\sqrt{2}\, I_п]^2} = I_п \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2},$$

Согласно указанным выше пределам изменений, т.е. 1< Ку <2, величина отношения $I_{уд}/I_П$ находится в пределах $1 < \frac{I_{уд}}{I_П} < \sqrt{3}$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ

Для цепи с последовательным соединением элементов эквивалентная постоянная времени определяется просто по формуле: $T_{a1} = \frac{L_1}{r_1} = \frac{x_1}{r_1 \omega_1}$, где x_1 и r_1 соответственно индуктивное и активное сопротивления всей короткозамкнутой цепи.

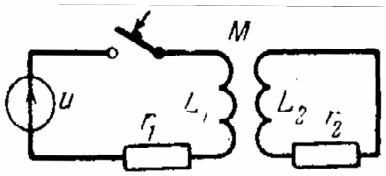
В разветвленной цепи эквивалентную постоянную времени определить труднее. В курсе ТОЭ эта задача решается с использованием операторного метода.. Такой общий и строгий путь решения сложен, т.к. получаются уравнения высоких порядков, решить

которые можно только с помощью ЭВМ. Для практических расчётов, используют более простое приближённое решение $T_{a\text{э}} = = \frac{x_\Sigma}{r_\Sigma \omega_\Sigma}$, где x_Σ и r_Σ — соответственно суммарное индуктивное сопротивление схемы, найденное при отсутствии всех активных сопротивлений (r =0) и суммарное активное сопротивление схемы при отсутствии всех индуктивных сопротивлений (x=0). Такой искусственный прием определения Та.э сильно упрощает решение. При нем приблизительно соблюдается эквивалентность количества электричества в действительных и заменяемых условиях.

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В НЕПОДВИЖНЫХ МАГНИТОСВЯЗАННЫХ ЦЕПЯХ. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ. ВНЕЗАПНОЕ К.З. ТРАНСФОРМАТОРА.

Обычно при расчётах токов к.з. считают что аппараты с железными сердечниками работают в ненасыщенном режиме. При этом зависимость между токами и напряжениями является линейной. Однако не всегда эти допущения справедливы. В основном они применимы для трансформаторов работающих под нагрузкой.

Рассмотрим переходный процесс при включении на некоторое напряжение u(t) контура с L_1 и r_1, связанного взаимной индуктивностью M с другим контуром, индуктивность и активное сопротивление которого L_2 и r_2. По существу это является процессом включения воздушного трансформатора с закороченной вторичной обмоткой (рис.).



Условимся, что все параметры и величины второго контура приведены к стороне первого контура.

Трансформатор питается от системы с неограниченной мощностью. Трансформатор работает в ненасыщенном режиме. Запишем уравнение для сторон первичного и вторичного напряжения .

Со стороны первичного напряжения $u(t) = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}$.

Рассмотрим вторичную сторону $0 = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}$.

Или в операторной форме (при нулевых начальных условиях)

$$\left.\begin{aligned} u(p) &= r_1 I_1(p) + L_1 p I_1(p) + M p I_2(p); \\ 0 &= r_2 I_2(p) + L_2 p I_2(p) + M p I_1(p). \end{aligned}\right\}$$

Решение системы можно получить простой подстановкой. Из второго уравнения имеем

$$I_2(p) = -\frac{Mp}{r_2 + L_2 p} I_1(p);$$

после подстановки его в первое уравнение получим

$$I_1(p) = \frac{u(p)}{z_1(p)},$$

$$z_1(p) = r_1 + \left(L_1 - \frac{M^2 p}{r_2 + L_2 p}\right) p = r_1 + \left(\frac{1 + \sigma T_{20} p}{1 + T_{20} p}\right) L_1 p =$$

$$= \frac{\sigma T_{10} T_{20} p^2 + (T_{10} + T_{20})\, p + 1}{(1 + T_{20} p)} r_1$$

где $Z_1(p)$ — операторное сопротивление первого контура с учетом магнитносвязанного с ним короткозамкнутого второго контура.

Отсюда следует, что влияние короткозамкнутого контура сказывается в снижении L_1, причем оно тем сильнее, чем меньше рассеяние и больше постоянная времени T_{20}. Напротив, в пределе, когда σ=1, т. е. при отсутствии магнитной вязи, индуктивность L_1 неизменна. Из характеристического уравнения $Z_1(p)$ =0 находим его корни:

$$p_{1,2}=\frac{-(T_{10}+T_{20})\pm\sqrt{(T_{10}+T_{20})^2-4\sigma T_{10}T_{20}}}{2\sigma T_{10}T_{20}}=-\frac{(T_{10}+T_{20})}{2\sigma T_{10}T_{20}}\times$$
$$\times(1\mp q),$$

где

$$q=\sqrt{1-\frac{4\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10}+T_{20})^2}}\,.$$

Поскольку всегда $(T_{10}+T_{20})^2>4\sigma T_{10}T_{20}$, оба корня являются действительными, меньшими нуля. Следовательно, свободный ток каждого контура представляет собой сумму двух свободных токов, один из которых затухает по экспоненте с постоянной времени

$$T'=-\frac{1}{p_1}=\frac{2}{(1-q)}\frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10}+T_{20})}=$$
$$=\frac{1+q}{2}(T_{10}+T_{20}),$$

а другой — с постоянной времени

$$T''=-\frac{1}{p_2}=\frac{2}{(1+q)}\frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10}+T_{20})}=$$
$$=\frac{1-q}{2}(T_{10}+T_{20}),$$

отношение между которыми

$$\frac{T'}{T''}=\frac{1+q}{1-q}\,.$$

Как видно, T' всегда больше T'' причем различие между ними возрастает с уменьшением рассеяния. В пределе имеем при σ = 0 $T'=T_{10}+T_{20}$ и $T''=0$.
При включении контура на постоянное напряжение $u(p)$ для изображения тока первого контура имеем:

$$I_1(p)=\frac{U}{pz_1(p)}\,.$$

Используя известную формулу разложения (или ее видоизменение, так называемую формулу включения) и произведя ряд преобразований, получим временную функцию тока этого контура:

$$i_1(t)=i_1+i'_1+i''_1=\frac{U}{r_1}-\frac{U(T_{10}-T'')}{r_1(T'-T'')}e^{-t/T'}-$$
$$-\frac{U(T_{20}-T'')}{r_1(T'-T'')}e^{-t/T''},$$

где i_1 — принужденный или установившийся ток; i'_1 — медленно затухающий свободный ток; i''_1 — быстро затухающий свободный ток.

Соотношение между начальными значениями этих свободных токов определяется постоянными времени:

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}}=\frac{T_{20}-T''}{T_{10}-T''}\,.$$

Аналогично находим выражение для тока во втором контуре:

$$i_2(t) = i'_2 + i''_2 = -\frac{MU}{L_1 L_2}\frac{T_{10}T_{20}}{(T' - T'')}\left(e^{-t/T'} - e^{-t/T''}\right),$$

из которого видно, что при включении контура на постоянное напряжение принужденный ток во втором контуре, естественно, отсутствует, а начальные значения свободных токов равны и взаимно противоположны:

$$i''_{2|0|} = -i'_{2|0|}.$$

Их связь с одноименными свободными токами первого контура выражается соотношениями:

$$i'_2 = \frac{M}{L_2}\frac{T_{20}}{(T_{10} - T'')}i'_1;$$

$$i''_2 = -\frac{M}{L_2}\frac{T_{20}}{(T_{20} - T'')}i''_1.$$

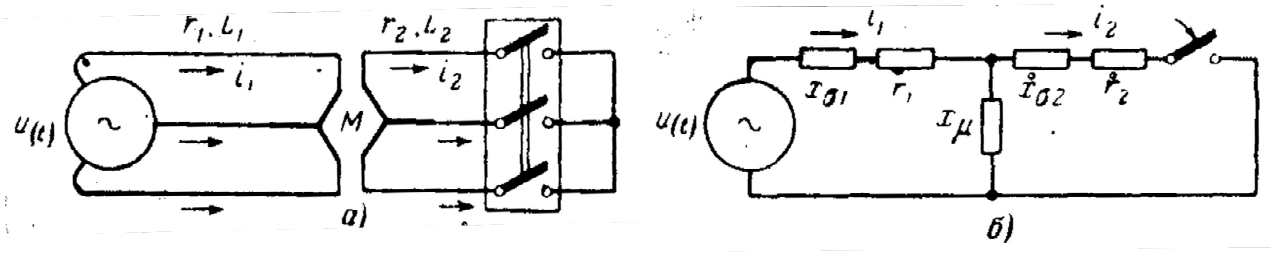
Т.о. в начальной стадии переходного процесса изменение токов обусловливается главным образом быстро затухающими свободными токами, а в последующей — практически только медленно затухающими свободными токами. Ток намагничивания, определяемый суммой токов ***(i₁+i₂)***, практически изменяется экспоненциально с постоянной времени T', так как сумма быстро затухающих токов ($i_1''+i_2''$) очень мала. Последняя равна нулю при σ =0.

Медленно затухающие свободные токи практически связаны с изменением только общего магнитного потока или потока взаимоиндукции между контурами, а быстро затухающие — с изменением только потоков рассеяния контуров.

Таким образом, магнитная связь между контурами вначале убыстряет переходный процесс, а затем, напротив, замедляет его. При постоянном коэффициенте рассеяния σ это проявляется тем интенсивнее, чем больше постоянная времени влияющего контура (T_{20}).

Переходный процесс при внезапном коротком замыкании за трансформатором при отсутствии насыщения его магнитопровода, вообще говоря, идентичен рассмотренному ранее, с той лишь разницей, что здесь включение производится не па постоянное, а на синусоидальное напряжение.

Полученные выше выражения для постоянных времени затухания свободных токов, конечно, полностью справедливы и в данном случае, причем, поскольку в трансформаторах потоки рассеяния ничтожно малы по сравнению с общим потоком взаимоиндукции, применение приближенных выражений для оценки T'' и T' практически не вносит никакой погрешности.



При этом условии соотношение между начальными свободными токами в обмотке с параметрами L_1 и r_1 получается следующим:

$$\frac{i''_{1/0/}}{i'_{1/0/}} = \frac{(1 + j\omega^2 T''^2)T''}{(1 + j\omega^2 T''^2)T'};$$

его можно привести к еще более простому виду, если пренебречь в числителе и знаменателе весьма малыми действительными частями по сравнению с мнимыми:

$$\frac{i''_{1/0/}}{i'_{1/0/}} \approx \frac{T'}{T''}.$$

Коэффициент рассеяния σ трансформатора очень мал, вследствие чего медленно затухающие свободные токи i_1' и i_2' значительно меньше соответствующих быстро затухающих свободных токов i_1'' и i_2''. По своей природе токи i_1' и i_2' обусловлены изменением общего магнитного потока трансформатора, который создается током намагничивания. При пренебрежении последним, как это делают в большинстве практических расчетов, одновременно отпадает учет и этих токов. В этом случае, полагая в схеме замещения трансформатора $x_\mu = \infty$, что приводит к уменьшению числа контуров этой схемы, каждую обмотку трансформатора можно рассматривать как элемент с активным и индуктивным (от потока рассеяния) сопротивлениями, приведенными к одной ступени напряжения и определяемыми по известным для данного трансформатора потерям и напряжению короткого замыкания (p_k и u_k). При этом для двухобмоточного трансформатора отпадает необходимость определения параметров отдельно каждой обмотки; такой трансформатор характеризуют суммарными активным и индуктивным сопротивлениями, приведенными к одной из его сторон. Постоянная времени затухания свободного тока в ціи, состоящей только из одного трансформатора, при этом будет:

$$T = T'' = \frac{x}{\omega r}.$$

Полученное уравнение подобно уравнению для переходного процесса при трёхфазном к.з. в простейшей цепи. Следовательно трансформатор может учитываться своими *r* и *l* при составлении расчётных схем замещения. В схему замещения трансформатор вводится без учёта ветви намагничивания .

ВКЛЮЧЕНИЕ ХОЛОСТОГО ТРАНСФОРМАТОРА .

Рассмотрим переходный процесс, возникающий при включении холостого трансформатора на синусоидальное напряжение постоянной амплитуды и неизменной частоты. По существу это равноценно включению дросселя с магнитным сердечником, в котором проявляется насыщение. При этом насыщением сердечника пренебрегать нельзя. В практике возможны броски намагничивающего тока в несколько раз превышающие номинальный ток.

Ранее было установлено, что при замыкании предварительно ненагруженной цепи с *r* и *l* наибольшая величина тока возникает при условии, когда подведенное напряжение в момент замыкания проходит через нуль. (При этом периодическая составляющая максимальна и равна апериодической). Из этого условия как наиболее неблагоприятного исходим и в данном случае. Если пренебречь малым активным сопротивлением обмотки трансформатора, то условие равновесия напряжения после включения трансформатора будет:

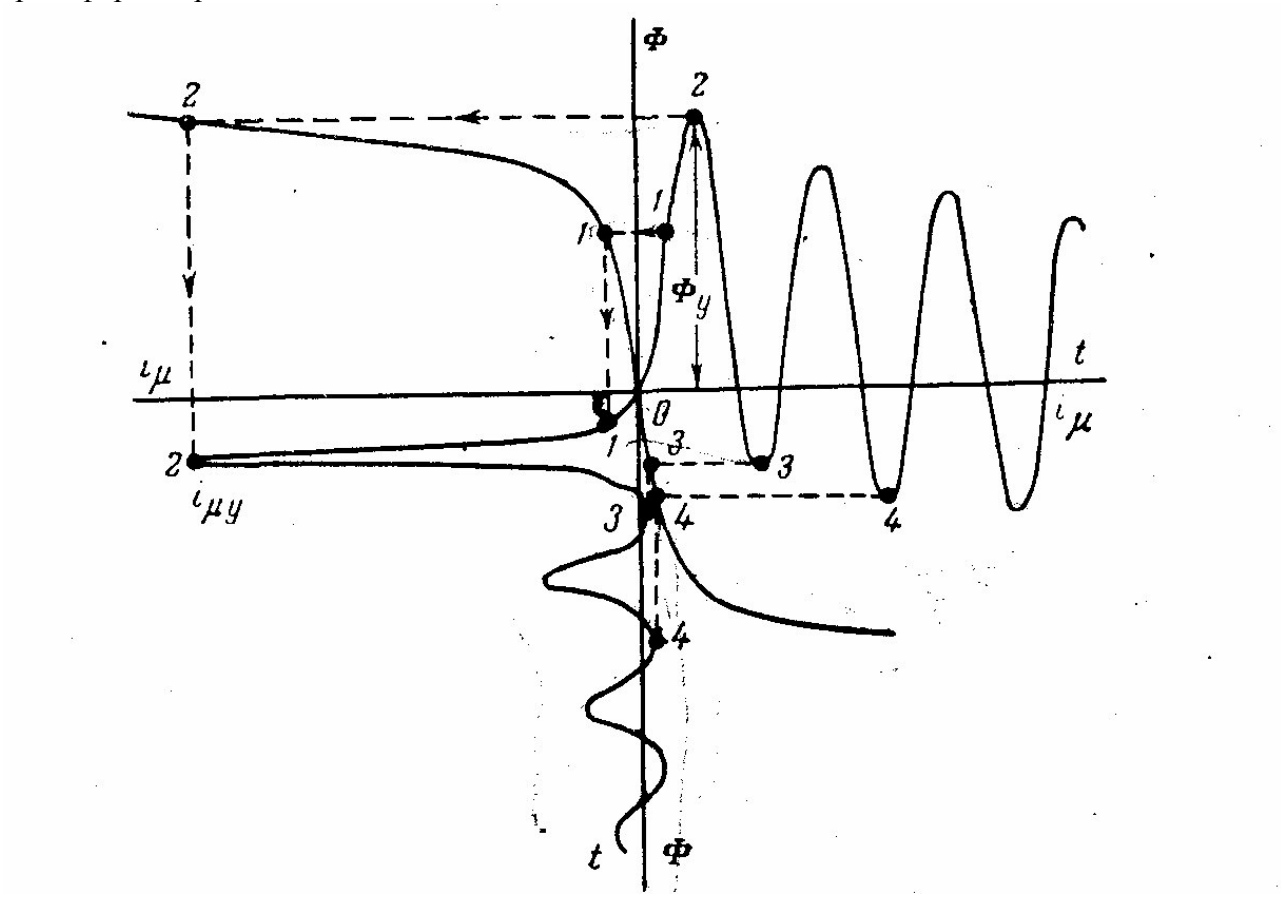
Составим уравнение, связывающее напряжение и магнитный поток, для этого момента времени: $U_m \sin \omega t = \omega \frac{d\Phi}{dt}$, где ω - число витков подключённой обмотки трансформатора. Интегрирование этого выражения с учетом того, что начальный магнитный поток Φ_0=0, приводит к очевидной закономерности изменения магнитного потока. Получим, что $\Phi = \Phi_m (1 - \cos \omega t)$.

При учете активного сопротивления обмотки постоянная составляющая будет затухать с постоянной времени $T_a = \frac{L}{r}$ и

это выражение примет вид:

$$\Phi = \Phi_m \left(e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos \omega t \right).$$

Связь между потоком Ф и током намагничивания i_μ, выражается магнитной характеристикой. Используя магнитную характеристику $\Phi = f(i_\mu)$ (кривая намагничивания. стали трансформатора), зная изменение $\Phi = f(t)$ можно путем графического построения найти кривую изменения тока намагничивания $i_\mu = f(t)$ в переходном процессе включения трансформатора.



Из рисунка видно, что благодаря насыщению магнитной системы трансформатора, бросок тока намагничивания достигает больших величин и может превышать номинальный ток трансформатора, в свою очередь это, при отсутствии специальных средств может вызвать отключение трансформатора. Поскольку трансформатор обладает остаточным магнетизмом, то броски тока при включении трансформатора на холостой ход достигают еще больших его значений. Из рисунка видно, что даже незначительное увеличение магнитного потока Ф (или добавление к нему) резко увеличит бросок тока намагничивания.

Кривая изменения тока намагничивания $i_\mu = f(t)$ в своей начальной стадии (в начальный момент переходного процесса) сильно отличается от синусоиды, это объясняется нелинейной частью характеристики намагничивания.

Тема 4. Установившейся режим трёхфазного к.з. (6 часов)

Основные параметры синхронной машины (СМ). Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора. Влияние АРВ на установившейся режим к.з. Расчёт установившегося тока к.з. в сложных системах.

Ранее предполагалось, что рассматриваемая цепь присоединена к источнику синусоидального напряжения, амплитуда которого постоянна. При таких условиях переходный процесс в цепи характеризуется затуханием лишь свободных апериодических слагающих тока, в то время как периодическая слагающая тока представляет собой синусоидальный принужденный или установившийся ток в этой цепи при изменившемся ее состоянии.

По мере приближения короткого замыкания к генератору такое предположение становится, естественно, все менее и менее приемлемым. Увеличение реакции статора при коротком замыкании приводит к размагничиванию генератора и, следовательно, к снижению его напряжения до некоторого уровня, зависящего от параметров генератора и удаленности (разумеется, электрической) короткого замыкания. При наличии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) возможна частичная или даже полная компенсация этого снижения напряжения путем увеличения тока возбуждения.

Под установившимся режимом понимают ту стадию процесса короткого замыкания, когда все возникшие в начальный момент короткого замыкания свободные токи практически затухли и полностью закончен подъем тока возбуждения под действием АРВ.

Обычно считают, что этот режим наступает уже через несколько секунд после возникновения короткого замыкания. При этом в соответствии с принятым допущением предполагается, что скорость вращения генератора сохраняется без изменения. Это наступает спустя 2-3 сек. после К.З.

Основные характеристики и параметры.

Основными характеристиками и параметрами синхронной машины (СМ) при симметричном установившемся режиме являются:

1. Характеристика холостого хода синхронного генератора.
2. Синхронные ненасыщенные реактивности по продольной оси Xd и по поперечной оси Xq.
3. Реактивность рассеяния статора
4. Предельное значение тока возбуждения (потолок, потолочное значение).

Характеристика Х.Х. строится в относительных единицах.

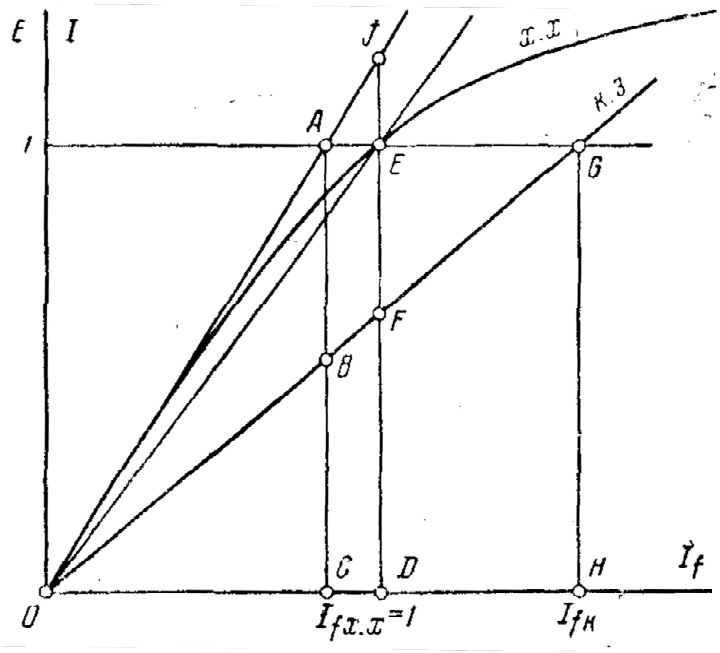


Рис. Характеристики ХХ и КЗ

Вместо *Xd* может быть задано отношение короткого замыкания Кс, которое представляет собой относительный установившийся ток при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора и относительном токе возбуждения, равном единице. Величина Кс определяет ординату второй точки F, через которую проходит прямая OF, представляющая характеристику трехфазного короткого замыкания машины (рис.). Отсюда, в частности, следует, что

$$K_c = \frac{I_{I_f=1}}{I_н} = \frac{OD}{OH} = \frac{1}{I_{fк}},$$

где *Ijk* — относительный ток возбуждения, при котором ток трехфазного короткого замыкания равен номинальному току.

Связь между Кс и *Xd* вытекает из условия короткого замыкания на выводах машины, а также из подобия ΔOBC и ΔOGH, т. е. $X_d = \frac{C}{K_C}$, где *C=JD / ED* — относительное значение э. д. с. по ненасыщенной характеристике холостого хода при *If=1*; обычно c=1,05÷1,2.

У явнополюсной машины *Xq* мало зависит от насыщения, что позволяет считать эту реактивность практически постоянной. Напротив, весьма существенно насыщение проявляется в продольной оси, что вызывает изменение продольной реакции статора *Xad*, а вместе с нею и реактивности *Xd= Xσ +Xad.* Тем не менее, имея, в виду небольшое насыщение машины и приближенность расчета установившегося режима короткого замыкания, примем, что эта реактивность также постоянна и отвечает магнитному состоянию машины, которое имеет место при работе на холостом ходу с номинальным напряжением. Другими словами, действительную характеристику холостого хода заменим прямой, проходящей через начало координат и точку с координатами (1, 1) (прямая OE на рис.). При этом, очевидно $E_{*q} = I_{*f}$, т. е. относительные значения э. д. с. и тока возбуждения численно одинаковы.

Соответственно для определения *Xd* при таком спрямлении характеристики холостого хода имеем: $X_d = \frac{1}{K_C}$, эта реактивность несколько меньше ненасыщенной реактивности, которая определяется по $X_d = \frac{C}{K_C}$ и значение которой обычно приводится в паспортных данных синхронной машины.

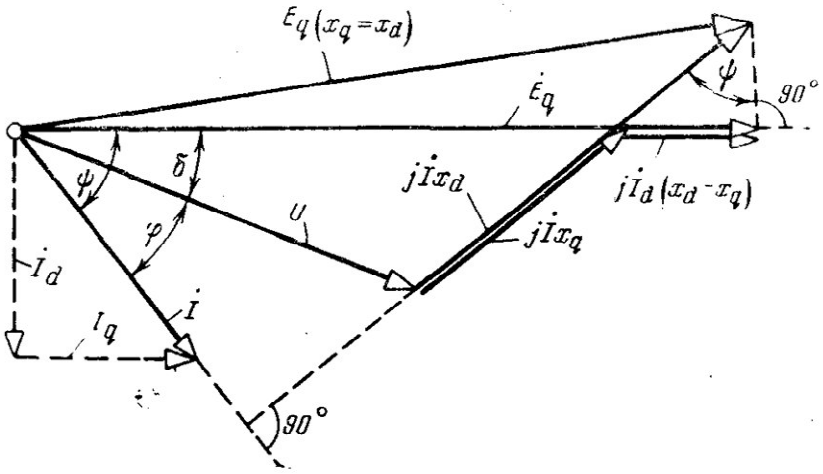
Если ток возбуждения машины при рассматриваемой ее нагрузке не задан, то его можно определить известными графическими построениями (диаграмма Потье, шведская диаграмма и др.). В первом приближении его относительную величину можно оценить из выражения:

$$I_f = E_q = \sqrt{(U\cos\varphi)^2 + (U\sin\varphi + Ix_d)^2},$$

где U, I и cos φ — соответственно напряжение, ток и коэффициент мощности, при которых работает машина.

Это выражение вытекает из векторной диаграммы синхронной машины с неизменными реактивностями *Xd = Xq* и при пренебрежении активным сопротивлением обмотки статора (рис.).

Для явнополюсной машины *Xq<Xd* (обычно *Xq=0,6Xd*); ее э. д. с. *Eq* при тех же прочих исходных данных, как видно из приведенного на рис. построения, несколько меньше. Однако, поскольку при cosφ≥0,8 это различие составляет лишь несколько процентов, выражением для относительного тока возбуждения практически можно пользоваться и для явнополюсных машин.



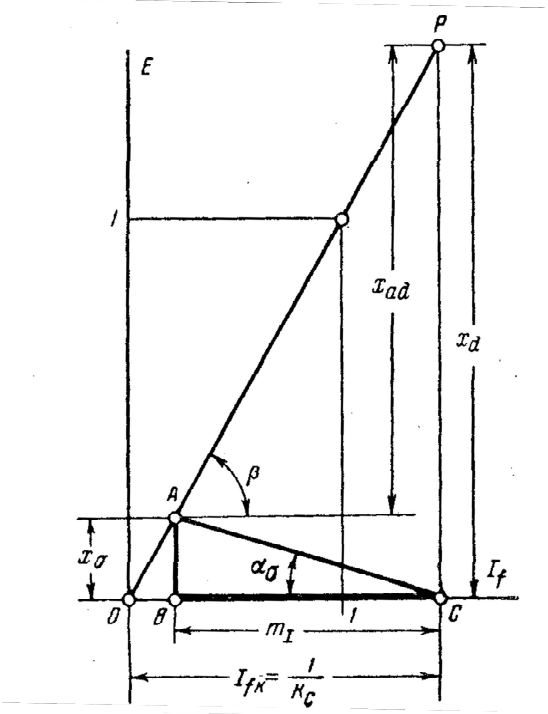
Векторная диаграмма генератора, работающего с отстающим током.

Величина предельного тока возбуждения $I_{f\,ПР}$ зависит от системы возбуждения и ее параметров, а также от типа генератора. При электромашинном возбуждении относительная величина этого тока находится в пределах $I_{f\,ПР}$=3÷5, что примерно в 2 раза больше тока возбуждения машины при ее номинальной нагрузке.

Приведение цепи ротора к статору

Рассмотрим, как осуществить приведение цепи ротора к статору. Это позволит освободиться от магнитной связи между ними и представить синхронную машину соответствующей схемой замещения. Для приведения, вообще говоря, могут быть использованы обмоточные данные ротора и статора. Однако значительно проще и нагляднее его можно произвести, используя известные паспортные параметры машины.

Обратимся к рис., где показан основной реактивный треугольник (или треугольник Потье), построенный в относительной системе координат с принятыми для нее масштабами: для единицы тока возбуждения m_f, мм, и единицы э. д. с. m_E, мм.



Основной реактивный треугольник.

Горизонтальный катет ВС треугольника определяет продольную реакцию статора, созданную его трехфазным номинальным током. Следовательно, отсюда можно установить масштаб тока статора: $m_I = BC/I_H$.

Ток возбуждения, выраженный в масштабе m_I, т. е. $\overset{\circ}{I}_f = \frac{m_f}{m_I} I_f$ является приведенным к статору током возбуждения.

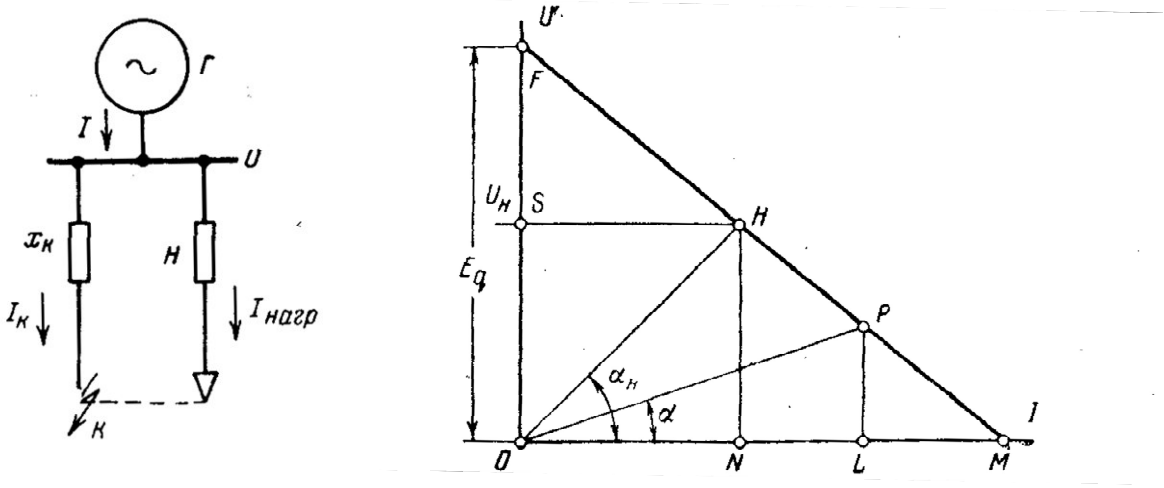
Масштаб для относительной единицы реактивности при построениях, приведенных на рис., составляет $m_x = m_E / m_I$, мм, в котором $tg\alpha_\sigma = m_x x_{*\sigma}$ и $tg\beta = m_x x_{*ad}$. Далее, из очевидных соотношений $PC = m_E E_q = OC\, tg\beta = m_I \overset{\circ}{I}_f\, m_x x_{*ad} = m_E \overset{\circ}{I}_f\, x_{*ad}$ имеем $E_q = \overset{\circ}{I}_f\, x_{*ad}$ или в соответствии с принятым спрямлением характеристики холостого хода $I_f = \overset{\circ}{I}_f\, x_{*ad}$, т. е. истинное и приведенное к статору значения тока возбуждения связаны постоянным (при принятом допущении) коэффициентом пропорциональности, равным x_{*ad}.

Чтобы обеспечить обратимость взаимоиндукции между трехфазной обмоткой статора и одноосной обмоткой возбуждения при выражении величин в системе относительных единиц, следует принимать на стороне обмотки возбуждения в качестве базисных условий: $S_{fб} = S_б$, т. е. ту же базисную мощность, что и на стороне статора; базисный ток (в амперах или килоамперах) $I_{fб} = I_{f\,XX}\, x_{*ad}$ и соответственно базисное напряжение (в вольтах или киловольтах) $U_{fб} = S_{fб} / I_{fб}$.

После того как все величины цепи обмотки возбуждения выражены в относительных единицах при таких базисных условиях, они одновременно становятся приведенными к статору. Согласованную указанным образом систему относительных единиц статора и ротора называют взаимной системой относительных единиц.

Влияние и учет нагрузки.

При установившемся режиме короткого замыкания нагрузку необходимо учитывать т.к. она может шунтировать поврежденную ветвь с К.З. (см.рис.) уменьшая величину сопротивления генератора статорной цепи.



Это приводит к увеличению тока генератора, уменьшению его напряжения и соответственно пропорциональному уменьшению тока в месте К.З. С увеличением эл. удаленности К.З. – влияние нагрузки увеличивается, и наоборот при К.З. на выводах генератора, это влияние не имеет значения. Оценить влияние и величину сопротивления нагрузки можно из внешней характеристики генератора (в общем случае нагрузка – в основном АД, сопротивление которых зависит от скольжения; последнее в свою очередь определяется напряжением у двигателя в рассматриваемом аварийном режиме). Эти зависимости нелинейны, что сильно усложняет достаточно

точный учет нагрузки. Поэтому для упрощения практических расчетов нагрузку учитывают приближенно, характеризуя ее некоторой постоянной реактивностью. Полный отказ от учета нагрузок приводит к столь большим искажениям результатов расчета, что даже такой приближенный их учет следует признать обязательным.

Полагая часто, что генератор с ЭДС *Eq* и реактивностью *Xd* работает на чисто индуктивную цепь, реактивность которой *Хвн*, можем записать следующие 2 уравнения, характеризующие величину напряжения на зажимах генератора: $U = E_q - I\,X_d$; $U = I\,X_{ВН}$.

Уравнение 1 – представляет внешнюю характеристику генератора, который соответствует прямая FM, 2 – этому выражению на рис. соответствует прямая OP, наклон которой пропорционален внешней реактивности цепи статора, т.е. $tg\alpha = X_{ВН}$.

Координаты точки пересечения этих прямых (точки Р) дают значения тока (OL) и напряжения (PL) генератора при рассматриваемых условиях. С изменением Хвн точка пересечения перемещается по прямой FM. Ее нижнее положение точка М (т.е. когда точка Р совмещается с М) соответствует К.З. на выводах генератора, когда установившийся ток достигает наибольшей величины (конечно при данном возбуждении или ЭДС *Eq*), а напряжение падает до нуля).

Если точку Н, где напряжение равно номинальному, считать отвечающей. нагрузочному режиму, то реактивность нагрузки, очевидно, будет характеризоваться наклоном прямой ОН, т. е. углом α_H. Эту реактивность также легко определить из совместного решения (1) и (2), положив Хвн=Хнагр и $U=U_H$, что приводит к выражению

$$X_{НАГР} = X_d \frac{U_H}{E_q - U_H}.$$

Из формулы видно, что Хнагр. зависит от параметров генератора, причем влияние коэффициента мощности нагрузки сказывается в скрытом виде через значение Eq. При средних значениях параметров типовых генераторов, работающих с полной нагрузкой при cosφ=0,8, относительная величина реактивности нагрузки составляет Хнагр.=1,2. Это сопротивление приведено к полной мощности генератора (в МВА) и среднему номинальному напряжению ступени, где присоединена данная нагрузка.

Расчет токов К.З. в установившемся режиме при отсутствии АРВ.

Когда генераторы не имеют автоматического регулирования возбуждения (или регуляторы хотя бы временно отключены), расчет установившегося режима трехфазного короткого замыкания при указанных выше предпосылках и допущениях по существу сводится к решению простой задачи определения токов и напряжений в линейной схеме, для которой известны все сопротивления и э. д. с.

При составлении расчетной схемы отдельные нагрузки следует объединять, т. е. рассматривать только, например, нагрузку целого района, нагрузку мощной подстанции и т. п., считая их присоединенными к крупным узлам системы. При аналитическом решении нагрузки целесообразно учитывать подобно генераторным ветвям с E=0.

По полученным после преобразования схемы результирующим э.д.с. E_Σ и реактивности X_Σ относительно места короткого замыкания легко найти ток в месте короткого: $I_K = \frac{E_\Sigma}{X_\Sigma}$. Поскольку реактивности нагрузок оценены из условия сохранения в схеме приблизительно предшествовавших напряжений при отсутствии в ней короткого замыкания, то результирующая э. д. с. E_Σ получается близкой к напряжению $U_{к0}$, которое известно или которым с достаточной точностью можно задаться. Поэтому когда задача ограничена нахождением тока в месте короткого

замыкания, достаточно определить лишь X_Σ схемы, в которой начала генераторных ветвей с реактивностями *Xd* и концы нагрузочных ветвей с реактивностями Хнагр объединены в общий узел. Искомый ток в месте короткого замыкания при этом будет:

$$I_K = \frac{U_{K0}}{X_\Sigma}$$

Учет влияния АРВ.

Снижение напряжения, вызванное коротким замыканием, приводит в действие АРВ генераторов, и их возбуждение соответственно возрастает. Поэтому можно заранее предвидеть, что токи и напряжения при этих условиях всегда больше, чем при отсутствии АРВ. Степень такого увеличения зависит от удаленности короткого замыкания и параметров самих генераторов.

В самом деле, если при относительно удаленном коротком замыкании для восстановления напряжения генератора до нормального достаточно лишь немного увеличить возбуждение, то по мере уменьшения удаленности для этого, очевидно, требуется все большее возбуждение. Однако рост последнего у генератора ограничен известным пределом $I_{f\,ПР}$.

Следовательно, для каждого генератора можно установить наименьшую величину внешней реактивности, при коротком замыкании за которой генератор при предельном возбуждении обеспечивает нормальное напряжение на своих выводах. Такую реактивность назовем критической реактивностью Хкр, а связанный с ней очевидным равенством ток $I_{KP} = \frac{U_H}{X_{KP}}$ — критическим током.

Если внешняя реактивность меньше критической, то, несмотря на работу генератора с предельным возбуждением, его напряжение все равно остается ниже нормального. Когда же внешняя реактивность больше критической, то напряжение генератора достигает нормального значения при возбуждении, меньшем предельного.

Таким образом, при коротком замыкании генератор с АРВ в зависимости от внешней реактивности может работать только в одном из двух режимов — предельного возбуждения или нормального напряжения. Лишь в частном случае, когда $X_{ВН}$= Хкр, оба режима существуют одновременно. Критерием для оценки возможности того или иного режима служит критическая реактивность, величина которой может быть определена по $X_{KP} = X_d \frac{U_H}{E_{qПР} - U_H}$.

В табл. сведены все соотношения, характеризующие указанные выше возможные режимы генератора при коротком замыкании.

Соотношения, характеризующие режимы генератора с АРВ

Режим предельного возбуждения	Режим нормального напряжения
$x_{вн} \leqslant x_{кр}$	$x_{вн} \geqslant x_{кр}$
$I_f = I_{f\,пр}$	$I_f \leqslant I_{f\,пр}$
$U \leqslant U_н$	$U = U_н$
$I = \frac{E_{q\,пр}}{x_d + x_{вн}} \geqslant I_{кр}$	$I = \frac{U_н}{x_{вн}} \leqslant I_{кр}$

В зависимости от эл. удаленности точки К.З. напряжение генератора с АРВ может оставаться неизменным (при этом запаса тока возбуждения достаточно, или

напряжения генератора может быть уменьшенным (при потолочном токе возбуждения)).

Если внешнее сопротивление меньше критического, то и при предельном токе возбуждения напряжение генератора ниже нормального. Если же внешнее сопротивление больше критического, то напряжение генератора достигает нормального значения при возбуждении, меньшем предельного.

Тема 5. Начальный момент внезапного нарушения режима. (6 часов)

Переходные и сверхпереходные параметры синхронного генератора. Схема замещения синхронной машины в начальный момент к.з. Расчёт начального сверхпереходного тока в сложных системах. Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины без учета и с учетом влияния демпферных контуров. Влияние асинхронных электродвигателей и комплексных нагрузок в начальный момент КЗ. Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ.

Начальный момент внезапного нарушения режима

Общие замечания. Все величины в начальный момент внезапного нарушения режима могут быть получены из общих уравнений переходного процесса при t=0 (как частный случай). Кроме того, т.к. индуктивность цепей исключает внезапное изменение тока, то он в начальный момент нарушения режима остаётся неизменным и равным по величине току в предшествующий режим. Но при изменившихся условиях этот ток состоит уже из новых слагающих, которые возникают в переходном процессе.

Т.к. задача ограничена рассмотрением только начального момента, то вращение ротора и связанное с ним изменение индуктивности не играют роли, т.е. в данном случае машину можно рассматривать как трансформатор.

Исследование начального момента переходного процесса ведётся на основе принципа сохранения начального потокосцепления, т.к. поток сцеплений с ротором в начальный момент внезапного нарушения режима не меняется, то соответствующая ему Э.Д.С. наведённая в статоре, в тот же момент также остаётся неизменной. Поэтому для синхронной машины в начальный момент переходного процесса справедливы те же условия, что и для трансформатора.

Следовательно, при переходном процессе ток статора синхронной машины также состоит из двух слагающих: - периодической, которая вызывается Э.Д.С. наводимой потоком ротора, и апериодической, обусловленной изменением потока статора.

Часто рассматривают внезапное изменение тока, имея в виду изменение лишь одной из его слагающих. При этом другие слагающие обеспечивают в момент нарушения режима сохранение предшествующего мгновенного значения тока.

Во всех дальнейших выкладках условимся считать:

а) продольную составляющую тока статора положительной, когда создаваемая ею н. с. совпадает по направлению с н. с. тока возбуждения;

б) поперечную составляющую тока статора положительной, когда создаваемая ею н.с. отстает на 90° (электрических) от н.с. тока возбуждения; при наличии на роторе поперечного контура это же направление принимается положительным для его магнитной оси;

в) все величины ротора приведенными к статору, причем они, как и все величины статора, выражены в относительных единицах.

Установим теперь, какими э. д. с. и реактивностями можно характеризовать синхронную машину в начальный момент переходного процесса.

Переходные Э.Д.С. и реактивности синхронной машины.

Рассмотрим баланс магнитных потоков в продольной оси ротора синхронной машины при установившемся симметричном режиме её с отстающим по фазе током (рис.).

При отсутствии насыщения каждый из потоков и их отдельные составляющие можно рассматривать независимо один от другого.

Полный поток обмотки возбуждения Φ_f, который был при холостом ходе (т.е. при разомкнутом статоре) машины, состоит из полезного потока $\Phi_{f\ ad}$ и потока рассеяния $\Phi\sigma_f$, в свою очередь полезный поток $\Phi_{f\ ad}$ является геометрической разностью продольного потока в воздушном зазоре $\Phi_{\delta d}$ и потока продольной реакции статора $\Phi_{f\ ad}$. Результирующий магнитный поток $\Phi_{f\ \Sigma}$, сцепленный с обмоткой возбуждения, складываются из потока $\Phi\sigma d$ и потока рассеяния $\Phi\sigma_f$.

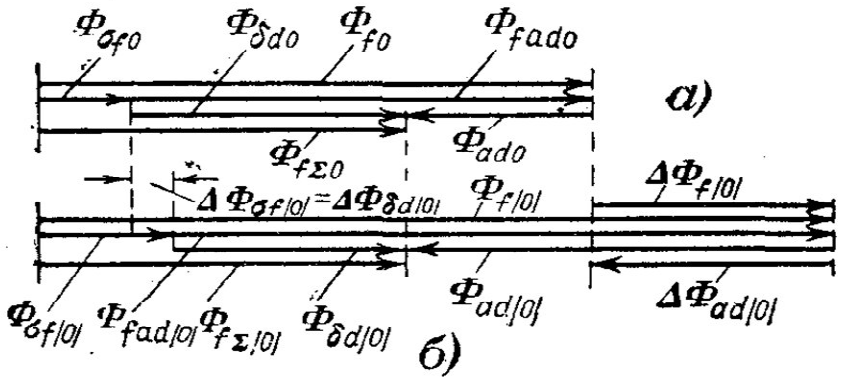


Рисунок - Баланс магнитных потоков в продольной оси ротора
а) в предшествующем режиме б) в момент внезапного изменения режима.

Рассмотрим, как изменится этот баланс, если произойдёт внезапное увеличение потока продольной реакции статора $\Delta\Phi_{ad|0|}$.

При этом считаем, что кроме обмотки возбуждения, никаких других замкнутых контуров в продольной, оси ротора нет. В соответствии с законом Ленца приращение потока $\Delta\Phi_{ad|0|}$ вызовет ответную реакцию обмотки возбуждения $\Delta\Phi_{f|0|}$, при этом приращение потокосцепления $\Delta\Psi_{ad|0|}$ и $\Delta\Psi_{f|0|}$ должны компенсировать друг друга, т.е. $\Delta\Psi_{ad|0|} + \Delta\Psi_{f|0|} = 0$ или

$$\Delta\dot{I}_{d|0|}x_{ad} + \Delta\dot{I}_{f|0|}(x_{\sigma f} + x_{ad}) = 0,$$

Из формулы видно, что приращение токов статора $\Delta I_{d|0|}$ и ротора $\Delta I_{f|0|}$ связаны между собой простым соотношением и различие в их величинах обусловлено только рассеянием обмотки возбуждения. Но т.к. в ненасыщенной машине поток рассеяния $\Phi\sigma_f$ составляет некоторую постоянную долю потока Φ_f, то её (эту долю, эту часть) можно характеризовать <u>коэффициентом рассеяния обмотки возбуждения</u>.

$$\sigma_f = \frac{\Phi_{\sigma f}}{\Phi_f} = \frac{x_{\sigma f}}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \frac{x_{\sigma f}}{x_f}.$$

С увеличением потока Φ_f от Φ_{f0} до $\Phi_{f/0/}$ пропорционально ему увеличивается поток $\Phi\sigma_{f0}$ до $\Phi\sigma_{f/0/}$, что приводит к уменьшению потока $\Phi_{\delta d0}$ до $\Phi_{\delta d/0/}$. Однако результирующий поток $\Phi_{f\,\Sigma/0/}$ сцепленный с обмоткой возбуждения, сохраняет своё предшествующее значение $\Phi_{f\,\Sigma 0}$.

Следовательно, рассеяние обмотки возбуждения не позволяет характеризовать машину в начальный момент переходного процесса реактивностью рассеяния статора x_σ и Э.Д.С. $E_{\delta q0}$, наводимой потоком $\Phi_{\delta d0}$, т.к. поток изменяется от приращения тока $\Delta I_{d|0|}$, который надо определить. Для решения задачи, используем неизменность потока $\Phi_{f\,\Sigma 0}$, сцепленного с обмоткой возбуждения, т.е. неизменность результирующего потокосцепления этой обмотки $\Delta\Psi_{f\Sigma|0|}$.

Если последнее рассматривать как потокосцепление на холостом ходу машины, то его часть, связанная со статором, будет:

$$\dot{\Psi}'_d = (1 - \sigma_f)\,\dot{\Psi}_{f\Sigma},$$

причем именно этим потокосцеплением обусловливается в статоре та э. д. с. E'_q, которая в начальный момент переходного процесса сохраняет свое предшествующее значение.

Придадим выражению более наглядный вид:

$$\dot{\Psi}'_d = (1-\sigma_f)\,\dot{\Psi}_{f\Sigma} = (1-\sigma_f)\,(\dot{\Psi}_f + \dot{\Psi}_{ad}) =$$

$$= \frac{x_{ad}}{x_{\sigma f} + x_{ad}}\,[\dot{I}_f\,(x_{\sigma f} + x_{ad}) + \dot{I}_d x_{ad}] =$$

$$= \dot{I}_f x_{ad} + \dot{I}_d \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}}.$$

Этому потокосцеплению соответствует э. д. с.

$$\dot{E}'_q = \dot{E}_q - j\dot{I}_d \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \dot{U}_q + j\dot{I}_d \left(x_d - \right.$$

$$\left. - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right) = \dot{U}_q + j\dot{I}_d x'_d,$$

Эту Э.д.с. называют поперечной переходной э.д.с.; а реактивность

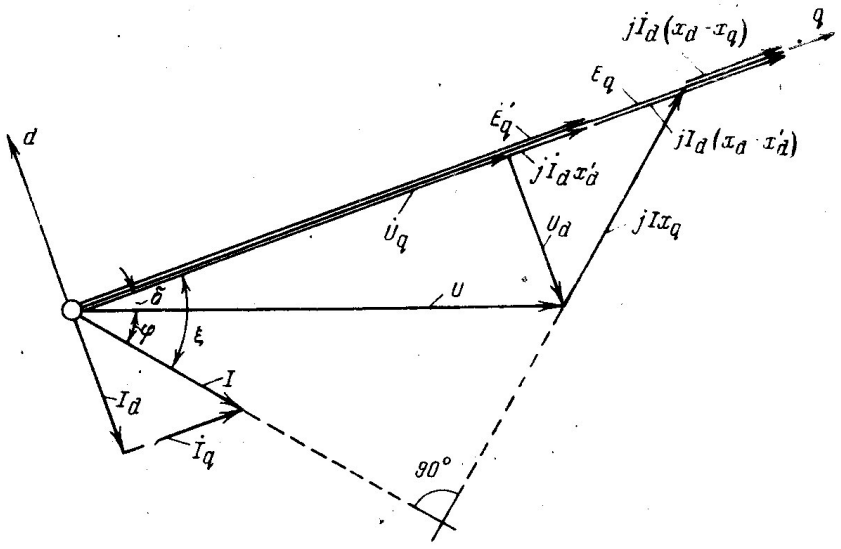
$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f}$$

продольной переходной реактивностью. Продольная переходная реактивность является характерным параметром с.м. и указывается в паспортных данных, (т.е. задается заводом-изготовителем).

Э.д.с. $\boldsymbol{E'_q}$ оставаясь неизменной в начальный момент внезапного нарушения режима позволяет связать предшествующий режим с новым режимом машины, в чем и заключается ее особая практическая ценность. С этой точки зрения термин "переходная" нужно относить к тому, что эта э.д.с. вместе с $\boldsymbol{x_d}$ позволяют оценить внезапный переход от одного режима к другому. Не верно думать, что $\boldsymbol{E'_q}$ возникает в момент нарушения режима. Ее можно представить в любой момент произвольного режима. Следует еще раз подчеркнуть, что особенностью э.д.с. $\boldsymbol{E'_q}$ является то, что она не претерпевает никаких внезапных изменений.

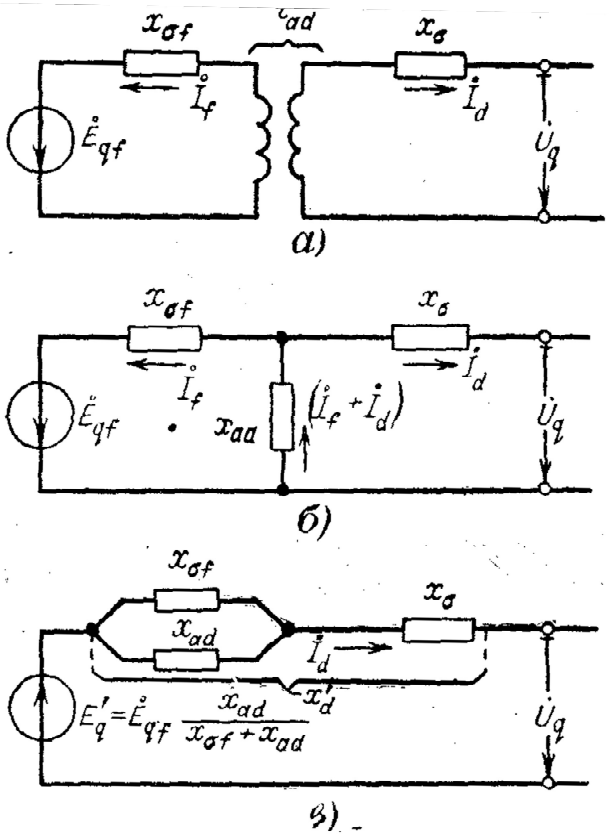
$\boldsymbol{E'_q}$ нельзя измерить, ее называют расчетной или условной э.д.с. Использование $\boldsymbol{E'_q}$ и $\boldsymbol{x_d}$, по существу эквивалентно замене реальной машины с рассеянием у обмотки возбуждения, машиной у которой этого рассеяния нет, вернее оно сказывается на статоре, по увеличению рассеяния у статора.

Нарисуем В.Д. явнополюсной синхронной машины, работающим с отстающим током.



1. Ток и напряжение раскладываем по осям d и q получаем составляющие Ud, Uq, Id, Iq
2. Суммируем Uq с jIxq или Eq вычитаем jId(xd xq) получаем E`q

Тогда схема замещения с.м. по продольной оси ротора (при отсутствии демпферных обмоток) имеет вид.



К определению переходной реактивности машины в продольной оси.
а — исходная принципиальная схема; *б* и *в* — схемы замещения.

Таким образом, если у явнополюсной синхронной машины без демпферных обмоток (и других аналогичных контуров) внезапно произошло изменение сопротивления цепи статора, при этом внешнее сопротивление является чисто индуктивным $x_{ВН}$, то начальное значение периодической слагающей тока возникшего переходного процесса или так называемый начальный переходный ток будет только продольным и составляет:

$$I'_{d/0/} = \frac{E'_{q0}}{x'_d + x_{вн}} = I'_{/0/}.$$

Сверхпереходные э.д.с. и реактивности с.м.

Рассмотрим с.м. имеющую не только обмотку возбуждения, но и демпферную обмотку. Наличие демпферных обмоток не обеспечивает магнитной симметрии ротора, что вынуждает определять параметры машины отдельно в продольной и поперечной осях.

Установим э.д.с. и реактивности, которыми можно характеризовать в начальный момент переходного режима такую машину. Как и раньше, считаем, что все величины выражены в относительных единицах и величин ротора приведены к статору.

Для простоты примем, что обмотка статора и обе обмотки ротора в его продольной оси связанны между собой общим потоком взаимоиндукции Φ_{ad}, которым определяет реактивность продольной реакции x_{ad}. Внезапное приращение потока $\Delta\Phi_{ad/0/}$ вызовет реакцию ротора, которая состоит из приращения потока обмотки возбуждения $\Delta\Phi_{f/0/}$ и потока продольной демпферной обмотки $\Delta\Phi_{ld/0/}$. Баланс результирующих потоков, сцепленных с этими обмотками, остается неизменным, т. е. должны быть соблюдены следующие равенства:

для обмотки возбуждения

$$\Delta\dot{I}_{f|0|}(x_{\sigma f}+x_{ad})+\Delta\dot{I}_{1d|0|}x_{ad}+\Delta\dot{I}_{d|0|}x_{ad}=0;$$

для продольной демпферной обмотки

$$\Delta\dot{I}_{1d|0|}(x_{\sigma 1d}+x_{ad})+\Delta\dot{I}_{f|0|}x_{ad}+\Delta\dot{I}_{d|0|}x_{ad}=0,$$

Приравняв левые части, получим

$$\Delta\dot{I}_{f|0|}x_{\sigma f}=\Delta\dot{I}_{1d|0|}x_{\sigma 1d},$$

откуда следует, что чем меньше рассеяние обмотки, тем больше наведенный в ней ток и тем соответственно больше ее участие в создании ответной реакции ротора.

Совместную ответную реакцию двух обмоток в начальный момент переходного процесса можно заменить аналогичной реакцией от суммарного тока

$$(\Delta\dot{I}_{f|0|}+\Delta\dot{I}_{1d|0|})=\Delta\dot{I}_{rd|0|}$$

в одной эквивалентной обмотке по продольной оси ротора с реактивностью рассеяния $x_{\sigma rd}$. При этом

$$\Delta\dot{I}_{rd|0|}(x_{\sigma rd}+x_{ad})=(\Delta\dot{I}_{f|0|}+\Delta\dot{I}_{1d|0|})(x_{\sigma rd}+x_{ad})=$$
$$=-\Delta\dot{I}_{d|0|}x_{ad}.$$

Нетрудно преобразовать последнее равенство и получить из него выражение для искомой реактивности рассеяния

$$x_{\sigma rd}=\frac{x_{\sigma f}x_{\sigma 1d}}{x_{\sigma f}+x_{\sigma 1d}},$$

которое показывает, что эта реактивность определяется как эквивалентная реактивность двух параллельных ветвей.

Сделав такую подстановку, определим так называемую продольную переходную реактивность

$$x''_d=x_d-\frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma rd}+x_{ad}}=x_\sigma+\frac{x_{\sigma rd}x_{ad}}{x_{\sigma rd}+x_{ad}}=$$
$$=x_\sigma+\frac{1}{\frac{1}{x_{ad}}+\frac{1}{x_{\sigma f}}+\frac{1}{x_{\sigma 1d}}}.$$

А также поперечную сверхпереходную реактивность -

$$x''_q=x_q-\frac{x_{aq}^2}{x_{1q}}=x_\sigma+\frac{x_{\sigma 1q}x_{aq}}{x_{\sigma 1q}+x_{aq}}.$$

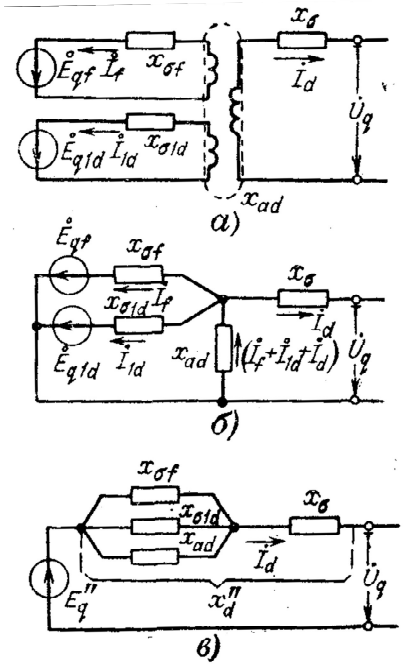
ЭДС E''_d и E''_q соответственно в продольных и поперечных осях и сохраняют свои значения неизменными в начальный момент внезапного нарушения режима. Величины их являются расчетными или задаются заводом изготовителем.

$$\dot{E}''_{d|0|}=\dot{E}''_{d0}=\dot{U}_{d0}+j\dot{I}_{q0}x''_q;$$

$$\dot{E}''_{q|0|}=\dot{E}''_{q0}=\dot{U}_{q0}+j\dot{I}_{d0}x''_d,$$

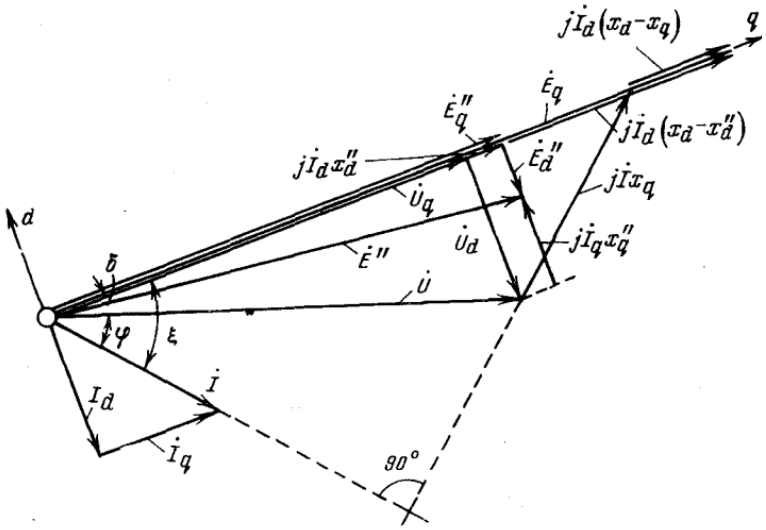
Приставка «сверх» в термине «сверхпереходные», подчеркивает, что данные параметры и величины учитывают влияние демпферных обмоток (или эквивалентных им контуров). Схема замещения к определению сверхпереходной реактивности в продольной

оси аналогична схеме замещения для определения переходной реактивности и имеет вид, представленный на рис. В.Д. явнополюсной с.м. с демпферными обмотками в обеих осях ротора при работе ее с отстающим током представляется следующим образом.

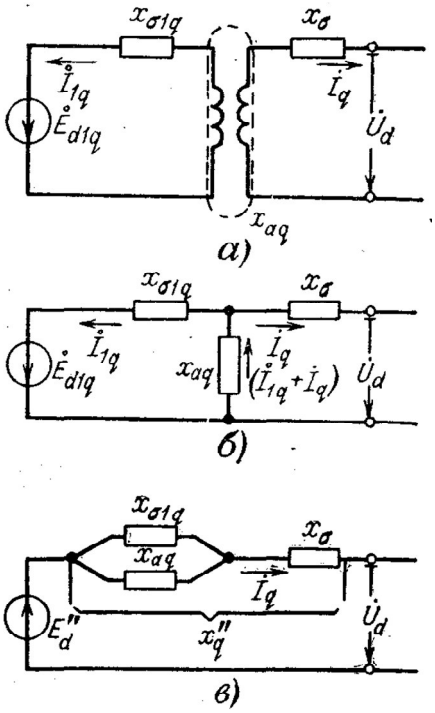


К определению сверхпереходной реактивности в продольной оси.

а — исходная принципиальная схема; *б* и *в* — схемы замещения.



Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины с демпферными обмотками в обеих осях ротора при работе ее с отстающим током.



К определению сверхпереходной реактивности в поперечной оси.

а — исходная принципиальная схема; *б* и *в* — схемы замещения.

При чисто индуктивной цепи статора продольная и поперечная составляющие начального значения периодической слагающей тока возникшего переходного процесса или так называемого начального сверхпереходного тока будут:

$$I''_{d\,|0|} = \frac{E''_{q0}}{x''_d + x_{вн}};\quad I''_{q\,|0|} = \frac{E''_{d0}}{x''_q + x_{вн}}$$

и его полная величина

$$I''_{|0|} = \sqrt{I''^2_{d\,|0|} + I''^2_{q\,|0|}}.$$

Характеристика двигателей и нагрузки.

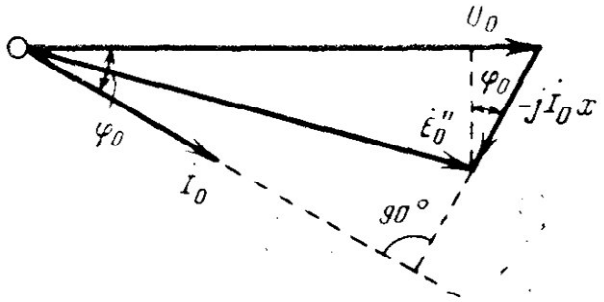
Все, что было сказано о с.м. в равной мере относится как к синхронным генераторам, так и к синхронным двигателям и компенсаторам. Различие в начальный момент переходного процесса определяется только величинами их сверхпереходных ЭДС. У перевозбужденного СД (или компенсатора) ЭДС всегда выше подведенного напряжения.

Поэтому при резком снижении напряжение реактивный ток двигателя растет. У СД работающего с недовозбуждением Е меньше напряжения. Здесь в зависимости от степени снижения напряжения возможно или потребление реактивного тока из сети (при ЭДС меньше напряжения или генерирование реактивного тока (при ЭДС больше напряжения).

Рассмотрим теперь А.Д. (которые, как правило, составляют основную часть промежуточной нагрузки). В нормальном режиме они работают с малым скольжением 2-5%. Этим скольжением можно пренебречь и А.Д. в начальный момент внезапного нарушения режима рассматривать как недовозбужденный синхронный двигатель.

Для А.Д. также можно установить сверхпереходные реактивность и ЭДС, кроме того, поскольку у А.Д. ротор полностью симметричен, то отпадает необходимость раскладывать величины по отдельным осям. Сверхпереходная реактивность А.Д. x'' **представляет собой реактивность короткого замыкания (т.е. когда двигатель заторможен S=100%) относительная величина этой реактивности** $x'' = \frac{1}{I_{пуск}}$**, где Iпуск-относительный пусковой ток двигателя (при пуске без реостата). В зависимости от типа и мощности двигателя величина сверхпереходной реактивности находиться в пределах 0,2-0,35.**

Начальное значение сверх переходной ЭДС двигателя определяется из его предшествующего режима и в соответствии с векторной диаграммой равно :



Векторная диаграмма асинхронного двигателя.

$$E''_{|0|} = E''_0 = \sqrt{(U_0 \cos\varphi_0)^2 + (U_0 \sin\varphi_0 - I_0 x'')^2}$$

или приближенно, принимая э. д. с. E''_0 **равной проекции вектора этой э. д. с. на вектор** U_0

$$E''_0 \approx U_0 - I_0 x'' \sin\varphi_0,$$

При рассмотрении переходного процесса в мощных схемах учет каждого двигателя практически невозможен. Поэтому на практике учитывают только наиболее крупные двигатели, которые могут оказать существенное влияние, а остальные учитываются в виде обобщенной нагрузки с другими токоприемниками, которые

характеризуются некоторыми средними параметрами. Практически установлено, что в начальный момент внезапного нарушения режима обобщенную нагрузку можно характеризовать параметрами.

$$E''_{\text{нагр}} = 0{,}85, \quad x''_{\text{нагр}} = 0{,}35$$

Тема 6. Уравнения электромагнитного переходного процесса СМ. (6 часов)

Математическая модель синхронной машины, отражающая основные закономерности электромагнитных переходных процессов в машине. Линейные преобразования дифференциальных уравнений переходного процесса. Уравнения Парка-Горева.

Переходные процессы в синхронной машине без учета влияния демпферных контуров. Характеристическое уравнение и его корни. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов. Изменение тока якоря при трехфазном КЗ. Влияние системы возбуждения на переходный процесс. Переходные процессы при гашении магнитного поля синхронной машины и неуспешном повторном включении на КЗ.

Переходные процессы в синхронной машине с учетом влияния демпферных контуров. Переходные процессы в контурах ротора при разомкнутой обмотке якоря. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов контуров ротора. Влияние на переходный процесс замкнутой обмотки якоря. Особенности переходных процессов в асинхронных машинах.

Данная тема подробно рассмотрена в книге Ульянова С.А. «Электромагнитные переходные процессы в электрических системах» стр. 144 -225 и в кратком конспекте лекций не приводится.

Тема 7. Практические методы расчёта токов к.з. (10 часов)

ГОСТ и РД по расчету токов к.з. Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых и методом спрямленных характеристик. Особенности расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В.

<u>Практические методы расчета переходного процесса К.З.</u>

Общие замечания. Ток при внезапном К.З. может быть рассчитан на основе системы уравнений Горева-Парка, позволяющий учесть переходные процессы во всех контурах с.м. с учетом нелинейностей. Это точный метод, но весьма громоздкий. Если же учесть, что в системе несколько генераторов, свободные токи которых связаны между собой, то задача резко усложняется, даже если не учитывать качания с.м., присоединенных нагрузок, и систем регулирования.

Использование методов операционного исчисления в мало-мальски сложной схеме – требует громоздких выкладок, т.к. порядок характериз.уравнен. и быстро возрастает с увеличением числа машин. Поэтому данный метод используется весьма ограничено.

Из-за перечисленных причин, а также в силу того, что расчеты переходных процессов во многих случаях не требует высокой точности, разработаны приближенные методы.

Основное требование, которому должен удовлетворять практический метод – простота расчета, что позволяет избежать ошибок. Но чем проще метод, тем он менее точен. Самые простые методы позволяют иногда определить только порядок величин, что бывает достаточно для решения отдельных практических задач.

Поэтому, как правило, расчет следует начинать с самых простых методов, а потом переходить к более точным, если требуется.

Кроме известных методов, при расчете переходных допущений процессов, в практических расчетах коротких замыканий дополнительно используются следующие:

1. **Закон изменения периодической слагающей тока К.З., установленный для схемы с одним генератором, можно использовать для приближенной оценки этой слагающей тока и в схеме с произвольным числом генераторов;**
2. **Учет апериодической слагающей тока К.З. во всех случаях можно производить приближенно;**
3. **Ротор каждой синхронной машины симметричен.**

Разница между практическими методами расчета переходного процесса К.З. состоит в различном подходе при вычислении периодической составляющей слагающей тока К.З. Это зависит от назначения расчета. Подход для расчета только тока К.З. отличается от подхода, если требуется найти распределение тока К.З. по ветвям схемы, что необходимо при расчете РЗ и систем автоматизации. В последнем случае требуется более точный расчет. Высокая точность требуется при анализе аварий, когда обнаружено повреждение оборудования и встает вопрос о рекламации к заводам поставщикам или возникают спорные вопросы.

Практические методы расчета имеют следующие ошибки по сравнению с замеренными величинами:

1. Начальные значения тока К.З. вычисленные практически дают погрешность ±5% (при сравнении с осциллограммой).

2. При определении тока К.З. в точке К.З. в произвольный момент времени переходного процесса, ошибка составляет 10-15% (что дает приемлемую точность для инженерных расчетов).

3. При определении тока К.З. в произвольный момент времени переходного процесса не в точке К.З. а в соседних ветвях, ошибка возрастет (по сравнению с 2) тем больше, чем дальше точка К.З.

Расчеты токов К.З., особенно в сложных системах, выполняются на специальных расчетных моделях (столах), на которых искомые величины можно получить в определенных масштабах по показаниям приборов. Точность расчета, в этом случае зависит и от точности модели и точности метода.

Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания

При расчете начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ в электроустановках напряжением свыше 1 кВ в исходную расчетную схему должны быть введены все синхронные генераторы и компенсаторы, а также синхронные и асинхронные электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если между электродвигателями и точкой КЗ отсутствуют токоограничивающие реакторы или силовые трансформаторы. В автономных электрических системах следует учитывать и электродвигатели меньшей мощности, если сумма их номинальных токов составляет не менее 1 % от тока в месте КЗ, определенного без учета этих электродвигателей.

Для расчета начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ аналитическим методом по принятой исходной расчетной схеме предварительно следует составить эквивалентную схему замещения, в которой синхронные и асинхронные машины должны быть представлены предварительно приведенными к базисной ступени напряжения или выраженными в относительных единицах при выбранных базисных условиях сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС. Исходные значения сверхпереходных ЭДС следует принимать численно равными их значениям в момент, предшествующий КЗ.

Для синхронных генераторов и электродвигателей сверхпереходную ЭДС в предшествующем режиме следует определять по формуле

$$E''_{|0|} = \sqrt{(U_{|0|} \pm I_{|0|} X''_{\mathrm{d}} \sin\varphi_{|0|})^2 + (I_{|0|} X''_{\mathrm{d}} \cos\varphi_{|0|})^2} ,$$

а для синхронных компенсаторов по формуле

$$E''_{|0|} = U_{|0|} \pm I_{|0|} X''_{\mathrm{d}} .$$

В формулах знак «+» относится к синхронным машинам, которые к моменту КЗ работали в режиме перевозбуждения, а знак «-» - к работавшим с недовозбуждением.

Сверхпереходную ЭДС асинхронных электродвигателей в момент, предшествующий КЗ, следует определять по формуле

$$E''_{|0|} = \sqrt{(U_{|0|} - I_{|0|} X''_{\text{АД}} \sin\varphi_{|0|})^2 + (I_{|0|} X''_{\text{АД}} \cos\varphi_{|0|})^2} ,$$

где $X''_{\text{АД}}$ — сверхпереходное индуктивное сопротивление электродвигателя.

Примечание.

При расчете тока КЗ с применением системы относительных единиц и приведением значений параметров элементов расчетной схемы к выбранным базисным условиям в формулы целесообразно подставлять $U_{|0|}$, $I_{|0|}$, X'' в относительных единицах при номинальных условиях машины, т.е. соответственно $U_{*\,|0|(\text{ном})}$, $I_{*\,|0|(\text{ном})}$ и $X''_{*\,(\text{ном})}$; при этом $U_{*\,|0|(\text{ном})}$ допустимо принимать равным единице, а $I_{*\,|0|(\text{ном})}$ для генераторов и электродвигателей рекомендуется определять по формуле

$$I_{*\,|0|(\text{ном})} = \frac{P_{|0|} \cos\varphi_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}} \cos\varphi_{|0|}};$$

для синхронных компенсаторов

$$I_{*\,|0|(\text{ном})} = \frac{Q_{|0|}}{Q_{\text{ном}}} .$$

Полученную ЭДС $E''_{*\,|0|(\text{ном})}$ следует затем привести к базисным условиям:

$$E''_{*\,|0|(\text{б})} = E''_{*\,|0|(\text{ном})} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{б}}} .$$

Схему замещения следует путем преобразований привести к простейшему виду и определить результирующую эквивалентную ЭДС $E''_{\text{эк}}$ (или $E''_{*\,\text{эк(б)}}$) и результирующее эквивалентное сопротивление $X_{\text{эк}}$ (или $X_{*\,\text{эк(б)}}$) относительно расчетной точки КЗ.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ составляет

$$I_{\text{П0}} = \frac{E''_{\text{эк}}}{X_{\text{эк}}} = \frac{E''_{*\,\text{эк(б)}}}{X_{*\,\text{эк(б)}}} I_{\text{б}} ,$$

где $I_{\text{б}}$ - базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится расчетная точка КЗ.

При приближенных расчетах начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ допускается определять, приняв в соответствии с теоремой об активном двухполюснике ЭДС всех источников энергии равными нулю и используя формулу

$$I_{\text{П0}} = \frac{U_{|0|}}{\sqrt{3} X_{\text{эк}}} = \frac{c U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} X\text{эк}}$$

или

$$I_{\text{П0}} = \frac{c}{X_{*\,\text{эк(б)}}} I_{\text{б}} ,$$

где $U_{|0|}$ - напряжение (линейное) в расчетной точке КЗ к моменту возникновения КЗ;

$U_{\text{ном}}$ - номинальное напряжение (линейное) сети, в которой произошло КЗ;

c - коэффициент, который рекомендуется принимать равным:

c = 1,1 - при определении максимального значения тока КЗ;

c = 1,0 - при определении минимального значения тока КЗ.

При неизвестных параметрах электрических машин во всех приближенных расчетах для упрощения средние значения сверхпереходного сопротивления X'' и величины сверхпереходных э. д. с. $E^{П}$ можно принимать по таблице:

Таблица

№ п/п.	Наименование элемента	X^{II}	E^{II}_d
1.	Турбогенераторы мощностью до 100 МВТ	0,125	1,08
2.	- ″ - свыше 100 до 500 МВТ	0,20	1,13
3.	Гидрогенераторы с демпферными обмотками	0,20	1,13
4.	- ″ - без демпферных обмоток	0,27	1,18
5.	Синхронный двигатель	0,20	1,10
6.	Синхронный компенсатор	0,20	1,20
7.	Асинхронный двигатель	0,20	0,90
8.	Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Расчет апериодической составляющей тока короткого замыкания

Допускается наибольшее начальное значение апериодической составляющей тока КЗ в общем случае принимать равным амплитуде периодической составляющей тока в начальный момент КЗ, т.е.

$$i_{a0} = \sqrt{2} I_{П0}.$$

Это выражение справедливо при следующих условиях:

1) активная составляющая результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно расчетной точки КЗ значительно меньше индуктивной составляющей, вследствие чего активной составляющей можно пренебречь (см. п. 5.1.1);

2) к моменту КЗ ветвь расчетной схемы, в которой находится расчетная точка КЗ, не нагружена;

3) напряжение сети к моменту возникновения КЗ проходит через нуль.

Если указанные условия не выполняются, то модуль начального значения апериодической составляющей тока КЗ следует определять как разность мгновенных значений периодической составляющей тока в начальный момент КЗ и тока в момент, предшествующий КЗ.

Для определения апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени предварительно должна быть составлена такая исходная схема замещения, чтобы в ней все элементы исходной расчетной схемы учитывались как индуктивными, так и активными сопротивлениями. При этом синхронные генераторы и компенсаторы, синхронные и асинхронные электродвигатели должны быть учтены индуктивным сопротивлением обратной последовательности (для асинхронных электродвигателей $X_2 \approx X''$) и сопротивлением обмотки статора постоянному току при нормированной рабочей температуре этой обмотки.

Если исходная расчетная схема имеет только последовательно включенные элементы, то апериодическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять по формуле

$$i_{at} = i_{ao} e^{-\frac{t}{T_a}},$$

где T_a — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ; она определяется по формуле $T_a = \frac{X_{эк}}{\omega_c R_{эк}}$, где $X_{эк}$ и $R_{эк}$ - соответственно индуктивная и активная составляющие результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно точки КЗ; ω_c - синхронная угловая частота напряжения сети.

Примечание. В тех случаях, когда при расчете апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени необходимо учесть ток генератора в момент, предшествующий КЗ, следует использовать формулу

$$i_{at} = \sqrt{2} I_{|0|} \sqrt{\left(\frac{I_{п0}}{I_{|0|}}\right)^2 - 2\frac{I_{п0}}{I_{|0|}}\sin\psi_{|0|} + 1} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}$$

где $I_{|0|}$ - ток генератора к моменту КЗ; $\psi_{|0|}$ - угол сдвига фаз сверхпереходной ЭДС и тока генератора к моменту КЗ; T_a - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ в цепи с синхронным генератором.

Если исходная расчетная схема (и соответственно схема замещения) является многоконтурной, то апериодическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений, составленных с учетом как индуктивных, так и активных сопротивлений всех элементов исходной расчетной схемы.

Методика приближенных расчетов апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени зависит от конфигурации исходной расчетной схемы и положения расчетной точки КЗ.

Если исходная расчетная схема является многоконтурной, но все источники энергии связаны с расчетной точкой КЗ общим сопротивлением (или схема содержит только один источник энергии), то при приближенных расчетах апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени допускается считать, что эта составляющая затухает во времени по экспоненциальному закону с некоторой эквивалентной постоянной времени. Существует несколько методов ее определения:

1) с использованием составляющих комплексного результирующего эквивалентного сопротивления схемы замещения относительно точки КЗ, измеренного при промышленной частоте:

$$T_{а.эк} = \frac{\mathrm{Jm}\underline{Z}_{эк}}{\omega_c \mathrm{Re}\underline{Z}_{эк}},$$

где $\underline{Z}_{эк}$ - комплексное результирующее эквивалентное сопротивление схемы замещения, измеренное при частоте 50 Hz;

$\mathrm{Jm}\underline{Z}_{эк}$ - мнимая составляющая комплексного результирующего эквивалентного сопротивления;

$\mathrm{Re}\underline{Z}_{эк}$ - действительная составляющая комплексного результирующего эквивалентного сопротивления;

2) с использованием результирующих эквивалентных сопротивлений схемы замещения относительно расчетной точки КЗ, полученных при поочередном исключении из схемы всех активных, а затем всех индуктивных сопротивлений:

$$T_{а.эк} = \frac{X_{эк(R=0)}}{\omega_c R_{эк(x=0)}},$$

где $X_{эк(R=0)}$ - результирующее эквивалентное сопротивление схемы замещения при учете в ней различных элементов расчетной схемы только индуктивными сопротивлениями, т.е. при исключении всех активных сопротивлений;

$R_{эк(x=0)}$ - результирующее эквивалентное сопротивление схемы замещения при исключении из нее всех индуктивных сопротивлений;

3) с использованием составляющих комплексного результирующего эквивалентного сопротивления схемы замещения относительно точки КЗ, измеренного при частоте 20 Hz:

$$T_{\text{а.эк}} = 2{,}5\frac{\text{Jm}\underline{Z}_{\text{эк(20)}}}{\omega_{\text{с}}\text{Re}\underline{Z}_{\text{эк(20)}}},$$

где $\underline{Z}_{\text{эк(20)}}$ - комплексное результирующее эквивалентное сопротивление схемы замещения относительно расчетной точки КЗ, измеренное при частоте 20 Hz;

$\text{Jm}\underline{Z}_{\text{эк(20)}}$ - мнимая составляющая указанного комплексного сопротивления;

$\text{Re}\underline{Z}_{\text{эк(20)}}$ - действительная составляющая этого сопротивления.

По отношению к точному решению применение первого метода обычно дает отрицательную погрешность (занижает значения постоянной времени), применение второго метода дает положительную погрешность (завышает значения постоянной времени). Погрешность, связанная с применением третьего метода, по абсолютной величине обычно меньше, чем при использовании первого и второго методов. При аналитических расчетах наиболее простым является второй метод. При расчетах с применением ЭВМ предпочтение следует отдавать первому и третьему методам.

Если расчетная точка КЗ делит исходную расчетную схему на несколько независимых друг от друга частей, то при приближенных расчетах апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени ее следует определять как сумму апериодических составляющих токов от отдельных частей схемы, полагая, что каждая из этих составляющих изменяется во времени с соответствующей эквивалентной постоянной времени, т.е.

$$i_{\text{at}} = \sum_{i=1}^{m} i_{\text{a0i}} e^{-\frac{\text{t}}{\text{Та.эki}}},$$

где m - число независимых частей схемы;

i_{a0i} - начальное значение апериодической составляющей тока КЗ от i-й части схемы;

$\text{Т}_{\text{а.эki}}$ - эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ от i-й части схемы, определяемая по (5.12), (5.13) или (5.14).

Расчет ударного тока короткого замыкания

Способ расчета ударного тока КЗ зависит от требуемой точности расчета и конфигурации исходной расчетной схемы.

Если исходная расчетная схема является многоконтурной, то для получения высокой точности расчета ударного тока КЗ следует решить систему дифференциальных уравнений, составленных для мгновенных значений токов в узлах и падений напряжения в контурах расчетной схемы, и определить максимальное мгновенное значение тока в ветви, в которой находится расчетная точка КЗ.

При расчете ударного тока КЗ с целью проверки проводников и электрических аппаратов по условиям КЗ допустимо считать, что амплитуда периодической составляющей тока КЗ в момент наступления ударного тока равна амплитуде этой составляющей в начальный момент КЗ. Исключение составляют случаи, когда вблизи расчетной точки КЗ включены асинхронные электродвигатели.

Если исходная расчетная схема содержит только последовательно включенные элементы, то ударный ток следует определять по формуле

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} I_{\text{п0}} K_{\text{уд}}$$

где $K_{\text{уд}}$ — ударный коэффициент. Последний рекомендуется определять по одной из следующих формул:

$$K_{\text{уд}} = 1{,}02 + 0{,}98e^{-\frac{3}{x_{\text{эк}}/R_{\text{эк}}}}$$

или

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,5\pi + \varphi_к}{x_{эк} / R_{эк}}},$$

где

$$\varphi_к = \text{arctg}\frac{X_{эк}}{R_{эк}}.$$

В тех случаях, когда $X_{эк}/R_{эк} \geq 5$, ударный коэффициент допустимо определять по формуле

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_а}},$$

где $T_а$ - постоянная времени.

Если исходная расчетная схема является многоконтурной, причем все источники энергии связаны с расчетной точкой КЗ общим сопротивлением, то при приближенных расчетах ударного тока КЗ, исходя из ранее принятого допущения о экспоненциальном характере изменения апериодической составляющей тока КЗ, рекомендуется ударный коэффициент определять по формулам

$$K_{уд} = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{\omega_с T_{а.эк}}}$$

и

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01(0,5 + \varphi_к / \pi)}{T_{а.эк}}},$$

где $T_{а.эк}$ - эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ.

При $X_{эк}/R_{эк} \geq 5$ допустимо также использовать формулу:

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{а.эк}}}.$$

В тех случаях, когда исходная расчетная схема является многоконтурной, но расчетная точка КЗ делит ее на несколько независимых частей, то ударный ток допустимо принимать равным сумме ударных токов от соответствующих частей схемы, т.е.

$$i_{уд} = \sqrt{2}\sum_{i=1}^{m} I_{п0i} K_{удi},$$

где $I_{п0i}$ - начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от i-й части схемы;

$K_{удi}$ - ударный коэффициент тока КЗ от i-й части схемы.

Ударный коэффициент, как уже отмечалось зависит от Та., т. е. от отношения x/r. В практических расчетах это отношение может определяться по таблице.

Таблица 2

№ п/п	Наименование элемента	x / r
1.	Турбогенератор до 100 МВТ	15 - 85
2.	- ″ - от 100 до 500 МВТ	100 - 400
3.	Гидрогенератор с демпферными обмотками	40 - 60
4.	- ″ - без демпферных обмоток	60 - 90
5.	Трансформаторы мощностью 5 – 30 МВА	7 - 17
6.	- ″ - 60 – 500 МВА	20 - 50
7.	Реакторы 6 – 10 кв. до 1000 А	15 - 70
8.	- ″ - до 1500 А и выше	40 - 80
9.	Воздушные линии	2 - 8

10.	Кабельные линии	0,2 – 0,8
11.	Обобщенная нагрузка	2,5

При расчетах токов к. з. на шинах электрических станций (т. е. вблизи генераторов) величина ударного коэффициента (Ку) близка к 2. По мере удаленности точки к. з. величина Ку уменьшается, причем уменьшение происходит тем быстрее, чем больше доля воздушных и особенно кабельных линий.

При учете асинхронных двигателей в качестве дополнительных источников питания необходимо учитывать, что затухание периодической и апериодической слагающих посылаемого ими тока происходит примерно с одинаковыми постоянными времени приблизительно 0,015 – 0,15 сек. Поэтому в ударном коэффициенте для АД обычно учитывают одновременное затухание обеих слагающих тока.

При учете АД ток в месте к. з. может определяться:

$i = Ку\sqrt{2}\,I'' + Ку_{дв}\sqrt{2}\,I''_{дв}$.

где $Ку_{дв}$; $I''_{дв}$ – ударный коэффициент и начальный сверхпереходной ток АД.

Приближенный учет системы.

При расчетах токов к. з. параметры генераторов и электрических машин учитываются в том случае, если к. з. произошло вблизи от этих машин. Остальную часть электрической системы, в которой сосредоточено преобладающая часть генерирующей мощности, как правило, рассматривают как источник бесконечной мощности, $S_c = \infty$; $X_c = 0$ участие которого в питании точки к. з. ограниченно только сопротивлением тех элементов (линии, тр-ры, реакторы и др.) которые связывают точку к. з. с этой частью схемы. Система считается с мощностью равной ∞, если $S_{сист.} \geq 3500$ мВА. $U_{ср}$ – среднее значение той ступени где известно I'' или S_c''. За этой реактивностью считают подключенным источник бесконечной мощности, т. е. напряжение за x_c принимают неизменным и равным $U_{ср}$.

Если сопротивлением системы пренебречь нельзя, то величина этого сопротивления определяется следующим образом. Наиболее удаленную от расчетной точки КЗ часть электроэнергетической системы допускается представлять в виде одного источника энергии с неизменной по амплитуде ЭДС и результирующим эквивалентным индуктивным сопротивлением. ЭДС этого источника следует принимать равной среднему номинальному напряжению сети, связывающей удаленную и остальную части электроэнергетической системы, а его результирующее эквивалентное сопротивление X_c определять, исходя из известного тока I_c от эквивалентируемой части системы при КЗ в какой-нибудь узловой точке указанной сети:

$$X_c = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3}\,I_c}.$$

Если для этой сети в качестве базисного напряжения принято соответствующее среднее номинальное напряжение, то

$$X_{*\,c(б)} = \frac{I_б}{I_c},$$

где $I_б$ - базисный ток той ступени напряжения, на которой находится узловая точка.

При отсутствии данных о токе КЗ от удаленной части электроэнергетической системы минимально возможное значение результирующего эквивалентного сопротивления X_c можно оценить, исходя из параметров выключателей, установленных на узловой подстанции, т.е. принимая в формулах ток КЗ от удаленной части системы I_c равным номинальному току отключения этих выключателей.

Расчет для выбора выключателей по отключающей способности.

При выборе выключателей требуется определить величину расчетного отключающего тока ($I_{откл. рас.}$) или расчетную отключающую мощность $S_{от. расч.}$

$S_{откл.\ расч.} = \sqrt{3} U_n I_{откл.расч.}$

Под $I_{от.\ расч}$, понимают наибольший ожидаемый ток $I_{к.\ з.}$, который выключатель должен отключить при наиболее неблагоприятных условиях. Величина этого тока ($I_{отк}$) определяется как действующее значение полного тока к. з. к моменту размыкания дугогасящих контактов выключателя. Время от возникновения к. з. до размыкания дугогасящих контактов выключателя складывается из времени действия релейной защиты и собственного времени выключателя. В качестве расчетного принимают наименьшее возможное время размыкания контактов выключателя. В зависимости от полного времени отключения выключателя, расчетное время составляет 0,02 – 0,08 сек.

Следовательно для определения отключающего расчетного тока, надо определить действующее значение полного тока $I_{к.з.}$ для малых отрезков времени с момента возникновения к. з. Большой точности при этом не требуется, т. к. величины токов по шкале для выключателей отличаются друг от друга более чем в 1,5 раза. Поэтому для оценки затухания апериодической составляющей пользуются эквивалентной постоянной времени Та для определения Ку.

Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания для произвольного момента времени

Расчет периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени в сложной разветвленной схеме с учетом переходных процессов в синхронных машинах, для которых КЗ является близким, следует производить путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов, используя с этой целью ЭВМ, и выделения из найденного тока его периодической составляющей.

Если исходная расчетная схема является радиальной и содержит одну синхронную машину (или группу однотипных машин), а требуемая точность расчетов позволяет принять допущение, что при форсировке возбуждения напряжение на обмотке возбуждения мгновенно возрастает до предельного значения, то действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени приближенно, без учета поперечной составляющей тока КЗ, может быть определено с использованием формулы

$$I_{nt} = \frac{E_{q|0|}}{X_d + X_{вш}} + \left(\frac{E'_{q|0|}}{X'_{d(1d)} + X_{вш}} - \frac{E_{q|0|}}{X_d + X_{вш}} \right) e^{-\frac{t}{T'd}} + \left(\frac{E''_{q|0|}}{X''_d + X_{вш}} - \frac{E'_{q|0|}}{X'_{d(1d)} + X_{вш}} \right) e^{-\frac{t}{T''d}} +$$

$$+ \left(\frac{E_{qп} - E_{q|0|}}{X_d + X_{вш}} \right) \left(1 - \frac{T'_d - T_{\sigma 1d}}{T'_d - T''_d} e^{-\frac{t}{T'd}} + \frac{T''_d - T_{\sigma 1d}}{T'_d - T''_d} e^{-\frac{t}{T''d}} \right),$$

где $E_{q|0|}$ - синхронная ЭДС машины по поперечной оси к моменту КЗ (допускается принимать эту ЭДС в относительных единицах численно равной отношению предшествующего тока возбуждения машины к ее току возбуждения при работе в режиме холостого хода с номинальным напряжением);

$E''_{q|0|}$ и $E'_{q|0|}$ - соответственно сверхпереходная и переходная ЭДС машины по поперечной оси к моменту КЗ (первую из них можно определить по формуле (5.3) или (5.4), вторую - по той же формуле, предварительно заменив в ней X''_d на X'_d);

$E_{qп}$ - предельное значение синхронной ЭДС машины по поперечной оси (в относительных единицах его можно считать равным отношению предельного тока возбуждения машины к ее току возбуждения при работе в режиме холостого хода с номинальным напряжением);

$X_{вш}$ - внешнее сопротивление;

T'_d и T''_d - постоянные времени затухания соответственно переходной и сверхпереходной составляющих тока КЗ, с; эти постоянные времени связаны с T'_f и T'_{1d} соотношениям *и*:

$$T'_{\rm d} = T'_{\rm f} + T'_{1d} \quad \text{и} \quad T''_{\rm d} = \sigma' \frac{T'_{\rm f} \cdot T'_{1\rm d}}{T'_{\rm f} + T'_{1\rm d}}, \text{ где } T'_{\rm f} = \frac{X'_{\rm f}}{\omega_{\rm c} R_{\rm f}} = \frac{X_{\rm f} - \dfrac{X^2_{\rm ad}}{X_{\rm d} + X_{\rm вш}}}{\omega_{\rm c} R_{\rm f}};\ T'_{1\rm d} = \frac{X'_{1\rm d}}{\omega_{\rm c} R_{1\rm d}} = \frac{X_{1\rm d} - \dfrac{X^2_{\rm ad}}{X_{\rm d} + X_{\rm вш}}}{\omega_{\rm c} R_{1\rm d}};$$

$$\sigma' = 1 - \frac{(X_\sigma + X_{\rm вш})^2 X^2_{\rm ad}}{[X_{\rm f}(X_{\rm d} + X_{\rm вш}) - X^2_{\rm ad}][X_{1\rm d}(X_{\rm d} + X{\rm вш}) - X^2_{\rm ad}]};\ X'_{\rm d(1d)} = (X_{\rm d} + X_{\rm вш}) \frac{T'_{\rm f} + T'_{1\rm d}}{T_{\rm f0} + T_{1\rm d0}},$$

$$\text{где} \quad T_{\rm f0} = \frac{X_{\rm f}}{\omega_{\rm c} R_{\rm f}}; \qquad T_{1\rm d0} = \frac{X_{1\rm d}}{\omega_{\rm c} R_{1\rm d}};$$

При приближенных расчетах токов КЗ для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных генераторов в произвольный момент времени при радиальной расчетной схеме следует применять метод типовых кривых. Он основан на использовании кривых изменения во времени отношения действующих значений периодической составляющей тока КЗ от генератора в произвольный и начальный моменты времени, т.е. $\gamma_t = I_{\rm пt}/I_{\rm по} = f(t)$, построенных для разных удаленностей точки КЗ. При этом электрическая удаленность точки КЗ от синхронной машины характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока генератора в начальный момент КЗ к его номинальному току, т.е. $I_{*\,\text{п0(ном)}} = \dfrac{I_{\text{п0}}}{I_{\text{ном}}} = I_{*\,\text{п0(б)}} \dfrac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}$, где $I_{*\,\text{п0}}$ - начальное значение периодической составляющей тока КЗ от машины в относительных единицах при выбранных базисных условиях; $S_{\text{б}}$ - базисная мощность, МВ·А; $S_{\text{ном}}$ - номинальная мощность (полная) синхронной машины, МВ·А.

На рис. 1-4 приведены типовые кривые $\gamma_t = f(t)$ для различных групп турбогенераторов с учетом современной тенденции оснащения генераторов разных типов определенными системами возбуждения.

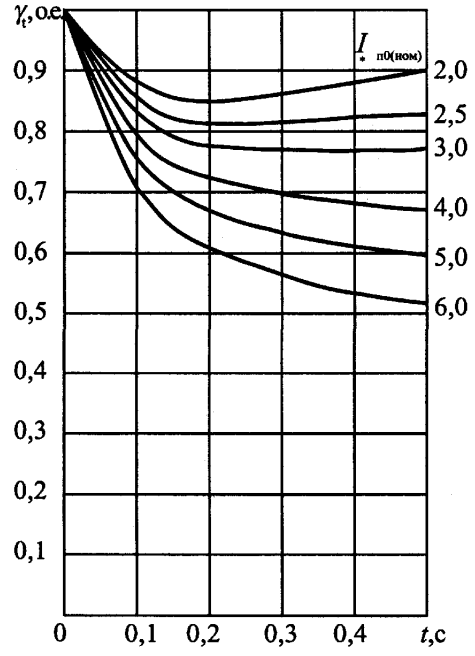


Рис. 1. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов с тиристорной независимой системой возбуждения

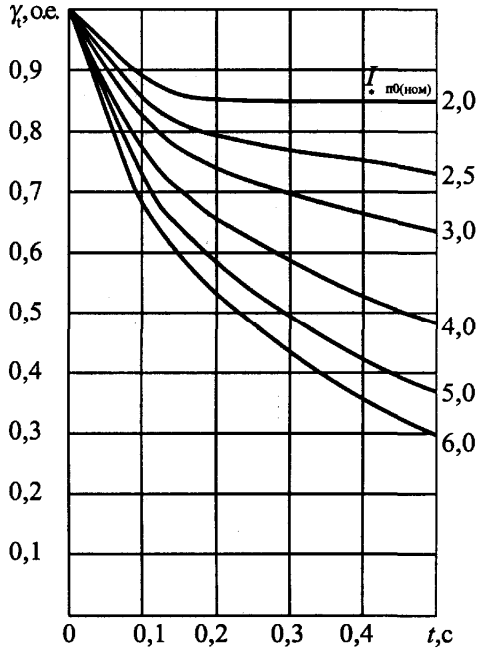


Рис. 2. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов с тиристорной системой самовозбуждения

На рис. *1* представлены типовые кривые для турбогенераторов с тиристорной независимой системой возбуждения (СТН)-генераторов типов ТВВ-300-2ЕУЗ, ТВВ-500-2ЕУЗ, ТВВ-800-2ЕУЗ, ТГВ-300-2УЗ, ТГВ-800-2УЗ; при построении кривых приняты

кратность предельного напряжения возбуждения K_{Uf} = 2,0 и постоянная времени нарастания напряжения возбуждения при форсировке возбуждения T_e = 0,02 с.

На рис. *2* представлены типовые кривые для турбогенераторов с тиристорной системой параллельного самовозбуждения (СТС)-генераторов типов ТВФ-100-2УЗ, ТВФ-110-2ЕУЗ, ТВФ-120-2УЗ, ТВВ-160-2ЕУЗ, ТВВ-167-2УЗ, ТВВ-200-2АУЗ, ТВВ-220-2УЗ, ТВВ-220-2ЕУЗ, ТГВ-200-2УЗ, ТЗВ-220-2ЕУЗ, ТЗВ-320-2ЕУЗ; при построении этих кривых приняты K_{Uf} = 2,5 и T_e = 0,02 с.

На рис. *3* представлены типовые кривые для турбогенераторов с диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения (СДН) - генераторов типов ТВФ-63-2ЕУЗ, ТВФ-63-2УЗ, ТВФ-110-2ЕУЗ; при построении кривых приняты K_{Uf} = 2,0 и T_e = 0,2с.

На рис. *4* представлены типовые кривые для турбогенераторов с диодной бесщеточной системой возбуждения (СДБ) - генераторов типов ТВВ-1000-2УЗ и ТВВ-1200-2УЗ; при построении кривых приняты K_{Uf} = 2,0 и T_e = 0,15 с.

Все кривые получены с учетом насыщения стали статора, насыщения путей рассеяния статора, вызванного апериодической составляющей тока статора, эффекта вытеснения токов в контурах ротора и регулирования частоты вращения ротора турбины. При этом предполагалось, что до КЗ генератор работал в номинальном режиме.

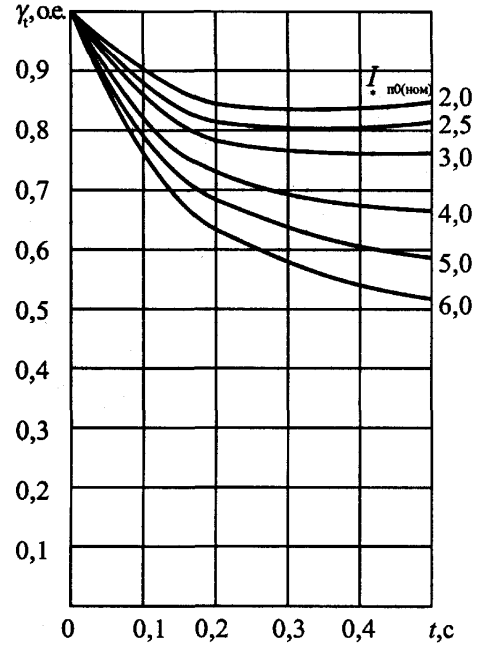


Рис. 3. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов с диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения

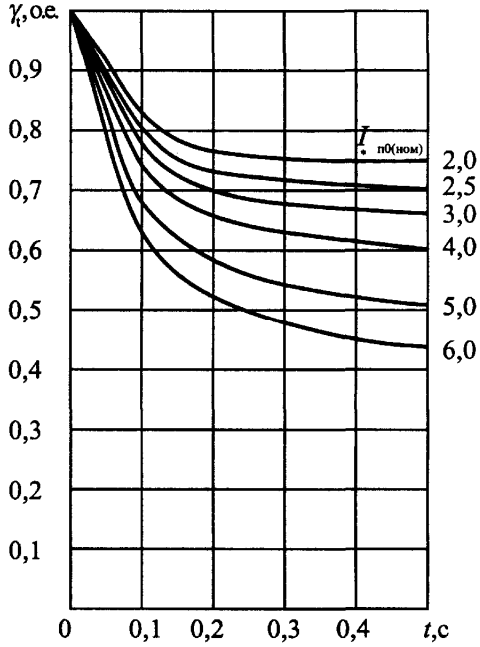


Рис. 4. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов с диодной бесщеточной системой возбуждения

Типовые кривые учитывают изменение действующего значения периодической составляющей тока КЗ, если отношение действующего значения периодической составляющей тока генератора в начальный момент КЗ к его номинальному току равно или больше двух. При меньших значениях этого отношения следует считать, что действующее значение периодической составляющей тока КЗ не изменяется во времени, т.е. $I_{пt} = I_{п0}$ = const.

Расчет действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронного генератора в произвольный (фиксированный) момент времени с использованием метода типовых кривых рекомендуется вести в следующем порядке:

1) по исходной расчетной схеме составить эквивалентную схему замещения для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ, в которой синхронную машину следует учесть предварительно приведенными к базисной ступени напряжения или выраженными в относительных единицах при выбранных базисных

условиях сверхпереходным сопротивлением и сверхпереходной ЭДС, с помощью преобразований привести схему к простейшему виду и определить действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент КЗ;

2) определить значение величины $I_{*\,\text{п0(ном)}}$, характеризующей электрическую удаленность расчетной точки КЗ от синхронной машины;

3) исходя из типа генератора и его системы возбуждения, выбрать соответствующие типовые кривые и по найденному значению $I_{*\,\text{п0(ном)}}$ выбрать необходимую кривую (при этом допустима линейная экстраполяция в области смежных кривых);

4) по выбранной кривой для заданного момента времени определить коэффициент γ_t;

5) определить искомое значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины в заданный момент времени $I_{\text{пt}} = \gamma_t I_{*\,\text{п0(б)}} I_{\text{б}}$, где $I_{\text{б}}$ - базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится расчетная точка КЗ.

Если исходная расчетная схема содержит несколько однотипных синхронных генераторов, находящихся в одинаковых условиях по отношению к расчетной точке КЗ, то порядок расчета периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени аналогичен изложенному, только при определении значения $I_{*\,\text{п0(ном)}}$ по формуле в последнюю вместо $S_{\text{ном}}$ следует подставлять сумму номинальных мощностей всех этих генераторов.

В тех случаях, когда расчетная продолжительность КЗ превышает 0,5 с, для расчета периодической составляющей тока в произвольный момент времени при КЗ на выводах турбогенераторов допустимо использовать кривые $\gamma_t = f(t)$, приведенные на рис.*5*, а при КЗ на стороне высшего напряжения блочных трансформаторов - кривые, приведенные на рис. *6*. Как на рис. *5*, так и на рис. *6* кривая 1 относится к турбогенераторам с диодной бесщеточной системой возбуждения, кривая 2 - с тиристорной независимой системой возбуждения, кривая 3 - с диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения и кривая 4 - с тиристорной системой самовозбуждения.

Для приближенного определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от синхронных генераторов напряжением 6-10 кВ в автономных системах электроснабжения следует использовать типовые кривые, представленные на рис. *7*. При разработке кривых были использованы параметры генераторов напряжением 6-10 кВ различных серий, а именно: СГДС 15.54.8 - 1000 кВт, 10,5 кВ; СГДС 15.74.8 - 1600 кВт, 10,5 кВ; СГДС 15.94.8-2000 кВт, 10,5 кВ; СГДС 15.74.8-2000 кВт, 6,3 кВ; СГДС 15.54.8 - 1600 кВт, 6,3 кВ; СБГД 6300 - 6300 кВт, 6,3 кВ.

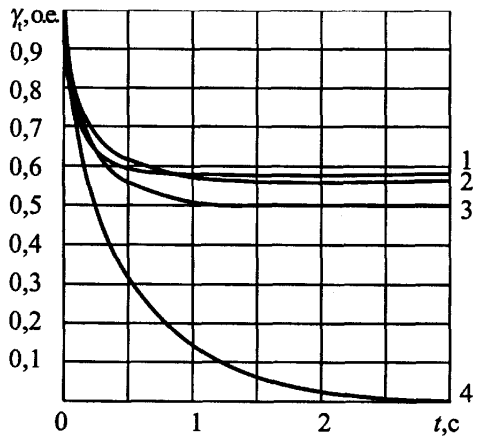


Рис. 5. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов с различными системами возбуждения при трехфазных КЗ на выводах генераторов

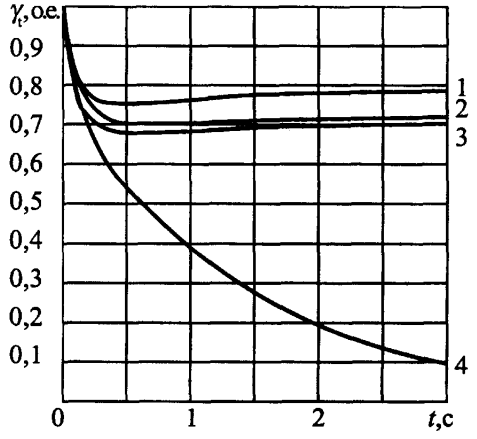


Рис. 6. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов с различными системами возбуждения при трехфазных КЗ на стороне ВН блочных трансформаторов

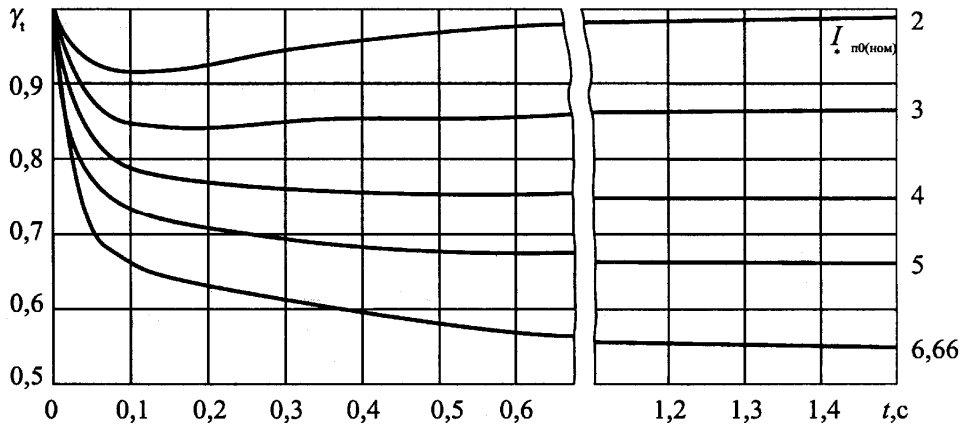


Рис. 7. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от синхронного генератора напряжением 6-10 кВ автономной системы электроснабжения

Учет синхронных и асинхронных электродвигателей при расчете токов короткого замыкания

Степень влияния синхронных и асинхронных электродвигателей на ток КЗ зависит от характера исходной расчетной схемы, положения расчетной точки КЗ, удаленности последней от электродвигателей и многих других факторов. Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей (или с учетом электродвигателей) следует выполнять в соответствии с указаниями, изложенными ранее. Расчет апериодической составляющей тока КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей и расчет ударного тока КЗ следует выполнять в соответствии с указаниями, изложенными ранее. Периодическую составляющую тока КЗ от синхронных или асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени следует рассчитывать путем решения системы дифференциальных уравнений переходных процессов и выделения из найденного тока его периодической составляющей, используя ЭВМ. В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных или асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени при радиальной схеме следует применять метод типовых кривых, который основан на использовании кривых изменения во времени отношений $\gamma_{tСД} = I_{пtСД}/I_{п0СД}$ и $\gamma_{tАД} = I_{пtАД}/I_{п0АД}$ при разных удаленностях точки КЗ.

Типовые кривые для синхронного электродвигателя приведены на рис. *8*, а для асинхронного электродвигателя — на рис. *9*.

Порядок расчета действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронного и асинхронного электродвигателей в произвольный момент времени с использованием этих кривых аналогичен изложенному. Значение периодической составляющей тока в килоамперах в момент времени *t* равно

$$\left.\begin{aligned} I_{пtСД} &= \gamma_{tСД}\, I_{*\,п0(ном)} I_{номСД} = \gamma_{tСД}\, I_{*\,п0(б)} I_{б}; \\ \text{и} \qquad I_{пtАД} &= \gamma_{tАД}\, I_{*\,п0(ном)} I_{номАД} = \gamma_{tАД}\, I_{*\,п0(б)} I_{б}, \end{aligned}\right\}$$

где $I_{номСД}$ и $I_{номАД}$ - номинальные токи соответственно синхронного и асинхронного электродвигателей; $I_{б}$ - базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находятся точка КЗ и электродвигатель.

Если в каком-либо узле мощность подключенных неявнополюсных синхронных электродвигателей (серии СТД, СТМ и др.) превышает 30 % суммарной мощности всех электродвигателей, то использование типовых кривых, приведенных на рис. *8*, приводит к погрешности, превышающей допустимую. Поэтому в указанном случае при расчете периодической составляющей тока КЗ неявнополюсные синхронные электродвигатели

следует учитывать индивидуально, используя кривые зависимости $\gamma_{tСД} = f(t)$, приведенные на рис. 10. При необходимости индивидуального учета асинхронных электродвигателей разных серий следует использовать типовые кривые, приведенные на рис. *11* (серии электродвигателей указаны у соответствующих кривых).

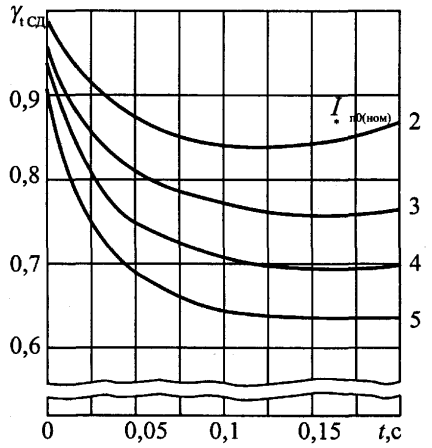


Рис. 8. Типовые кривые для СД

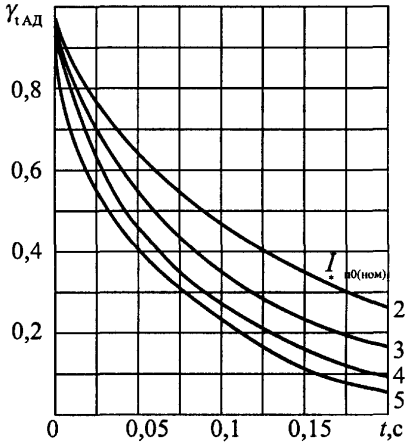


Рис. 9. Типовые кривые для АД

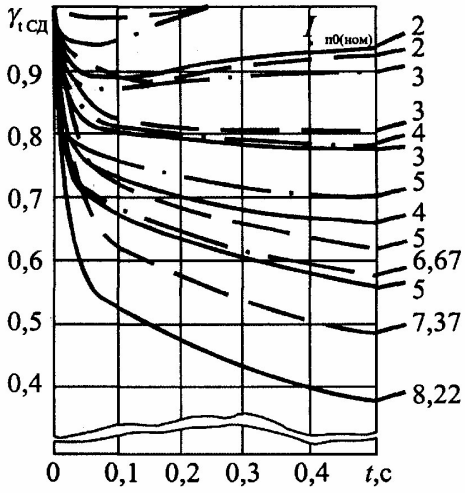


Рис. 10. Типовые кривые изменения тока КЗ от синхронных электродвигателей серии СДН (сплошные линии), серии СД с частотой вращения 1500 об/мин (штрихпунктирные линии) и серии СТД (пунктирные линии со звездочками)

В тех случаях, когда исходная расчетная схема содержит группу синхронных или асинхронных электродвигателей, присоединенных к общим шинам, и не является радиальной, а включает в себя также удаленные от расчетной точки КЗ источники энергии, причем как электродвигатели, так и упомянутые источники (система) связаны с точкой КЗ с помощью общей ветви, то действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени с учетом изменения во времени амплитуды периодической составляющей тока от электродвигателей рекомендуется определять с использованием типовых кривых, приведенных на рис. *12* (для явнополюсных синхронных электродвигателей) и на рис. *13* (для асинхронных электродвигателей).

Примечание. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от группы электродвигателей, представленные на рис. *12* и *13*, разработаны на основе данных, полученных тремя способами, а именно: при суммировании мгновенных токов отдельных электродвигателей; при замене группы электродвигателей эквивалентным электродвигателем; при статистической обработке расчетных данных единичных электродвигателей различных серий и мощностей.

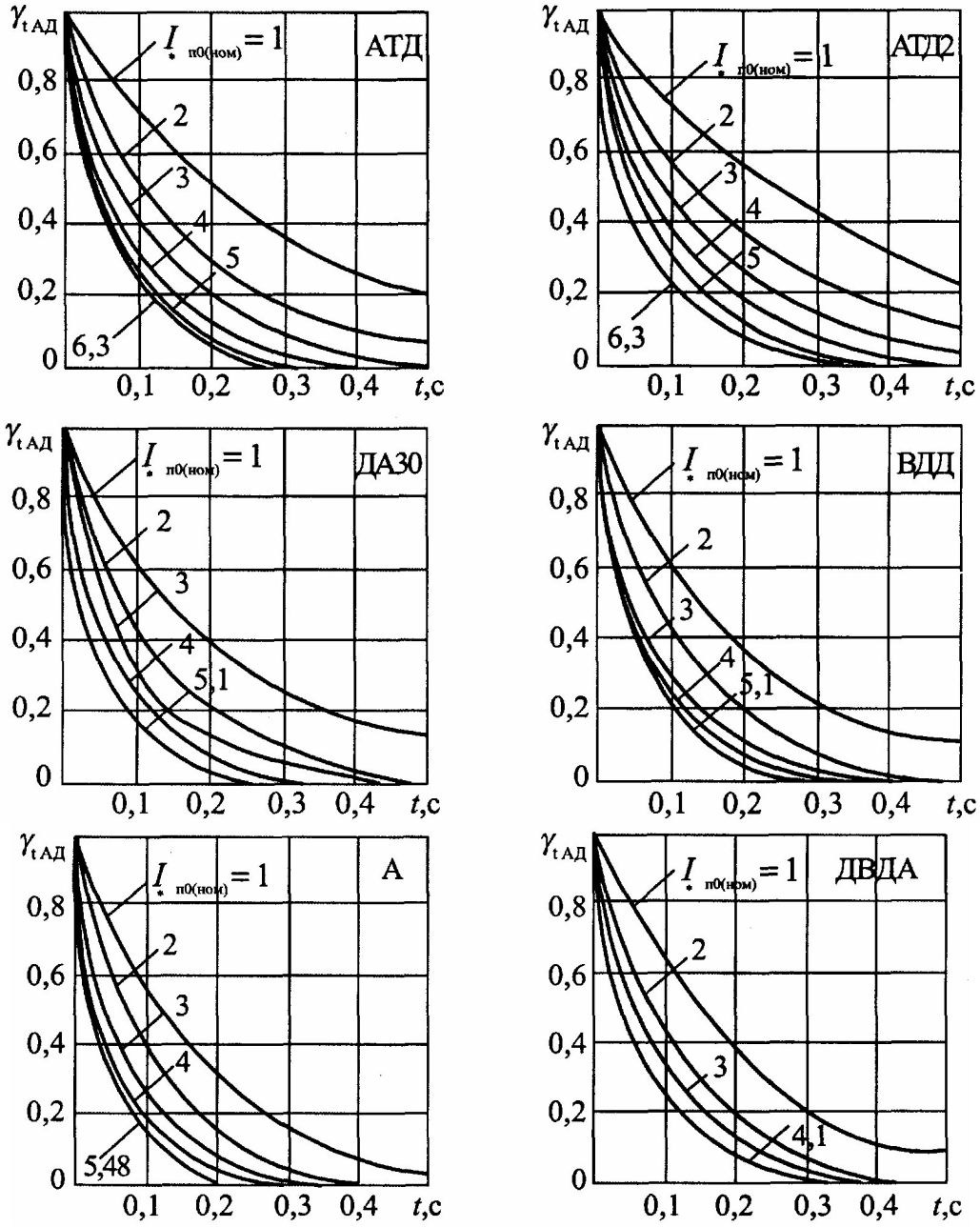
Расчет действующего значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от группы синхронных явнополюсных или асинхронных

электродвигателей с учетом влияния удаленных от расчетной точки КЗ источников энергии, но связанных с точкой КЗ общим для этих источников и электродвигателей сопротивлением $X_к$ (ветвь КЗ) рекомендуется проводить в следующей последовательности:

1) группу подлежащих учету синхронных явнополюсных или асинхронных электродвигателей заменить одним эквивалентным электродвигателем, номинальная мощность которого равна сумме номинальных мощностей заменяемых электродвигателей, т.е. $S_{ном.эк} = \sum_{i=1}^{i=n} S_{номi}$, где n - число электродвигателей в группе; $S_{номi}$ - номинальная мощность i-го электродвигателя, МВ·А;

2) по исходной расчетной схеме составить соответствующую схему замещения для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ, преобразовать ее в эквивалентную Т-образную схему и определить параметры ветвей последней - ветви двигательной нагрузки (без учета сопротивления двигателей) $X_д$, ветви системы $X_с$ и ветви КЗ общей для двигателей и системы - $X_к$ (см. схемы в верхней части рис. *12* и *13*);

3) вычислить периодическую составляющую тока от эквивалентного электродвигателя в начальный момент КЗ при принятых базисных условиях:



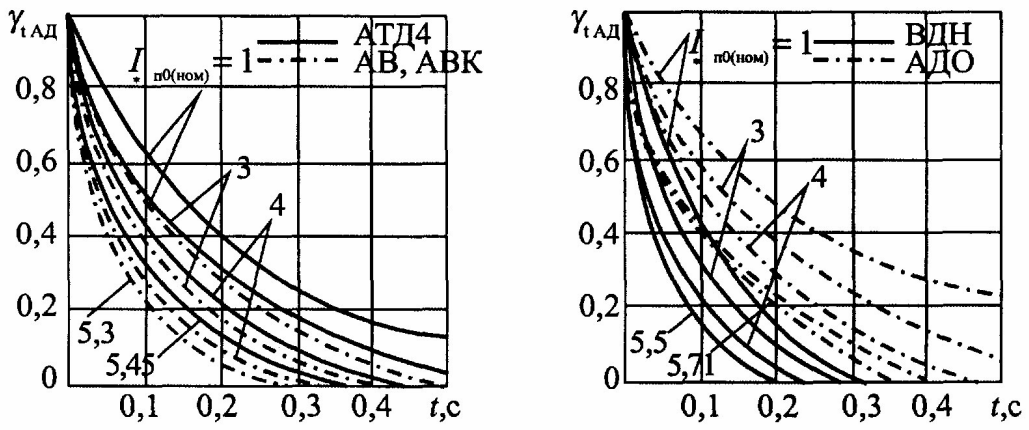


Рис. 11. Типовые кривые изменения тока КЗ от эквивалентных АД

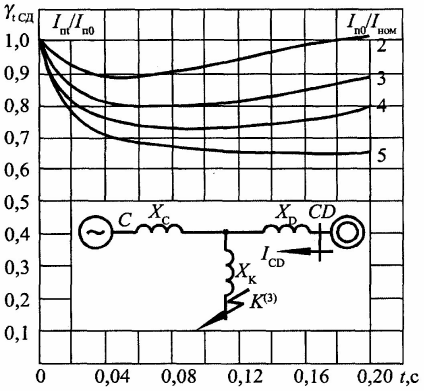


Рис. 12. Кривые для определения тока трехфазного КЗ от эквивалентного СД 6 кВ

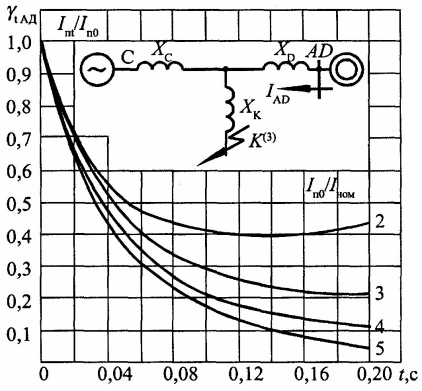


Рис. 13. Кривые для определения тока трехфазного КЗ от эквивалентного АД 6 кВ

$$I_{\text{п0д(б)}} = \frac{E''_{*0\text{д(б)}} - E_{*\text{с(б)}} X_{*\text{к(б)}} / (X_{*\text{с(б)}} + X_{*\text{к(б)}})}{X_{*\text{с(б)}} X_{*\text{к(б)}} / (X_{*\text{с(б)}} + X_{*\text{к(б)}}) + X_{*\text{д(б)}} + X''_{*\text{д(б)}}},$$

где $E''_{*0\text{д(б)}}$ - начальное значение сверхпереходной ЭДС эквивалентного электродвигателя; $E_{*\text{с(б)}}$ - ЭДС удаленных источников энергии (системы); $X''_{*\text{д(б)}}$ - сверхпереходное индуктивное сопротивление эквивалентного электродвигателя;

4) определить значение величины, характеризующей электрическую удаленность расчетной точки КЗ от эквивалентного электродвигателя

$$I_{*\text{ п0(ном)}} = \frac{I_{\text{п0}}}{I_{\text{ном}}} = I_{*\text{ п0д(б)}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном.эк}}};$$

5) по найденному значению $I_{*\text{ п0(ном)}}$ на рис. *5.12* или рис. *5.13* (в зависимости от типа электродвигателей) выбрать соответствующую типовую кривую (возможна линейная экстраполяция между смежными кривыми) и для заданного момента времени *t* определить коэффициент γ_t;

6) определить действующее значение периодической составляющей тока эквивалентного электродвигателя в момент времени *t*

$$I_{*\text{ пtд(б)}} = \gamma_t I_{*\text{ п0д(б)}};$$

7) вычислить искомое действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ в момент времени *t*

$$I_{\text{кt}} = \frac{E_{*\text{ с(б)}} - I_{*\text{ пtд(б)}} X_{*\text{ с(б)}}}{X_{*\text{ с(б)}} + X_{*\text{ к(б)}}} I_{\text{б}},$$

где $I_{\text{б}}$ - базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится точка КЗ.

Учет комплексной нагрузки при расчете токов короткого замыкания

При расчетах токов КЗ следует учитывать влияние каждой комплексной нагрузки, если ток в месте КЗ от той нагрузки составляет не менее 5 % тока в месте КЗ, определенного без учета нагрузки.

В общем случае ток КЗ от комплексной нагрузки следует определять как геометрическую сумму токов от отдельных ее элементов.

В приближенных расчетах допускается эквивалентирование комплексной нагрузки с представлением ее в виде эквивалентной ЭДС и эквивалентного сопротивления.

Эквивалентное сопротивление прямой (обратной) последовательности $Z_{*\,1\text{нг(ном)}}$, $Z_{*\,2\text{нг(ном)}}$ в относительных единицах в зависимости от относительного состава потребителей узла при номинальных условиях допускается рассчитывать по формуле

$$Z_{*\,1\text{нг(ном)}} = S_{\Sigma}\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\frac{S_{\text{i}}}{\sqrt{R_{*\,1\text{i(ном)}}^{2}+X_{*\,1\text{i(ном)}}^{2}}}},$$

где $R_{*\,1\text{i(ном)}}$ и $X_{*\,1\text{i(ном)}}$ - активная и индуктивная составляющие сопротивления прямой (обратной) последовательности *i*-го потребителя, включая составляющие сопротивления элементов, связывающих потребителя с шинами узла; их значения в относительных единицах при суммарной номинальной мощности нагрузка S_{Σ}, кВ·А, и среднем номинальном напряжении той ступени напряжения сети, где она присоединена, приведены в табл.;

S_{i} - полная установленная мощность *i*-го потребителя нагрузки, кВ·А.

Таблица 1 - Параметры элементов комплексной нагрузки

Потребители комплексной нагрузки	Значение эквивалентной ЭДС	cos φ	Сопротивление, отн.ед.	
			прямой последовательности	обратной последовательности
Синхронные двигатели напряжением свыше 1 кВ	1,074	0,9	0,04 + *j*0,15	0,04 + *j*0,15
Синхронные двигатели напряжением до 1 кВ	1,079	0,9	0,03 + *j*0,16	0,03 + *j*0,16
Асинхронные двигатели напряжением свыше 1 кВ	0,93	0,87	0,01 + *j*0,17	0,01 + *j*0,17
Асинхронные двигатели напряжением до 1 кВ	0,9	0,8	0,07 + *j*0,18	0,07 + *j*0,18
Лампы накаливания	0	1,0	1,0	1,33
Газоразрядные источники света	0	0,85	0,85 + *j*0,53	0,382 + *j*0,24
Преобразователи	0	0,9	0,9 + *j*0,45	1,66 + *j*0,81
Электротермические установки	0	0,9	1 + *j*0,49	0,4 + *j*0,2

Метод расчета тока КЗ от комплексной нагрузки зависит от характера исходной схемы замещения узла и положения точки КЗ (рис. *14*). При радиальной расчетной схеме (рис. *14, б*) допускается не учитывать влияние статических потребителей (преобразователей, электротермических установок и др.). При КЗ за общим сопротивлением для различных потребителей узла нагрузки (рис. *14, в*) начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ рекомендуется определять с учетом влияния двигательной и статической нагрузки, используя выражение $\dot{I}_{\text{п0нг}} = \dot{E}''_{\text{нг}} /(\underline{Z}_{\text{нг}} + \underline{Z}_{\text{вш}})$, где $\dot{E}''_{\text{нг}}$ и $\underline{Z}_{\text{нг}}$ - результирующая ЭДС и сопротивление узла нагрузки. Их значения можно определить по данным табл., в зависимости от относительного состава потребителей; $\underline{Z}_{\text{вш}}$ - внешнее сопротивление до точки КЗ.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени с учетом электродвигателей и статической нагрузки узла рекомендуется определять как $I_{\text{пtнг}} = I_{\text{пtд}} - I_{\text{ст}}$, где $I_{\text{пtд}}$ - периодическая составляющая тока КЗ в произвольный момент времени от электродвигателей. Она определяется с использованием соответствующих типовых кривых; $I_{\text{ст}}$ - суммарный ток статических потребителей до КЗ.

При КЗ за общим для узла нагрузки и системы сопротивлением (рис. *5.14, г*) начальное значение периодической составляющей тока в точке трехфазного КЗ следует определять по формуле

$$\dot{I}_{\text{п0к}} = \frac{(\dot{E}_{\text{с}} \underline{Z}_{\text{нг}} + \dot{E}''_{\text{нг}} \underline{Z}_{\text{с}})}{\underline{Z}_{\text{с}} \underline{Z}_{\text{нг}} + \underline{Z}_{\text{с}} \underline{Z}_{\text{к}} + \underline{Z}_{\text{нг}} \underline{Z}_{\text{к}}},$$

где $\dot{E}_{\text{с}}$ и $\dot{E}''_{\text{нг}}$ - ЭДС соответственно системы и узла нагрузки; $\underline{Z}_{\text{с}}$ - результирующее сопротивление со стороны системы до сборных шин узла (см. рис. *14, г*); $\underline{Z}_{\text{нг}}$ - эквивалентное сопротивление нагрузки, включая цепь ее подключения; $\underline{Z}_{\text{к}}$ - эквивалентное сопротивление элементов, включенных между точкой КЗ и шинами узла нагрузки.

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ от узла нагрузки

$$\dot{I}_{\text{п0нг}} = \frac{(\dot{E}''_{\text{нг}} - \dot{U}_{\text{м}})}{\underline{Z}_{\text{нг}}},$$

где $\dot{U}_{\text{м}}$ - напряжение в точке *М* (рис. *14, г*): $\dot{U}_{\text{м}} = \dot{I}_{\text{п0к}} \underline{Z}_{\text{к}}$.

Значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от узла нагрузки следует рассчитывать с учетом влияния электродвигателей по формулам (5.25), причем коэффициенты $\gamma_{\text{tсд}}$ и $\gamma_{\text{tад}}$ рекомендуется определять по расчетным кривым, приведенным на рис. *5.15* и *5.16*, в зависимости от значения напряжения в точке *М*..

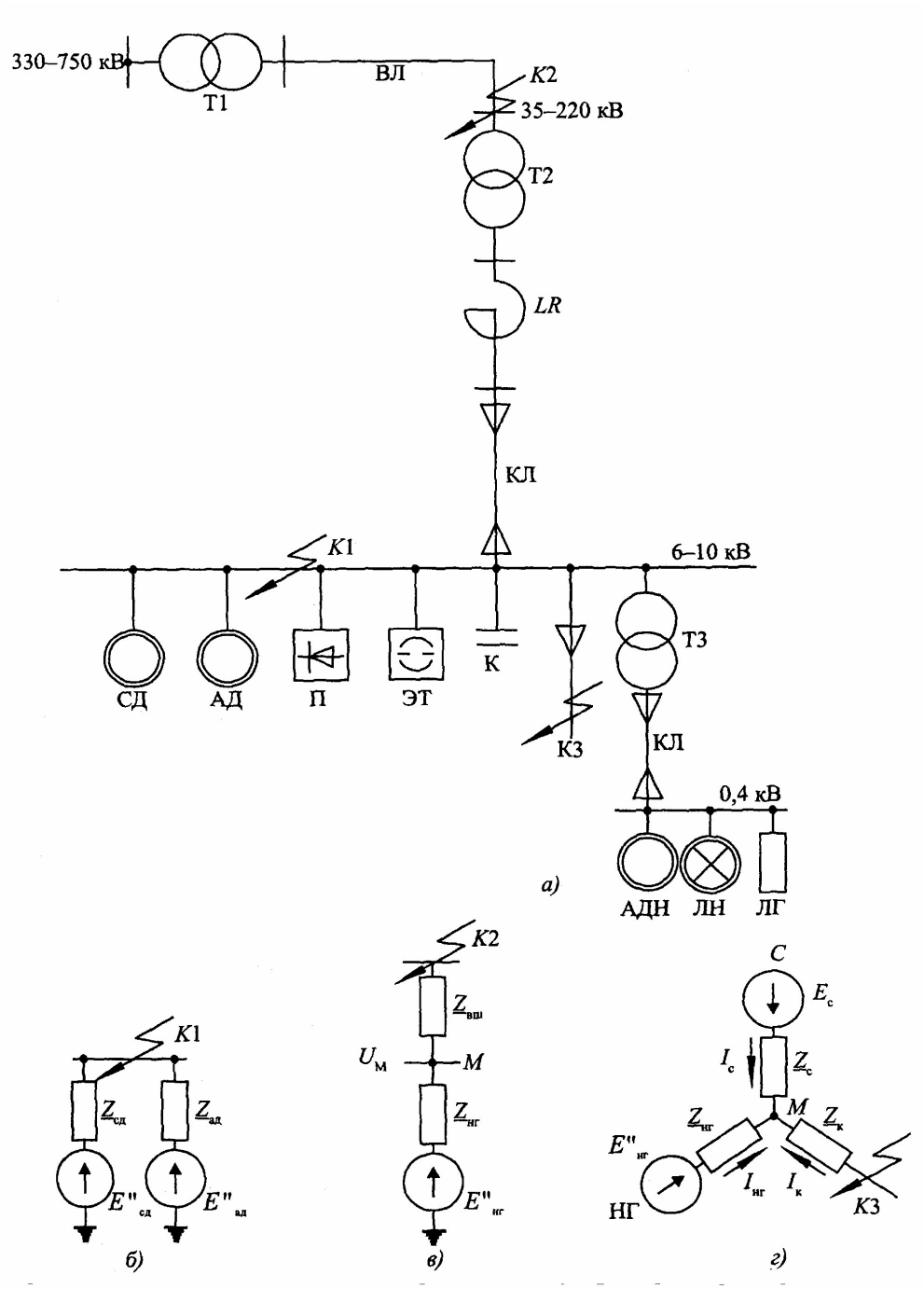


Рис. 14. Схема узла комплексной нагрузки и ее преобразование

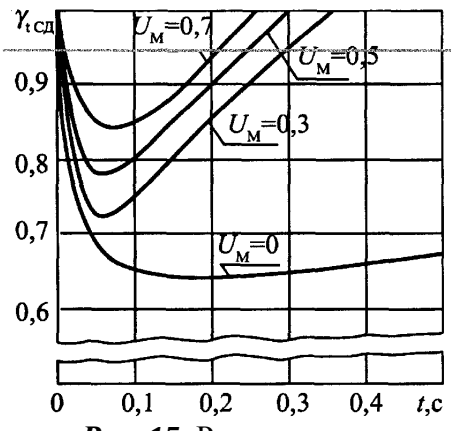


Рис. 15. Расчетные кривые для СД

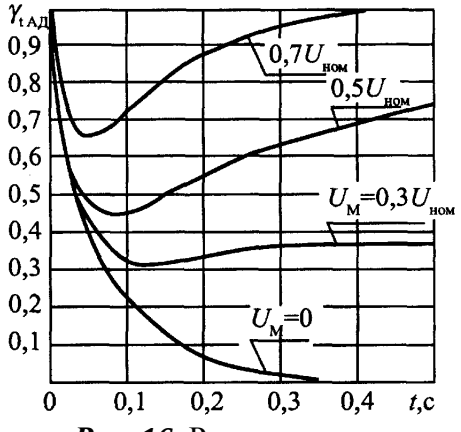


Рис. 16. Расчетные кривые для АД

Примеры расчетов токов короткого замыкания

Определить значение периодической составляющей тока через 0,2 с после момента трехфазного КЗ за блоком генератор-трансформатор.

Параметры генератора типа ТВФ-110-2ЕУЗ: $P_{ном}$ = 110 МВт; cos $\varphi_{ном}$ = 0,8; $U_{ном}$ = 10,5 кВ; $X''_{*d(ном)}$ = 0,189; до КЗ генератор работал с номинальной нагрузкой, т.е. $I_{(0)}/I_{ном}$ = 1.

Параметры трансформатора типа ТДЦ-125000/110: $U_к$ = 10,5 %; n = 115/10,5 кВ.

Расчеты проведем в относительных единицах при следующих базисных условиях: $S_б = P_{ном}/\cos\varphi_{ном}$ = 110/0,8 = 137,5 МВ·А;

базисные напряжения на сторонах обмоток высшего и низшего напряжений трансформатора принимаем соответственно равными: $U_{б.в}$ =115 кВ; $U_{б.н}$ = 10,5 кВ; базисный ток на стороне обмотки высшего напряжения

$$I_{б.в} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{б.в}} = \frac{137,5}{\sqrt{3}\cdot 115} = 0,69 \text{ кА}.$$

При указанных условиях по формуле

$$E''_{*о(б)} = \sqrt{(1+1\cdot 0,189\cdot 0,6)^2 + (1\cdot 0,189\cdot 0,8)^2}\cdot\frac{10,5}{10,5} = 1,1236;$$

индуктивные сопротивления генератора и трансформатора соответственно равны

$$X_{*Г(б)} = X''_{*d(ном)}\frac{S_б}{S_{ном}} = 0,189\frac{137,5}{137,5} = 0,189;$$

$$X_{*Т(б)} = \frac{U_к}{100}\cdot\frac{S_б}{S_{ном}} = \frac{10,5}{100}\cdot\frac{137,5}{125} = 0,1155,$$

поэтому $X_{*Σ(б)} = X_{*Г(б)} + X_{*Т(б)} = 0,189 + 0,1155 = 0,3045$.

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ

$$I_{*п0(б)} = \frac{E''_{*О(б)}}{X_{*Σ(б)}} = \frac{1,1236}{0,3045} = 3,69,$$

поэтому

$$I_{*п0(ном)} = I_{*п0(б)}\frac{S_б}{S_{ном}} = 3,69\frac{137,5}{137,5} = 3,69.$$

В соответствии с кривыми на рис. *1* при t = 0,2 с коэффициент γ_t = 0,82, поэтому $I_{пt} = \gamma_t I_{*п0(б)} I_{б.в} = 0,82\cdot 3,69\cdot 0,69 = 2,088$ кА.

Расчет токов короткого замыкания в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ

Принимаемые допущения

При расчетах токов КЗ в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ допускается:

1) использовать упрощенные методы расчетов, если их погрешность не превышает 10%;
2) максимально упрощать и эквивалентировать всю внешнюю сеть по отношению к месту КЗ и индивидуально учитывать только автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту КЗ;
3) не учитывать ток намагничивания трансформаторов;
4) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;
5) принимать коэффициенты трансформации трансформаторов равными отношению средних номинальных напряжений тех ступеней напряжения сетей, которые связывают трансформаторы. При этом следует использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений: 37; 24; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23;

6) не учитывать влияние синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки, если их суммарный номинальный ток не превышает 1,0% начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ, рассчитанного без учета электродвигателей или комплексной нагрузки.

Расчет начального значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания

Токи КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ рекомендуется рассчитывать в именованных единицах.

При составлении эквивалентных схем замещения параметры элементов исходной расчетной схемы следует приводить к ступени напряжения сети, на которой находится точка КЗ, а активные и индуктивные сопротивления всех элементов схемы замещения выражать в миллиомах.

Методика расчета начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ в электроустановках до 1 кВ зависит от способа электроснабжения - от энергосистемы или от автономного источника.

При расчете токов КЗ в электроустановках, получающих питание непосредственно от сети энергосистемы, допускается считать, что понижающие трансформаторы подключены к источнику неизменного по амплитуде напряжения через эквивалентное индуктивное сопротивление.

Значение этого сопротивления ($X_с$), мОм, приведенное к ступени низшего напряжения сети, следует рассчитывать по формуле

$$X_с = \frac{U_{ср.НН}}{\sqrt{3} I_{к.ВН} \cdot U_{ср.ВН}} = \frac{U_{ср.НН}}{S_к} 10^{-3},$$

где $U_{ср.НН}$ - среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке низшего напряжения трансформатора, В;

$U_{ср.ВН}$ - среднее номинальное напряжение сети, к которой подключена обмотка высшего напряжения трансформатора. В;

$I_{к.ВН} = I_{п0ВН}$ - действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, кА;

$S_к$ - условная мощность короткого замыкания у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВ·А.

При отсутствии указанных данных эквивалентное индуктивное сопротивление системы в миллиомах допускается рассчитывать по формуле

$$X_с = \frac{U^2_{ср.НН}}{\sqrt{3} I_{откл.ном} \cdot U_{ср.ВН}},$$

где $I_{откл.ном}$ - номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора.

В случаях, когда понижающий трансформатор подключен к сети энергосистемы через реактор, воздушную или кабельную линию (длиной более 1 км), необходимо учитывать не только индуктивные, но и активные сопротивления этих элементов.

При электроснабжении электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ ($I_{п0}$) в килоамперах без учета подпитки от электродвигателей следует рассчитывать по формуле

$$I_{п0} = \frac{U_{ср.НН}}{\sqrt{3}\sqrt{R^2_{1\Sigma} + X^2_{1\Sigma}}},$$

где $U_{ср.НН}$ - среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло короткое замыкание, В; $R_{1\Sigma}$, $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм. Эти сопротивления равны:

$$R_{1\Sigma} = R_{т} + R_{р} + R_{тА} + R_{кв} + R_{ш} + R_{к} + R_{1кб} + R_{вл} + R_{д}$$

и

$$X_{1\Sigma} = X_{с} + X_{т} + X_{р} + X_{тА} + X_{кв} + X_{ш} + X_{1кб} + X_{вл}$$

где $X_{с}$ - эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, мОм, приведенное к ступени низшего напряжения;

$R_{т}$ и $X_{т}$ - активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности понижающего трансформатора, мОм, приведенные к ступени низшего напряжения сети, их рассчитывают по формулам:

$$R_{т} = \frac{P_{к.ном} U^2_{ННном}}{S^2_{т.ном}} 10^6; \quad X_{т} = \sqrt{u^2_{к} - \left(\frac{100 P_{к.ном}}{S т.ном}\right)^2} \frac{U^2_{ННном}}{S_{т.ном}} 10^4,$$

где $S_{т.ном}$ - номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$P_{к.ном}$ - потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт;

$U_{ННном}$ - номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;

$u_{к}$ - напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$R_{тА}$ и $X_{тА}$ - активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока, мОм, значения которых приведены в приложении 5 ГОСТ Р 50270-92;

$R_{р}$ и $X_{р}$ - активное и индуктивное сопротивления реактора, мОм.

Активное сопротивление токоограничивающего реактора следует рассчитывать по формуле

$$R_{р} = \frac{\Delta P_{р.ном}}{I^2_{р.ном}} 10^3,$$

где $\Delta P_{р.ном}$ - потери активной мощности в фазе реактора при номинальном токе, Вт;

$I_{р.ном}$ - номинальный ток реактора, А.

Индуктивное сопротивление реактора ($X_{р}$) следует принимать, как указано изготовителем, или определять по формуле

$$X_{р} = \omega_{с}(L - M) \cdot 10^3,$$

где $\omega_{с} = 2\pi f$ - угловая частота напряжения сети, рад/с;

L - индуктивность катушки реактора, Гн;

M - взаимная индуктивность между фазами реактора, Гн;

$R_{кв}$ и $X_{кв}$ - активное и индуктивное сопротивления токовых катушек и переходных сопротивлений подвижных контактов автоматических выключателей, мОм, значения которых приведены в приложении 6 ГОСТ Р 50270-92;

$R_{ш}$ и $X_{ш}$ - активное и индуктивное сопротивления шинопроводов, мОм. Рекомендуемый метод расчета сопротивлений шинопроводов и параметры некоторых комплектных шинопроводов приведены в приложении 1 ГОСТ Р 50270-92;

$R_{к}$ - суммарное активное сопротивление различных контактов и контактных соединений, данные о которых приведены в приложении 4 ГОСТ Р 50270-92. При приближенном учете сопротивлений контактов следует принимать: $R_{к}$ = 0,1 мОм - для контактных соединений кабелей; $R_{к}$ = 0,01 мОм - для шинопроводов; $R_{к}$ = 1,0 мОм - для коммутационных аппаратов;

$R_{1кб}$ и $X_{1кб}$ - активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности кабелей, значения которых приведены в приложении 2 ГОСТ Р 50270-92;

$R_{1вл}$ и $X_{1вл}$ - активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности воздушных линий или проводов, проложенных открыто на изоляторах, значения которых приведены в приложении 3 ГОСТ Р 50270-92;

$R_{д}$ - активное сопротивление дуги в месте КЗ, мОм, рассчитываемое, как указано в п.6.8, в зависимости от условий КЗ.

Если электроснабжение электроустановки осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор и вблизи места КЗ имеются синхронные и асинхронные

электродвигатели или комплексная нагрузка, то начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учетом подпитки от электродвигателей или комплексной нагрузки следует определять как сумму токов от энергосистемы и от электродвигателей или комплексной нагрузки.

В электроустановках с автономными источниками электроэнергии начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ без учета подпитки от электродвигателей в килоамперах следует рассчитывать по формуле

$$I_{\text{п0}} = \frac{E''_{\text{ф}}}{\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}},$$

где $R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления цепи КЗ, мОм.

Эти сопротивления равны:

$$R_{1\Sigma} = R_{\text{ст}} + R_{\text{тА}} + R_{\text{кв}} + R_{\text{р}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{к}} + R_{1\text{кб}} + R_{1\text{вл}} + R_{\text{д}};$$

$$X_{1\Sigma} = X''_{\text{d}} + X_{\text{тА}} + X_{\text{кв}} + X_{\text{р}} + X_{\text{ш}} + X_{1\text{кб}} + X_{1\text{вл}},$$

где $E''_{\text{ф}}$ - сверхпереходная ЭДС (фазное значение) автономного источника, В.

Значение этой ЭДС следует рассчитывать как и для синхронных электродвигателей;

X''_{d} - сверхпереходное сопротивление по продольной оси ротора;

$R_{\text{ст}}$ - активное сопротивление обмотки статора автономного источника.

При необходимости учета синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки в автономной электрической системе начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ следует определять как сумму токов от автономных источников и от электродвигателей или комплексной нагрузки.

Расчет апериодической составляющей тока короткого замыкания

Наибольшее начальное значение апериодической составляющей тока КЗ в общем случае следует считать равным амплитуде периодической составляющей тока в начальный момент КЗ: $i_{\text{a0}} = \sqrt{2} I_{\text{п0}}$.

В радиальных сетях апериодическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять по формуле $i_{\text{at}} = i_{\text{a0}} e^{-\text{t/Ta}}$,

где t - время, с; T_{a} - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, с, равная $T_{\text{a}} = \frac{X_{\Sigma}}{\omega_{\text{c}} R_{\Sigma}}$, где X_{Σ} и R_{Σ} - результирующие индуктивное и активное сопротивления цепи КЗ, мОм; ω_{c} - синхронная угловая частота напряжения сети, рад/с.

При определении X_{Σ} и R_{Σ} синхронные генераторы, синхронные и асинхронные электродвигатели должны быть введены в схему замещения.

Комплексная нагрузка должна быть введена в схему замещения .

Если точка КЗ делит расчетную схему на радиальные, независимые друг от друга ветви, то апериодическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять как сумму апериодических составляющих токов отдельных ветвей.

Расчет ударного тока короткого замыкания

Ударный ток трехфазного КЗ в электроустановках с одним источником энергии (энергосистема или автономный источник) рассчитывают по формуле

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} I_{\text{п0}} \left(1 + e^{\frac{-t_{\text{уд}}}{\text{Ta}}}\right) = \sqrt{2} I_{\text{п0}} K_{\text{уд}},$$

где $K_{уд} = \left(1 + e^{\frac{-t_{уд}}{Ta}}\right)$ - ударный коэффициент, который может быть определен по кривым на рис. *1*; T_a - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ: $t_{уд}$ - время от начала КЗ до появления ударного тока, с, равное $t_{уд} = 0{,}001\frac{\frac{\pi}{2} + \varphi_к}{\pi}$; $\varphi_к = \text{arctg}\, X_{1\Sigma} / R_{1\Sigma}$.

При необходимости учета синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки ударный ток КЗ следует определять как сумму ударных токов от автономных источников и от электродвигателей или от комплексной нагрузки.

Если точка КЗ делит расчетную схему на радиальные, независимые друг от друга ветви, то ударный ток КЗ допустимо определять как сумму ударных токов отдельных ветвей по формуле

$$i_{уд} = \sum_{i=1}^{m} \sqrt{2} I_{п0i} \left(1 + e^{\frac{-t_{удi}}{T_{ai}}}\right),$$

где m - число независимых ветвей схемы; $I_{п0i}$ - начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в i-й ветви, кА; $t_{удi}$ - время появления ударного тока в i-й ветви, с; T_{ai} - постоянная времени затухания апериодической составляющей в i-й ветви, с.

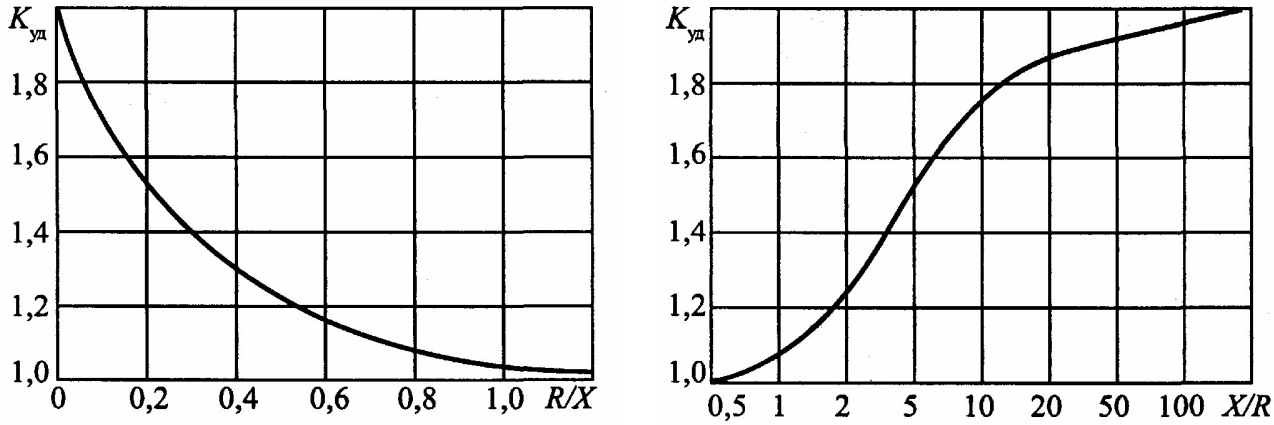


Рис. 1. Кривые зависимости ударного коэффициента $K_{уд}$ от отношений R/X и X/R

Расчет периодической составляющей тока КЗ для произвольного момента времени

Методика расчета периодической составляющей тока трехфазного КЗ для произвольного момента времени в электроустановках до 1 кВ зависит от способа электроснабжения - от энергосистемы или от автономного источника.

При электроснабжении электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени в килоамперах без учета подпитки от электродвигателей следует определять по формуле

$$I_{\text{пt}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{3}\sqrt{X_{1\Sigma}^2 + (R_{1\Sigma} + R_{\text{дt}} + R_{\text{кбдt}})^2}},$$

где $U_{\text{ср.НН}}$ - среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло КЗ, В;

$X_{1\Sigma}$, $R_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм, без учета активного сопротивления электрической дуги и кабельной (воздушной) линии;

$R_{\text{дt}}$ - активное сопротивление дуги в месте КЗ в произвольный момент времени, мОм;

$R_{1\text{кбдt}}$ - активное сопротивление прямой последовательности кабельной линии к моменту t с учетом нагрева его током КЗ, мОм.

Если электроснабжение электроустановки осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор и вблизи места КЗ имеются синхронные и асинхронные электродвигатели или комплексная нагрузка, связанные с точкой КЗ по радиальной схеме, то действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени следует определять как сумму токов от энергосистемы и от электродвигателей или комплексной нагрузки.

В электроустановках с автономными источниками электроэнергии уточненный расчет периодической составляющей тока КЗ от источников электроэнергии (синхронных генераторов) в произвольный момент времени следует выполнять путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов с использованием ЭВМ и выделения периодической составляющей. В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ при радиальной схеме следует применять типовые кривые, приведенные на рис.*2*.

Типовые кривые разработаны на базе параметров схемы замещения эквивалентного генератора, полученных в результате эквивалентирования синхронных генераторов напряжением 230/400 В различных серий, а именно: МСК-1500 (400 В); МСК-1500 (230 В); МС-1500 (400 В); МС-1500 (230 В); МС-1000 (400 В); МС-1000 (230 В); СГДС (400 В); ЕСС, ЕСС5 (230 В); ЕСС, ЕСС5 (400 В); ГСФ5; ГМ; СВГ; СГ и др.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от синхронного генератора (или нескольких однотипных синхронных генераторов, находящихся в одинаковых условиях по отношению к точке КЗ) следует определять по формуле

$$I_{\text{пt}} = \gamma_{\text{t}} I_{*\ \text{п0(ном)}} I_{\text{ном}},$$

причем при нескольких генераторах под номинальным током следует понимать сумму номинальных токов всех генераторов.

При необходимости учета синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки в автономной электрической системе действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени при радиальной схеме связи двигателей с точкой КЗ следует определять как сумму токов от автономных источников и от электродвигателей или комплексной нагрузки.

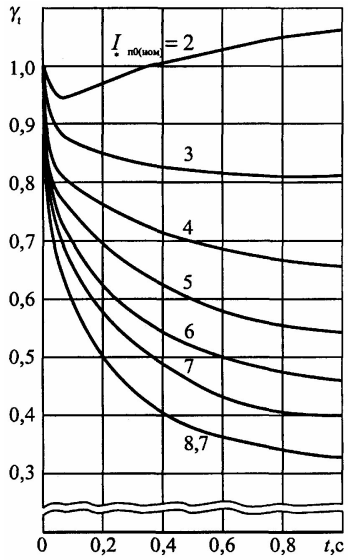


Рис. 2. Типовые кривые для синхронного генератора автономных систем электроснабжения напряжением 400/230 В

Учет синхронных и асинхронных электродвигателей при расчете токов КЗ

При расчете начального значения периодической составляющей тока КЗ синхронные электродвигатели следует учитывать сверхпереходным сопротивлением по продольной оси ротора (X''_d), а при определении постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ — индуктивным сопротивлением для токов обратной последовательности X_2 и активным сопротивлением обмотки статора $R_{СД}$. При приближенных расчетах допустимо принимать $X''_{*\,d(ном)} = 0{,}15$; $X_2 = X''_d$; $R_{СД} = 0{,}15X''_d$.

В радиальной схеме начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от синхронных электродвигателей следует определять по формуле

$$I_{п0СД} = \frac{E''_{ф.СД}}{\sqrt{(X''_d + X_{1\Sigma})^2 + (R_{СД} + R_{1\Sigma})^2}},$$

где $E''_{ф.СД}$ - сверхпереходная ЭДС синхронного электродвигателя (фазное значение), В; X''_d и $R_{СД}$ - соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления электродвигателя, мОм; $R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления прямой последовательности цепи, включенной между электродвигателем и расчетной точкой КЗ, мОм.

Для синхронных электродвигателей, которые до КЗ работали с перевозбуждением, сверхпереходную ЭДС в вольтах следует рассчитывать по формуле

$$E''_{ф.СД} = \sqrt{(U_{ф|0|}\cos\varphi_{|0|} + I_{|0|}R_{СД})^2 + (U_{|0|}\sin\varphi_{|0|} + I_{|0|}X''_d)^2}.$$

Для синхронных электродвигателей, работавших до КЗ с недовозбуждением, сверхпереходную ЭДС ($E''_{ф.СД}$), в вольтах, следует определять по формуле

$$E''_{ф.СД} = \sqrt{(U_{ф|0|}\cos\varphi_{|0|} + I_{|0|}R_{СД})^2 + (U_{|0|}\sin\varphi_{|0|} - I_{|0|}X''_d)^2}.$$

При расчетах начального значения периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей последние следует вводить в схему замещения сверхпереходным индуктивным сопротивлением. При необходимости проведения уточненных расчетов следует также учитывать активное сопротивление асинхронного электродвигателя.

Суммарное активное сопротивление, характеризующее асинхронный электродвигатель в начальный момент КЗ в миллиомах, допустимо рассчитывать по формуле

$$R_{АД} = R_1 + 0{,}96R_2^{\circ},$$

где R_1 - активное сопротивление статора, мОм;

$\overset{\circ}{R}_2$ - активное сопротивление ротора, приведенное к статору, мОм. Это сопротивление допустимо определять по формуле

$$\overset{\circ}{R}_2 = \frac{0{,}36 M_{*\,\text{п}}(P_{\text{ном}} + P_{\text{мх}})}{I_{*\,\text{п}}^2 I_{\text{ном}}^2 (1 - s_{\text{ном}})} 10^6,$$

где $M_{*\,\text{п}}$ - кратность пускового момента электродвигателя по отношению к его номинальному моменту; $P_{\text{ном}}$ - номинальная мощность электродвигателя, кВт; $P_{\text{мх}}$ - механические потери в электродвигателе (включая добавочные потери), кВт; $I_{*\,\text{п}}$ - кратность пускового тока электродвигателя по отношению к его номинальному току; $I_{\text{ном}}$ - номинальный ток электродвигателя, А; $s_{\text{ном}}$ - номинальное скольжение, отн.ед.

Активное сопротивление статора электродвигателя, в миллиомах, если оно не задано изготовителем, допускается определять по формуле $R_1 = \frac{s_{\text{ном}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2 \cos\varphi \eta_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}}$,

где $s_{\text{ном}}$ - номинальное скольжение асинхронного электродвигателя, %.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного электродвигателя в миллиомах равно $X''_{\text{АД}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{ф.ном}}}{I_{*\,\text{п}} I_{\text{ном}}} 10^3\right)^2 - R_{\text{АД}}^2}$,

где $U_{\text{ф.ном}}$ - номинальное фазное напряжение электродвигателя, В.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей в килоамперах следует рассчитывать по формуле

$$I_{\text{п0АД}} = \frac{E''_{\text{ф.АД}}}{\sqrt{(X''_{\text{АД}} + X_{1\Sigma})^2 + (R_{\text{АД}} + R_{1\Sigma})^2}},$$

где $X''_{\text{АД}}$ и $R_{\text{АД}}$ - соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления электродвигателя, мОм; $R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления прямой последовательности цепи, включенной между электродвигателем и расчетной точкой КЗ, мОм; $E''_{\text{ф.АД}}$ - сверхпереходная ЭДС асинхронного электродвигателя, которую можно рассчитать по формуле (6.24), заменив в ней $R_{\text{СД}}$ и X''_{d} соответственно на $R_{\text{АД}}$ и $X''_{\text{АД}}$.

Ударный ток трехфазного КЗ от синхронного электродвигателя следует рассчитывать так же, как и от автономного источника.

Ударный ток от асинхронного электродвигателя следует рассчитывать с учетом затухания амплитуды периодической составляющей тока КЗ по формуле

$$i_{\text{удАД}} = \sqrt{2} I_{\text{п0АД}} \left(e^{\frac{-0{,}01}{T\text{р}}} + e^{\frac{-0{,}01}{T\text{а}}} \right),$$

где $T_{\text{р}}$ - расчетная постоянная времени затухания периодической составляющей тока статора, с; $T_{\text{а}}$ - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока статора, с.

Постоянные $T_{\text{р}}$ и $T_{\text{а}}$ допускается рассчитывать по формулам

$$T_{\text{р}} = \frac{X''_{\text{АД}} + X_{1\text{кб}}}{\omega_{\text{с}} \cdot \overset{\circ}{R}_2}; \; T_{\text{а}} = \frac{X''_{\text{АД}} + X_{1\text{кб}}}{\omega_{\text{с}} (R_1 + R_{1\text{кб}})},$$

где $\omega_{\text{с}}$ - синхронная угловая частота, рад/с;

R_1 и $\overset{\circ}{R}_2$ - соответственно активное сопротивление статора и активное сопротивление ротора, приведенное к статору.

Точный расчет действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени выполняют путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов и выделения периодической составляющей тока.

При приближенных расчетах этой составляющей тока КЗ в радиальной схеме используют типовые кривые, приведенные на рис.*3* и *4*.

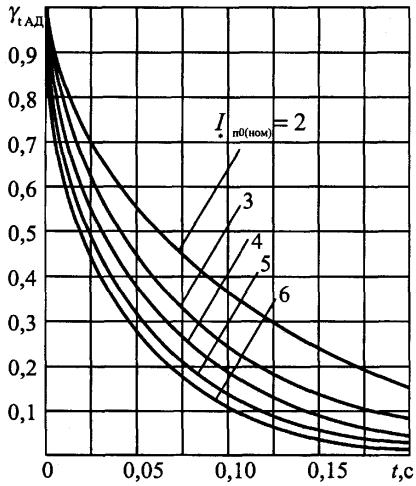


Рис. 3. Типовые кривые для асинхронного электродвигателя напряжением до 1 кВ

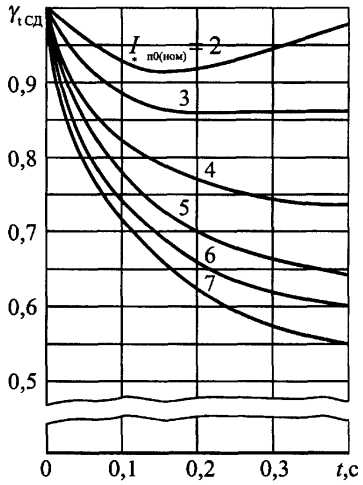


Рис. 4. Типовые кривые для синхронного электродвигателя напряжением до 1 кВ

Типовые кривые асинхронного двигателя (рис.*3*) разработаны на базе параметров схемы замещения эквивалентного асинхронного двигателя, полученных при эквивалентировании следующих серий асинхронных двигателей: А2 6 - 9-го габаритов; АОЛ2; 4А и 4АН; ВАО; АЗ-315; А 3 - 9-го габаритов; АО и АОЛ 2 - 9-го габаритов; А защищенные 10 - 13-го габаритов; АО 8 и 9-го габаритов и др.

Типовые кривые синхронного двигателя (рис. *4*) разработаны также в результате эквивалентирования синхронных двигателей напряжением до 1 кВ.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от синхронного или асинхронного электродвигателя ($I_{\text{пtСД}}$, $I_{\text{пtАД}}$) или нескольких электродвигателей, находящихся в одинаковых условиях по отношению к точке КЗ, следует рассчитывать соответственно по формулам

$$I_{\text{пtСД}} = \gamma_{\text{tСД}} \, I_{*\,\text{п0(ном)}} I_{\text{номСД}};$$

$$I_{\text{пtАД}} = \gamma_{\text{tАД}} \, I_{*\,\text{п0(ном)}} I_{\text{номАД}},$$

причем при нескольких электродвигателях под номинальным током следует понимать сумму номинальных токов всех электродвигателей.

Учет комплексной нагрузки при расчетах токов короткого замыкания

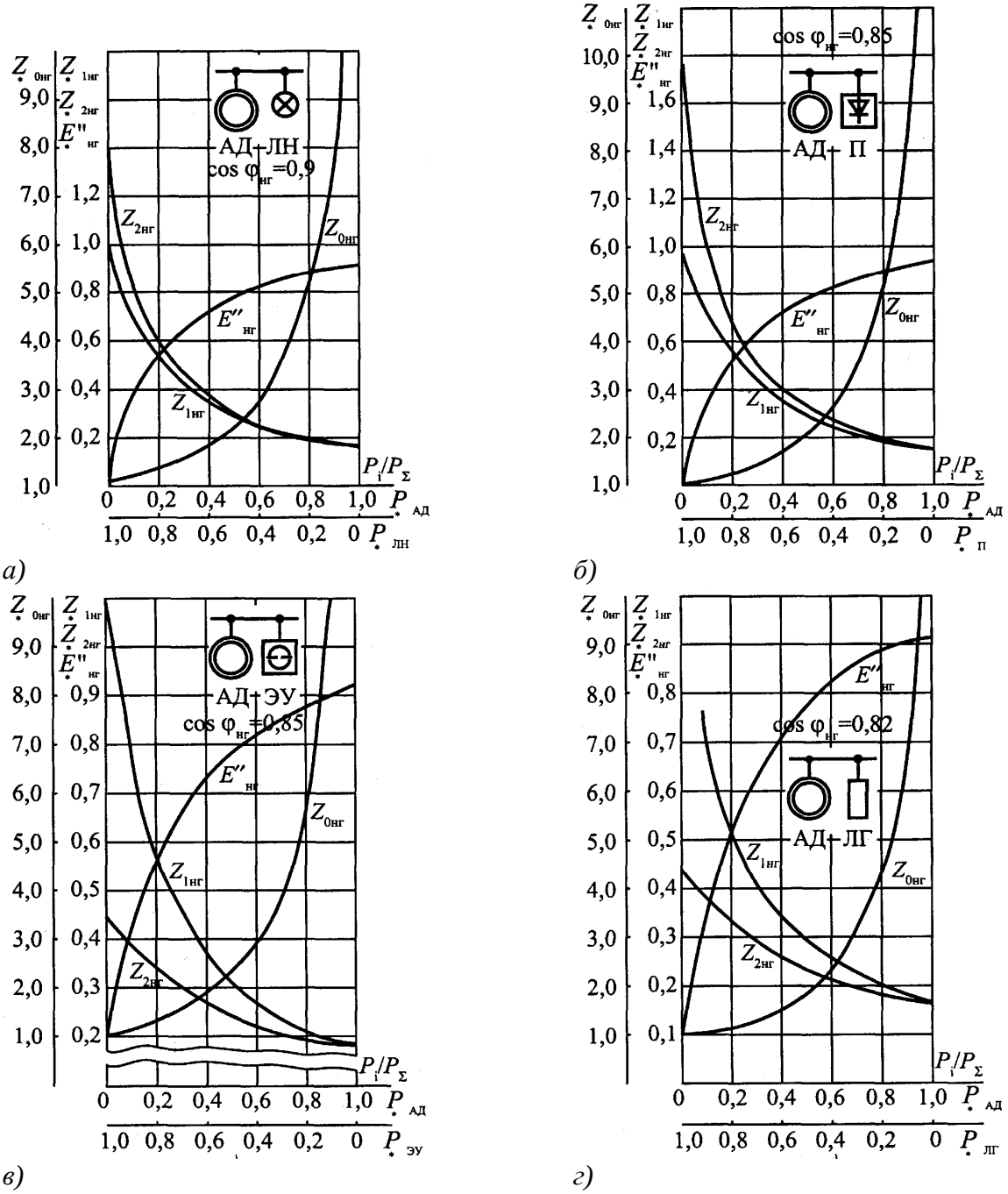
В состав комплексной нагрузки могут входить асинхронные и синхронные электродвигатели, преобразователи, электротермические установки, конденсаторные батареи, лампы накаливания и газоразрядные источники света.

При определении начального значения периодической составляющей тока КЗ комплексную нагрузку в схему замещения прямой последовательности следует вводить эквивалентной сверхпереходной ЭДС *E"* и сопротивлением прямой последовательности $Z_{1\text{нг}}$, а в схему обратной и нулевой последовательностей - сопротивлениями $Z_{2\text{нг}}$ и $Z_{0\text{нг}}$.

Рекомендуемые значения сверхпереходной ЭДС ($E''_{\text{нг}}$), сопротивлений прямой (Z_1) и обратной (Z_2) последовательностей отдельных элементов комплексной нагрузки приведены в табл.

Значения модулей полных сопротивлений $Z_{1нг}$, $Z_{2нг}$ и $Z_{0нг}$, а также эквивалентной сверхпереходной ЭДС комплексной нагрузки $E''_{нг}$ в относительных единицах при отсутствии других, более полных данных, могут быть определены по кривым, приведенным на рис. 5, *а-г* и 6, *а-в* в зависимости от относительного состава потребителей узла нагрузки P_i/P_Σ, где P_Σ - суммарная номинальная активная мощность нагрузки, кВт; P_i - установленная мощность *i*-го потребителя нагрузки, кВт ($P_{*АД}$ - асинхронные двигатели, $P_{*СД}$ - синхронные двигатели, $P_{*ЛН}$ - лампы накаливания, $P_{*ЭУ}$ - электротермические установки, $P_{*ЛГ}$ - газонаполненные лампы, $P_{*П}$ - преобразователи).

На графиках указаны значения cos $\varphi_{нг}$.



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 5. Зависимость параметров комплексной нагрузки $Z_{1нг}$, $Z_{2нг}$, $Z_{0нг}$, $E_{нг}$ от ее состава

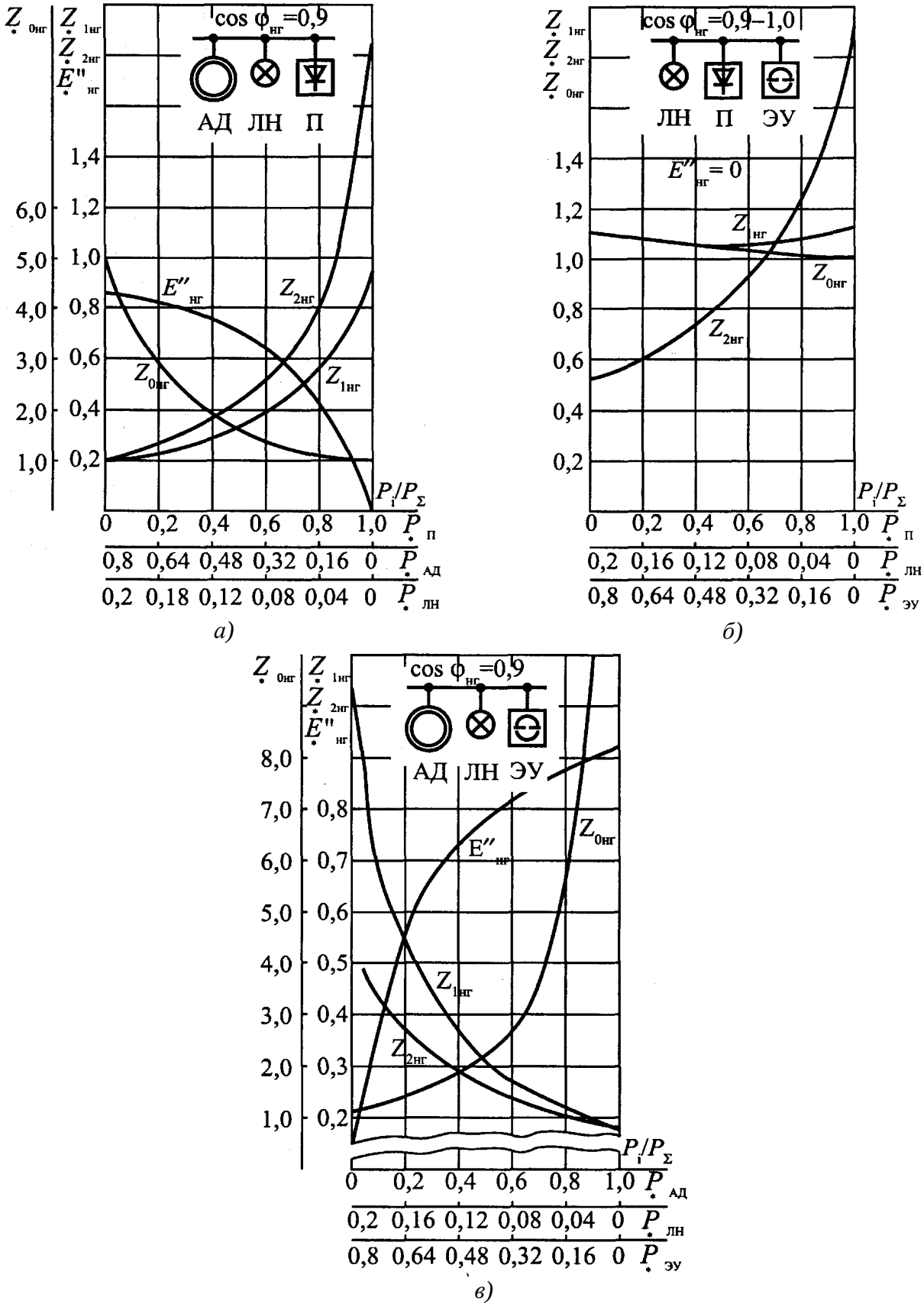


Рис. 6. Зависимость параметров комплексной нагрузки $Z_{1нг}$, $Z_{2нг}$, $Z_{0нг}$, $E_{нг}$ от ее состава

Метод учета комплексной нагрузки зависит от характера исходной схемы замещения комплексной нагрузки (рис. *7*) и положения расчетной точки КЗ. В радиальной схеме допускается не учитывать влияние статических потребителей (преобразователей, электротермических установок, электрического освещения).

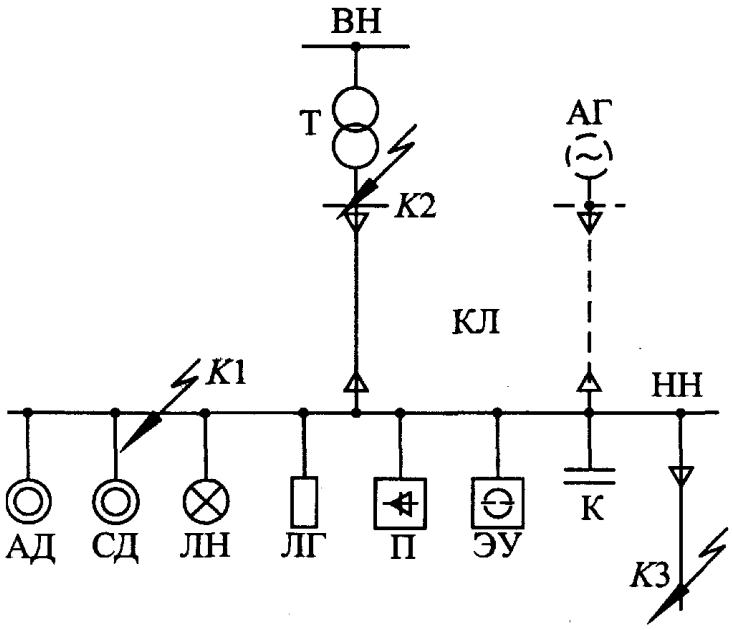


Рис. 7. Типовая расчетная схема узла комплексной нагрузки

АД — асинхронные электродвигатели; СД — синхронные электродвигатели; ЛН — лампы накаливания; ЛГ — лампы газоразрядные; П — преобразователи; ЭУ — электротермические установки; К — конденсаторные батареи; КЛ — кабельная линия; АТ — автономный источник электроэнергии; Т — трансформатор; *К*1, *К*2, *К*З — точки КЗ

При КЗ за общим для узла нагрузки сопротивлением начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ ($I_{п0нг}$) в килоамперах следует определять с учетом влияния двигательной и статической нагрузок, используя формулу

$$I_{п0нг} = \frac{E''_{*\,нг} U_{ср.НН}}{\sqrt{3}\sqrt{\left(Z_{*\,1нг}\frac{U^2_{ср.НН}}{S_\Sigma}\cos\varphi_{нг} + R_{1\Sigma}\right)^2 + \left(Z_{*\,1нг}\frac{U^2_{ср.НН}}{S_\Sigma}\sin\varphi_{нг} + X_{1\Sigma}\right)^2}},$$

где $E''_{*\,нг}$ и $Z_{*\,1нг}$ - эквивалентная ЭДС и сопротивление прямой последовательности узла нагрузки; их значения в относительных единицах следует определять по кривым, приведенным на рис. *5* и *6*, в зависимости от относительного состава потребителей;

$R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления цепи короткого замыкания, мОм;

S_Σ - суммарная номинальная мощность нагрузки, кВ·А;

$U_{ср.НН}$ - среднее номинальное напряжение сети, соответствующей обмотке низшего напряжения трансформатора, В.

При коротком замыкании за общим для нагрузки и системы сопротивлением (рис. *14*, *г*) и одинаковых отношениях *X*/*R* ветвей расчетной схемы начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ допускается рассчитывать по формуле

$$I_{п0к} = \frac{U_{ср.НН}\frac{1}{n_i}Z_{1нг} + E''_{*\,нг(ном)}U_{ср.НН}Z_с}{Z_с \cdot Z_{1нг} + Z_с \cdot Z_к + Z_{1нг} \cdot Z_к},$$

где $E''_{*\,нг(ном)}$ - ЭДС узла нагрузки в относительных единицах;

n_i - коэффициент трансформации трансформатора;

$Z_{1нг}$, $Z_с$, $Z_к$ — модули сопротивлений ветвей исходной схемы замещения (рис. *14*, *г*), причем

$Z_{1нг} = Z_{*\ 1нг(ном)} \dfrac{U^2_{ср.НН}}{S_\Sigma}$; $Z_с = \sqrt{R^2_{1\Sigma} + X^2_{1\Sigma}}$;

$Z_к = \sqrt{R^2_{1\Sigma} + X^2_{1\Sigma}}$; $R_{1\Sigma к}$ и $X_{1\Sigma к}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления цепи КЗ.

Учет сопротивления электрической дуги

Учет электрической дуги в месте КЗ рекомендуется производить введением в расчетную схему активного сопротивления дуги $R_д$, которое определяется на базе вероятностных характеристик влияния устойчивой (непогасающейся) дуги на ток КЗ.

Среднее значение активного сопротивления дуги в начальный момент КЗ допустимо определять по формуле

$$R_д = \sqrt{\frac{U^2_{ср.НН}}{3I^2_{п0}K^2_с} - X^2_{1\Sigma}} - R_{1\Sigma},$$

где $I_{п0}$ - начальное значение периодической составляющей тока в месте металлического КЗ, кА;

$R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления цепи КЗ, мОм;

$K_с$ - среднестатистическое значение поправочного коэффициента, учитывающего снижение тока в начальный момент дугового КЗ по сравнению с током металлического КЗ, который можно определить по формуле

$$K_с = 0{,}6 - 0{,}0025Z_к + 0{,}114\sqrt{Z_к} - 0{,}13\sqrt[3]{Z_к},$$

где $Z_к$ - сопротивление цепи КЗ, зависящее от вида КЗ:

при трехфазном КЗ $Z^{(3)}_к = \sqrt{R^2_{1\Sigma} + X^2_{1\Sigma}}$;

при двухфазном КЗ $Z^{(2)}_к = 2/\sqrt{3}\sqrt{R^2_{1\Sigma} + X^2_{1\Sigma}}$;

при однофазном КЗ $Z^{(1)}_к = 1/3\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}$.

Среднее значение активного сопротивления дуги в произвольный момент времени при устойчивом дуговом КЗ допустимо определять по формуле

$$R_{дt} = \sqrt{\frac{U^2_{ср.НН}}{3I^2_{пt}K^2_{ct}} - X^2_{1\Sigma}} - (R_{1\Sigma} + R_{1кбϑt}),$$

где $I_{пt}$ - действующее значение периодической составляющей тока металлического КЗ в произвольный момент времени с учетом увеличения активного сопротивления цепи КЗ;

$R_{1\Sigma}$ - суммарное активное сопротивление прямой последовательности цепи КЗ, мОм, без учета активного сопротивления кабельной или воздушной линии и сопротивления электрической дуги;

$R_{1кбϑt}$ - активное сопротивление прямой последовательности кабельной или воздушной линии к моменту t, мОм, с учетом нагрева ее током КЗ;

K_{ct} - среднестатистическое значение поправочного коэффициента, учитывающего снижение тока дугового КЗ по сравнению с током металлического КЗ, который можно определить по формуле

$$K_{ct} = 0{,}55 - 0{,}002Z_{кt} + 0{,}1\sqrt{Z_{кt}} - 0{,}12\sqrt[3]{Z_{кt}},$$

где $Z_{кt}$ - сопротивление цепи КЗ, зависящее от вида КЗ:

при трехфазном КЗ $Z^{(3)}_{кt} = \sqrt{(R_{1\Sigma} + R_{1кбϑt})^2 + X^2_{1\Sigma}}$;

при двухфазном КЗ $Z^{(2)}_{кt} = 2/\sqrt{3}\sqrt{(R_{1\Sigma} + R_{1кбϑt})^2 + X^2_{1\Sigma}}$;

при однофазном КЗ $Z^{(1)}_{кt} = 1/3\sqrt{[2(R_{1\Sigma} + R_{1кбϑt}) + R_{0\Sigma}]^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}$.

Расчет максимальных и минимальных значений тока дугового КЗ рекомендуется выполнять на основе предельных значений сопротивления дуги, определяемых по статистическим характеристикам разброса поправочного коэффициента, учитывающего снижение тока дугового КЗ по сравнению с током металлического КЗ.

При определении вероятного значения тока КЗ в начальный момент времени с учетом сопротивления дуги последнее рекомендуется рассчитывать по формуле, в которой коэффициент K_c следует определять в соответствии с выражением:

для максимального значения тока КЗ

$$K_{c\,max} = 0{,}788 + 0{,}353 \cdot 10^{-2} Z_к - 0{,}21 \cdot 10^{-4} Z_к^2 + 0{,}45 \cdot 10^{-7} Z_к^3;$$

для минимального значения тока КЗ

$$K_{c\,min} = 0{,}458 + 0{,}557 \cdot 10^{-2} Z_к - 0{,}247 \cdot 10^{-4} Z_к^2 + 0{,}39 \cdot 10^{-7} Z_к^3.$$

При определении вероятного значения тока КЗ в произвольный момент времени сопротивление дуги рекомендуется рассчитывать по формуле, в которой коэффициент K_{ct} следует определять в соответствии с выражением:

для максимального значения тока КЗ

$$K_{ct\,max} = 0{,}661 + 0{,}319 \cdot 10^{-2} Z_{кt} - 0{,}127 \cdot 10^{-4} Z_{кt}^2 + 0{,}13 \cdot 10^{-7} Z_{кt}^3;$$

для минимального значения тока КЗ

$$K_{ct\,min} = 0{,}339 + 0{,}745 \cdot 10^{-2} Z_{кt} - 0{,}484 \cdot 10^{-4} Z_{кt}^2 + 0{,}13 \cdot 10^{-7} Z_{кt}^3.$$

Примеры расчетов токов короткого замыкания

Требуется определить вероятные максимальное и минимальное значения тока в начальный момент КЗ в точке *К*1 (см. схему на рис.*12*) и к моменту отключения КЗ ($t_{откл}$ = 0,6 с). Исходные данные приведены ниже.

Система С: $S_к$ = 150 МВ·А; $U_{ср.ВН}$ = 6,0 кВ.

Трансформатор типа ТСЗС-1000/6,0: $u_к$ = 8 %; $U_{ВН}$ = 6,3 кВ; $U_{НН}$ = 0,4 кВ; $P_к$ = 11,2 кВт.

Автоматические выключатели:

QF1 "Электрон": $I_{ном}$ = 1000 А; $R_{кв1}$ = 0,25 мОм; $X_{кв1}$ = 0,1 мОм;

QF2-A3794C: $I_{ном}$ = 400 А; $R_{кв2}$ = 0,65 мОм; $X_{кв2}$ = 0,17 мОм;

QF3-AE2056: $I_{ном}$ = 100 А; $R_{кв3}$ = 2,15 мОм; $X_{кв3}$ = 1,2 мОм.

Шинопровод Ш1: ШМА-4-1600; l_1 = 15 м; $R_{1ш1}$ = 0,03 мОм/м; $X_{1ш1}$ = 0,014 мОм/м; $R_{0ш1}$ = 0,037 мОм/м; $X_{0ш1}$ = 0,042 мОм/м.

Кабельные линии:

КБ1: АВВГ-3х185+1х70; l_2 = 50 м; R_1 = 0,208 мОм/м; X_1 = 0,063 мОм/м; R_0 = 0,989 мОм/м; X_0 = 0,244 мОм/м;

КБ2: АВВГ-3х35+1х16; l_3 = 20 м; R_1 = 1,1 мОм/м; X_1 = 0,068 мОм/м; R_0 = 2,63 мОм/м; X_0 = 0,647 мОм/м.

Болтовые контактные соединения: $R_к$ = 0,003 мОм; n = 10.

Значения параметров схемы замещения прямой последовательности: сопротивление системы (X_c) составляет

$$X_c = \frac{(400)^2}{150} 10^{-3} = 1{,}066 \text{ мОм};$$

активное и индуктивное сопротивления трансформатора ($R_т$) и ($X_т$) составляют

$$R_т = \frac{11{,}2 \cdot 0{,}4^2}{(1000)^2} 10^6 = 1{,}79 \text{ мОм};$$

$$X_т = \sqrt{8^2 - \left(\frac{100 \cdot 11{,}2}{1000}\right)^2} \cdot \frac{0{,}4^2}{1000} 10^4 = 12{,}67 \text{ мОм};$$

активное и индуктивное сопротивления шинопровода:

$R_{1ш1}$ = 0,03·15 = 0,45 мОм; $X_{1ш1}$ = 0,014·15 = 0,21 мОм;

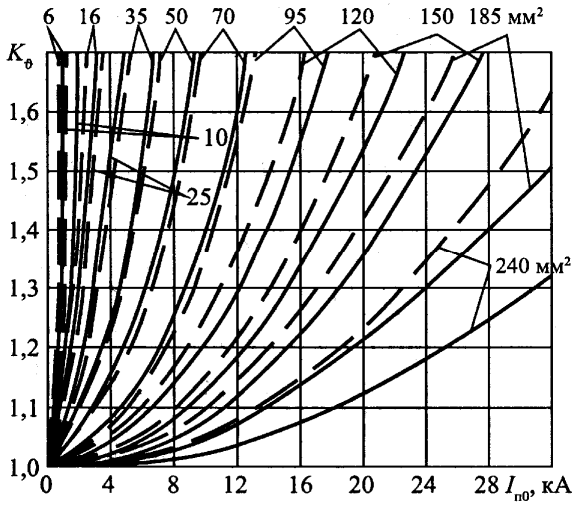


Рис. 10. Зависимости коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей различных сечений с медными жилами от тока дугового устойчивого КЗ с учетом теплоотдачи при продолжительностях КЗ 0,2 с (сплошные кривые) и 0,6 с (пунктирные кривые)

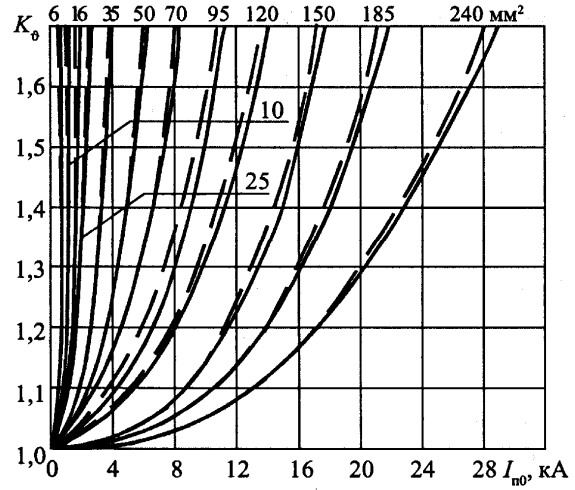


Рис. 11. Зависимости коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей различных сечений с медными жилами при дуговом КЗ с учетом теплоотдачи при продолжительностях КЗ 1,0 с (сплошные кривые) и 1,5 с (пунктирные кривые) $K_ϑ = f\,(I_{п0}, S_{кб})$

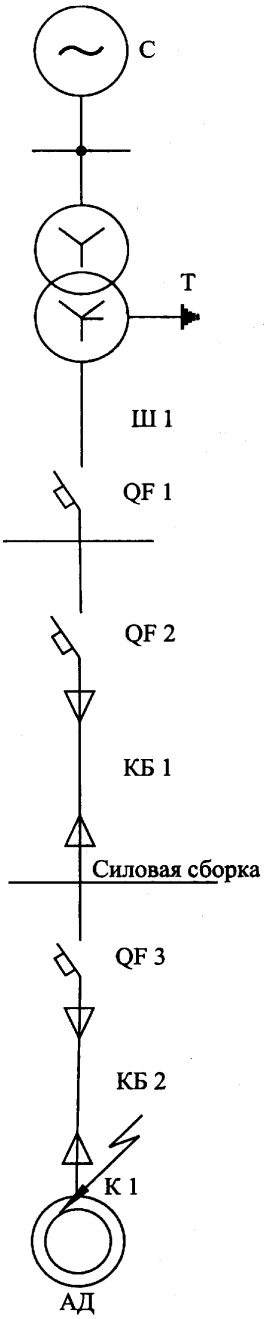


Рис. 12. Расчетная схема

активное сопротивление болтовых контактных соединений: $R_к$ = 0,003·10 = 0,03 мОм;
активное и индуктивное сопротивления кабельных линий: КБ1: $R_{1кб1}$ = 0,208·50 = 10,4 мОм; $X_{1кб1}$ = 0,063·50 = 3,15 мОм; КБ2: $R_{1кб2}$ = 1,1·20 = 22 мОм; $X_{1кб2}$ = 0,068·20 = 1,36 мОм.
Значения параметров схемы замещения нулевой последовательности:
$R_{0т}$ = 154 мОм; $X_{0т}$ = 59 мОм; $R_{0ш1}$ = 0,037·15 = 0,555 мОм; $X_{0ш1}$ = 0,042·15 = 0,63 мОм; $R_{0кб1}$ = 0,989·50 = 49,45 мОм; $X_{0кб1}$ = 0,244·50 = 12,2 мОм; $R_{0кб2}$ = 2,63·20 = 52,6 мОм; $X_{0кб2}$ = 0,647·20 = 12,94 мОм.

Суммарные сопротивления относительно точки КЗ *К*1*:*

$R_{1Σ}=R_т+R_{1ш1}+R_{1кб1}+R_{1кб2}+R_{кв1}+R_{кв2}+R_{кв3}+R_к$=1,79+0,45+10,4+22+0,25+0,65+2,15+0,03=37,72мОм;

$X_{1Σ} = X_т + X_{1ш1} + X_{1кб1} + X_{1кб2} + X_{кв1}+X_{кв2}+X_{кв3}$= 12,67+0,21+3,15+1,36+0,1+0,17+1,2=18,86мОм.

Начальное значение периодической составляющей тока при металлическом КЗ:

$$I^{(3)}_{п0\,max} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{37{,}72^2 + 18{,}86^2}} = 5{,}48\ \text{кА}.$$

Начальное значение периодической составляющей тока дугового КЗ определяется с учетом сопротивления дуги.

Активное сопротивление дуги в начальный момент КЗ составляет:

$$R_{\text{д}} = \sqrt{\frac{U^2_{\text{ср.НН}}}{3I^2_{\text{по}}K^2_{\text{с}}} - X^2_{1\Sigma}} - R_{1\Sigma} = \sqrt{\frac{400^2}{3\cdot 5{,}48^2\cdot 0{,}78^2} - 18{,}86^2} - 37{,}72 = 12{,}9 \text{ мОм},$$

где коэффициент $K_{\text{с}}$ составляет: $K_{\text{с}} = 0{,}6 - 0{,}0025\cdot 42{,}17 + 0{,}114\sqrt{42{,}17} - 0{,}13\sqrt[3]{42{,}17} = 0{,}78$.

Среднее (вероятное) начальное значение тока дугового КЗ составляет:

$$I^{(3)}_{\text{п0 д}} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{(37{,}72+12{,}9)^2 + 18{,}86^2}} = 4{,}28 \text{ кА}.$$

Максимальный и минимальный токи $I^{(3)}_{\text{п0 д}}$ определяются с учетом соответствующих значений коэффициента $K_{\text{с}}$: $I^{(3)}_{\text{п0 д max}} = 0{,}896\cdot 5{,}48 = 4{,}9$ кА; $I^{(3)}_{\text{п0 д min}} = 0{,}64\cdot 5{,}48 = 3{,}5$ кА

Коэффициент увеличения активного сопротивления кабеля КБ1 при металлическом КЗ без учета теплоотдачи составляет: $K_{\vartheta\text{кб1а}} = \frac{\tau_{\text{р}} + \vartheta_{\text{к.кб1а}}}{\tau_{\text{р}} + \vartheta_{\text{н.кб1}}} = \frac{236+26}{236+20} = 1{,}024$,

где $\vartheta_{\text{к.кб1а}}$ - конечная температура при адиабатическом нагреве. Она составляет

$$\vartheta_{\text{к.кб1а}} = (\vartheta_{\text{н}} + \beta)\exp\left[\frac{I^2_{\text{п0}}\cdot t}{K^2 S^2 \varepsilon^2}\right] - \beta = (20+228)\exp\left[\frac{5{,}48^2\cdot 10^6\cdot 0{,}6}{148^2\cdot 185^2\cdot 1{,}016^2}\right] - 228 = 26^{\circ}\text{C},$$

где $\varepsilon = \sqrt{1 + F\cdot A\sqrt{\frac{t}{S}} + F^2\cdot B\left(\frac{t}{S}\right)} = \sqrt{1 + 0{,}7\cdot 0{,}574\sqrt{\frac{0{,}6}{185}} + 0{,}7^2\cdot 0{,}165\left(\frac{0{,}6}{185}\right)} = 1{,}016$.

Конечная температура жил кабельной линии КБ1 с учетом теплоотдачи:

$\vartheta_{\text{к.кб1}} = \vartheta_{\text{н.кб1}} + (\vartheta_{\text{к.кб1}} - \vartheta_{\text{н.кб1}})\cdot\eta = 20 + (26 - 20)\cdot 0{,}968 = 25{,}8$ °С,

где коэффициент η найден по кривым.

Коэффициент увеличения активного сопротивления кабеля КБ1 с учетом теплоотдачи $K_{\vartheta\text{кб1}} = 1{,}022$.

Соответственно для кабеля КБ2 $\vartheta_{\text{к.кб2а}} = (20+228)\exp\left[\frac{5{,}48^2\cdot 10^6\cdot 0{,}6}{148^2\cdot 35^2\cdot 1{,}0375^2}\right] - 228 = 234{,}8^{\circ}\text{C}$;

$\vartheta_{\text{к.кб2}} = 20 + (234{,}8 - 20)\cdot 0{,}92 = 217{,}6$ °С и $K_{\vartheta\text{кб2}} = 1{,}77$.

Поэтому значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ к моменту отключения КЗ с учетом нагрева кабелей $I^{(3)}_{\text{пт}} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{(10{,}4\cdot 1{,}022 + 22\cdot 1{,}77 + 5{,}32)^2}} = 3{,}98$ кА.

Сопротивление электрической дуги к моменту отключения КЗ составляет:

$$R_{\text{дт}} = \sqrt{\frac{U^2_{\text{ср.НН}}}{3I^2_{\text{пт}}\cdot K^2_{\text{ст}}} - X^2_{1\Sigma}} - R_{1\Sigma t} = \sqrt{\frac{400^2}{3\cdot 3{,}98^2\cdot 0{,}74^2} - 18{,}86^2} - 54{,}9 = 21{,}2 \text{ мОм},$$

где $K_{\text{ст}} = 0{,}55 - 0{,}002\cdot 58 + 0{,}1\sqrt{58} - 0{,}12\sqrt[3]{58} = 0{,}74$, так как

$Z_{\text{кт}} = \sqrt{(10{,}4\cdot 1{,}022 + 22\cdot 1{,}77 + 5{,}32)^2 + 18{,}86^2} = 58$ мОм.

Среднее значение периодической составляющей тока КЗ к моменту отключения с учетом влияния и электрической дуги: $I^{(3)}_{\text{пт ср}} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{(10{,}4\cdot 1{,}01 + 22\cdot 1{,}7 + 21{,}2 + 5{,}32)^2 + 18{,}86^2}} = 3{,}0$ кА.

Значения $K_{\vartheta\text{кб1}}$ и $K_{\vartheta\text{кб2}}$ определены с учетом влияния теплоотдачи и активного сопротивления дуги по кривым рис.*8* для $t_{\text{откл}} = 0{,}6$ с.

Максимальное и минимальное вероятные значения тока $I^{(3)}_{\text{птд}}$ определены с учетом коэффициента $K_{\text{ст}}$:

$I^{(3)}_{\text{птд max}} = 3{,}98\cdot 0{,}81 = 3{,}22$ кА; $I^{(3)}_{\text{птд min}} = 3{,}98\cdot 0{,}65 = 2{,}59$ кА.

Тема 8. Несимметричные и сложные короткие замыкания. (12 часов)

Условия, при которых допустимо применение метода симметричных составляющих для анализа несимметричных режимов в трехфазных цепях, содержащих синхронные машины. Параметры электрических машин, трансформаторов (автотрансформаторов), обобщенных нагрузок, воздушных линий электропередач и кабелей по отношению к токам разных последовательностей. Граничные условия и основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений при несимметричных КЗ и обрывах фаз. Векторные диаграммы напряжений и токов при несимметриях разного вида. Учет группы соединения трансформаторов (автотрансформаторов) при определении токов в разных ветвях и напряжений в произвольных точках расчетной схемы. Правило эквивалентности тока прямой последовательности при несимметричных режимах и его использование. Комплексные схемы замещения. Сравнение токов при несимметричных КЗ разного вида.

Основные положения в исследовавании несиметричных переходных процессов.

Общие замечания. При рассмотрении несимметричных переходных процессов ограничимся условием, что не симметрия возникает только в одном месте схемы, а вся остальная часть схемы строго симметрична.

В практических расчетах несимметричных переходных процессов учитываем только основную гармонику токаи напряжения. Такое допущение позволяет использовать метод симметричных составляющих в его обычной форме, известной из курса ТОЭ.

Токи прямой, обратной и нулевой последовательности протекая по обмоткам статора, создают магнитные потоки тех же последовательностей, которые в свою очередь наводят в статоре соответствующие э. д. с. Однако поскольку эти э. д. с. пропорциональны токам отдельных последовательностей, значение которых еще требуется определить, то вводить их в расчет нецелесообразно. Поэтому в расчет вводятся только те э. д. с. которые известны или не зависят от внешних условий цепи статора (например, начальные значения переходной и сверхпереходной э. д. с.), причем в силу симметричного выполнения статорной обмотки это будет э. д. с. только прямой последовательности.

Устройства АРВ синхронных машин реагируют только на отклонения напряжения прямой последовательности и стремятся поддержать это напряжение на постоянном уровне (т. е. они включены через фильтры прямой последовательности). Это напряжение принимается равным номинальному для каждой машины. А э. д. с., вызываемые токами отдельных последовательностей, учитываются в виде падений напряжений в соответствующих реактивностях, взятых с обратным знаком.

Если параметры всех фаз исходной расчетной схемы одинаковы, а причиной нарушения симметрии является короткое замыкание в одном или двух местах, то для расчета токов при несимметричных КЗ следует применять метод симметричных составляющих, так как при указанных условиях этот метод имеет большие преимущества за счет того, что симметричные системы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей связаны законом Ома только с симметричными системами напряжений одноименной последовательности:

$$\left.\begin{aligned} \Delta\dot{U}_1 &= \dot{I}_1 \underline{Z}_1; \\ \Delta\dot{U}_2 &= \dot{I}_2 \underline{Z}_2; \\ \Delta\dot{U}_0 &= \dot{I}_0 \underline{Z}_0; \end{aligned}\right\}$$

где $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$; $\underline{Z}_0$ - сопротивления соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Поскольку при этом разные фазы симметричной системы любой последовательности находятся в одинаковых условиях (в них соблюдается симметрия токов, напряжений и других электрических величин), то метод симметричных составляющих позволяет использовать эквивалентные схемы замещения различных последовательностей в

однолинейном изображении и вести расчеты для одной фазы (она обычно называется особой).

Исходя из сказанного для произвольного несимметричного к. з. основные уравнения II закона Кирхгофа отдельно для каждой последовательности имеет вид:

$$\dot{U}_{K1} = \dot{E}_{\Sigma} - Z_{1\Sigma} \cdot \dot{I}_{K1} \quad (1)$$

$$\dot{U}_{K2} = 0 - Z_{2\Sigma} \cdot \dot{I}_{K2} \quad (2)$$

$$\dot{U}_{K0} = 0 - Z_{0\Sigma} \cdot \dot{I}_{K0} \quad (3)$$

где $\dot{U}_{K1}, \dot{U}_{K2}, \dot{U}_{K0}$ - симметричные составляющие напряжения и тока в месте к. з.

$\dot{I}_{K1}, \dot{I}_{K2}, \dot{I}_{K0}, \dot{E}_{\Sigma}$ - результирующая э. д. с. относительно точки к. з.

$Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ - результирующее сопротивление схем соответствующих последовательностей относительно точки к. з.

Из формул 2 и 3 следует, что образование токов обратной и нулевой последовательностей можно представить как следствие возникающих в месте к. з. напряжений обратной и нулевой последовательностей.

При однократной продольной несимметрии основные уравнения для каждой последовательности имеют тот же вид, что и (1)—(3), только вместо $\dot{U}_{K1}, \dot{U}_{K2}, \dot{U}_{K0}$ в них следует ввести разности фазных напряжений соответствующих последовательностей по концам местной несимметрии, а сопротивления $Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ должны представлять собой результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно места рассматриваемой продольной несимметрии.

Уравнения 1; 2; 3 содержат 6 неизвестных величин: 3 составляющие напряжения и 3 составляющие тока. Недостающие три уравнения получаем из граничных условий, которыми характеризуются тот или иной вид несимметричного к. з.

Таким образом, определение токов и напряжений при несимметричном переходном процессе сводится к вычислению симметричных составляющих этих величин с последующим определением фазных величин токов и напряжений несимметричного к. з. по известным соотношениям теории симметричных составляющих.

Параметры элементов для токов обратной и нулевой последовательности.

Общие замечания. В нормальном симметричном режиме, а также в симметричном переходном процессе все сопротивления отдельных элементов являются сопротивлениями прямой последовательности (раньше мы это определение не вводили, т. к. токи были только одной последовательности).

При отсутствии магнитной связи между фазами какого–либо элемента его сопротивление не зависит от порядка чередования фаз тока. Следовательно, сопротивления такого элемента зависит от частоты тока и следовательно для всех последовательностей одинаковы.

$r_1 = r_2 = r_0$

$x_1 = x_2 = x_0$

$z_1 = z_2 = z_0$

Для элемента, магнитосвязанные цепи которого неподвижны относительно друг друга, сопротивления прямой и обратной последовательности одинаковы (т. к. от перемены порядка чередования фаз симметричной 3 – х фазной системы токов взаимоиндукция между фазами такого элемента не изменится).

Таким образом для трансформаторов, автотрансформаторов, ВЛ, кабелей и реакторов:

$r_1 = r_2$; $x_1 = x_2$; $z_1 = z_2$

Сопротивление нулевой последовательности в общем случае значительно отличается от сопротивлений прямой и обратной последовательностей, т. к. система токов нулевой последовательности резко отличается от систем тока двух других последовательностей.

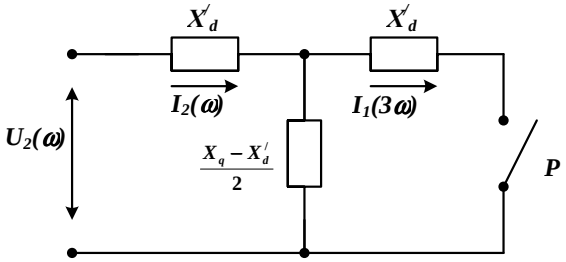
Синхронные машины. В синхронной машине токи обратной последовательности синхронной частоты создают магнитный поток, который вращается относительно ротора с двойной синхронной скоростью и встречает на своем пути непрерывно изменяющееся магнитное сопротивление. Изменяющееся магнитное сопротивление обусловлено магнитной несимметрией ротора.

Таким образом, при неизменной н. с. статора поток обратной последовательности гармонически изменяется с двойной синхронной скоростью в пределах между его наибольшим и наименьшим значением. Разница между наибольшим и наименьшим значениями зависит от степени несимметрии ротора, она велика при разной несимметрии ротора и совсем исчезает при его полной симметрии.

Для синхронной машины без демпферных обмоток при рассмотрении внезапного к. з. реактивность можно получить x_2

$$x_2 = \frac{2 x_d^{/} \cdot}{x_d^{/} + x_q} \quad (1)$$

Схема замещения, определяющая реактивность x_2 с. м. прямой последовательности имеет вид



Из схемы замещения следует, что реактивность x_2 представляет собой реактивность обратной последовательности, определенную как отношение подведенного синусоидального напряжения обратной последовательности синхронной частоты к основной гармонике тока обратной последовательности.

Если поток обратной последовательности синхронной частоты попадает от источника бесконечной мощности, то помимо основной гармоники обратной последовательности (I_2) в статоре еще возникает третья гармоника тока прямой последовательности. Следовательно, формула (1) учитывает влияние третьей гармоники тока прямой последовательности.

Если не учитывать третью гармонику, то реактивность x_2 определится как:

$$X_2 \approx \frac{x_d^{/} + x_q}{2} \quad (2)$$

В схеме это учитывается размыканием рубильника Р.

При симметричном роторе сихронной машины $x_d^{/} = x_q$ обе формулы дадут одинаковый результат $x_2 = x_d^{/}$.

Если с. м. работает в несимметричном режиме, то поле обратной последовательности основной частоты вызывает в статоре весь спектр нечетных гармоник. В этом случае результирующая реактивность x_2 определяется:

(3)

Для машины с демпферными обмотками реактивность x_2 может быть определена по тем же выражениям (1, 2, 3) если в них заменить $x^{/}_d$ и x_q соответственно на $X^{//}_d$ и $X^{//}_q$.

Поскольку выражения 1, 2, 3 почти равноценны, во многих практических расчетах целесообразно принимать для с. м. реактивность x_2 по наиболее простому выражению

$X_2 \approx \frac{x_d^{/} + x_q}{2}$ (2). При необходимости учета высших гармоник, следует принимать более точное выражение $X_2 = \sqrt{x_d^{/} \cdot x_q}$ (3).

В качестве приближенных соотношений принимают:

для машин без демпферных обмоток $x_2 \approx 1{,}45x'_d$;

для турбогенераторов и машин с демпферными обмотками в обеих осях ротора $x_2 \approx 1{,}22x''_d$;

в практических приближенных расчетах для турбогенераторов и машин с продольно – поперечными демпферными обмотками принимают дополнительное упрощение, полагая, что $x_2 = x''_d$.

Токи нулевой последовательности создают практически только магнитные потоки рассеяния статорной обмотки, которые меньше чем при токах прямой или обратной последовательностей, причем это уменьшение сильно зависит от типа обмотки, поэтому величина x_0 СМ колеблется в широких пределах.

Асинхронные машины. Если в нормальных условиях асинхронный двигатель работает со скольжением s, то по отношению к магнитному потоку обратной последовательности синхронной частоты ротор двигателя, очевидно, имеет скольжение (2-s). Следовательно, сопротивление обратной последовательности асинхронного двигателя представляет собой его сопротивление при скольжении (2—s).

Как видно, с ростом s реактивность двигателя вначале резко падает, а затем ее снижение весьма незначительно. Это позволяет практически считать $\boldsymbol{x_2 \approx x_{s=1} = x_k}$, т.е. реактивность x_2 двигателя равной его так называемой реактивности короткого замыкания (относительная величина которого близка к обратной величине относительного номинального пускового тока).

Т.о., индуктивное сопротивление обратной последовательности синхронных и асинхронных электродвигателей допустимо принимать численно равным индуктивной составляющей их сопротивления короткого замыкания.

Обобщеная нагрузка. Реактивность обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от характера приемников эл. энергии и относительного участия каждого из них в рассматриваемой нагрузке. Учитывая, что основная часть средней типовой промышленной нагрузки состоит из АД, реактивность обратной последовательности которых в начальный момент внезапного к. з. не меняется в практических расчетах сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки какого-либо узла в относительных единицах, отнесенное к полной мощности нагрузки и среднему номинальному напряжению той ступени напряжения сети, где эта нагрузка присоединена, следует принимать равным: при напряжении сети 35 кВ и более $X_{*\,2(\text{ном})} = 0{,}45$ и при напряжении сети менее $X_{*\,2(\text{ном})} = 0{,}35$.

Обобщенная нагрузка включает в себя кроме АД сеть и понижающие тр – ры, поэтому сопротивление нулевой последовательности обобщенной нагрузки определяется названными элементами и в каждом конкретном случае будет различно. Средние величины сопротивления нулевой последовательности привести невозможно.

Трансформаторы. Выше отмечалось, что для трансформаторов имеет место соотношение $x_2 = x_1$. Рассмотрим, что собой представляет сопротивление нулевой последовательности.

Следует отметить, что реактивность нулевой последовательности трансформатора в значительной мере определяется его конструкцией и соединением обмоток. Со стороны обмотки, соединенной в Δ или Y без заземления нейтрали, независимо от способа соединения других обмоток, реактивность нулевой последовательности трансформатора, очевидно, бесконечно велика ($x_o = \infty$), т. к. при этих условиях вообще исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе.

Следовательно, результирующая реактивность нулевой последовательности трансформатора может быть позволена только со стороны его обмотки, соединенной в Y с заземленной нейтралью.

Схема замещения нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y_0/Δ, представлена на рис. *а*. Поскольку индуктивное сопротивление $X_{\mu 0}$ во много раз больше сопротивлений рассеяния обмоток X_{I} и X_{II}, то в исходной схеме замещения нулевой последовательности трансформатор с указанной схемой соединения обмоток представляется в виде одного индуктивного сопротивления $X_{т0} = X_{\text{I}} + X_{\text{II}}$, которое с противоположной стороны (идя от расчетной точки КЗ) соединяется с точкой нулевого потенциала схемы замещения (с землей). Таким образом, если в исходной расчетной схеме за таким трансформатором имеются какие-либо элементы (трансформаторы, генераторы, воздушные или кабельные линии и т.д.), то независимо от их вида и схемы соединения их обмоток эти элементы в схему замещения нулевой последовательности не вводятся. Это объясняется тем, что при соединении обмоток трансформатора по схеме Y_0/Δ ЭДС нулевой последовательности, наводимая в соединенной треугольником обмотке, полностью компенсируется падением напряжения от тока нулевой последовательности в индуктивном сопротивлении рассеяния этой обмотки, вследствие чего напряжение нулевой последовательности на выводах этой обмотки равно нулю.

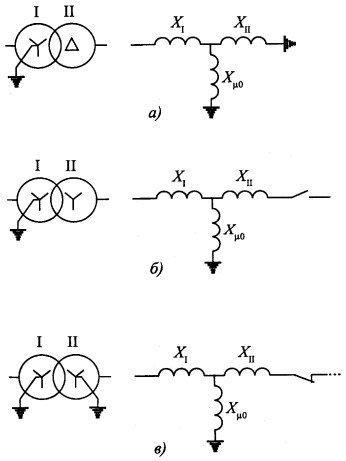


Рис. Схемы замещения нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов

В случае соединения обмоток двухобмоточного трансформатора по схеме Y_0/Y циркуляция токов нулевой последовательности в обмотке, соединенной в звезду, невозможна (см. схему замещения нулевой последовательности такого трансформатора на рис. *б)*. Поскольку у трансформаторов с номинальным напряжением обмоток свыше 1 кВ сопротивление $X_{\mu 0}$ весьма значительно, то в схему замещения нулевой последовательности такие трансформаторы не вводят.

Схема замещения нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y_0/Y_0, представлена на рис. *в*. Очевидно, трансформатор необходимо вводить в исходную схему замещения нулевой последовательности только в том случае, если на стороне обмотки II имеется контур для циркуляции токов нулевой последовательности (имеются в виду электроустановки напряжением свыше 1 кВ, когда $X_{\mu 0} >> X_{\text{I}}+X_{\text{II}}$).

Сопротивление нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, зависит от схемы соединения двух других обмоток. Обычно одна из них соединена треугольником, а другая может быть соединена или треугольником, или в звезду с изолированной нейтралью, или в звезду с заземленной нейтралью. В первом случае компенсация тока нулевой последовательности обмотки, обращенной к расчетной точке КЗ, осуществляется токами обеих обмоток, соединенных треугольником, и схема замещения нулевой последовательности такого трансформатора имеет вид, как показано на рис. *а*. При этом сопротивление нулевой последовательности трансформатора $X_{т0} = X_{\text{I}} + X_{\text{II}} // X_{\text{III}}$. Во втором случае по обмотке, соединенной в звезду с изолированной нейтралью, протекание тока нулевой последовательности невозможно (см. схему на рис. *б)*, поэтому сопротивление

нулевой последовательности такого трансформатора $X_{т0} = X_I + X_{III}$. В третьем случае циркуляция тока нулевой последовательности возможна и в обмотке II (см. рис. *в)*, если в сети, электрически связанной с этой обмоткой, обеспечены условия для замыкания этого тока.

Схема замещения нулевой последовательности автотрансформатора, который имеет обмотку, соединенную треугольником, а его нейтраль заземлена наглухо, аналогична схеме замещения нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора, у которого обмотки соединены по схеме $Y_0/Y_0/\Delta$ (см. рис. *в*).

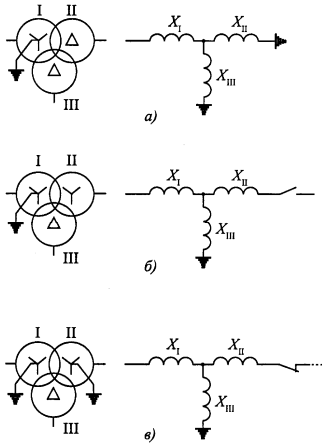
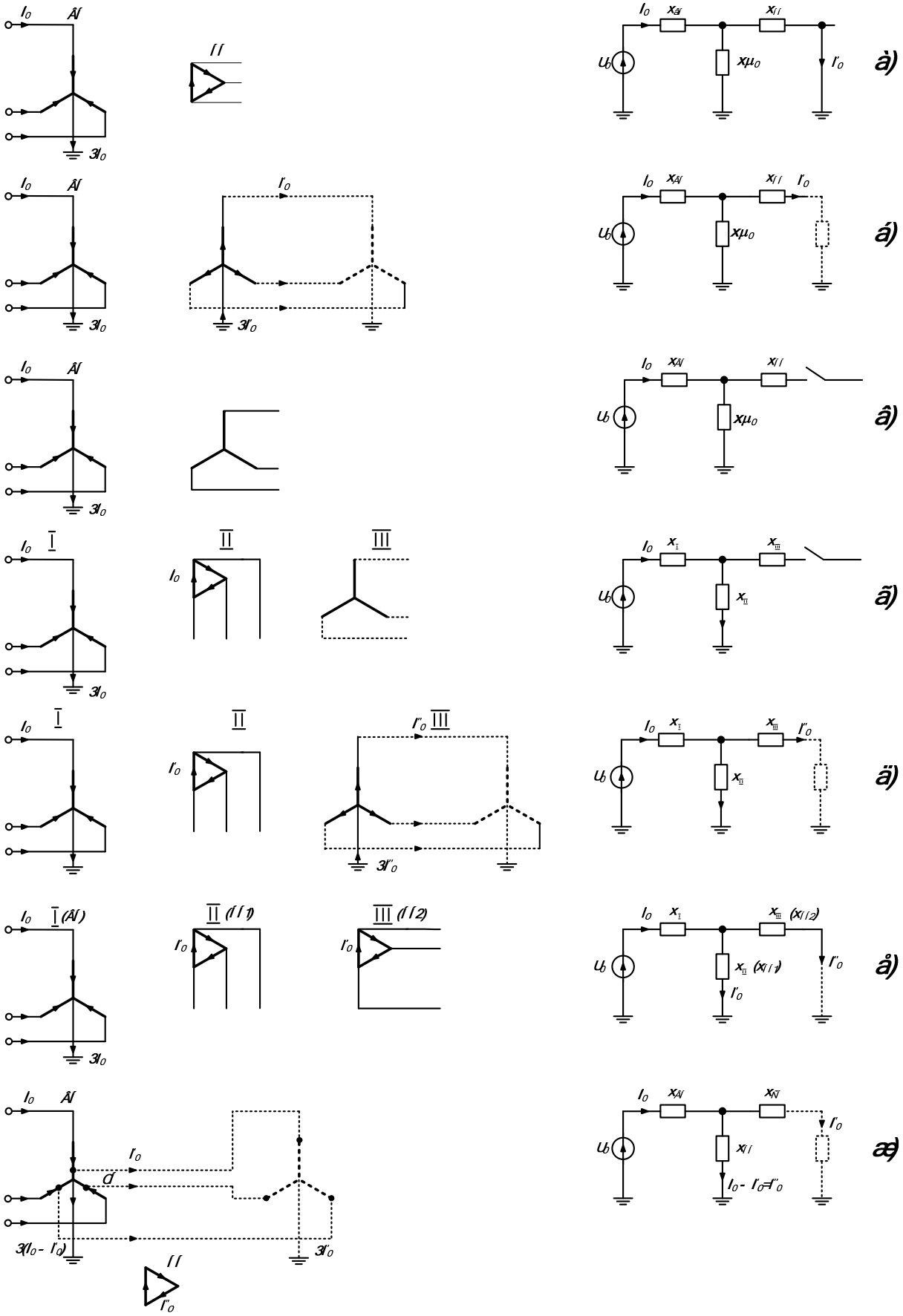


Рис. Схемы замещения нулевой последовательности трехобмоточных трансформаторов

В зависимости от варианта соединения обмоток оценить реактивность нулевой последовательности трансформаторов можно при помощи следующей таблицы.

Тип трансформатора и соединение его обмоток		Сопротивление нулевой последовательности	Рисунок
Двухобмоточные			
Тр-р любого типа с соединением обмоток		$x_0 = x_1 \quad (x\mu_0 = \infty)$	а)
Трехфазная группа из трех однофазных трансформаторов или трехфазный (четырех или пятистержневой) с соединением обмоток			
	Y Ё /Y	$x_0 = \infty \quad (x\mu_0 = \infty)$	в)
	Y Ё /Y Ё	$x_0 = x_1 \quad (x\mu_0 = \infty)$	б)
Трехфазный трехстержневой трансформатор с соединением обмоток			
	Y Ё /Y	$x_0 = x_1 + x_{\mu 0} \quad (x_{\mu 0} = 0.3 \div 1)$	в)
	Y Ё /Y Ё	$x_0 = x_1$	б)
Трехобмоточные			
Трехобмоточные тр-ы с соединением обмоток			
	Y Ё /Δ/Y	$x_0 = x_I + x_{II}$	г)
	Y Ё /Δ/Y Ё Y Ё /Δ/Δ	определяется своей схемой $x_0 = x_I + \frac{x_{II} \cdot x_{III}}{x_{II} + x_{III}}$	д)
Двухобмоточные с расщепленной обмоткой НН Y Ё /Δ/Δ		$x_0 = x_I + \frac{x_{II} \cdot x_{III}}{x_{II} + x_{III}}$	е)
Автотрансформаторы			
	Y/Y/Δ	определяется своей схемой	ж)

Варианты соединения обмоток трансформаторов
и схемы их замещения для токов нулевой последовательности



1) $x_{\mu 0}$ - реактивное сопротивление намагничивания нулевой последовательности

2) активными сопротивлениями пренебрегаем

Воздушные линии. Ток нулевой последовательности воздушной линии возвращается через землю и по заземленным цепям, расположенным параллельно данной линии (защитных тросов, рельсовые пути вдоль линии и д.р.).

Основная трудность правильного определения сопротивления нулевой последовательности воздушной линии связана с учетом распределения тока в земле, т.к. точное определение его сложная проблема.

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи зависит от сечения проводов, расстояний между фазами, наличия или отсутствия заземленных тросов и других линий, проложенных по той же трассе, и многих других факторов. Поэтому его следует определять расчетным путем.

Для одноцепной воздушной линии без заземленных тросов индуктивное сопротивление нулевой последовательности, Ом/км, следует определять по формуле

$$X_0 = 0{,}435 \lg \frac{D_з}{R_{ср}},$$

где $D_з$ = 935 м - эквивалентная глубина возврата тока через землю; $R_{ср}$ - средний геометрический радиус системы трех проводов линии, определяемый по формуле

$$R_{ср} = \sqrt[3]{R_{эк} D_{ср}^2},$$

где $R_{эк}$ - эквивалентный радиус провода, учитывающий наличие в реальном проводе внутреннего магнитного поля. Он меньше действительного радиуса провода R: для сплошных проводов из немагнитного материала $R_{эк} = 0{,}779R$, для сталеалюминиевых проводов с двумя-тремя повивами $R_{эк} = 0{,}82R$; $D_{ср} = \sqrt{D_{AB} D_{BC} D_{CA}}$ - среднее геометрическое расстояние между проводами фаз A, B, C.

Если воздушная линия имеет расщепленные фазы, то в формулу вместо $R_{эк}$ необходимо вводить средний геометрический радиус системы проводов одной фазы, определяемый по формуле

$$r_{ср} = \sqrt[n]{R_{эк} d_{ср}^{n-1}},$$

где n - число проводов в фазе;

$d_{ср}$ - среднее геометрическое расстояние между проводами одной фазы.

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности одноцепной воздушной линии с одним или несколькими заземленными тросами может быть определено по формуле

$$X_0^{(т)} = X_0 - \frac{X_{П-Т0}^2}{X_{Т0}},$$

где X_0 - индуктивное сопротивление нулевой последовательности этой линии без учета троса (системы тросов); $X_{П-Т0}$ - индуктивное сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности между тросом (системой тросов) и проводами линии; $X_{Т0}$ - индуктивное сопротивление нулевой последовательности троса (системы тросов).

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности $X_{ПТ0}$, Ом/км, определяется по формуле

$$X_{ПТ0} = 0{,}435 \lg \frac{D_з}{D_{ПТ}},$$

где $D_{ПТ}$ - среднее геометрическое расстояние между проводами линии и тросом (системой тросов):

при одном тросе, находящемся от фазных проводов на расстояниях соответственно $D_{АТ}$, $D_{ВТ}$, $D_{СТ}$, это расстояние равно

$$D_{ПТ} = \sqrt[3]{D_{АТ} D_{ВТ} D_{СТ}};$$

при двух тросах ($T1$ и $T2$)

$$D_{ПТ} = \sqrt[6]{D_{АТ1} D_{АТ2} D_{ВТ1} D_{ВТ2} D_{СТ1} D_{СТ2}}.$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности $X_{Т0}$, Ом/км, при одном тросе определяется по формуле

$$X_{\text{T0}} = 0{,}435 \lg \frac{D_{\text{з}}}{R_{\text{эк.т}}},$$

где $R_{\text{эк.т}}$ - эквивалентный радиус троса.

При двух тросах, находящихся друг от друга на расстоянии $D_{\text{т}}$, индуктивное сопротивление X_{T0}, Ом/км, определяется по формуле

$$X_{\text{T0}} = 0{,}435 \frac{D_{\text{з}}}{R_{\text{ср.т}}},$$

где $R_{\text{ср.т}}$ - редкий геометрический радиус системы двух тросов, определяемый по формуле

$$R_{\text{ср.т}} = \sqrt{R_{\text{эк.т}} D_{\text{т}}}\ .$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности одной из двух параллельных цепей, соединенных по концам, при внешнем КЗ составляет

$$X_0' = X_0 + X_{\text{I–II0}},$$

где X_0 - индуктивное сопротивление нулевой последовательности одной цепи без учета другой; $X_{\text{I-II0}}$ - индуктивное сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности одной цепи от другой.

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности одной из двух одинаковых параллельных цепей, имеющих заземленные тросы и соединенных по концам, при внешнем КЗ составляет

$$X'^{(\text{T})}_0 = X_0 + X_{\text{I–II0}} - 2\frac{X^2_{\text{ПТ0}}}{X_{\text{T0}}},$$

где $X_{\text{ПТ0}}$ - индуктивное сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности между системой тросов и проводами каждой из цепей; X_{T0} - индуктивное сопротивление нулевой последовательности системы тросов.

При приближенных расчетах токов несимметричных КЗ допускается использовать данные о средних значениях отношений сопротивлений нулевой и прямой последовательностей воздушных линий электропередачи, приведенные в табл.

В приближенных практических расчетах пользуются средними соотношениями $\boldsymbol{X_0/X_1}$ между индуктивными сопротивлениями Xo и X_{I}.

Характеристика линии	X_0/X_{I}
Одноцепная линия без тросов	3,5
То же со стальными тросами	3
То же со хорошо проводимыми тросами (из цветного металла)	2
Двухцепная линия без тросов	5,5
То же со стальными тросами	4,7
То же со хорошо проводимыми тросами (из цветного металла)	3

Кабели. Оболочка кабеля, как правило, заземлена на его концах (и в ряде промежуточных точек). Следовательно, она образует для токов нулевой последовательности путь параллельной земле. В этом отношении оболочка кабеля аналогична заземленным тросам у воздушной линии.

На распределение тока между заземленной оболочкой кабеля и землей влияет соответственное сопротивление оболочки и сопротивления ее заземлений, величины которых зависят от ряда факторов (например, характер прокладки кабеля – траншея, блоки и т.п.) что существенно затруднит определение Zo кабеля.

В ориентировочных расчетах для 3-х жильных кабелей обычно принимают:

$r_0 = 10 r_1$ $\quad X_0 \approx (3.5\text{-}4.6) X_1$

Более точные замеры – экспериментным путем (замеры в реальных условиях).

К а б е л и		
Трехжильные	$\boldsymbol{x_0 = (3{,}5 \div 4{,}6) \cdot x_1}$	$\boldsymbol{r_0 = 10 \cdot r_1}$
Одножильные	$\boldsymbol{x_0 = (0{,}8 \div 1{,}0) \cdot x_1}$	$\boldsymbol{r_0 = 10 \cdot r_1}$

Схемы замещения различных последовательностей

Общие замечания. Для расчета токов при несимметричных КЗ целесообразно использовать метод симметричных составляющих. При этом кроме схемы замещения прямой последовательности для расчета двухфазного КЗ необходимо составить схему замещения обратной последовательности, а для расчета однофазного и двухфазного КЗ на землю - также схему замещения нулевой последовательности.

Если несимметричный режим рассчитывать аналитически, то необходимо по полученным схемам замещения отдельно определить результирующее сопротивление каждой последовательности относительно точки возникновения несимметрии.

Схемы замещения отдельных последовательностей составляют в соответствии с общими указаниями (принятыми для составления схем замещения при симметричных 3-х фазных к.з.).

Схемы прямой и обратной последовательностей

Схема прямой последовательности представляет собой обычную схему составленную для расчета любого симметричного 3-х фазного режима или процесса. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени в схемах замещения вводят генераторы и нагрузки соответствующими реактивностями и Э.Д.С.

Схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности (т.к. пути циркуляции токов у них одинаковы). Однако между ними есть и различие.

Прежде всего, различие состоит в том, что в схеме обратной последовательности Э.Д.С. всех генерирующих ветвей условно принимают равными нулю (об этом уже говорилось). Кроме того, считают, что реактивности обратной последовательности с.м. и нагрузок практически не зависят от вида и условий возникшей несимметрии и от продолжительности переходного процесса.

Началом схем прямой и обратной пследовательности считают точку в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей, это точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности.

Концом схемы прямой и обратной пследовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия. При продольной несимметрии каждая из схем имеет два конца, ими являются две точки, между которыми расположена данная продольная несимметрия. К концу схемы отдельных последовательностей (или между концами схем при продольной несимметрии) приложены напряжения соответствующих последовательностей, возникшая в месте несимметрии.

Схема нулевой последовательности.

Схема замещения нулевой последовательности обычно существенно отличается от схем прямой и обратной последовательностей. Ее конфигурация определяется в основном положением расчетной точки КЗ и схемами соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов исходной расчетной схемы. Как уже отмечалось раньше, путь циркуляции токов нулевой последовательности резко отличается от пути, по которому проходят токи прямой и обратной последовательностей, т.к. токи нулевой последовательности по существу являются однофазным током, который разветвлен между тремя фазами и возвращается через землю и параллельные ей цепи.

Составление схемы нулевой последовательности следует начинать, как правило, в месте возникновения несимметрии, считая что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней (точке) приложено напряжение нулевой последовательности

Затем, идя от точки КЗ поочередно в разные стороны, необходимо на каждой ступени напряжения исходной расчетной схемы выявить возможные пути циркуляции токов нулевой последовательности (циркуляция этих токов возможна только в тех ветвях, которые образуют контуры для замыкания токов через землю и параллельные ей цепи) и

соответственно определить элементы этой схемы, которые должны быть введены в схему замещения. При этом следует иметь в виду, что сопротивление нулевой последовательности трансформатора со стороны обмотки, соединенной в треугольник или звезду с незаземленной нейтралью, бесконечно велико, поэтому трансформаторы с указанными схемами соединения и все находящиеся за ними элементы исходной расчетной схемы в схему замещения нулевой последовательности не входят.

Если напряжение нулевой последовательности приложено относительно земли, то при отсутствии емкостей проводимости для протекания токов нулевой последовательности, необходимо, как минимум одна заземленная нейтраль в той же электрически связанной цепи, где приложено Uo. Если в рассматриваемой цепи имеется несколько заземленных нейтралей, то соответственно образуется несколько параллельных контуров для токов нулевой последовательности.

Если напряжение нулевой последовательности введено последовательно в рассечку фазных проводов, то циркуляция токов нулевой последовательности возможна если в схеме отсутствуют заземленные нейтрали, но если при этом имеется замкнутый контур через обходные пути той же электрически связанной цепи, (при этом в земле циркулирует наведенный ток, следуя по трассе линии).

Если же такие пути отсутствуют, то для протекания токов нулевой последовательности необходимым условием является наличие в той же электрически связанной цепи заземленных нейтралей с обеих сторон от места, где приложено Uo.



а) б)

а) Напряжение нулевой последовательности при поперечной несимметрии.

б) Напряжение нулевой последовательности при продольной несимметрии.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной. Это связанно с тем, что схема нулевой последовательности составляют для одной фазы, а через указанное заземление протекают сумма токов Io всех трех фаз.

Рассмотрим пример составления схем нулевой последовательности.

Для исходной расчетной схемы, представленной на рис. *а*, составить исходные эквивалентные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей при КЗ на землю в точке *К*1 и преобразовать их в эквивалентные результирующие схемы. Расчеты провести с использованием системы относительных единиц и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформатора. Параметры исходной расчетной схемы приведены ниже.

Генераторы 1,2: $P_{ном}$=63МВт; $U_{ном}$=10,5кВ; cosφ$_{ном}$=0,8; $X''_{d(ном)*}$=0,136; $X_{2(ном)*}$=0,166; до КЗ генераторы работали в режиме холостого хода с номинальным напряжением.

Реактор 9: $U_{ном}$ = 10 кВ; $I_{ном}$ = 2500 А; X = 0,35 Ом.

Трансформаторы 3 и 4: $S_{ном}$ = 40 МВ·А; n = 121/10,5 кВ; $u_к$ = 10,5 %.

Автотрансформатор: $S_{ном}$ = 125 МВ·А; n = 230/121/10,5 кВ; $u_{кВ-С}$ = 11 %; $u_{кВ-Н}$ = 32 %; $u_{кС-Н}$ = 20%.

Линии 10 и 11: l = 50 км; $X_{1уд}$ =0,4 Ом/км; $X_{0уд}$ =1,2 Ом/км.

Система 8: $S_{ном}$ = 2000 МВ·А; $X_{1с(ном)*}$ = 1,0; $X_{0с(ном)*}$ = 1,1.

Исходные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей представлены соответственно на рис. *б*, *в* и *г*.

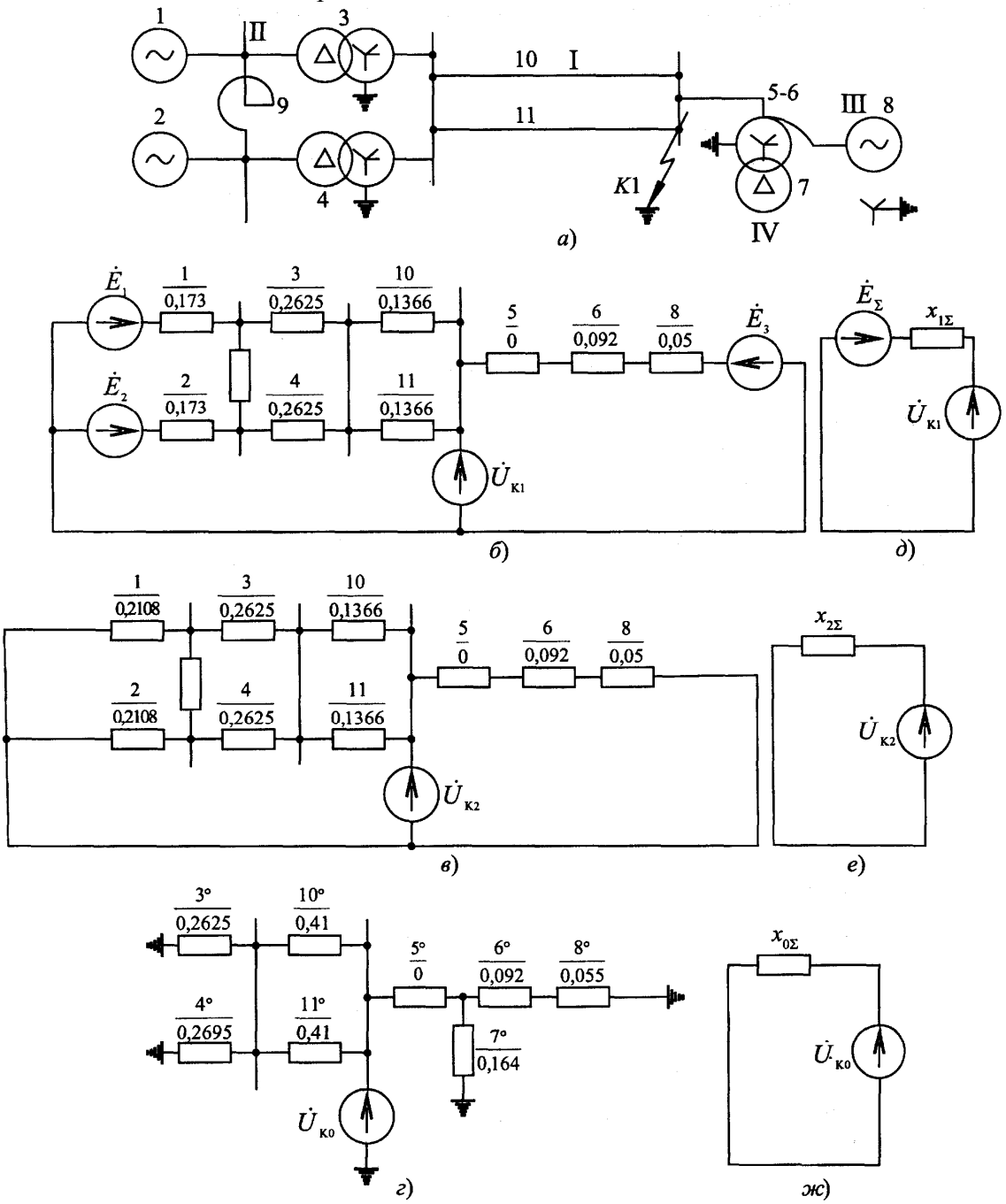


Рис. Пример составления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и определения результирующих ЭДС и сопротивлений при коротком замыкании в точке *K*1

Обмотка низшего напряжения автотрансформатора не нагружена, поэтому она не вводится в схемы замещения прямой и обратной последовательностей.

В качестве базисных единиц выбираем:

$S_б$ = 100 МВ·А и $U_{бI}$ = 121 кВ.

Тогда по формуле

$$U_{бII} = \frac{1}{121/10{,}5}121 = 10{,}5 \text{ кВ};\quad U_{бIII} = \frac{1}{121/230}121 = 230 \text{ кВ};\quad U_{бIV} = \frac{1}{121/10{,}5}121 = 10{,}5 \text{ кВ};$$

По формуле $X_{*1(б)} = X_{*2(б)} = 0{,}136\frac{100}{63/0{,}8}\cdot\frac{10{,}5^2}{10{,}5^2} = 0{,}173$; $X_{*3(б)} = X_{*4(б)} = \frac{10{,}5}{100}\cdot\frac{100}{40}\cdot\frac{10{,}5^2}{10{,}5^2} = 0{,}2625$

Для автотрансформатора предварительно находим $X_{*В(ном)}$, $X_{*С(ном)}$, $X_{*Н(ном)}$:

$X_{*В(ном)} = 0{,}005(11+32-20) = 0{,}115$; $X_{*С(ном)} = 0{,}005(11+20-32) = 0$;

$X_{*Н(ном)} = 0{,}005(32+20-11) = 0{,}205$, поэтому

$X_{*5(б)} = 0$ и $X_{*6(б)} = 0{,}115\frac{100}{125}\cdot\frac{230^2}{230^2} = 0{,}092$.

Для системы обычно принимают $E = U_{ном} = U_{ср.ном}$, поэтому $X_{*8(б)} = 1{,}0\frac{100}{2000}\cdot\frac{230^2}{230^2} = 0{,}05$

По формуле $X_{*9(б)} = 0{,}35\frac{100}{10{,}5^2} = 0{,}317$; $X_{*10(б)} = X_{*11(б)} = 0{,}4\cdot 50\cdot\frac{100}{121^2} = 0{,}1366$.

ЭДС генераторов $E_{*1(б)} = E_{*2(б)} = \frac{E}{U_{бII}} = \frac{10{,}5}{10{,}5} = 1$;

ЭДС системы $E_{*3(б)} = \frac{U_{ср.ном}}{U_{бIII}} = \frac{230}{230} = 1$.

Схема обратной последовательности отличается от схемы прямой последовательности только тем, что в ней отсутствуют ЭДС, а сопротивления генераторов

$X_{*1б} = X_{*2(б)} = 0{,}166\frac{100}{63/0{,}8}\cdot\frac{10{,}5^2}{10{,}5^2} = 0{,}2108$.

В схему замещения нулевой последовательности генераторы и реактор не вводятся, так как они находятся за трансформаторами с соединением обмоток по схеме Y_0/Δ, но вводится обмотка низшего напряжения автотрансформатора, соединенная в треугольник. Сопротивление этой обмотки

$X^{0}_{*7(б)} = 0{,}205\frac{100}{125}\cdot\frac{10{,}5^2}{10{,}5^2} = 0{,}164$.

Сопротивления нулевой последовательности системы и линий соответственно равны

$X^{0}_{*8(б)} = 1{,}1\frac{100}{2000}\cdot\frac{230^2}{230^2} = 0{,}055$ и $X^{0}_{*10(б)} = X^{0}_{*11(б)} = 1{,}2\cdot 50\cdot\frac{100}{121^2} = 0{,}41$.

Поскольку $E_{*1(б)} = E_{*2(б)}$, $X_{*1(б)} = X_{*2(б)}$ и $X_{*3(б)} = X_{*4(б)}$, то при КЗ потенциалы с обеих сторон реактора одинаковы, поэтому он может быть закорочен или исключен.

Это упрощает задачу преобразования схемы:

$X_{*12(б)} = X_{*1(б)} + X_{*3(б)} + X_{*10(б)} = X_{*13(б)} = X_{*2(б)} + X_{*4(б)} + X_{*11(б)} = 0{,}5721$;

$E_{*4(б)} = E_{*1(б)} // E_{*2(б)} = \frac{E_{*1(б)}X_{*13(б)} + E_{*2(б)}X_{*12(б)}}{X_{*13(б)} + X_{*12(б)}} = 1$; $X_{*14(б)} = X_{*12(б)} // X_{*13(б)} = 0{,}286$.

Сопротивление $X_{*15(б)} = X_{*5(б)} + X_{*6(б)} + X_{*8(б)} = 0{,}142$.

При этом $X_{*1\Sigma(б)} = X_{*14(б)} // X_{*15(б)} = \frac{0{,}286\cdot 0{,}142}{0{,}286+0{,}142} = 0{,}095$; $E_{*\Sigma(б)} = E_{*3(б)} // E_{*4(б)} = 1$.

Аналогичные преобразования схемы обратной последовательности дают $X_{*2\Sigma(б)} = 0{,}097$.

Элементарные преобразования схемы нулевой последовательности дают $X_{*0\Sigma(б)} = 0{,}063$.

Эквивалентные результирующие схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, полученные в результате преобразований рассмотренных исходных схем замещения, представлены соответственно на рис. *д*, *е* и *ж*.

Распределение и трансформации токов и напряжений

При несимметричных процессах, фазные токи и напряжения определяются путем суммирования симметричных составляющих.

При определении фазных величин за трансформаторами нужно иметь в виду, что токи и напряжения при переходе через трансформатор изменяются не только по величине, но и по фазе в зависимости от соединения его обмоток.

Рассмотрим схему трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ-11.

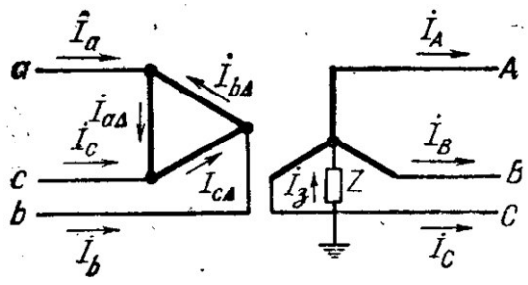


Схема трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ-11.

Обозначим число витков фазных обмоток соответственно через ωY и $\omega\Delta$. Тогда линейный коэффициент трансформации определяется при этом как:

$$K = \sqrt{3} * \frac{\omega Y}{\omega \Delta}$$

При заданных фазных токах I_A, I_B, I_C в соответствии с принятыми на рис. положительными направлениями для токов в линейных проводах за треугольником имеем:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a\Delta} - I_{b\Delta} = (I_A - I_B) * \frac{\omega Y}{\omega \Delta} = \frac{I_A - I_B}{\sqrt{3}} * K \\ I_b &= I_{b\Delta} - I_{c\Delta} = (I_B - I_C) * \frac{\omega Y}{\omega \Delta} = \frac{I_B - I_C}{\sqrt{3}} * K \\ I_c &= I_{c\Delta} - I_{a\Delta} = (I_C - I_A) * \frac{\omega Y}{\omega \Delta} = \frac{I_C - I_A}{\sqrt{3}} * K \end{aligned} \qquad (1)$$

Если токи выразить через симметричные составляющие, формулы будут иметь иной вид. Например, для тока I_a получим:

$$I_a = \frac{I_{A1} + I_{A2} + I_0 - a^2 I_{A1} - a I_{A2} - I_0}{\sqrt{3}} \cdot K = \frac{(1-a^2) I_{A1} + (1-a) I_{A2}}{\sqrt{3}} \cdot K = (I_{A1} e^{j30^\circ} + I_{A2} e^{-j30^\circ}) K \qquad (2)$$

Из формулы видно, что как и следовало ожидать, линейные токи за треугольником не содержат составляющих нулевой последовательности.

Аналогично можно найти напряжения за рассматриваемым трансформатором (Δ). Если U_A, U_B и U_C фазные напряжения со стороны Y, включающие в себя падения напряжения в самом трансформаторе, то искомые фазные напряжения со стороны Δ будут:

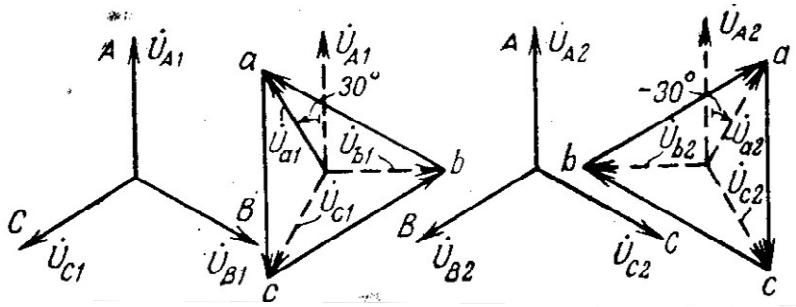
$$\begin{aligned} U_a &= \frac{U_A - U_B}{\sqrt{3}} * \frac{1}{K} \\ U_b &= \frac{U_B - U_C}{\sqrt{3}} * \frac{1}{K} \\ U_c &= \frac{U_C - U_A}{\sqrt{3}} * \frac{1}{K} \end{aligned} \qquad (3)$$

или если выразить напряжение через симметричные составляющие, например U_a, имеем:

$$U_a = (U_{A1}e^{j30} + U_{A2}e^{-j30}) * \frac{1}{K} \qquad (4)$$

из 3 и 4 следует, что напряжения со стороны Δ не зависят от напряжения нулевой последовательности на стороне Y. В то же время, если нейтраль системы на стороне треугольника смещена на $U_{o\Delta}$, для определения фазных напряжений относительно земли к значениям по 3 и 4 нужно прибавить $U_{o\Delta}$.

Структура формул 2 и 4 показывает, что при переходе со стороны Y на сторону Δ трансформатора, обмотки которого соединены по группе Y/Δ-11, векторы прямой последовательности поворачиваются на 30^0 в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности – на 30^0 в противоположном направлении.

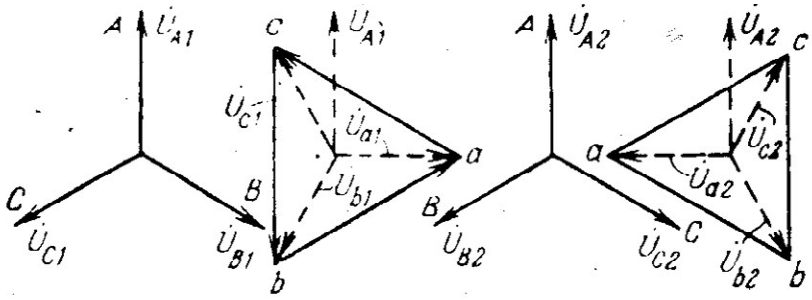


Сдвиг векторов напряжений прямой и обратной последовательностей для трансформатора с соединением обмоток Y/Δ-11.

Если переход через трансформатор осуществляется в обратном направлении, угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

При соединении обмоток по группе 12 – угловые смещения токов и напряжений вообще отсутствуют. При этом при соединении трансформатора по схеме Y_0/ Y_0 должны быть учтены трансформируемые составляющие нулевой последовательности.

При нечетной группе соединения обмоток в тех случаях, когда не требуется знать истинной взаимной ориентировки векторных диатрамм на обеих сторонах трансформатора, можно для простоты считать его соединение по группе 3 (или 9), поскольку при этом векторы прямой и обратной последовательностей повертываются на 90° в противоположные направления (рис.).



Сдвиг векторов напряжений прямой и обратной последовательностей при трансформаторе с соединением обмоток Y/Δ-3.

Очевидно, векторы прямой последовательности можно оставить без смещения, но векторы обратной последовательности сдвинуть на 180°. Отсюда вытекает простое и удобное для практики правило:

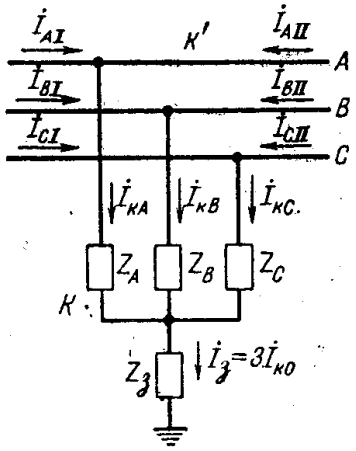
при переходе через трансформатор с соединением Y/Δ (или Δ/Y) достаточно только у векторов обратной последовательности изменить знак на противоположный.

Нужно иметь в виду, что отказ от учета действительной группы соединения обмоток трансформатора приводит к несовпадению обозначений линейных проводов за трансформатором с маркировкой, отвечающей действительной группе соединений.

Следует особо подчеркнуть, что если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги, обусловленные соответствующей группой соединения обмоток трансформатора.

Однократная поперечная несимметрия

Общие замечания. Поперечную несимметрия в произвольной точке 3-х фазной системы можно представить в общем виде присоединением в той точке неодинаковых сопротивлений.



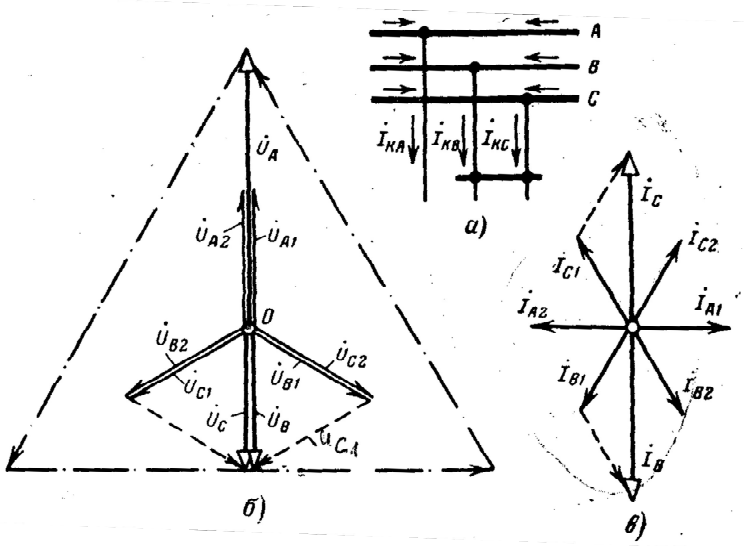
Такой подход позволяет получить решение в общем виде, из которого затем получают частные решения, характер, тот или иной вид несимметрии.

Однако (при решении в общем виде) получаются громоздкие выражения. Проще и нагляднее проводить решение для каждого вида поперечной несимметрии, используя характеризующие его условия.

При рассмотрении несимметричных коротких замыканий вначале предполагаем, что эти замыкания металлические, а затем укажем, как учесть переходные сопротивления.

При записи граничных условий принимаем, что фаза А находится в условиях, отличных от условий для двух других фаз, т.е. она является, как принято называть особой фазой. За положительное направление фазных токов и их симметричных составляющих принимаем направление к точке к.з. (Для упрощения можно опускать индекс вида к.з., сохраняя его только в записи граничных условий и в окончательных результатах).

Двухфазное короткое замыкание



Запишем граничные условия для 2-х фазного КЗ

$$\boldsymbol{I_{KA}^{(2)} = 0;} \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{I_{KB}^{(2)} = -I_{KC}^{(2)};} \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{U_{KB}^{(2)} - U_{KC}^{(2)} = 0} \qquad (3)$$

Поскольку система токов уравновешена, т.е. $I_A + I_B + I_C = 0$, то $I_{K0} = 0$.

Следовательно, (1) можно записать $\boldsymbol{I_{KA} = I_{KA1} + I_{KA2} = 0}$, откуда

$$I_{KA1} = -I_{KA2} \qquad (4)$$

Выразим напряжение $\boldsymbol{U_{KB}}$ и $\boldsymbol{U_{KC}}$ через симметричные составляющие напряжения фазы А. Тогда (3) будет

$a^2U_{KA1}+aU_{KA2}+U_{KA0}-aU_{KA1}-a^2U_{KA2}-U_{KA0}=(a^2-a)(U_{KA1}-U_{KA2})=0$, откуда

$$U_{KA2}=U_{KA1} \qquad (5)$$

Теперь обратимся к основным уравнениям II закона Кирхгофа для отдельных последовательностей

$U_{K1}=E_{\Sigma}-Z_{1\Sigma}*I_{K1}$

$U_{K2}=0-Z_{2\Sigma}*I_{K2}$

$U_{K0}=0-Z_{0\Sigma}*I_{K0}$

Соотношение (5) позволяет приравнять правые части уравнений для $\boldsymbol{U_{K1}}$ и $\boldsymbol{U_{K2}}$, т.е.

$$\boldsymbol{E_{A\Sigma}-jX_{1\Sigma}I_{KA1}=-jX_{2\Sigma}I_{KA2}}$$

Откуда имея в виду соотношение (4), после простых преобразований получили:

$$I^{(2)}_{KA1}=\frac{E_{A\Sigma}}{j(X_{1\Sigma}+X_{2\Sigma})} \qquad (6)$$

Токи поврежденных фаз в месте к.з. можно выразить через $\boldsymbol{I_{KA2}}$, т.е.

$$\boldsymbol{I^{(2)}_{KB}=a^2I_{KA1}+aI^{(2)}_{KA2}=(a^2-a)I^{(2)}_{KA1}=-j\sqrt{3}a^2I^{(2)}_{KA1}} \qquad (7)$$

и согласно выражению 2

$$I^{(2)}_{KC}=j\sqrt{3}I^{(2)}_{KA1} \qquad (7а)$$

Напряжение прямой и обратной последовательностей фазы А в месте к.з. в соответствии с первым уравнением II закона Кирхгофа и выражениями 4,5 будут:

$$\boldsymbol{U^{(2)}_{KA1}=U^{(2)}_{KA2}=-jX_{2\Sigma}I^{(2)}_{KA1}} \qquad (8)$$

Напряжение нулевой последовательности $\boldsymbol{U^{(2)}_{K0}}$ может иметь произвольное значение, т.к. при данном виде к.з. смещение нейтрали системы относительно земли не влияет на величины токов. Поскольку в данном случае для токов путь через землю отсутствует ($X_{0\Sigma}=\infty$) то имеем: $U^{(2)}_{KA0}=-jX_{0\Sigma}I^{(2)}_{K0}=-\infty*0$ - неопределенность.

Фазные напряжения в месте к.з. составляют:

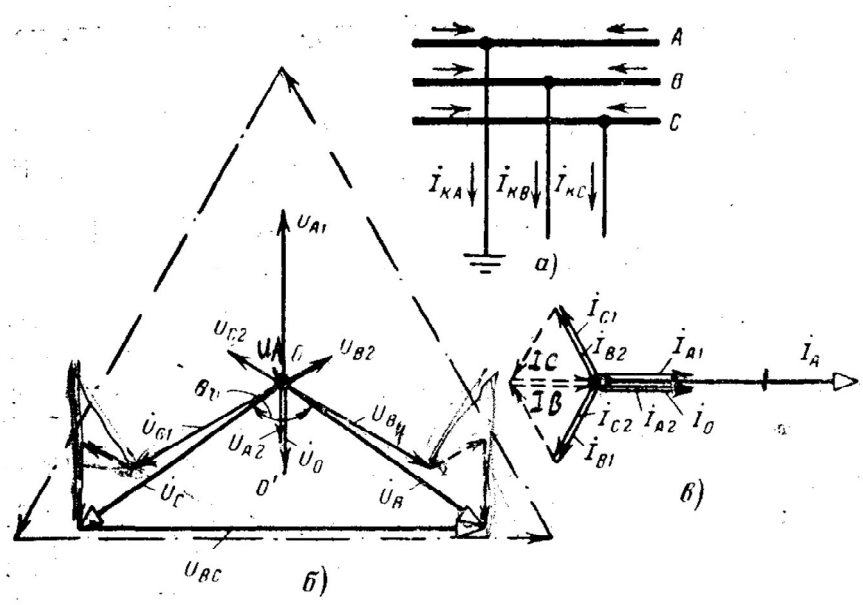
$$\boldsymbol{U^{(2)}_{KA}=U^{(2)}_{KA1}+U^{(2)}_{KA2}=2U^{(2)}_{KA1}=2jX_{2\Sigma}I^{(2)}_{KA1}} \qquad (9)$$

$$\boldsymbol{U^{(2)}_{KB}=U^{(2)}_{KC}=a^2U^{(2)}_{KA1}+aU^{(2)}_{KA2}=-U^{(2)}_{KA1}=-\frac{U^{(2)}_{KA}}{2}} \qquad (10)$$

Построим векторные диаграммы токов и напряжений (см. рис. *б,в*).

Однофазное короткое замыкание

При к.з. на землю фазы А



граничные условия будут

$$\boldsymbol{I}_{KB}^{(1)} = \mathbf{0}; \qquad (11)$$

$$\boldsymbol{I}_{KC}^{(1)} = \mathbf{0}; \qquad (12)$$

$$\boldsymbol{U}_{KA}^{(1)} = \mathbf{0}. \qquad (13)$$

При соблюдении условий 11 и 12 симметричные составляющие токов в месте к.з. связаны простым соотношением

$$\boldsymbol{I}_{KA1}^{(1)} = \boldsymbol{I}_{KA2}^{(1)} = \boldsymbol{I}_{KA0}^{(1)} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{3}}\boldsymbol{I}_{KA}^{(1)} \qquad (14)$$

Для заземленной фазы в соответствии с 13 имеем; $\boldsymbol{U}_{KA} = \boldsymbol{U}_{KA1} + \boldsymbol{U}_{KA2} + \boldsymbol{U}_{K0} = \mathbf{0}$ или подставляя сюда вместо симметричных составляющих напряжений их выражения по II закону Кирхгофа:

$$U_{K1} = E_{\Sigma} - Z_{1\Sigma} * I_{K1}$$

$$U_{K2} = 0 - Z_{2\Sigma} * I_{K2}$$

$$U_{K0} = 0 - Z_{0\Sigma} * I_{K0}$$

и учитывая соотношение 14 получим: $\boldsymbol{E}_{A\Sigma} - \boldsymbol{jI}_{KA1}(\boldsymbol{X}_{1\Sigma} + \boldsymbol{X}_{2\Sigma} + \boldsymbol{X}_{0\Sigma}) = \mathbf{0}$,

откуда $I_{KA1} = \dfrac{E_{A\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}$ (15)

Ток в поврежденной фазе в месте к.з. $\boldsymbol{I}_{KA}^{(1)} = \mathbf{3}\boldsymbol{I}_{KA1}^{(1)}$ (16)

Симметричные составляющие напряжения в месте к.з.

$$\boldsymbol{U}_{K0} = \boldsymbol{jX}_{0\Sigma}\boldsymbol{I}_{K0} - \boldsymbol{jX}_{0\Sigma}\boldsymbol{I}_{KA1} \qquad (17)$$

$$\boldsymbol{U}_{KA2} = -\boldsymbol{jX}_{2\Sigma}\boldsymbol{I}_{KA2} = -\boldsymbol{jX}_{1\Sigma}\boldsymbol{I}_{KA1} \qquad (18)$$

$$\boldsymbol{U}_{KA1} = -(\boldsymbol{U}_{KA2} + \boldsymbol{U}_{K0}) = \boldsymbol{j}(\boldsymbol{X}_{2\Sigma} - \boldsymbol{X}_{0\Sigma})\boldsymbol{I}_{KA1} \qquad (19)$$

Фазные (относительно земли) напряжения в месте к.з.

$$U_{KB}^{(1)} = a^2 U_{KA1}^{(1)} + aU_{KA2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} = j((a^2 - a)X_{2\Sigma} + (a^2 - 1)X_{0\Sigma})I_{KA1}^{(1)} \qquad (20)$$

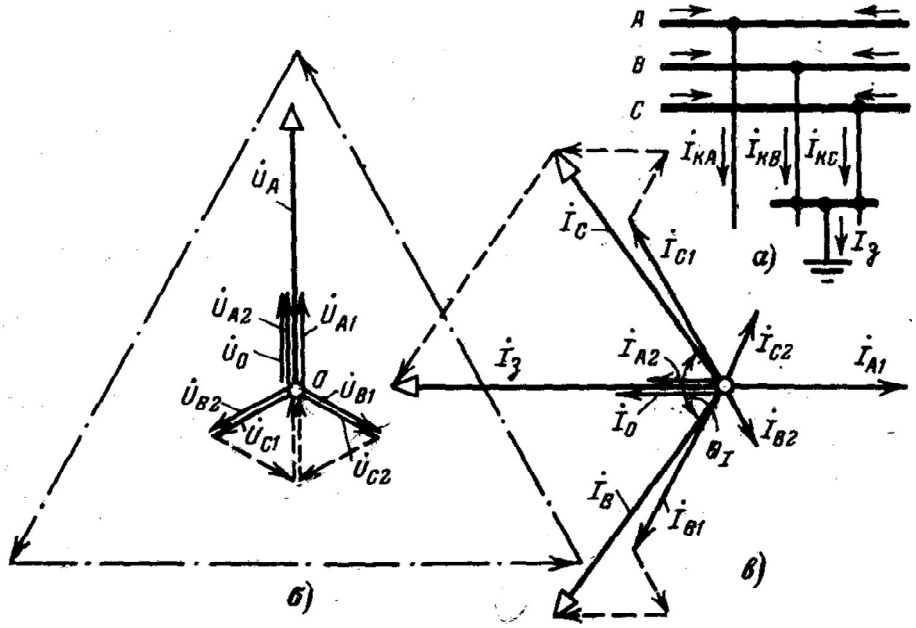
$$U_{KC}^{(1)} = j((a - a^2)X_{2\Sigma} + (a - 1)X_{0\Sigma})I_{KA1}^{(1)} \qquad (21)$$

Рассмотрим векторные диаграммы напряжений (б) и токов (в) в месте однофазного к.з. Угол $\boldsymbol{\Theta}_U$ между напряжениями неповрежденных фаз зависит от соотношений между $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$. Он изменяется в широких пределах $60^0 \leq \boldsymbol{\Theta}_U < 180^0$.

Нижний предел соответствует условию $X_{0\Sigma}=\infty$ т.е. когда замыкание на землю происходит в системе с изолированной нейтралью. К верхнему пределу Θ_U стремится при $X_{0\Sigma}\to 0$. Лишь в частном случае, при $X_{2\Sigma}= X_{0\Sigma}$ угол $\Theta_U =120^0$.

Двухфазное к.з. на землю

При одновременном замыкании фаз В и С на землю в одной точке



граничные условия будут

$$\boldsymbol{I_{KA}^{(1.1)}=0}; \qquad (22)$$

$$\boldsymbol{U_{KB}^{(1.1)}=0}; \qquad (23)$$

$$\boldsymbol{U_{KC}^{(1.1)}=0}. \qquad (24)$$

Записанные через симметричные составляющие эти условия примут вид:

$$\boldsymbol{I_{KA1}^{(1.1)}+I_{KA2}^{(1.1)}+I_{KA0}^{(1.1)}=0} \qquad (22а)$$

$$\boldsymbol{U_{KA1}^{(1.1)}=U_{KA2}^{(1.1)}=U_{KA0}^{(1.1)}=\frac{1}{3}U_{KA}^{(1.1)}} \qquad (25)$$

Очевидно, что согласно 2 и 3 уравнению по II закону Кирхгофа, а также (25):

$I_{KA0}^{(1.1)} jX_{0\Sigma} = I_{KA2}^{(1.1)} jX_{2\Sigma}$.

Прибавим к обеим частям равенства $\boldsymbol{I_{KA0}^{(1.1)} jX_{2\Sigma}}$ и учитывая (22а), после преобразований получим:

$$I_{KA0}^{(1.1)} = -I_{KA1}^{(1.1)} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{0\Sigma}+X_{2\Sigma}} \qquad (26)$$

аналогично

$$I_{KA2}^{(1.1)} = -I_{KA1}^{(1.1)} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{0\Sigma}+X_{2\Sigma}} \qquad (27)$$

Используя $\boldsymbol{U_{K1}=E_\Sigma - Z_{1\Sigma}I_{K1}}$ и полученные уравнения (25-26) имеем

$$\boldsymbol{U_{KA1}^{(1,1)}=E_{A\Sigma}-jX_{1\Sigma}I_{KA1}^{(1,1)}=U_{K0}^{(1,1)}=I_{KA1}^{(1,1)}\frac{X_{2\Sigma}\cdot X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}}, \qquad (28)$$

откуда $\boldsymbol{I_{KA1}^{(1.1)}=\dfrac{E_{A\Sigma}}{j(X_{1\Sigma}+\dfrac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}})}}$ (29)

Токи поврежденных фаз в месте КЗ

$$\boldsymbol{I_{KB}^{(1.1)} = (a^2 - \frac{X_{2\Sigma} + aX_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}})I_{KA}^{(1.1)}} \quad (30)$$

$$\boldsymbol{I_{KC}^{(1.1)} = (a - \frac{X_{2\Sigma} + a^2X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}})I_{KA}^{(1.1)}} \quad (31)$$

Ток через землю $\boldsymbol{I_3^{(1.1)} = 3I_{K0}^{(1.1)}}$.

Модули выражений в скобках, входящих в (30 и 31), одинаковы и составляют

$$\boldsymbol{m^{(1,1)} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}}.$$

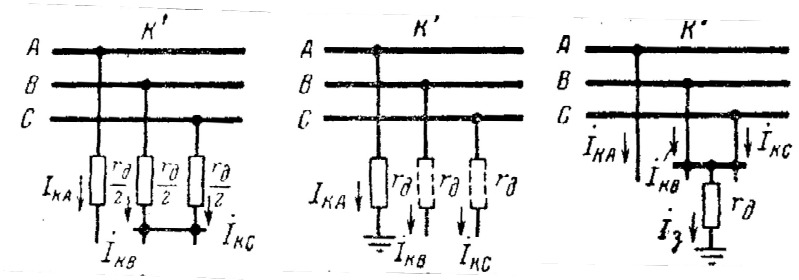
В зависимости от соотношения между $\boldsymbol{X_{2\Sigma}}$ и $\boldsymbol{X_{0\Sigma}}$ значения $\boldsymbol{m^{(1,1)}}$ находятся в пределах $\boldsymbol{1{,}5 \le m^{(1,1)} \le \sqrt{3}}$. Нижний предел наступает при $\boldsymbol{X_{2\Sigma} = X_{0\Sigma}}$, а верхний – при $\boldsymbol{X_{2\Sigma} / X_{0\Sigma}}$, равном 0 или ∞.

Векторные диаграммы напряжений и токов в месте двухфазного короткого замыкания на землю приведены на рис. *б* и *в*. Угол $\boldsymbol{\Theta_I}$ между токами поврежденных фаз может изменяться в пределах $60^0 \le \Theta_I < 180^0$, стремясь к нижнему пределу при $\boldsymbol{X_{0\Sigma}} \to 0$ и к верхнему — при $\boldsymbol{X_{0\Sigma}} \to \infty$, что соответствует условиям двухфазного короткого замыкания без соединения с землей. Напряжение неповрежденной фазы (относительно земли) в месте короткого замыкания составляет: $U_{KA}^{(1.1)} = 3U_{KA1}^{(1.1)}$.

Напряжение двух других фаз равны 0.

Учет переходного сопротивления в месте к.з.

Эл. дугу в открытом воздухе приближенно можно характеризовать активным сопротивлением $r_д$. Рассмотрим, как учитывается сопротивление дуги при различных видах несимметричных к.з. Предположим, что замыкание между фазами В и С произошло через сопротивление дуги $r_д$. Это замыкание можно представить как глухое двухфазное к.з. на ответвлении, фазы которого имеют одинаковые сопротивления $r_д/2$. Этот прием позволяет несимметричный участок 3-х фазной цепи привести к симметричному, что в свою очередь позволяет использовать метод симметричных составляющих.



Введение сопротивления $r_д/2$ в фазу А, не меняет условий рассматриваемого замыкания, т.к. на данном участке ток в фазе А отсутствует. Тогда по аналогии с (6) (2-х фазное к.з.) для тока прямой последовательности в месте к.з. можно записать:

$$I_{KA1}^{(2)} = \frac{E_{A\Sigma}}{(\frac{r_Д}{2} + jX_{1\Sigma}) + (\frac{r_Д}{2} + jX_{2\Sigma})} = \frac{E_{A\Sigma}}{r_Д + j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}$$

(32)

Для напряжения прямой последовательности за сопротивлениями дуги $r_д$ имеем

$$\boldsymbol{U_{KA1}^{(2)} = \left(r_Д + jX_{2\Sigma}\right) I_{KA1}^{(2)}}$$

(33)

Для напряжения обратной последовательности в точке К/ справедливо уравнение (8) (2-х фазное к.з.).

Рассмотрим теперь влияние дуги при однофазном к.з.. Пусть фаза А замкнулась на землю через сопротивление дуги $r_д$. Для сохранения симметрии данного участка цепи, можно представить, что такие же сопротивления введены и в две другие фазы. От этого ничего не изменится, т.к. в соответствии с граничными условиями, при однофазном к.з. (ф А) токи фаз В и С равны 0 $\boldsymbol{I_{KB}^{(1)} = I_{KC}^{(1)} = 0}$. При учете влияния сопротивления эл. дуги, сопротивление каждой последовательности увеличилось на $r_д$ и по аналогии с (15) (однофазное к.з.) выражение для тока прямой последовательности в месте к.з. будет

$$\boldsymbol{I_{KA1}^{(1)} = \frac{E_{A\Sigma}}{\left(r_Д + jX_{1\Sigma}\right) + \left(r_Д + jX_{2\Sigma}\right) + \left(r_Д + jX_{0\Sigma}\right)} = \frac{E_{A\Sigma}}{3r_Д + j\left(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}\right)}}$$

(34)

Напряжение прямой последовательности за сопротивлением (точка К/)составляет:

$$\boldsymbol{U_{KA1}^{(1)} = \left[(3r_Д + j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})\right] I_{KA1}^{(1)}}.$$

При коротком замыкании между фазами В и С с одновременным замыканием этой точки на землю через сопротивление дуги $r_д$. (рис. *в*) сопротивление дуги в данном случае войдет в схему нулевой последовательности своей утроенной величиной. Выражение для тока прямой последовательности в месте к.з. по аналогии с (29) (2-х фазное к.з. на землю) будет $I_{KA1}^{(1.1)} = \dfrac{E_{A\Sigma}}{jX_{1\Sigma} + \dfrac{jX_{2\Sigma}(3r_Д + jX_{0\Sigma})}{jX_{2\Sigma} + (3r_Д + jX_{0\Sigma})}}$,

(35)

а напряжение прямой последовательности за сопротивлением $r_д$ в т К/

$$U_{KA1}^{(1.1)} = \frac{jX_{2\Sigma}(3r_{Д} + jX_{0\Sigma})}{jX_{2\Sigma} + (3r_{Д} + jX_{0\Sigma})} I_{KA1}^{(1.1)}$$

(36)

Для определения токов обратной и нулевой последовательности в месте замыкания в формулах 28 и 29 (2-х фазное к.з. на землю) вместо $X_{0\Sigma}$ следует ввести ($3r_{Д}+jX_{0\Sigma}$)

Правило эквивалентности прямой последовательности

На основании полученных формул можно сделать вывод, что токи обратной и нулевой последовательности и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте к.з. Т.е. задача расчета любого несимметричного к.з. прежде всего состоит в определении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида к.з.

Обычно при коротких замыканиях в основных цепях электроэнергетических систем результирующее эквивалентное индуктивное сопротивление расчетной схемы относительно точки КЗ значительно превышает результирующее активное сопротивление (в 10 и более раз), поэтому расчет периодической составляющей тока при несимметричных КЗ допускается производить, не учитывая активные сопротивления различных элементов расчетной схемы. При этом условии ток прямой последовательности особой фазы в месте любого несимметричного КЗ следует определять по формуле

$$\dot{I}_{кA1}^{(n)} = \frac{\dot{E}эк}{j(X_{1\Sigma} + \Delta X^{(n)})},$$

где (n) - вид несимметричного КЗ;

$\dot{E}_{эк}$ - результирующая эквивалентная ЭДС всех учитываемых источников энергии;

$X_{1\Sigma}$ - результирующее эквивалентное индуктивное сопротивление схемы замещения прямой последовательности относительно точки несимметричного КЗ;

$\Delta X^{(n)}$ - дополнительное индуктивное сопротивление, которое определяется видом несимметричного КЗ (n) и параметрами схем замещения обратной и нулевой (при однофазном и двухфазном КЗ на землю) последовательностей.

Модуль полного (суммарного) тока поврежденной фазы в месте несимметричного КЗ связан с модулем соответствующего тока прямой последовательности следующим соотношением:

$$\left|I_{к}^{(n)}\right| = m^{(n)}\left|I_{к1}^{(n)}\right|,$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, показывающий, во сколько раз модуль полного (суммарного) тока поврежденной фазы при *n-м* виде несимметричного КЗ в расчетной точке КЗ превышает ток прямой последовательности при этом же виде КЗ и в той же точке. Значения коэффициента $m^{(n)}$ при КЗ разных видов приведены в табл.

Значения дополнительного сопротивления $\Delta X^{(n)}$ и коэффициента $m^{(n)}$ для несимметричных КЗ разных видов

Вид КЗ	Значение $\Delta X^{(n)}$	Значение коэффициента $m^{(n)}$
Двухфазное	$X_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
Однофазное	$X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$	3
Двухфазное КЗ на землю	$\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$	$\sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}}$

Ток прямой последовательности любого несимметричного к.з. может быть определен как ток при 3-х фазном к.з. в точке, удаленной от действительной точки к.з. на дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$, которое не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида к.з. определяется результирующими

сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки схемы, а также в общем случае сопротивлением возникшей дуги. . А для определения модуля результирующего тока КЗ поврежденной фазы достаточно найденный ток прямой последовательности увеличить в $m^{(n)}$ раз

Это положение называется правилом эквивалентности прямой последовательности. Оно справедливо, если мы, как уже отмечали, рассматриваем только основную гармонику тока несимметричного к.з.

Токи обратной и нулевой последовательностей особой фазы в месте несимметричного КЗ связаны с током прямой последовательности соотношениями:

- при двухфазном КЗ $\dot{I}_{кА2} = -\dot{I}_{кА1}$;
- при однофазном КЗ $\dot{I}_{кА2} = \dot{I}_{кА0} = \dot{I}_{кА1}$;
- при двухфазном КЗ на землю $\dot{I}_{кА2} = -\dot{I}_{кА1}\frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}$ и $\dot{I}_{кА0} = -\dot{I}_{кА1}\frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}$.

При расчетах несимметричных КЗ определению подлежит не только ток КЗ, но и напряжение в месте КЗ.

Напряжение прямой последовательности особой фазы в точке несимметричного КЗ любого вида составляет $\dot{U}_{кА1} = j\dot{I}_{кА1}\Delta X^{(n)}$.

Напряжения обратной и нулевой (при однофазном и двухфазном КЗ на землю) последовательностей особой фазы в точке КЗ равны соответственно:

- при двухфазном КЗ $\dot{U}_{кА2} = \dot{U}_{кА1}$;
- при однофазном КЗ $\dot{U}_{кА2} = -j\dot{I}_{кА2}X_{2\Sigma}$ и $\dot{U}_{кА0} = -j\dot{I}_{кА0}X_{0\Sigma}$;
- при двухфазном КЗ на землю $\dot{U}_{кА2} = \dot{U}_{кА0} = \dot{U}_{кА1}$.

Расчет токов несимметричного КЗ в заданный момент времени.

Аналитические расчеты тока КЗ от синхронной машины в произвольный момент времени при несимметричном КЗ рекомендуется выполнять с использованием метода типовых кривых. При этом расчеты целесообразно вести в следующем порядке:

1) по исходной расчетной схеме составить эквивалентные схемы замещения прямой, обратной и нулевой (при однофазном и двухфазном КЗ на землю) последовательностей, выразив все параметры в относительных единицах при предварительно выбранных базисных условиях, причем в схеме замещения прямой последовательности синхронную машину следует учесть сверхпереходной ЭДС (предварительно найденной из предшествующего режима) и сверхпереходным сопротивлением;

2) с помощью преобразований привести схемы к простейшему виду и определить $\Delta X^{(n)}$;

3) определить начальное действующее значение тока прямой последовательности

$$I_{*\,1п0(б)} = \frac{E''_{*\,0(б)}}{X_{*\,1\Sigma(б)} + \Delta X_{*\,(б)}^{(n)}};$$

4) определить значение величины $I_{*\,1п0(ном)}$ характеризующей электрическую удаленность расчетной точки КЗ от синхронной машины

$$I_{*\,1п0(ном)} = I_{*\,1п0(б)}\frac{S_б}{S_{ном}};$$

5) в соответствии с типом генератора, его системы возбуждения и найденным значением $I_{*\,1п0(ном)}$ выбрать необходимую типовую кривую и для заданного момента времени определить коэффициент γ_t;

6) определить искомое значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины в заданный момент времени

$$I_{nt} = m^{(n)} \gamma_t \underset{*}{I}_{1п0(б)} I_б ,$$

где $m^{(n)}$ — коэффициент, зависящий от вида КЗ.

Методы расчета несимметричных коротких замыканий в сетях до 1 кВ.

Расчет токов несимметричных КЗ следует выполнять с использованием метода симметричных составляющих. При этом предварительно следует составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В схему замещения прямой последовательности должны быть введены все элементы исходной расчетной схемы, причем при расчете начального значения периодической составляющей тока несимметричного КЗ автономные источники, синхронные и асинхронные электродвигатели, а также комплексная нагрузка должны быть учтены сверхпереходными ЭДС и сверхпереходными сопротивлениями.

Схема замещения обратной последовательности также должна включать все элементы исходной расчетной схемы. Сопротивления обратной последовательности следует принимать по данным каталогов, а асинхронных машин - принимать равными сверхпереходным сопротивлениям.

Расчет токов однофазного короткого замыкания

Если электроснабжение электроустановки напряжением до 1 кВ осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор, то начальное значение периодической составляющей тока однофазного КЗ от системы, кА, следует рассчитывать по формуле

$$I_{\text{п0}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}},$$

где $R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ, мОм;

$R_{0\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления нулевой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ, мОм. Эти сопротивления равны:

$$\left.\begin{aligned} R_{0\Sigma} &= R_{0\text{т}} + R_{\text{р}} + R_{\text{тА}} + R_{\text{кв}} + R_{\text{к}} + R_{0\text{ш}} + R_{0\text{кб}} + R_{0\text{вл}} + R_{\text{д}}; \\ X_{0\Sigma} &= X_{0\text{т}} + X_{\text{р}} + X_{\text{тА}} + X_{\text{кв}} + X_{0\text{ш}} + X_{0\text{кб}} + X_{0\text{вл}}, \end{aligned}\right\}$$

где $R_{0\text{т}}$ и $X_{0\text{т}}$ - активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности понижающего трансформатора. Для трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме Δ/Y_0, при расчете КЗ в сети низшего напряжения эти сопротивления следует принимать равными соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности. При других схемах соединения обмоток трансформаторов активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности необходимо принимать в соответствии с указаниями изготовителей;

$R_{0\text{ш}}$ и $X_{0\text{ш}}$ - активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности шинопровода;

$R_{0\text{кб}}$ и $X_{0\text{кб}}$ - активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности кабеля;

$R_{0\text{вл}}$ и $X_{0\text{вл}}$ - активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности воздушной линии:

$$R_{0\text{вл}} = R_1 + 3R_3 = R_1 + 0{,}15 \text{ мОм/м};$$

$$X_{0\text{вл}} \approx 3X_{1\text{вл}}.$$

В электроустановках с автономными источниками энергии начальное значение периодической составляющей тока однофазного КЗ ($I_{\text{п0}}^{(1)}$) в килоамперах следует определять по формуле

$$I_{\text{п0}}^{(1)} = \frac{3E''_{\text{ф}}}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}},$$

где $E''_{\text{ф}}$ - эквивалентная сверхпереходная ЭДС автономных источников (фазная), В.

Расчет токов двухфазного короткого замыкания

При электроснабжении электроустановок напряжением до 1 кВ от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ ($I_{п0}^{(2)}$) в килоамперах следует определять по формуле

$$I_{п0}^{(2)} = \frac{U_{ср.НН}}{2\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}},$$

где $R_{1\Sigma} = R_т + R_р + R_{тА} + R_{кв} + R_ш + R_к + R_{1кб} + R_{1вл} + R_д / 2$;

$X_{1\Sigma} = X_с + X_т + X_р + X_{тА} + X_{кв} + X_ш + X_{1кб} + X_{1вл}$.

В электроустановках с автономными источниками энергии начальное значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ следует рассчитывать по формуле

$$I_{п0}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E''_ф}{2\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}},$$

Начальное значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ с учетом асинхронных электродвигателей ($I_{п0АД}^{(2)}$) в килоамперах следует определять по формуле

$$I_{п0АД}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E''_{ф\Sigma}}{2\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}},)$$

где $E''_{ф\Sigma}$ - эквивалентная сверхпереходная ЭДС (фазное значение) асинхронных электродвигателей и источника электроэнергии, В;

$R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности относительно точки КЗ (с учетом параметров асинхронных электродвигателей), мОм.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ с учетом синхронных электродвигателей в килоамперах определяют аналогично.

Сравнение видов к.з.

Правило эквлвалентностн прямой последовательности и установленные значения $\Delta X^{(n)}$ и $m^{(n)}$ позволяют достаточно просто произвести сравнение различных видов короткого замыкания. Ограничимся таким сравненением для условий, когда цепь короткого замыкания чисто индуктивная.

Имея в виду, что короткие замыкания разных видов предполагаются происходящими поочередно в одной и той же точке системы и при одних и тех же исходных условиях на основании данных табл. можно написать, что между величинами дополнительных реактивностей $\Delta X^{(n)}$ при разных видах короткого замыкания существуют следующие неравенства:

$\Delta X^{(1)} > \Delta X^{(2)} > \Delta X^{(1;1)} > \Delta X^{(3)} = 0.$

Соответственно

$I_{к1}^{(1)} < I_{к1}^{(2)} < I_{к1}^{(1;1)} < I_{к1}^{(3)}$ и $U^{(1)}_{к1} > U^{(2)}_{к1} > U^{(1;1)}_{к1} > U^{(3)}_{к1} = 0.$

Далее, постоянные времени затухания свободного переходного тока при разных видах короткого замыкания (конечно, в одной и той же точке) связаны неравенствами

$T^{(1)}_d > T^{(2)}_d > T^{(1;1)}_d > T^{(3)}_d.$

Увеличение внешней реактивности статора замедляет форсировку возбуждения. Однако благодаря тому, что при этом напряжение прямой последовательности генератора падает меньше, его восстановление (если это вообще возможно) происходит за более короткий промежуток времени. Следовательно, величины критического времени при разных видах короткого замыкания в одной и той же точке связаны неравенствами

$\boldsymbol{t_{кр}^{(1)} < t_{кр}^{(2)} < t_{кр}^{(1,1)} < t_{кр}^{(3)}}$.

Анализ характера изменения тока и напряжения прямой последовательности генератора при разных видах короткого замыкания и наличии АРВ у генератора показал, что при внешней реактивности меньше критической при трехфазном коротком замыкании напряжение генератора под действием АРВ не достигнет нормальной величины, но при несимметричном коротком замыкании, при котором ($x^{вн1}+\Delta X^{(n)}$)>хкр, напряжение прямой последовательности генератора будет доведено до нормального значения.

Таким образом, чем больше дополнительная реактивность $\Delta X^{(n)}$, характеризующая вид несимметричного короткого замыкания, тем медленнее протекает переходный процесс генератора, но вместе с тем раньше наступает установпвтвийся режим.

Аналогично процесс гашения поля генератора при несимметричном коротком замыкании протекает тем медленнее, чем больше для данного вида короткого замыкания реактивность $\Delta X^{(n)}$.

Абсолютную величину отношения тока в месте любого (n) несимметричного металлического короткого замыкания чисто индуктивной схемы к току трехфазного короткого замыкания при тех же условиях можно представить как

$$K_{(n-3)} = \frac{I_к^{(n)}}{I_к^{(3)}} = m^{(n)} \frac{E^{(n)}}{E^{(3)}} \frac{1}{1 + (x_\Delta^{(n)}/x_{1\Sigma})},$$

где у результирующей э. д. с. поставлен индекс, указывающий, какому виду короткого замыкания отвечает ее значение.

В начальный момент короткого замыкания $X_{1\Sigma} \approx X_{2\Sigma}$, а при установившемся режиме короткого замыкания вблизи генератора $X_{1\Sigma} >> X_{2\Sigma}$. Следовательно, отношение $K_{(2-3)}$ находится примерно в следующих пределах

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \leqslant K_{(2-3)} < \sqrt{3}.$$

При достаточно большой удаленности короткого замыкания токи двух- и трехфазного короткого замыкания изменяются во времени мало, благодаря чему между ними в течение всего процесса короткого замыкания сохраняется приблизительно постоянное соотношение:

$$I_к^{(2)} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} I_к^{(3)} = 0{,}87 I_к^{(3)}.$$

Поскольку реактивность $X_{0\Sigma}$ может измениться в очень широких пределах (почти от 0 до ∞), то отношение $K_{(1-3)}$ находится в диапазоне

$$0 \leqslant K_{(1-3)} < 3.$$

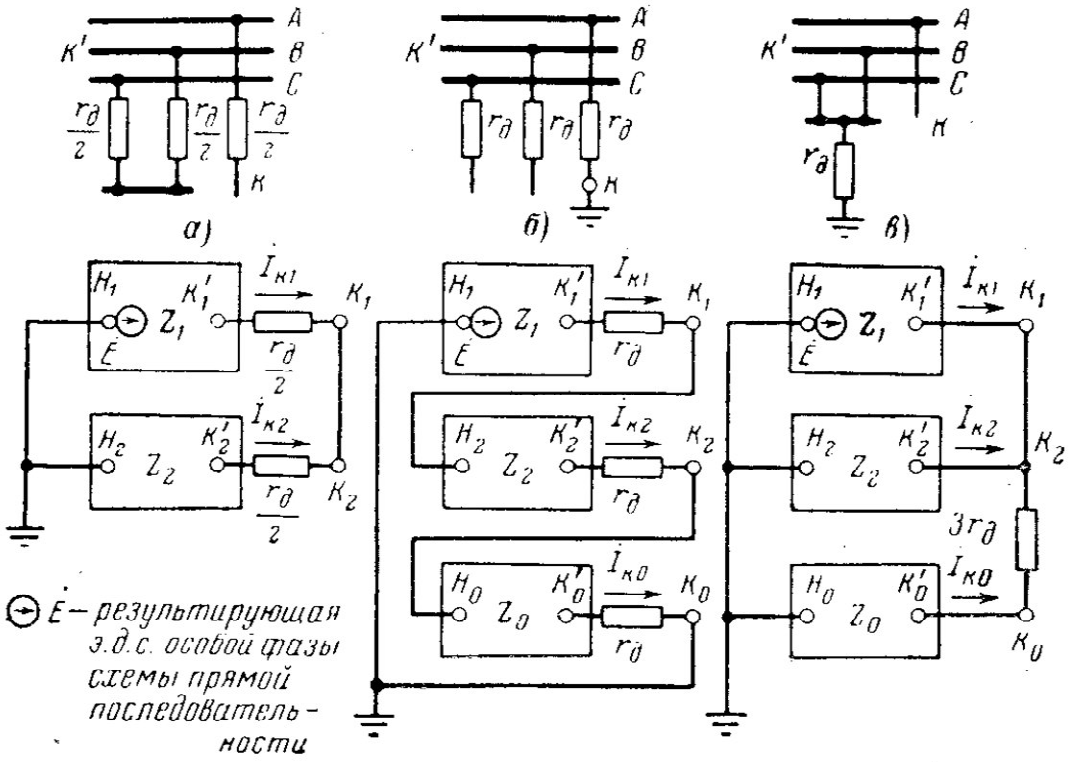
Комплексные схемы замещения

Установленные в предыдущих параграфах соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте короткого замыкания позволяют для каждого вида несимметричного короткого замыкания соединить вместе схемы отдельных последовательностей и образовать тем самым комплексную схему замещения для соответствующего вида короткого замыкания.

Такие схемы приведены на рис., причем как общий случай здесь принято, что в месте замыкания имеется сопротивление дуги и схема каждой последовательности характеризуется соответствующим полным сопротивлением. Они соответствуют особой фазе. Нетрудно убедиться, что в них соблюдаются не только соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте короткого замыкания, но также соотношения между симметричными составляющими токов в месте короткого замыкания.

Нужно иметь в виду, что в комплексной схеме для однофазвого короткого замыкания обеспечиваются правильные значения напряжений прямой последовательности в различных точках. Что касается напряжений обратной и нулевой последовательностей, то они должны определяться относительно точек нулевого потенциала схем одноименных

последовательностей, т. е. соответственно по отношению к точкам Н2 и Н0, которые являются началами схем этих последовательностей.



Комплексные схемы замещения.

а — для двухфазного замыкания через дугу; *б* — для однофазного замыкания через дугу; *в* — для двухфазного замыкания на землю через дугу.

Простое замыкание на землю.

Распределительные сети напряжением 3 - 35 кВ являются, как правило второй или третьей ступеней трансформаций от генераторов станций системы. Такие сети следовательно характеризуются относительно большой электрической удаленностью от источников питания, поэтому аварийные процессы, возникающие в этих сетях, сравнительно мало сказываются на работе генераторов системы. В практических расчетах это обстоятельство позволяет считать, что при любых нарушениях в распределительной сети, напряжение высшей ступени трансформации остается неизменным.

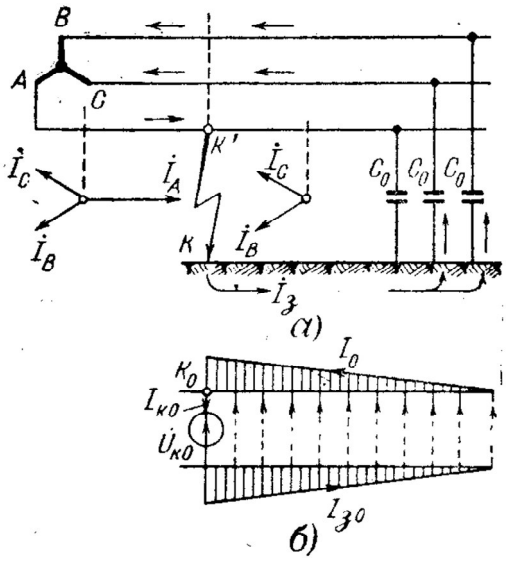
Исключение составляют местные станции, которые находятсяся непосредственно в самой распределительной сети. Такие станции, как и СК и крупные СД учитываются отдельно.

В распределительных сетях часто встречаются воздушные и кабельные линии с проводниками сравнительно малых сечений, что приводит к необходимости учета активных сопротивлений таких линий.

Распределительные сети напряжением 3 - 35 кВ работают, в основном, с изолированной нейтралью заземленной через большое сопротивление. Поэтому, если в такой сети замкнет одна фаза на землю, то не образуются обычные условия однофазного к.з. Возникший при этом ток обусловлен емкостной проводимостью сети и по величине он меньше тока однофазного к.з. в сети с глухозаземленной нейтралью.

Поэтому сети с изолированными нейтралями или нейтралями заземленными через большие дугогасящие сопротивления, называются сетями с малыми токами замыкания на землю.

Пусть в начале трехфазной линии, присоединенной к источнику переменного тока, произошло замыкание на землю фазы А (рис. а).



Простое замыкание на землю:
а) принципиальная схема; б) эпюра пространственного распределения тока нулевой последовательности.

Распределенные вдоль линии емкости каждой фазы относительно земли условно представлены сосредоточенными емкостями в конце линии. Частичные емкости между фазами для простоты не показаны; при этом отметим, что их влияние на ток замыкания на землю очень мало (см. ниже).

Проследим путь циркуляции тока замыкания на землю (он указан стрелками). Поступая в землю в месте замыкания, ток возвращается по неповрежденным фазам через их емкостные проводчмости относительно земли. Емкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной рассматриваемым замыканием, и ток в этой фазе справа от места замыкания отсутствует, если пренебречь весьма малым током, который наводится токами двух других фаз на данном участке линии. Характер векторных диаграмм токов слева и справа от места замыкания показан на том же рисунке.

В действительности емкостная проводимость линии распределена равномерно по ее длине, поэтому эпюра пространственного распределения тока нулевой последовательности, который составляет одну треть тока замыкания на землю, вдоль линии выражается наклонной прямой (рис.).

Граничные условия для простого замыкания на землю, естественно, те же, что и для однофазного короткого замыкания. Поэтому все выражения, полученные ранее, в равной мере относятся к случаю простого замыкания на землю.

Емкостные сопротивления элементов электрической системы значительно превышают их индуктивные и активные сопротивления, что позволяет при определении тока простого замыкания на землю пренебречь последними и, следовательно, считать, что величина этого тока практически не зависит от места замыкания в рассматриваемой электрически связанной сети. Кроме того, так как этот ток относительно мал, при его нахождении можно считать, что напряжение источника сохраняется неизменным. При таких допущениях ток в месте замыкания на землю через дугу с сопротивлением $\boldsymbol{r_Д}$ будет:

$$\boldsymbol{I_к = 3 \cdot \frac{U_{ф.ср}}{3 \cdot r_Д - jX_{C0\Sigma}}} .$$

Здесь $X_{C0\Sigma}$ - результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов, электрически связанных с точкой замыкания (практически только линии и кабели).

$U_{ф.ср}$- среднее фазное напряжение ступени, где рассматривается замыкание на землю.

Максимальное значение тока замыкания на землю, будет, естественно, при металлическом к.з., т.е. $r_Д=0$:

$$I_к = 3j\frac{U_{ф.ср}}{X_{с0\Sigma}}$$

Грубо оценить порядок величины тока замыкания на землю можно по следующей формуле:

$$I_к = \sqrt{3}\cdot\frac{U_{ср}}{N}l\ ,$$

здесь $U_{ср}$ - среднее номинальное напряжение ступени где рассматривается замыкание на землю, кВ.

N- коэф., принимаемый для воздушных линий 350, кабельных – 10.

ℓ - суммарная длина воздушных или кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания на землю, км.

Для симметричных составляющих напряжений за сопротивлением дуги при принятых допущениях имеем:

$$U'_{к\,a1} = U_{ф.ср};\ U'_{к\,a2} = 0;\ U_{к'0} = \frac{j\cdot X_{со\Sigma}}{3\cdot r_Д - jX_{с0\Sigma}}\cdot U_{ф.ср}$$

Если в схеме нулевой последовательности однофазного к.з. разложить все нейтрали, и схемы каждой последовательности ввести емкостные сопротивления, получим комплексную схему простого замыкания на землю. В комплексной схеме помимо емкостных сопротивлений введены индуктивные сопротивления линии и трансформатора и сопротивление дуги.

Из схемы следует, что для ограничения тока простого замыкания на землю, необходимо нейтраль трансформатора заземлить через индуктивную катушку. Индуктивность катушки выбирается так, чтобы в цепи нулевой последовательности был обеспечен резонанс между индуктивностью и емкостью, что приведет к $X_{0\Sigma}=\infty$, т.е. к полной компенсации тока простого замыкания на землю. Если пренебречь реактивностью трансформатора, то данное условие будет выполняться при $X_L = X_{со\Sigma}/3$.

Такие катушки называются дугогасящими. Их выполняют с регулированием индуктивности, что позволяет их настраивать при изменениях защищаемой сети. Ток замыкания на землю снижают до величины, при котором дуга самопогасается. Опытом установлено, что самопогасание дуги происходит, если ток замыкания на замлю не превышает :

при 6 кВ - 30 А
10 кВ - 20 А
15-20 кВ - 15 А
35 кВ - 10 А.

Однократная продольная несимметрия.

Общие замечания : В общем виде продольную несимметрию в произвольной точке 3-х фазной системы можно представить включением в рассечку каждой фазы неодинаковых сопротивлений. Сопротивления могут быть связаны между собой взаимоиндукцией, значения которой различны для каждой пары фаз.

Как и при рассмотрении поперечной несимметрии, такой подход хотя и дает решение в самом общем виде, однако очень громоздка. Целесообразнее, как и раньше, проводить решение для каждого вида продольной несимметрии, используя характеризующие его граничные условия.

Рассмотрим два вида наиболее часто встречающейся продольной несимметрии - разрыв одной фазы и разрыв 2- х фаз (в одном и том же месте).

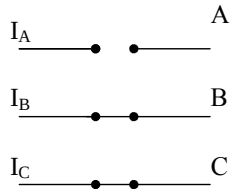
Уравнения 2 - го закона в схемах каждой последовательности, составленные, аналогичны уравнениям для однократной поперечной несимметрии при чисто индуктивной цепи могут быть представлены следующим образом:

$$\Delta U_{LA1} = E_{A\Sigma} - jX_{L1\Sigma} \cdot I_{LA1} \quad (1)$$
$$\Delta U_{LA2} = 0 - jX_{L2\Sigma} \cdot I_{LA2} \quad (2)$$
$$\Delta U_{L0} = 0 - jX_{L0\Sigma} \cdot I_{L0} \quad (3)$$

где ΔU_{LA1}, ΔU_{LA2} , ΔU_{L0} - симметричные составляющие падения напряжения фазы А на несимметричном участке системы.

$X_{L1\Sigma}, X_{L2\Sigma}, X_{L0\Sigma}$ - результирующие реактивности схем соответствующих последовательностей относительно места продольной несимметрии.

Разрыв одной фазы.



Характеризуется следующими граничными условиями:

$$I_{LA} = 0 \quad (4)$$
$$\Delta U_{LB} = 0 \quad (5)$$
$$\Delta U_{LB} = 0 \quad (6)$$

а) Исходная схема.

Граничные условия аналогичны условиям 2-х фазного к.з. на землю. Данная аналогия сохраняется и в расчетных выражениях.

Исходя из условий (5) и (6), при разложении на симметричные составляющие, получаем равенства:

$$\Delta U_{LA1} = \Delta U_{LA2} = \Delta U_{L0} = 1/3\Delta U_{LA}$$

(7)

Используя уравнения 2,3,7 выразим I_{LA2} и I_{L0} через ΔU_{LA1} т.е.

$$I_{LA2} = -\frac{\Delta U_{LA1}}{jX_{L2\Sigma}} \quad (8)$$

$$I_{L0} = -\frac{\Delta U_{LA1}}{jX_{L0\Sigma}} \quad (9)$$

В соответствии с (4) можно записать : $I_{LA1} + I_{LA2} + I_{L0} = 0$

(10)

После подстановки (8) и (9) в (10), после преобразования. получим

$$\Delta U_{LA1} = jX^{(1)}_{\Delta L} \cdot I_{LA1}$$

(11)

где

$$X^{(1)}_{\Delta L} = X_{L2\Sigma} // X_{L0}$$

(12)

Верхний индекс (1) и далее (2) одновременно с нижним индексом L, указывает обрыв соответственно одной и двух фаз.

Для тока прямой последовательности фазы А в месте разрыва из (1) и (11) имеем:

$$I_{LA1} = \frac{I_{A\Sigma}}{j(X_{L1\Sigma} + X^{(1)}_{Al}}$$

(13)

Для токов обратной и нулевой последовательности с учетом (8 и 9)

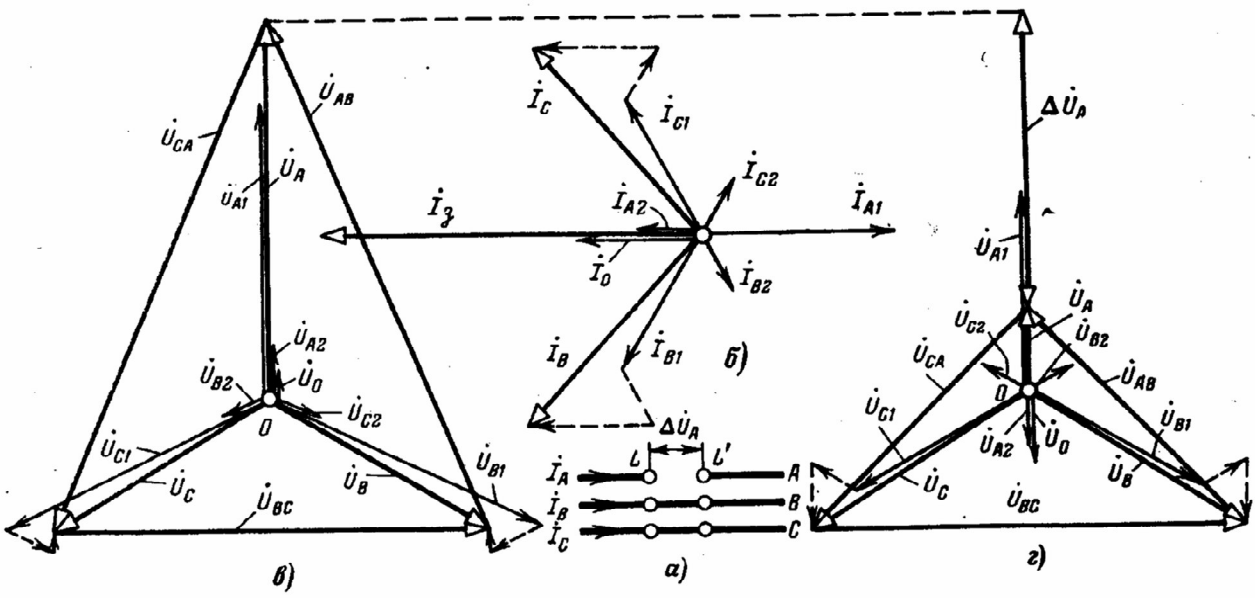
$$I_{LA2} = -\frac{X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \cdot I_{LA1}$$

(8а)

$$I_{L0} = -\frac{X_{L2\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0}} \cdot I_{LA1}$$

(9а)

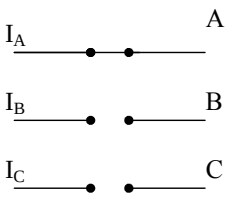
Для определения напряжений в одной из сторон продольной несимметрии необходимо по схемам отдельных последовательностей симметричной части цепи найти составляющие этих напряжений. Прибавив затем к ним ΔU_{LA1}, ΔU_{LA2}, ΔU_{L0} - найдем симметричные составляющие напряжений с другой стороны продольной несимметрии.



Разрыв одной фазы трехфазной цепи.

а — исходная схема; *б* — векторная диаграмма токов в месте разрыва чисто индуктивной цепи; *в* и *г* — векторные диаграммы напряжений по концам разрыва (соответственно в точках *L* и *L'*).

Разрыв 2-х фаз.



При разрыве 2-х фаз граничные условия, очевидно, будут:

$$I_{LB} = 0 \quad (14)$$

$$I_{LC} = 0 \quad (15)$$

$$\Delta U_{LA} = 0 \quad (16)$$

т.е. они аналогичны граничным условиям однофазного к.з.

В соответствии с (14) и (15) следует, что симметричные составляющие тока фазы А в месте обрыва двух других фаз связаны простым соотношением:

$$I_{LA1} = I_{LA2} = I_{L0} = 1/3 I_{LA}$$

(17)

С другой стороны, поскольку согласно (16)

$$\Delta U_{LA1} + \Delta U_{LA2} + \Delta U_{L0} = 0$$

(18)

достаточно сложить правые части уравнения (1-3) и сумму приравнять нулю, после этого, учитывая (17), получим:

$$I_{LA1} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(X_{L1\Sigma} + X^{(2)}_{\Delta L})}$$

(19)

где

$$X^{(1)}_{\Delta L} = X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma} \quad (20)$$

Для фазного тока согласно (17) имеем: $I_{LA} = 3 I_{LA1}$

(21)

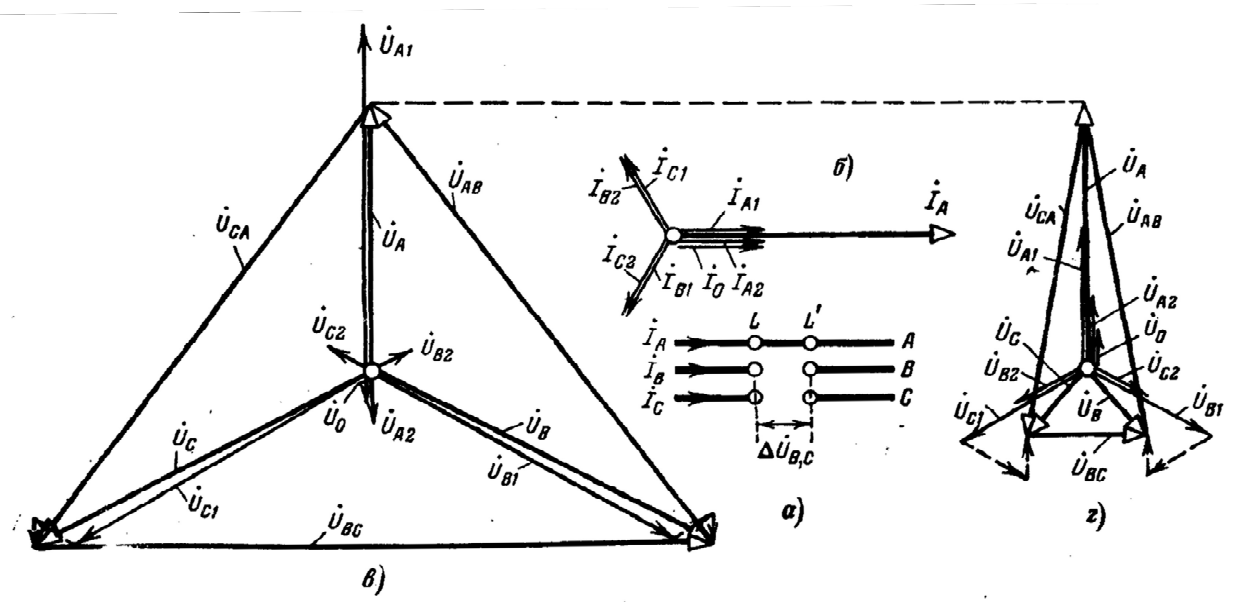
Симметричные составляющие разности фазных напряжений в месте обрыва определяются для обратной и нулевой последовательностей соответственно по (2) и (3), а для прямой последовательности проще по (18).

$$\Delta U_{LA1} = -(\Delta U_{LA2} + \Delta U_{L0}) = X_{\Delta L}^{(2)} I_{LA1}$$

Рассмотрим ВД.

Правило эквивалентности прямой последоательности.

Из структуры выражений для тока прямой последовательности при рассмотренных видах однократной продольной несимметрии непосредственно следует, что этот ток можно определить как ток симметричного 3-х фазного режима в схеме, где несимметричный участок заменен симметричной цепью, величина сопротивления, которой для каждого вида продольной несимметрии определяется сопротивлениями как самого несимметричного участка, так и схем обратной и нулевой последовательностей относительно места несимметрии.



Разрыв двух фаз трехфазной цепи.

а — исходная схема; *б* — векторная диаграмма токов в месте разрыва; *в* и *г* — векторные диаграммы напряжений по концам разрыва (соответственно в точках *L* и *L'*).

Применительно к условиям однократной продольной несимметрии изложенное положение представляет собой правило эквивалентности прямой последовательности и позволяет ток прямой последовательности выразить в общем виде.

$$I_{LA1}^{(n)} = \frac{E_{\Delta\Sigma}}{jX_{L1\Sigma} + Z_{\Delta L}^{(n)}}$$

а падение напряжения прямой последовательности на несимметричном участке:

$$\Delta U^{(n)}_{LA1} = Z^{(n)}_{\Delta L} \cdot I^{(n)}_{L1}$$

где верхний индекс (n) условно воказывает вид рассматриваемой продольной несимметрив [как-то: (1) —сопротивление в одной фазе или ее обрыв; (2) — сопротивление в двух фазах или их обрыв].

Правило эквивалентности прямой последовательности справедливо при учете только основной гармоники.

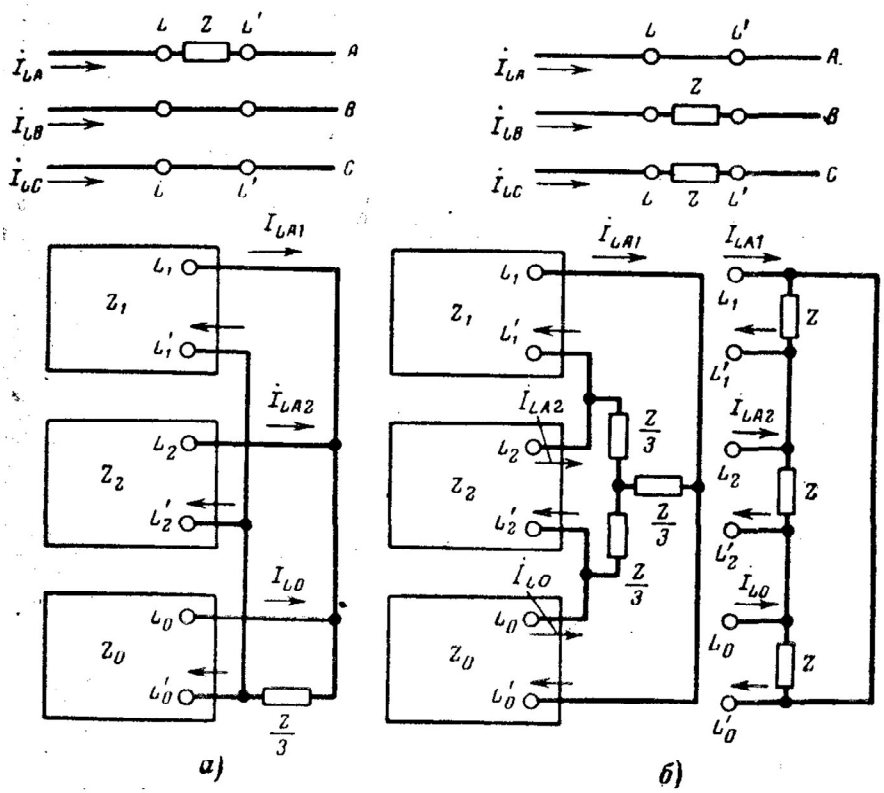
Комплексные схемы замещения

Полученные выше соотношения между симметричными составляющими падений напряжений в месте рассматриваемой продольной несимметрии позволяют составить для каждого вида несимметрии комплексную схему замещения, соединив соответственным образом между собой схемы отдельных последовательностей и введя сопротивление, обусловливающее данную несимметрию.

Такие схемы приведены на рис. а и б, причем в последнем случае показаны два варианта соединения, а именно: когда сопротивления Z/3 соединены в звезду и когда сопротивления Z соединены в треугольник.

Как и при однократной поперечной несимметрии, эти комплексные схемы соответствуют особой фазе, в качестве которой, как обычно, принята фаза А.

Все сказанное ранее относительно наглядности и целесообразности комплексных схем при поперечной несимметрии и полной мере относится также к комплексным схемам при продольной несимметрии. Они особенно удобны при использовании расчетных моделей или столов, а также в совместном применении с аналоговыми вычислительными машинами.



Комплексные схемы замещения.
а — при наличии сопротивления в одной фазе; *б* — при наличии одинаковых сопротивлений в двух фазах.

3.2. Электромеханические переходные процессы

Конспект лекций в электронную форму переводится в настоящее время, работа еще не завершена. В его основу положены материалы книг:

Л-1: Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 283 с. - (Серия «Учебники НГТУ»).

Л-2: Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М: Высшая. школа., 1978.

Поэтому ниже для каждой лекции приведены только основные вопросы и ссылки на соответствующие разделы книг.

Введение - 2 часа

Основные понятия и определения электроэнергетических систем (ЭЭС).

Классификация режимов ЭЭС и задачи управления ими.

Суть электромеханических переходных процессов (ЭМПП).

Устойчивость ЭЭС

Л-1, с. 7-9, 169-173; Л-2, с. 11-23.

Раздел 2: Статическая устойчивость электрической системы; практические критерии устойчивости – 6 часов.

Лк-1.

Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора для анализа ЭМПП. Уравнение переходного процесса в обмотке возбуждения генератора. Уравнение механического движения ротора генератора

Л-1, с. 13-28, 178-179; Л-2, с. 47-50.

Лк-2.

Векторная диаграмма простейшей электрической системы. Выражения для мощностей через различные ЭДС генератора.

Л-1, с. 179-187; Л-2, с. 140-149.

Лк-3.

Определение угловых характеристик мощности через собственные и взаимные сопротивления.

Л-1, с. 187-193; Л-2, с. 63-65.

Раздел 3: Динамическая устойчивость электрической системы; способ площадей; анализ процессов с учетом форсировки возбуждения; способы приближённого решения уравнения движения ротора генератора – 6 часов.

Лк-1.

Динамическая устойчивость. Причины и характер больших возмущений в электрической системе.

Задачи исследования динамической устойчивости.

Допущения, принимаемые при анализе динамической устойчивости. Энергетические соотношения, характеризующие движение ротора генератора.

Способ площадей, допущения и область применения.

Определение предельного угла отключения короткого замыкания.

Л-1, с. 215-225; Л-2, с. 79-100.

Лк-2.

Численное решение уравнения движения ротора генератора.

Метод последовательных интервалов.

Учет электромагнитных переходных процессов.

Л-1, с. 225-229; Л-2, с. 111-140.

Лк-3.

Влияние демпфирования.

Анализ процессов с учетом форсировки возбуждения генератора.

Особенности расчета переходных процессов в сложной системе.

Л-1, с. 229-231; Л-2, с. 93-100, 85-90.

Раздел 4: Метод малых колебаний; статическая устойчивость с учетом действия регуляторов возбуждения и скорости – 6 часов.

Лк-1.

Статическая устойчивость ЭЭС. Задачи и методы исследования.

Основные допущения и области применения.

Математическое описание переходных процессов при анализе статической устойчивости.

Метод малых колебаний. Необходимые и достаточные условия статической устойчивости.

Л-1, с. 193-204; Л-2, с. 140-149.

Лк-2.

Статическая устойчивость и малые колебания в нерегулируемой системе.

Нарушения устойчивости в виде сползания, самораскачивания и самовозбуждения и способы их подавления.

Л-1, с. 193-204; Л-2, с. 145-158.

Лк-3.

Регулирование возбуждения, его задачи.

Анализ статической устойчивости простейшей ЭЭС с учетом автоматического регулятора возбуждения (АРВ) пропорционального действия.

Статическая устойчивость ЭЭС с АРВ сильного действия.

Л-1, с. 193-204; Л-2, с. 158-191.

Раздел 5: Переходные процессы в узлах нагрузки системы, устойчивость узлов нагрузки – 6 часов.

Лк-1.

Переходные процессы в узлах нагрузки ЭЭС. Задачи исследования.

Статические и динамические характеристики нагрузки.

Уравнение движения и схема замещения асинхронного двигателя (АД).

Практический критерий статической устойчивости АД.

Изменение условий статической устойчивости АД при его работе от источника соизмеримой мощности.

Л-1, с. 204-212; Л-2, с. 191-208.

Лк-2.

Лавина напряжения - причина возникновения и средства подавления.

Общие принципы построения практических критериев. Практические критерии для узлов комплексных нагрузок.

Статические характеристики и регулирующие эффекты мощности нагрузок по напряжению.

Поведение нагрузки при больших возмущениях.

Л-1, с. 205-212; Л-2, с. 192-199, 201-208.

Лк-3.

Пуск АД, работа при толчкообразной нагрузке на валу, при резких снижениях напряжения на зажимах.

Численное решение уравнения движения ротора АД при больших возмущениях. Поведение АД нагрузки при коротких замыканиях.

Л-1, с. 208-212; Л-2, с. 208-243.

Раздел 6: Понятие результирующей устойчивости; процесс выпадения генератора из синхронизма, условие ресинхронизации – 6 ч.

Лк-1.

Асинхронные режимы в ЭЭС. Общая характеристика асинхронных режимов и основные задачи их исследования.

Причины возникновения асинхронного режима.

Понятие результирующей устойчивости.

Процесс выпадения из синхронизма, необходимое условие ресинхронизации.

Практические способы восстановления синхронного режима.

Л-1, с. 252-257; Л-2, с. 303-340.

Лк-2.

Изменения частоты в электроэнергетических системах. Причины и характер изменения частоты.

Требования к частоте как к общесистемному показателю качества электроэнергии.

Виды регулирования первичных двигателей.

Статические характеристики нерегулируемых и регулируемых первичных двигателей в системе.

Л-1, с. 258-261; Л-2, с. 340-349.

Лк-3.

Определение динамических характеристик частоты в системе.

Лавина частоты и способы ее предотвращения.

Автоматическая частотная разгрузка, мероприятия по обеспечению требуемого уровня частоты в ЭЭС.

Л-1, с. 263-265; Л-2, с. 349-352.

4. Методические рекомендации по выполнению курсовых работ

4.1. Методические рекомендации по выполнению курсовой работы «Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в электрических сетях энергосистем и энергообъектов»

Курсовая работа по данной дисциплине выполняется в 7 семестре и предназначена для приобретения студентами навыков выполнения самостоятельных расчётов симметричных и несимметричных коротких замыканий в электрических сетях энергосистем, и промышленных предприятий, на электрических станциях.

Введение

Курсовое проектирование имеет цель получить студентом расчетные и практические навыки по составлению схем замещения для прямой, обратной и нулевой последовательностей, определению параметров элементов схем замещения, преобразованию схем замещения, использованию наиболее приемлемого метода расчета, определению составляющих токов КЗ в начальный момент повреждения и в заданный момент времени, а также установившегося значения тока КЗ, построению векторных диаграмм, определению остаточного напряжения.

Курсовая работа представляет собой комплексное задание, включающее вопросы расчета симметричных и несимметричных режимов к.з. При выполнении работы определяются следующие расчетные величины:

- Действующее значение периодической составляющей тока к.з. в сверхпереходном и установившемся режимах при трехфазном к.з. в заданной точке ;
- Ударный ток к.з.;
- Действующее значение полного тока к.з. за первый период его изменения;
- Мощность в начальный момент к.з.;
- Начальное значение тока при заданном виде несимметричного к.з.;
- Действующее значение периодической составляющей тока к.з. в заданный момент времени при трехфазном к.з. и при заданном виде несимметричного к.з. в заданной точке;
- Напряжение отдельных последовательностей в месте к.з. и на шинах среднего напряжения автотрансформатора системы при несимметричном к.з., а также полные напряжения;
- Векторные диаграммы токов и напряжений в месте к.з. и напряжений на шинах среднего напряжения автотрансформатора системы при несимметричном к.з.;

При выполнении работы студент полностью отвечает за принятые решения, а задача руководителя сводится к ознакомлению студента с возможными вариантами решения, методами расчета, он направляет самостоятельную творческую работу студента.

Оформление проекта.

Курсовая работа разрабатывается в соответствии с заданием и оформляется в виде расчетно-пояснительной и графической части (1 лист формата А-1).

Пояснительная записка включает: титульный лист, задание, введение, расчетно-пояснительная часть, список используемой литературы и оглавление.

Без наличия задания работа к проверке не принимается.

Чертежи, графики, схемы должны соответствовать требованиям ЕСКД. Пояснения расчетов должны быть предельно краткими и четкими. При многократном повторении одинаковых решений пример подробного решения приводится один раз, а результаты остальных решений сводятся в таблицу.

Указания по выполнению графической части проекта

Графический материал должен содержать один лист чертежей формата А1, на котором приводятся:

исходная схема электрической сети (энергообъекта) для расчета токов КЗ;
схемы замещения для прямой, обратной и нулевой последовательностей;
основные этапы преобразования схем замещения;
векторные диаграммы для заданного вида несимметричного КЗ;
поясняющая схема к нахождению остаточного напряжения;
таблица основных результатов расчета.

Защита курсовой работы

Курсовая работа защищается на кафедре.

Студенту дается 10 минут для краткого сообщения о содержании курсового проекта и принятых в нем решениях, а затем он отвечает на вопросы членов комиссии.

Примерное содержание пояснительной записки

Введение
Исходные данные
1. Расчет симметричного трехфазного КЗ
   1.1. Составление схемы замещения
   1.2. Определение параметров элементов схемы замещения
   1.3. Действующее значение периодической составляющей тока к.з. в сверхпереходном и установившемся режимах при трехфазном к.з. в заданной точке
   1.4. Ударный ток к.з.
   1.5. Действующее значение полного тока к.з. за первый период его изменения
   1.6. Мощность в начальный момент к.з.
   1.7. Начальное значение тока при заданном виде несимметричного к.з.
   1.8. Действующее значение периодической составляющей тока к.з. в заданный момент времени при трехфазном к.з. и при заданном виде несимметричного к.з. в заданной точке
2. Расчет несимметричного трехфазного КЗ
   2.1. Составление схем замещения отдельных последовательностей
   2.2. Определение параметров элементов схемы замещения
   2.3. Нахождение тока прямой последовательности при несимметричном к.з. в заданной точке
   2.4. Определение полного тока несимметричного КЗ в начальный и заданный моменты времени
   2.5. Определение напряжения отдельных последовательностей в месте к.з. и в заданной точке при несимметричном к.з., а также полных напряжений
   2.6. Векторные диаграммы токов и напряжений в месте к.з. и напряжений на шинах в заданной точке при несимметричном к.з.

Заключение
Список литературы

Введение

Во введении должны быть использованы материалы постановлений Правительства Российской Федерации, приказов, руководящих указаний и документов Минтопэнерго РФ, нормативно-техническая документация РАО «ЕЭС России».

Во введении должны быть сформулированы основные задачи требующие расчета коротких замыканий, их актуальность, способы и методы их расчетов, повышение эффективности функционирования энергосистем и энергообъектов за счет координации уровней КЗ. Обосновываются цели и задачи и задачи разрабатываемого проекта.

Исходные данные

Обстоятельное изучение вопросов проектирования электрической части подстанций электроснабжения – сложная самостоятельная задача.

Для распространенных в среде промышленных предприятий электроприемников характеристики электрической нагрузки определены на основе многолетних экспериментальных исследований и приводятся в задании.

В данном разделе необходимо воспользоваться заданным преподавателем вариантом курсового проектирования.

Курсовая работа по данной дисциплине выполняется в 7 семестре и предназначена для приобретения студентами навыков выполнения самостоятельных расчётов симметричных и несимметричных коротких замыканий в электрических сетях энергосистем, и промышленных предприятий, на электрических станциях.

Задание на курсовую работу

Задание на курсовую работу по курсу
"Электромагнитные переходные процессы" для специальности 140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» и 140211 – «Электроснабжение»

Для приведенной схемы электрической сети определить следующие расчетные величины:

действующее значение периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания в месте КЗ в начальный момент возникновения повреждения;

ударный ток и мощность трёхфазного короткого замыкания в начальный момент возникновения повреждения;

амплитудное и действующее значения апериодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания и полный ток трёхфазного короткого замыкания в месте КЗ в начальный момент возникновения повреждения;

начальные значения токов отдельных последовательностей для заданного вида несимметричного короткого замыкания в месте короткого замыкания;

начальное значение полного тока для заданного вида несимметричного короткого замыкания в месте короткого замыкания;

напряжения отдельных последовательностей в точке КЗ и на шинах ВН станции 1;

построить диаграммы токов и напряжений в месте КЗ и напряжений на шинах станции 1;

токи через выключатель в заданный момент времени при трёхфазном и несимметричном КЗ.

Курсовая работа защищается студентом после устранения всех замечаний. При защите студент должен уметь ответить на вопросы, приведённые в конце пособия.

Согласно задания расчёт симметричного и несимметричного КЗ предусматривается в одной точке заданной схемы. При расчётах считать, что на каждую секцию шин станции 1 приходится одинаковое число блоков n/2. Точки кз находятся в середине соответствующих линий. При расчёте ударного тока активные сопротивления нагрузок и системы считать равным нулю.

Удельные сопротивления воздушных линий напряжением

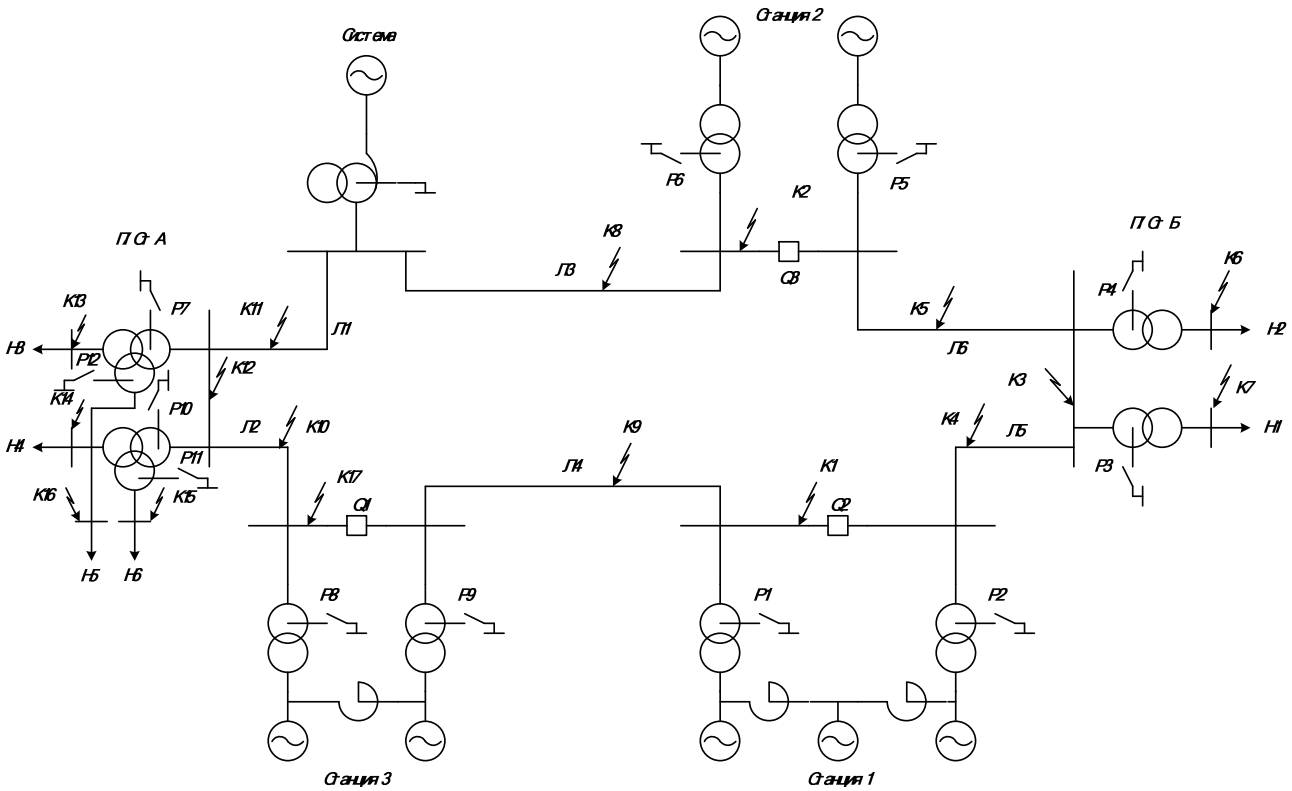
110 кВ – Худ=0,44 Ом/км , Rуд=0,14 Ом/км;

220 кВ – Худ=0,42 Ом/км , Rуд=0,08 Ом/км;

330 кВ – Худ=0,32 Ом/км , Rуд=0,04 Ом/км;

Молниезащита воздушных линий 1 и 2 выполнена тросами марки АС, линий 3 и 4 – стальными тросами, а на линии 5 тросовая защита не установлена.

Исходная схема электрической сети



Исходные данные к курсовому проекту

Таблица 1

Станция 1									Трансформаторы			
№ В-та	$P_{H,}MBm$	$cos(\varphi_н)$	X_d	$X_d^{''}$	X_2	$X_d^{''}/R$	X_p	X_p/R	$S_{ном,}MBA$	$U_{BH,}кВ$	$U_{k,}\%$	X/R
1	60	0.8	0.6	0.182	0,195	100	0.35	30	80	220	14	40
2	63	0.85	0.7	0.216	0,156	100	0.45	50	180	330	13	50
3	30	0.85	0.76	0.212	0,14	120	0.25	30	80	110	12	60
4	140	0.8	0.85	0.194	0,214	120	0.4	50	125	220	11.5	40
5	120	0.8	0.88	0.19	0,236	130	0.4	30	200	220	11	50
6	100	0.85	0.98	0.173	0,341	130	0.56	30	100	330	12	60
7	200	0.8	1.12	0.28	0,215	100	0.7	40	250	110	13.5	40
8	160	0.85	1.22	0.17	0,215	120	0.14	40	400	110	14	50
9	180	0.85	1.34	0.18	0,231	130	0.22	50	125	220	14	60
10	300	0.85	1.44	0.2	0,298	100	0.45	50	63	220	12	40
11	100	0.8	2,07	0.19	0,298	140	0.56	30	630	330	12.5	50
12	150	0.8	1,85	0,269	0,286	150	0.14	50	400	330	14	60
13	250	0.8	1,71	0,324	0,354	150	0.25	40	200	220	13	40
14	165	0.85	1,65	0,191	0,215	140	0.35	30	250	110	12.5	50
15	120	0.9	1,13	0,121	0,136	130	0.4	30	63	220	11	50
16	320	0.92	2.22	0,119	0,145	100	0.25	50	63	330	12.5	40
17	300	0.9	2.04	0,114	0,132	130	0.56	40	630	330	13	60
18	200	0.85	2.01	0,131	0,156	120	0.4	30	250	220	12	50
19	240	0.9	1.97	0,231	0,245	140	0.14	40	100	220	11.5	40
20	180	0.8	2.03	0,173	0,195	120	0.25	30	400	330	11	40
21	140	0,8	1.98	0,215	0,359	140	0,3	40	250	110	12	50
22	160	0,85	1.75	0.228	0,124	150	0,2	30	125	110	10,5	65
23	250	0,9	2.53	0.206	0,547	195	0,25	35	80	220	11	45
24	165	0,95	2.64	0.28	0,647	160	0,1	45	250	330	10,5	30
25	170	0,75	1.85	0.22	0,379	110	0,6	50	125	220	10	40
26	130	0,95	1.46	0.25	0,419	120	0,42	60	80	220	12	65

Продолжение таблицы 1

Станция 2								Трансформаторы			
№ В-та	n	$P_{H,}MBm$	$cos(\varphi_н)$	X_d	$X_d^{''}$	X_2	$X_d^{''}/R$	$S_{ном,}MBA$	$U_{ВН,}кВ$	$U_{k,}\%$	X/R
1	4	63	0,9	1,65	0,12	0,15	100	80	220	14	40
2	6	300	0,85	1,71	0,19	0,21	120	630	330	13	50
3	8	63	0,8	1,85	0,13	0,18	130	80	110	12	60
4	4	80	0,85	2,07	0,22	0,25	100	125	220	11.5	40
5	2	110	0,9	2,45	0,26	0,29	120	200	220	11	50
6	6	63	0,9	2,65	0,18	0,21	110	100	330	12	60
7	4	160	0,92	2,21	0,29	0,31	120	250	110	13.5	40
8	4	210	0,9	2,19	0,22	0,26	120	400	110	14	50
9	6	63	0,8	2,16	0,25	0,27	130	125	220	14	60
10	6	32	0,85	2,49	0,26	0,28	100	63	220	12	40
11	8	300	0,85	2,41	0,18	0,23	120	630	330	12.5	50
12	10	210	0,85	2,82	0,19	0,22	130	400	330	14	60
13	6	110	0,8	1,84	0,16	0,19	130	200	220	13	40
14	4	160	0,8	1,96	0,17	0,24	110	250	110	12.5	50
15	6	32	0,8	2,15	0,21	0,25	100	63	220	11	50
16	8	32	0,85	2,32	0,23	0,26	120	63	330	12.5	40
17	8	300	0,8	2,41	0,19	0,22	120	630	330	13	60
18	4	160	0,85	2,56	0,22	0,24	110	250	220	12	50
19	4	63	0,8	2,48	0,17	0,21	130	100	220	11.5	40
20	2	210	0,85	2,34	0,18	0,21	100	400	330	11	40
21	6	225	0,8	2,6	0,45	0,15	90	250	110	12	50
22	6	320	0,9	2,4	0,11	0,17	140	125	110	10,5	65
23	4	300	0,85	2,34	0,23	0,16	110	80	220	11	45
24	8	280	0,95	2,21	0,12	0,12	120	250	330	10,5	30
25	10	180	0,9	1,9	0,31	0,17	110	125	220	10	40
26	8	160	0,7	1,78	0,4	0,19	100	80	220	12	65

Продолжение таблицы 1

Станция 3									Трансформаторы			
№ В-та	$P_{H,}MBm$	$cos(\varphi_н)$	X_d	$X_d^{''}$	X_2	$X_d^{''}/R$	X_p	X_p/R	$S_{ном,}MBA$	$U_{ВН,}кВ$	$U_{k,}\%$	X/R
1	60	0.8	2,64	0,153	0,195	100	0.35	30	80	220	10,5	40
2	120	0.85	2,56	0,143	0,156	100	0.45	50	200	330	11	50
3	60	0.85	2,0	0,13	0,14	120	0.25	30	80	110	12,5	60
4	165	0.8	2,04	0,19	0,214	120	0.4	50	200	220	11,5	30
5	200	0.8	2,11	0,225	0,236	130	0.4	30	250	220	10	45
6	120	0.85	1,84	0,324	0,341	130	0.56	30	160	330	10,5	70
7	90	0.8	1,91	0,189	0,215	100	0.7	40	125	110	11,5	65
8	300	0.85	2,21	0,195	0,215	120	0.14	40	400	110	12	45
9	200	0.85	2,64	0,203	0,231	130	0.22	50	250	220	10,5	55
10	40	0.85	2,45	0,268	0,298	100	0.45	50	63	220	11	35
11	120	0.8	2,07	0,272	0,298	140	0.56	30	200	330	12,5	30
12	165	0.8	1,85	0,269	0,286	150	0.14	50	200	330	13	40
13	100	0.8	1,71	0,324	0,354	150	0.25	40	125	220	12,5	53
14	165	0.85	1,65	0,191	0,215	140	0.35	30	200	110	13	54
15	120	0.9	1,13	0,121	0,136	130	0.4	30	160	220	10	64
16	60	0.92	1,05	0,119	0,145	100	0.25	50	80	330	12	56
17	160	0.9	1,15	0,114	0,132	130	0.56	40	200	330	11	35
18	180	0.85	2,07	0,131	0,156	120	0.4	30	250	220	10,5	48
19	100	0.9	1,1	0,231	0,245	140	0.14	40	125	220	12,5	75
20	120	0.8	1,32	0,173	0,195	120	0.25	30	160	330	11,5	69
21	320	0,8	1,5	0,215	0,359	140	0,3	40	200	110	12	60
22	400	0,85	1,34	0,345	0,124	150	0,2	30	80	110	13	40
23	63	0,9	1,15	0,642	0,547	195	0,25	35	160	220	11,5	30
24	80	0,95	1,87	0,942	0,647	160	0,1	45	250	330	10	65
25	100	0,75	1,65	0,942	0,379	110	0,6	50	400	220	10,5	45
26	160	0,95	2,21	0,547	0,419	120	0,42	60	200	220	12	35

Продолжение таблицы 1

№ В-та	Автотрансформатор						Система
	$S_{ном,}MBA$	$U_{CH,}кВ$	$U_{kBH,}\%$	$U_{kBC,}\%$	$U_{kCH,}\%$	X/R	S_k, MBA
1	135	220	18	10,5	7	20	2500
2	250	330	18,5	11	7	40	3000
3	500	110	17,5	10,5	6,5	30	3500
4	167	220	18	10,5	6	50	4000
5	250	220	18,5	10,5	6	60	5000
6	500	330	17,5	10,5	6,5	80	7000
7	135	110	16,5	11	7	70	6500
8	250	110	16,5	11	6,5	45	5500
9	500	220	16,5	10,5	6	60	5000
10	167	220	18	11	6	65	2000
11	250	330	17,5	11	6,5	55	2500
12	250	330	17,5	10,5	7	40	3200
13	500	220	18	11	6,5	20	4150
14	167	110	17,5	11	7	15	3250
15	135	220	17	10,5	7	20	6000
16	167	330	16,5	10,5	6,5	10	7400
17	250	330	18	10,5	6,5	60	6200
18	500	220	17,5	11	7	45	3550
19	250	220	17	11	6	75	6430
20	500	330	16,8	10,5	6,5	90	5260
21	135	110	20	11	7	30	4300
22	135	110	22	10,5	8	40	4800
23	167	220	31	11	6,5	55	5400
24	250	330	25	11	7	75	3100
25	167	220	17,5	10,5	7	85	1500
26	500	220	18	10,5	6,5	90	1000

Продолжение таблицы 1

№ В-та	П/Ст А						Нагрузка			
	Трансформаторы						$S_{ном,}MBA$			
	$S_{ном,}MBA$	$U_{BH,}кВ$	$U_{kBH,}\%$	$U_{kBC,}\%$	$U_{kCH,}\%$	X/R	$H3$	$H4$	$H5$	$H6$
1	80	220	18	10,5	7	10	13	9	7	23
2	63	330	18,5	11	7	20	11	10	6,5	27
3	250	110	17,5	10,5	6,5	30	14	10,5	25	39
4	200	220	18	10,5	6	25	18	11	35	31
5	125	220	18,5	10,5	6	15	17	11,5	30	35
6	200	330	17,5	10,5	6,5	35	13	13	20	36
7	125	110	16,5	11	7	40	11	12	21	42
8	63	110	16,5	11	6,5	45	13	16	13	16
9	40	220	16,5	10,5	6	50	20	24	20	24
10	80	220	18	11	6	15	15	26	15	26
11	100	330	17,5	11	6,5	20	14	37	14	37
12	250	330	17,5	10,5	7	30	16	64	13	9
13	200	220	18	11	6,5	35	17	34	11	10
14	125	110	17,5	11	7	40	9	22	14	10,5
15	63	220	17	10,5	7	45	7	23	18	11
16	80	330	16,5	10,5	6,5	35	6,5	27	17	11,5
17	250	330	18	10,5	6,5	40	25	39	13	13
18	63	220	17,5	11	7	30	35	31	11	12
19	125	220	17	11	6	20	30	35	13	16
20	125	330	16,8	10,5	6,5	15	20	36	20	24
21	200	110	20	11	7	10	21	42	15	26
22	250	110	22	10,5	8	30	29	49	14	37
23	63	220	31	11	6,5	40	34	50	16	64
24	80	330	25	11	7	15	26	15	45	120
25	80	220	17,5	10,5	7	25	41	11	60	140
26	63	220	18	10,5	6,5	20	32	12,5	70	50

Продолжение таблицы 1

№ В-та	П/Ст Б				Нагрузка		Линии					
	Трансформаторы				$S_{ном}, MBA$		Длины, км					
	$S_{ном}, MBA$	$U_{ВН}, кВ$	$U_k, \%$	X/R	$Н1$	$Н2$	$Л1$	$Л2$	$Л3$	$Л4$	$Л5$	$Л6$
1	80	220	11	10	48	50	80	90	254	90	157	163
2	63	330	10,5	20	23	28	120	80	125	95	245	145
3	250	110	12	30	95	98	36	45	421	100	315	349
4	200	220	11,5	25	96	102	149	163	264	70	246	420
5	125	220	10	15	52	52	230	300	325	50	197	431
6	200	330	10,5	35	68	65	125	163	149	60	164	318
7	125	110	11	40	78	76	125	125	154	85	284	197
8	63	110	11,5	45	49	49	115	125	134	40	299	143
9	40	220	12,5	50	54	55	85	98	137	60	300	135
10	80	220	11	15	29	28	80	65	167	120	350	130
11	100	330	10	20	100	100	90	136	189	150	331	140
12	250	330	10,5	30	68	71	120	159	175	175	349	197
13	200	220	11,5	35	56	61	190	150	186	95	200	200
14	125	110	12	40	58	61	300	215	147	67	150	246
15	63	220	12,5	45	36	38	260	168	126	84	50	210
16	80	330	13	35	32	30	400	65	120	94	46	205
17	250	330	10,5	40	85	89	125	130	110	92	95	207
18	63	220	11	30	46	45	325	147	105	110	97	264
19	125	220	12	20	15	16	225	98	100	113	35	319
20	125	330	10,5	15	30	27	215	128	90	116	40	320
21	200	110	11,5	10	20	19	155	140	130	286	55	350
22	250	110	12	30	11	12	82	150	140	241	59	410
23	63	220	11	40	18	19	135	180	180	267	120	400
24	80	330	12	15	11	12	412	195	146	364	197	450
25	80	220	10	25	9	9	215	124	124	385	461	379
26	63	220	11,5	20	18	19	150	157	167	258	348	316

Таблица 2 - Состояние нейтрали трансформаторов

N	*P1*	*P2*	*P3*	*P4*	*P5*	*P6*	*P7*	*P8*	*P9*	*P10*	*P11*	*P12*
1	***x***	***x***	***x***	-	-	***x***	***x***	-	***x***	-	-	***x***
2	-	***x***	-	***x***	***x***	-	-	***x***	-	***x***	***x***	-
3	***x***	-	-	***x***	-	***x***	***x***	-	***x***	-	-	-
4	-	***x***	***x***	***x***	-	***x***	-	***x***	-	***x***	-	-

Задание на курсовую работу по курсу
"Электромагнитные переходные процессы" для специальности 140205 –
«Электроэнергетические системы и сети»

Для приведенной схемы электрической сети определить следующие расчетные величины:

действующее значение периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания в месте КЗ;

ударный ток и мощность в начальный момент трёхфазного короткого замыкания;

действующее значение апериодической составляющей тока и полный ток трёхфазного короткого замыкания в месте КЗ;

начальное значение тока несимметричного короткого замыкания в месте КЗ;

напряжения отдельных последовательностей в точке КЗ и на шинах ВН станции 1;

построить диаграммы токов и напряжений в месте КЗ и напряжений на шинах станции 1;

токи через выключатель в заданный момент времени при трёхфазном и несимметричном КЗ.

Курсовая работа защищается студентом после устранения всех замечаний. При защите студент должен уметь ответить на вопросы, приведённые в конце пособия.

Студент выполняет курсовую работу в соответствии с индивидуальным заданием, определённым шифром. Шифр имеет следующую структуру: АА.ВВ.СС

АА – номер строки в табл.1;ВВ – номер строки в табл.2; СС – номер строки в табл.3.

Согласно задания расчёт симметричного и несимметричного КЗ предусматривается в одной точке заданной схемы. При расчётах считать, что на каждую секцию шин станции 1

приходится одинаковое число блоков n/2. точки к1, к2, к3 и к4 находятся в середине соответствующих линий. При расчёте ударного тока активные сопротивления нагрузок и системы считать равным нулю. Удельные сопротивления воздушных линий напряжением

110 кВ – Худ=0,44 Ом/км , Rуд=0,14 Ом/км;

220 кВ – Худ=0,42 Ом/км , Rуд=0,08 Ом/км;

330 кВ – Худ=0,32 Ом/км , Rуд=0,04 Ом/км;

Молниезащита воздушных линий 1 и 2 выполнена тросами марки АС, линий 3 и 4 – стальными тросами, а на линии 5 тросовая защита не установлена.

Таблица 1 - Технические данные элементов электрической схемы

вар-т	Станция 1										
	Генераторы							Трансформаторы			
	n	Рн,МВт	Cosφ$_{ном}$	Xd	Xd"	X2	Xd"/R	Sном,МВА	Uвн,кВ	Uk ,%	X/R
1	6	60	0.8	2,64	0,153	0,195	100	80	121	11	40
2	4	120	0.85	2,56	0,143	0,156	100	200	230	12	40
3	8	60	0.85	2,0	0,13	0,14	120	80	121	12,5	50
4	2	165	0.8	2,04	0,19	0,214	120	200	347	13	50
5	4	200	0.8	2,11	0,225	0,236	130	250	347	12,5	40
6	6	120	0.85	1,84	0,324	0,341	130	160	230	11	50
7	8	90	0.8	1,91	0,189	0,215	100	125	347	12,5	50
8	2	300	0.85	2,21	0,195	0,215	120	400	347	13	40
9	4	200	0.85	2,64	0,203	0,231	130	250	347	12,5	40
10	6	40	0.85	2,45	0,268	0,298	100	63	121	13	60
11	8	120	0.8	2,07	0,272	0,298	140	200	347	12,5	40
12	4	165	0.8	1,85	0,269	0,286	150	200	347	13	50
13	2	100	0.8	1,71	0,324	0,354	150	125	242	11	40
14	6	165	0.85	1,65	0,191	0,215	140	200	347	13	50
15	8	120	0.9	1,13	0,121	0,136	130	160	230	11,5	60
16	4	60	0.92	1,05	0,119	0,145	100	80	121	12,5	40
17	2	160	0.9	1,15	0,114	0,132	130	200	347	11	50
18	6	180	0.85	2,07	0,131	0,156	120	250	347	12	40
19	8	100	0.9	1,1	0,231	0,245	140	125	242	13	80
20	10	120	0.8	1,32	0,173	0,195	120	160	242	11,5	60

Продолжение табл.1

вар-т	Станция 2											
	Генераторы						Трансформаторы				Реакторы	
	Рн,МВт	Cosφ$_{ном}$	Xd	Xd"	X2	Xd''/R	Sном,МВА	Uвн,кВ	Uк,%	X/R	Xр,Ом	Xр/R
Станция 2												
1	63	0,9	1,65	0,12	0,15	100	80	115	14	40	0.35	30
2	300	0,85	1,71	0,19	0,21	120	630	230	13	50	0.45	50
3	63	0,8	1,85	0,13	0,18	130	80	115	12	60	0.25	30
4	80	0,85	2,07	0,22	0,25	100	125	347	11.5	40	0.4	50
5	110	0,9	2,45	0,26	0,29	120	200	347	11	50	0.4	30
6	63	0,9	2,65	0,18	0,21	110	100	230	12	60	0.56	30
7	160	0,92	2,21	0,29	0,31	120	250	347	13.5	40	0.7	40
8	210	0,9	2,19	0,22	0,26	120	400	347	14	50	0.14	40
9	63	0,8	2,16	0,25	0,27	130	125	347	14	60	0.22	50
10	32	0,85	2,49	0,26	0,28	100	63	121	12	40	0.45	50
11	300	0,85	2,41	0,18	0,23	120	630	347	12.5	50	0.56	30
12	210	0,85	2,82	0,19	0,22	130	400	347	14	60	0.14	50
13	110	0,8	1,84	0,16	0,19	130	200	230	13	40	0.25	40
14	160	0,8	1,96	0,17	0,24	110	250	347	12.5	50	0.35	30
15	32	0,8	2,15	0,21	0,25	100	63	242	11	50	0.4	30
16	32	0,85	2,32	0,23	0,26	120	63	115	12.5	40	0.25	50
17	300	0,8	2,41	0,19	0,22	120	630	347	13	60	0.56	40
18	160	0,85	2,56	0,22	0,24	110	250	347	12	50	0.4	30
19	63	0,8	2,48	0,17	0,21	130	100	242	11.5	40	0.14	40
20	210	0,85	2,34	0,18	0,21	100	400	230	11	40	0.25	30

Продолжение таблицы 1.

№	Трансформаторы п/ст А				Трансформаторы п/ст Б						
	Sном МВА	UВН кВ	UК %	X/R	Sном МВА	UВН кВ	UСН кВ	UКВ-Н %	UКВ-С %	UКС-Н %	X/R
1	40	121	11	20	80	115	37	18	10,5	7	20
2	32	230	12,5	30	63	242	38,5	18,5	11	7	30
3	25	121	12	40	200	115	37	17,5	10,5	6,5	20
4	40	347	14	20	250	347	115	18	10,5	6	40
5	63	347	13,5	30	125	347	115	18,5	10,5	6	30
6	40	230	13	50	125	242	38,5	17,5	10,5	6,5	40
7	63	347	12,5	60	200	347	115	16,5	11	7	20
8	40	347	11	30	125	347	115	16,5	11	6,5	20
9	40	347	12,5	20	125	347	115	16,5	10,5	6	40
10	32	115	12	40	63	121	38,5	18	11	6	30
11	63	347	14	20	400	347	121	17,5	11	6,5	20
12	40	347	13	30	250	347	121	17,5	10,5	7	40
13	32	230	12,5	50	125	242	38,5	18	11	6,5	30
14	40	347	12	30	200	347	121	17,5	11	7	30
15	25	230	11,5	20	125	242	121	17	10,5	7	20
16	25	115	11	40	80	121	38,5	16,5	10,5	6,5	20
17	63	347	12,5	30	250	347	115	18	10,5	6,5	30
18	125	347	13	30	125	347	121	17,5	11	7	40
19	100	230	12,5	40	40	242	36,3	17	11	6	30
20	63	242	11	30	63	230	38,5	16,8	10,5	6,5	20

Продолжение таблицы 1.

№	Мощности нагрузок, МВА						Длины линий, км				
	Н1	Н2	Н3	Н4	Н5	Н6	Л1	Л2	Л3	Л4	Л5
1	30	25	48	50	13	12	80	90	50	50	60
2	20	20	23	28	11	12	120	80	75	36	45
3	15	15	95	98	14	16	36	45	65	79	36
4	25	27	96	102	18	19	149	163	125	100	36
5	40	37	52	52	17	19	230	300	153	126	186
6	30	32	68	65	13	14	125	163	129	89	96
7	38	35	78	76	11	11	125	125	139	145	250
8	28	36	49	49	13	11	115	125	145	136	185
9	26	29	54	55	20	19	89	98	95	78	154
10	25	28	29	28	11	12	45	65	29	56	48
11	45	48	100	100	18	19	125	136	148	169	210
12	30	27	68	71	11	12	210	159	126	148	150
13	28	26	56	61	9	9	120	150	147	153	100
14	25	31	58	61	18	19	200	215	136	159	200
15	18	18	36	38	15	14	145	168	125	139	89
16	17	19	32	30	10,5	9	59	65	36	38	75
17	45	52	85	89	13	15	125	130	102	87	94
18	59	65	46	45	10	10	115	147	123	196	139
19	58	68	15	16	8,8	9,6	114	98	65	89	135
20	51	49	30	27	11	12	163	128	146	201	158

Продолжение таблицы 1.

№	Автотрансформатор							Система
	Sном МВА	UВН кВ	UСН кВ	UКВ-Н %	UКС-Н %	UКВ-С %	X/R	SK МВА
1	135	330	115	16,5	8	10	50	1500
2	250	500	242	16	7,5	10,5	50	2500
3	500	330	115	17,5	7,5	11	60	3000
4	167	500	330	16,5	7	11	30	3500
5	250	750	330	16,5	6,5	10,5	60	2500
6	500	750	242	17,5	6	11	50	4000
7	135	750	330	17	6,5	10	40	5000
8	250	750	330	18	6	10,5	60	3500
9	500	750	330	18,5	7,5	10	30	4500
10	250	330	115	16	8	10,5	50	5500
11	250	750	330	16,5	7	11	40	2000
12	500	750	330	18	6,5	11	50	2500
13	135	525	242	18,5	8	10,5	40	3000
14	250	750	330	17,5	7,5	10,5	30	5000
15	135	525	242	17	7	10	60	6000
16	500	330	115	18	6,5	11	50	2500
17	250	750	330	16,5	7	10,5	40	3000
18	250	750	330	18	6	11,5	60	4500
19	500	525	242	18,5	6,5	10	50	1500
20	135	525	242	16,5	6	10,5	30	2500

Таблица 2. Схемы соединения обмоток трансформаторов

№	Автотрансформатор	Станция 1	Станция 2	П/ст А	П/ст Б
1	4	1	1	3	4
2	5	1	2	1	5
3	4	3	1	1	5
4	5	2	1	2	4
5	4	1	1	1	4
6	5	2	3	2	5
7	4	3	2	3	4
8	5	2	1	1	5
9	4	2	3	2	4
10	5	1	2	1	5

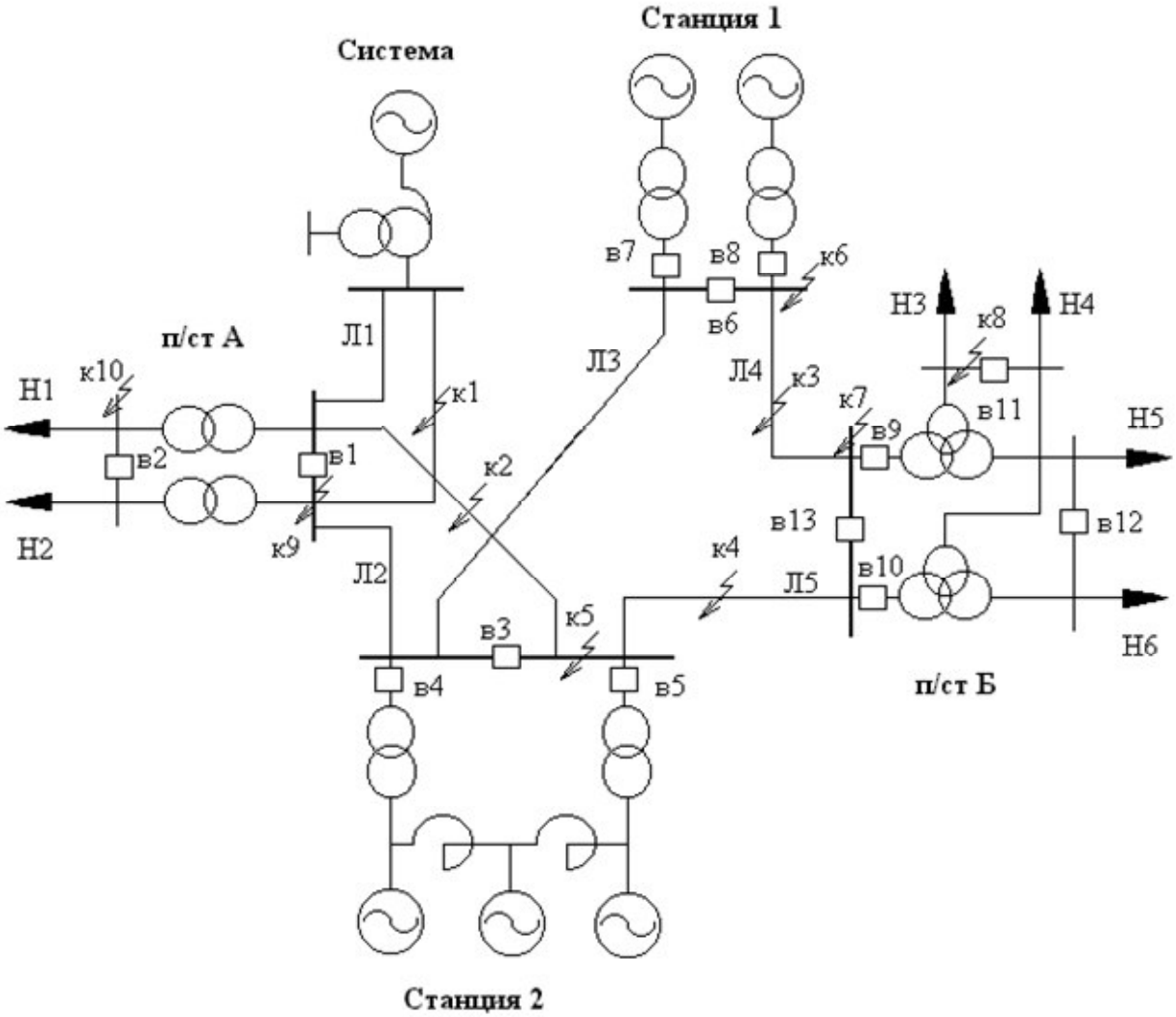
1 – заземлённая звезда / треугольник; 2 – звезда / треугольник;

3 – заземлённая звезда / звезда; 4 – заземлённая звезда / треугольник / треугольник;

5 – заземлённая звезда / заземлённая звезда / треугольник.

Таблица 3

№ варианта	Отключенные выключатели	Точка КЗ	Время t, с	Выключатель
1	6, 9, 11	1	0,15	4
2	11, 12, 13	3	0,12	9
3	3, 10, 12	2	0,14	5
4	4, 1, 2	4	0,18	10
5	8, 10, 12	5	0,14	7
6	2, 11, 12	6	0,16	8
7	1, 10, 11	10	0,19	4
8	3, 6, 9	7	0,12	10
9	2, 7, 12	8	0,13	9
10	3, 4, 13	9	0,17	7



Задание на курсовую работу по курсу
"Электромагнитные переходные процессы" для специальности 140204 – «Электрические станции»

Студент выполняет курсовую работу в соответствии с индивидуальным заданием, определенным шифром, состоящим из буквенных и цифровых обозначений. Шифр имеет следующую структуру:

А.В.С.Д.КЗ(Х)

А – номер схемы электрических соединений системы, для которой выполняется расчет;

В – номер строки в табл. 1. с характеристиками линий электропередачи;

С – номер строки в табл.2 с указанием состояния в нейтрали трансформаторов;

Д – номер строки в табл. 3 с параметрами генераторов, трансформаторов, автотрансформаторов, реакторов, нагрузок системы;

КЗ – номер точки к.з.;

(Х) – вид несимметричного короткого замыкания, подлежащий расчету:

(1) – однофазное к.з.;

(2) – двухфазное к.з.;

(1.1) – двухфазное к.з. на землю.

Расчет симметричного и несимметричного к.з. предусматривается в одной точке заданной схемы. При расчетах считать, что схемы заземления нейтралей в блочных схемах станций 2 и 3 одинаковы для всех блоков. Точки к.з. К4, К5, К6, К7 находятся в середине соответствующих линий. При расчете ударного коэффициента

активное сопротивление системы считать равным нулю, а активное сопротивление нагрузки не учитывать.

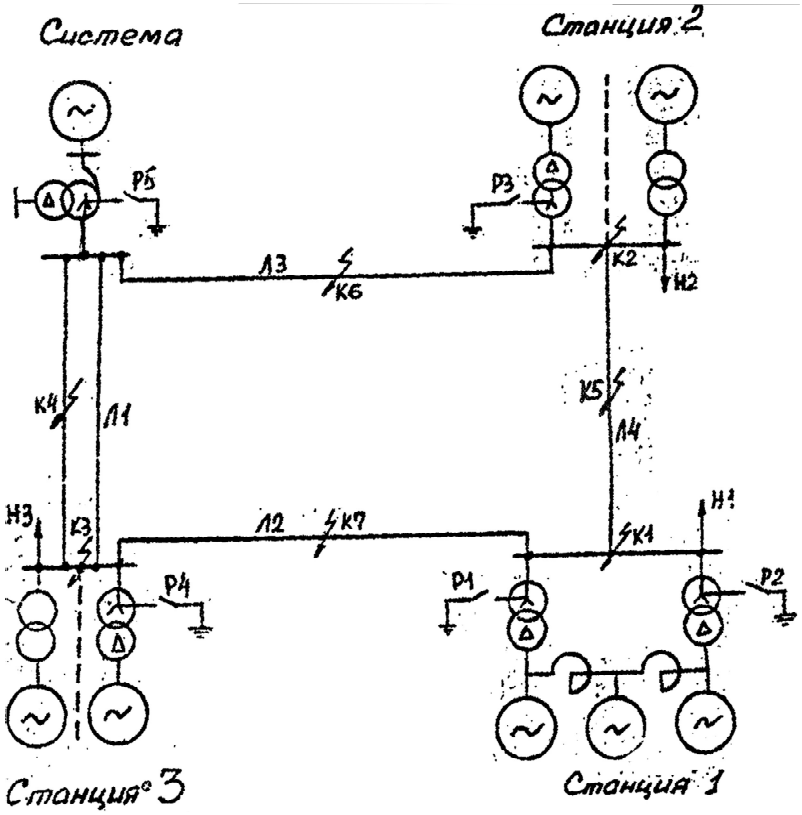


Рис. 1. Схема электрических соединений системы №1

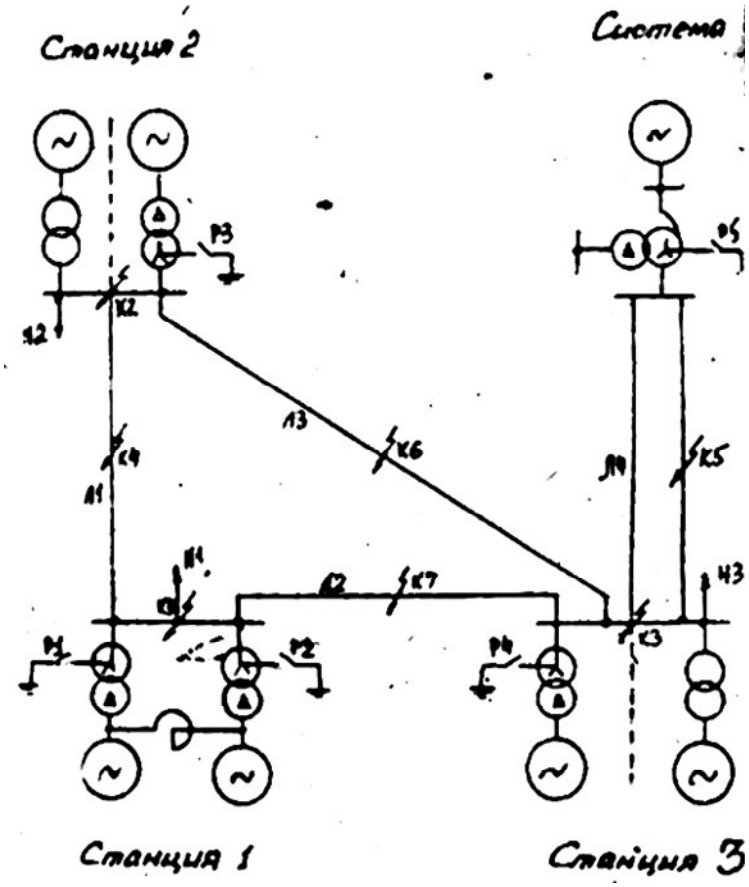


Рис. 2. Схема электрических соединений системы №2

Таблица 1 - Характеристики линий электропередачи

Вариант	Длина линии (км)				Удельные параметры, (Ом/км)	
	Л1	Л2	Л3	Л4	Худ	Rуд
1	80	100	130	45	0,42	0,09
2	35	65	70	80	0,4	0,085
3	80	40	90	60	0,38	0,075
4	160	200	260	30	0,36	0,07
5	70	125	150	100	0,34	0,065
6	240	120	180	20	0,32	0,06
7	300	300	260	250	0,3	0,06
8	200	110	200	300	0,32	0,07
9	250	250	300	100	0,36	0,08
10	150	150	150	100	0,38	0,09

Таблица 2.2 - Состояние нейтрали трансформаторов (* - нейтраль заземлена)

Вариант	Р1	Р2	Р3	Р4	Р5
1	*	*	*	*	*
2	*	*	*	-	*
3	*	*	-	-	*
4	*	-	*	-	*
5	-	-	*	*	*
6	-	*	*	-	*
7	*	-	-	*	*
8	-	*	-	*	*
9	*	-	-	-	*
10	-	-	-	*	*

Таблица 3 - Технические данные элементов электрической системы

Вариант	Станция 1												
	Турбогенераторы						Трансформаторы				Реакторы		
	Рн, МВт	$Cos\varphi_н$	X_d	X_d”	X_2	X_d”/R	Sн, МВА	$U_{ВН}$, кВ	$U_К$, %	X/R	$U_{НОМ}$, кВ	$X_Р$, Ом	$X_Р$/R
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	30	0,8	1,45	0,143	0,174	20	40	115	10,5	20	6	0,173	40
2	60	0,8	1,85	0,146	0,18	40	80	121	10,5	20	10	0,23	40
3	100	0,85	2,45	0,183	0,223	100	125	121	10,5	30	10	0,27	50
4	120	0,85	2,65	0,214	0,26	100	125	121	11	30	10	0,35	50
5	200	0,85	1,96	0,19	0,232	120	200	121	11	30	10	0,4	60
6	120	0,85	2,6	0,214	0,26	100	125	121	10,5	30	10	0,25	50
7	100	0,85	2,4	0,183	0,223	100	125	242	11	30	10	0,45	80
8	60	0,8	1,9	0,146	0,18	10	80	242	10,5	20	6	0,21	80
9	30	0,8	1,55	0,143	0,174	20	32	330	11	20	6	0,28	40
10	63	0,8	2,05	0,12	0,25	40	80	121	10,5	20	6	0,7	40

Продолжение табл. 3

Вариант	Станция 2										
	Турбогенераторы							Трансформаторы			
	h	Рн, МВт	$Cos\varphi_н$	X_d	X_d”	X_2	X_d”/R	Sн, МВА	$U_{ВН}$, кВ	$U_К$, %	X/R
	15	16	17	18	18	20	21	22	23	24	25
1	6	100	0,85	2,52	0,183	0,223	100	125	121	10,5	30
2	4	120	0,85	2,65	0,214	0,26	100	125	121	10,5	30
3	5	165	0,85	1,75	0,213	0,25	100	200	121	10,5	30
4	2	200	0,85	1,98	0,19	0,232	120	200	121	10,5	30
5	4	300	0,85	2,03	0,195	0,238	130	400	121	10,5	40
6	4	320	0,8	2,05	0,173	0,21	140	400	121	11	40
7	2	500	0,8	2,2	0,28	0,25	150	630	242	11	50
8	6	320	0,8	2,05	0,173	0,21	140	400	242	11	40
9	6	300	0,8	2,01	0,195	0,238	130	400	347	11	40
10	8	200	0,8	1,97	0,19	0,232	120	200	121	11	30

Продолжение табл. 3

Вариант	Станция 3										
	Турбогенераторы							Трансформаторы			
	h	$P_н$, МВт	$Cos\varphi_н$	X_d	X_d”	X_2	X_d”/R	$S_н$, МВА	$U_{ВН}$, кВ	$U_К$, %	X/R
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	6	20	0,85	0,60	0,225	0,228	40	40	121	10,5	20
2	8	30	0,8	0,70	0,197	0,206	40	40	121	10,5	20
3	8	40	0,9	0,76	0,232	0,236	40	63	115	11	20
4	5	72	0,8	0,85	0,24	0,26	40	80	121	11	20
5	6	90	0,9	0,88	0,19	0,198	50	125	121	10,5	30
6	4	100	0,85	0,98	0,22	0,23	50	125	121	10,5	30
7	8	171	0,85	1,12	0,27	0,28	50	20	242	11	30
8	5	260	0,9	1,22	0,268	0,27	50	400	242	11	40
9	4	300	0,8	1,34	0,34	0,25	60	400	347	10,5	40
10	6	500	0,85	1,45	0,3	0,32	60	630	121	10,5	50

Продолжение табл. 3

Вариант	Автотрансформатор							Система Sc, МВА	Нагрузка		
									Н1	Н2	Н3
	$S_н$, МВА	$U_{вн}$, кВ	$U_{сн}$, кВ	$U_{кв-н}$, %	$U_{кс-н}$, %	$U_{кв-с}$, %	X/R		$S_{н1}$, МВА	$S_{н2}$, МВА	$S_{н3}$, МВА
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
1	63	230	121	35	22	11	20	1500	20	40	160
2	125	230	121	31	19	11	30	2000	100	200	200
3	200	230	121	32	20	11	30	2500	200	400	1000
4	250	230	121	32	20	11	30	2300	200	200	400
5	125	330	115	35	22	12	30	3500	800	1000	1000
6	200	330	121	32	22	12	30	4000	400	600	700
7	500	500	230	35	22	11	50	4500	1000	200	700
8	800	600	230	23	13	9	6	5000	200	2000	2000
9	500	500	330	67	61	10	50	5500	100	1000	1500
10	200	230	121	32	20	11	30	5000	200	2000	2500

Примечание: h – количество блоков генератор-трансформатор

Расчетная часть

Определение параметров элементов, составление и преобразование схем замещения

Общие положения

Расчеты токов к.з выполняются как правило без учета активных сопротивлений и проводимостей элементов сети, а также фазовых сдвигов между векторами э.д.с источников. Поэтому для составления схем замещения заданной электрической схемы необходимо определить лишь индуктивные сопротивления всех элементов сети и э.д.с источников, подпитывающих точку к.з. Расчет рекомендуется выполнять в относительных единицах приближенным способом.

Сопротивлениям, определяемым в результате преобразования схем замещения, присваиваются порядковые номера. В знаменателе указывается величина сопротивления в относительных единицах при принятых базисных условиях (базисной мощности Sб). Сопротивлениям, возникающим в результате преобразования схем замещения, присваиваются последующие порядковые номера. При определении сопротивлений отдельных элементов (воздушных линий, реакторов) необходимо использовать значение среднего напряжения в месте установки данного элемента, выбранное из ряда: 515; 340; 230; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3 кВ.

При переходе от расчета сверхпереходного к расчету установившегося режима схема замещения изменяется. Поэтому составление и упрощение схемы замещения нужно выполнить как для сверхпереходного, так и для установившегося режима к.з.

При расчете тока несимметричного к.з необходимо составить и выполнить преобразование схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Схема прямой последовательности аналогична схеме замещения при определении сверхпереходного тока трехфазного к.з.

Расчетная схема

Составляется для одной точки к.з. Представляет собой однолинейную схему электроснабжения, где указываются элементы (генератора, трансформатора, линии и т.п.), через которые проходят токи источников в точку к.з. Кроме того, на расчетной схеме указываются номинальные напряжения. При расчетах токов к.з. в установках высокого напряжения сопротивления шин распределительных устройств, электрических аппаратов (выключателей, разъединителей и т.п.), кабельных и воздушных перемычек сравнительно небольшой длины не учитывают из-за малого значения. Поэтому их параметры на расчетной схеме не указываются.

Параметры элементов для отдельных последовательностей

Для расчета начального действующего значения периодической составляющей тока трёхфазного КЗ в электроустановках свыше 1 кВ в исходную схему вводятся все генераторы и компенсаторы, а также СД и АД мощностью 100 кВт и более, если между ними и точкой КЗ отсутствуют токоограничивающие реакторы и силовые трансформаторы. Синхронные и асинхронные машины в эквивалентную схему замещения вводятся сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС.

Параметры элементов для схемы прямой последовательности определяется в соответствии с заданием, в котором они даны в относительных единицах при номинальных условиях, либо в именованных единицах (воздушные линии, реакторы). Расчет параметров отдельных последовательностей для различных элементов выполняется следующим образом:

Источники энергии. В сверхпереходном режиме генераторы замещаются сверхпереходными э.д.с. $E''_{Г*}$ за сверхпереходными сопротивлениями X''_d, а в установившемся режиме к.з. – синхронной э.д.с. $E_{Г*}$ и сопротивлением X_d. Э.Д.С генераторов определяется по формуле:

$$E_* = \sqrt{(X_Г \cos\varphi_H)^2 + (1 \pm X_Г \sin\varphi_H)^2}$$

где $X_Г = X_d''$ - при определении E_{r*}''; $X_Г = X_d$ - при определении E_{r*}, причем знак минус принимается в случае работы гидрогенераторов в режиме недовозбуждения; знак плюс и минус у турбогенераторов – принимается в режиме перевозбуждения и недовозбуждения.

Для синхронных компенсаторов ЭДС определяется как

$E''_{|0|}=U_{|0|}\pm I_{|0|}X_d''$.

В приведённых формулах знак <+> относится к синхронным машинам, работавшим к моменту КЗ в режиме перевозбуждения, а знак <-> – к работавшим с недовозбуждением.

Сверхпереходная ЭДС асинхронных двигателей определяется по формуле

$$E''_{|0|} = \sqrt{\left(U_{|0|} - I_{|0|}X''_{АД}\sin\varphi_{|0|}\right)^2 + \left(I_{|0|}X''_{АД}\cos\varphi_{|0|}\right)^2}$$

где $X''_{АД}$ – сверхпереходное сопротивление АД.

Сопротивление обратной последовательности асинхронных электродвигателей напряжением свыше 1 кВ допускается принимать равным индуктивной составляющей сопротивления короткого замыкания и определять по формуле

$$X''_{*(ном)} = X_{*2(ном)} \approx \frac{1}{I_{*п}},$$

где $I_{*п}$ - кратность пускового тока электродвигателя по отношению к его номинальному току.

В относительных единицах ток статора для генераторов и электродвигателей определяется по формуле

$$I_{*|0|ном} = \frac{P_{|0|}\cos\varphi_{ном}}{P_{ном}\cos\varphi_{|0|}}$$

где $P_{|0|}$, $P_{ном}$, $cos\varphi_{ном}$ – мощность машины в предшествующем КЗ режиме, номинальные мощность и коэффициент мощности синхронной машины;

для синхронных компенсаторов

$$I_{*|0|ном} = \frac{Q_{|0|}}{Q_{ном}}$$

Схемы соединений обмоток трансформаторов исключают протекание через генераторы токов нулевой последовательности. Определение сопротивлений генераторов в относительных единицах при базисных условиях выполняется по формуле:

$$X_{*(\delta)} = X_Г \frac{S_\delta \cos\varphi_H}{P_H}$$

<u>*Нагрузки*</u>. Нагрузки в схему замещения для сверхпереходного режима входят как источники с параметрами $E''_{H*} = 0.85$, $X''_{H*} = 0.35$, а в установившемся режиме к.з - $E_{H*\infty} = 0$, $X_{H*\infty} = 1.2$.

Для обратной последовательности $X_{2H*} = 0.35$.

Сопротивление нулевой последовательности нагрузки определяется сопротивлениями и схемами соединения входящих в нее элементов. Обычно это только понижающие трансформаторы, подключенные к сети 110 кВ и выше, имеющие заземленную нейтраль. Рекомендуется принимать $X_{0H*} = 0.15$.

Приведение сопротивлений нагрузки к базисным условиям выполняется по формуле:

$$X_{*(\delta)} = X_H \frac{S_\delta}{S_H}$$

Трансформаторы. Для двухобмоточных трансформаторов:

$$X_{1T*(\delta)} = X_{2H*(\delta)} = \frac{U_{K\%} \cdot S_{\delta}}{100 \cdot S_{H}}$$

Сопротивление нулевой последовательности трансформатора определяется схемой соединения его обмоток.

Автотрансформатор вводится в схему нулевой последовательности своей схемой замещения.

Схема замещения трехобмоточного трансформатора и автотрансформатора, имеющего обмотку низшего напряжения, представляет собой трехлучевую звезду. Индуктивные сопротивления ее ветвей в относительных единицах при номинальных условиях этого трансформатора соответственно равны:

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= \frac{u_{\text{кВ}}}{100} = 0{,}005(u_{\text{кВ–Н}} + u_{\text{кВ–С}} - u_{\text{кС–Н}});\\ X_{*\,\text{С(ном)}} &= \frac{u_{\text{кВ}}}{100} = 0{,}005(u_{\text{кВ–С}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–Н}});\\ X_{*\,\text{Н(ном)}} &= \frac{u_{\text{кВ}}}{100} = 0{,}005(u_{\text{кВ–Н}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–С}}), \end{aligned}\right\}$$

где $u_{\text{кВ-Н}}$, $u_{\text{кВ-С}}$, $u_{\text{кС-Н}}$ - напряжения короткого замыкания соответствующих пар обмоток, %.

Схема замещения двухобмоточного трансформатора, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на две ветви, также представляет собой трехлучевую звезду. Индуктивные сопротивления ее ветвей в относительных единицах при номинальных условиях следует определять по формулам

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= 0{,}01(u_{\text{кВ–Н}} - 0{,}25u_{\text{кН1–Н2}});\\ X_{*\,\text{Н(ном)}} &= X_{*\,\text{Н2(ном)}} = 0{,}005u_{\text{кН1–Н2}}, \end{aligned}\right\}$$

где $u_{\text{кВ-Н}}$ - напряжение КЗ между обмоткой высшего напряжения и параллельно соединенными ветвями обмотки низшего напряжения; $u_{\text{кН1-Н2}}$ - напряжение КЗ между ветвями обмотки низшего напряжения (измеряется при разомкнутой обмотке высшего напряжения).

При отсутствии данных о напряжении КЗ $u_{\text{кН1-Н2}}$ допускается для трехфазных трансформаторов принимать

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= 0{,}00125u_{\text{кВ–Н}};\\ X_{*\,\text{Н1(ном)}} &= X_{*\,\text{Н2(ном)}} = 0{,}0175u_{\text{кВ–Н}}. \end{aligned}\right\}$$

Схема замещения двухобмоточного трансформатора, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на n ветвей, представляет собой $(n + 1)$-лучевую звезду. Индуктивные сопротивления ее ветвей в относительных единицах при номинальных условиях трансформатора следует определять по формулам

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= 0{,}01\left(u_{\text{кВ–Н}} - \frac{u_{\text{кН1–Н2}}}{2n}\right);\\ X_{*\,\text{Н1(ном)}} &= X_{*\,\text{Н2(ном)}} = \ldots = X_{*\,\text{Нn(ном)}} = 0{,}005u_{\text{кН1–Нn}}, \end{aligned}\right\}$$

где $u_{\text{кН1-Нn}}$ - напряжение КЗ, измеренное между выводами H_1 и H_n обмотки низшего напряжения (при разомкнутой обмотке высшего напряжения).

Схема замещения автотрансформатора, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на две ветви, отличается от схемы замещения автотрансформатора с нерасщепленной обмоткой низшего напряжения тем, что вместо сопротивления $X_{\text{Н}}$ содержит трехлучевую звезду с ветвями $X'_{\text{Н}}$, $X_{\text{Н1}}$ и $X_{\text{Н2}}$. Индуктивные сопротивления элементов схемы в относительных единицах при номинальных условиях автотрансформатора следует определять по формулам

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= 0{,}005(u_{\text{кВ–С}} + u_{\text{кВ–Н}} - u_{\text{кС–Н}});\\ X_{*\,\text{С(ном)}} &= 0{,}005(u_{\text{кВ–С}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–Н}});\\ X_{*\,\text{Н1(ном)}} &= X_{*\,\text{Н2(ном)}} = 0{,}005u_{\text{кН1–Н2}};\\ X'_{*\,\text{Н(ном)}} &= X_{*\,\text{Н(ном)}} - 0{,}0025u_{\text{кН1–Н2}}, \end{aligned}\right\}$$

Схема замещения автотрансформатора, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на n ветвей, отличается от схемы замещения автотрансформатора с нерасщепленной обмоткой низшего напряжения тем, что вместо сопротивления $X_{\text{Н}}$ содержит $(n + 1)$-лучевую звезду с ветвями $X'_{\text{Н}}$, $X_{\text{Н1}}$ ... $X_{\text{Нn}}$. Индуктивные сопротивления элементов схемы в относительных единицах при номинальных условиях автотрансформатора следует определять по формулам

$$\left.\begin{aligned} X_{*\,\text{В(ном)}} &= 0{,}005(u_{\text{кВ–С}} + u_{\text{кВ–Н}} - u_{\text{кС–Н}});\\ X_{*\,\text{С(ном)}} &= 0{,}005(u_{\text{кВ–С}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–Н}});\\ X_{*\,\text{Н1(ном)}} &= X_{*\,\text{Н2(ном)}} = \ldots = X_{*\,\text{Нn(ном)}} = 0{,}005u_{\text{кН1–Нn}};\\ X'_{*\,\text{Н(ном)}} &= X_{*\,\text{Н(ном)}} - 0{,}01\frac{u_{\text{кН1–Нn}}}{2n}, \end{aligned}\right\}$$

где $X_{*\,\text{Н(ном)}} = 0{,}005(u_{\text{кВ–Н}} + u_{\text{кС–Н}} - u_{\text{кВ–С}})$.

Суммарное активное сопротивление обеих обмоток двухобмоточного трансформатора в относительных единицах при номинальных условиях этого трансформатора следует определять по формуле

$$R_{*\,(\text{ном})} = \frac{\Delta P_{\text{к}} 10^{-3}}{S_{\text{ном}}},$$

где $\Delta P_{\text{к}}$ - потери короткого замыкания, кВт; $S_{\text{ном}}$ - номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

Активные сопротивления отдельных обмоток трехобмоточных трансформаторов и ветвей схемы замещения автотрансформаторов, имеющих обмотку низшего напряжения, в относительных единицах при номинальных условиях этих трансформаторов и автотрансформаторов следует определять по формулам

$$\left.\begin{aligned} R_{*\,\text{В(ном)}} &= \frac{0{,}5\cdot 10^{-3}}{S_{\text{ном}}}(\Delta P_{\text{кВ–С}} + \Delta P_{\text{кВ–Н}} - \Delta P_{\text{кС–Н}});\\ R_{*\,\text{С(ном)}} &= \frac{0{,}5\cdot 10^{-3}}{S_{\text{ном}}}(\Delta P_{\text{кВ–С}} + \Delta P_{\text{кС–Н}} - \Delta P_{\text{кВ–Н}});\\ R_{*\,\text{Н(ном)}} &= \frac{0{,}5\cdot 10^{-3}}{S_{\text{ном}}}(\Delta P_{\text{кВ–Н}} + \Delta P_{\text{кС–Н}} - \Delta P_{\text{кВ–}C}). \end{aligned}\right\}$$

Токоограничивающие реакторы

Схема замещения сдвоенного токоограничивающего реактора представляет собой трехлучевую звезду. Индуктивное сопротивление луча со стороны среднего зажима (т.е. зажима, обращенного в сторону источника энергии) следует определять по формуле

$$X_{\text{с}} = -K_{\text{св}} X_{\text{р}},$$

где $K_{\text{св}}$ - коэффициент связи между ветвями реактора; $X_{\text{р}}$ - номинальное индуктивное сопротивление реактора (т.е. сопротивление одной ветви реактора при отсутствии тока в другой ветви).

Индуктивные сопротивления двух других лучей схемы замещения одинаковы и определяются по формуле $X_1 = X_2 = (1 + K_{\text{св}})X_{\text{р}}$.

Активное сопротивление фазы одинарного реактора, Ом, следует определять по формуле

$$R = \frac{\Delta P}{I_{\text{ном}}^2} 10^3,$$

где ΔP - номинальные потери мощности на фазу реактора, кВт; $I_{\text{ном}}$ - номинальный ток реактора, А.

Активное сопротивление каждой ветви сдвоенного реактора, Ом, следует определять по формуле

$$R = \frac{\Delta P}{2I_{\text{ном}}^2} 10^3,$$

Сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательности реакторов равно:

$$X_{P*(\delta)} = X_P \frac{S_\delta}{U_{CP}^2}$$

Система.

Для системы конечной мощности рекомендуется принимать $\boldsymbol{X_{1C} = X_{2C}}$, $\boldsymbol{X_{0C} = 0}$.

Сопротивление прямой (обратной) последовательности системы конечной мощности, отнесенное к базисным условиям:

$$X_{1C*(\delta)} = X_{2C*(\delta)} = \frac{S_\delta}{S_C}$$

За этим сопротивлением считается подключенным источник с $E_{C*} = 1$.

Воздушные и кабельные линии. Сопротивление прямой и обратной последовательности линий электропередачи, приведенное к базисным условиям, равно:

$$X_{1Л*(\delta)} = X_{2Л*(\delta)} = X_{УД} L \frac{S_\delta}{U_{CP}^2}$$

где $\boldsymbol{X_{УД}}$ - индуктивное сопротивление линии на 1 км длины, Ом/км; $\boldsymbol{L}$ - длина линии, км; $\boldsymbol{U_{CP}}$ - среднее напряжение в месте установки элемента (в данном случае – ЛЭП), кВ.

Сопротивление нулевой последовательности значительно большее, чем прямой (обратной) последовательности. Рекомендуется принимать это сопротивление, как для воздушной линии с тросами:

- для одноцепной линии $X_{0Л} = 3.0 X_{1Л}$
- для двухцепной линии $X_{0Л} = 4.7 X_{1Л}$

Сопротивление нулевой последовательности кабелей зависит от характера их прокладки, наличия или отсутствия проводящей оболочки, сопротивления заземлений проводящей оболочки (если она имеется) и других факторов. При приближенных расчетах токов несимметричных КЗ допустимо принимать

$X_0 = (3{,}5 \div 4{,}5) X_1$ и $R_0 = 10 R_1$.

Составление схем замещения системы

Схема замещения представляется в однолинейном изображении (для одной фазы) и содержит все элементы расчетной схемы.

Элементы вводят в схему их эквивалентными сопротивлениями, а источниками питания, кроме того, и ЭДС.

Сопротивления и ЭДС целесообразно обозначать порядковыми номерами, а под чертой указывать их величины в относительных или именованных единицах.

Схемы замещения отдельных последовательностей.

Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей составляются в соответствии с заданной схемой электрических соединений при расчете тока несимметричного к.з

Схема прямой последовательности соответствует схеме, составленной для расчета действующего значения периодической составляющей сверхпереходного тока симметричного трехфазного к.з . Генераторы и нагрузки вводятся в нее соответствующими реактивностями и э.д.с.

Схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности, но не содержит э.д.с. Генераторы и нагрузки вводятся в схему своими сопротивлениями обратной последовательности (X_2).

Схема нулевой последовательности определяется соединением обмоток участвующих в ней трансформаторов и автотрансформаторов и способом заземления нейтрали. В общем случае эта схема отличается от схем обратной и прямой последовательностей. При составление схемы необходимо помнить, что ток нулевой последовательности является по существу однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю и параллельным ей цепям. Ток нулевой последовательности может протекать только в сторону обмоток трансформаторов, соединенных в звезду с заземленной нейтралью.

Схему нулевой последовательности начинают составлять от точки к.з.

Началом схем прямой, обратной и нулевой последовательности считают точку нулевого потенциала, а концом схемы – точка к.з. К концу схемы приложено напряжение соответствующей последовательности ($U_{K1,}$ $U_{K2,}$ U_{Ko}).

Схемы замещения можно составлять методом точного или приближенного приведения, выражая параметры режима и элементов системы в именованных или относительных единицах.

Если известны фактические при принятых исходных условиях коэффициенты трансформации всех трансформаторов и автотрансформаторов расчетной схемы, то составление схемы замещения следует производить с учетом этих коэффициентов. Если же фактические коэффициенты трансформации части трансформаторов и автотрансформаторов неизвестны, то допускается при составлении схемы замещения указанные коэффициенты учитывать приближенно.

При выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в именованных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к выбранной основной (базисной) ступени напряжения сети и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов приведенные значения ЭДС источников энергии и сопротивления различных элементов схемы следует определять по формулам

$$\overset{\circ}{E} = E\, n_1 n_2 \ldots n_m; \quad \overset{\circ}{\underline{Z}} = \underline{Z}\, n_1^2 n_2^2 \ldots n_m^2,$$

где E и $\underline{Z}$ — истинные значения ЭДС источника энергии и сопротивления какого-либо элемента исходной расчетной схемы; $\overset{\circ}{E}$ и $\overset{\circ}{\underline{Z}}$ — их приведенные значения; n_1, n_2,...n_m — коэффициенты трансформации трансформаторов или автотрансформаторов, включенных каскадно между ступенью напряжения сети, где находятся элементы с подлежащими приведению ЭДС E и сопротивлением $\underline{Z}$, и основной ступенью напряжения.

Если ЭДС источника энергии и сопротивление какого-либо элемента расчетной схемы выражены в относительных единицах при номинальных условиях (т.е. ЭДС при номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$, а сопротивление - при номинальном напряжении и номинальной мощности S), то значения соответствующей ЭДС и сопротивления, приведенные к основной ступени напряжения сети, следует определять по формулам

$$\overset{\circ}{E} = \underset{*}{E}_{(\text{ном})} U_{\text{ном}}\, n_1 n_2 \ldots n_m; \quad \overset{\circ}{\underline{Z}} = \underset{*}{\underline{Z}}_{(\text{ном})} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} n_1^2 n_2^2 \ldots n_m^2,$$

где $\underset{*}{E}_{(\text{ном})}$ и $\underset{*}{Z}_{(\text{ном})}$ - значения ЭДС источника энергии и сопротивления элемента расчетной схемы в относительных единицах при номинальных условиях.

Примечание. Здесь и далее под коэффициентом трансформации трансформатора (автотрансформатора) понимается отношение напряжения холостого хода его обмотки, обращенной в сторону выбранной основной ступени напряжения сети, к напряжению холостого хода другой обмотки.

При выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в относительных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к базисным условиям и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов необходимо:

1) задаться базисной мощностью $S_{\text{б}}$ и для одной из ступеней напряжения исходной расчетной схемы, принимаемой за основную, выбрать базисное напряжение $U_{\text{б.осн}}$;

2) определить базисные напряжения других ступеней напряжения расчетной схемы, используя формулу

$$U_{\text{бN}} = \frac{1}{n_1 n_2 \ldots n_m} U_{\text{б.осн}},$$

где n_1, n_2, ... n_m — коэффициенты трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, включенных каскадно между основной и N-й ступенями напряжения;

3) найти искомые значения ЭДС источников энергии и сопротивлений всех элементов схемы замещения в относительных единицах при выбранных базисных условиях, используя формулы

$$\underset{*}{E}_{(\text{б})} = E / U_{\text{бN}} \quad \text{или} \quad \underset{*}{E}_{(\text{б})} = \underset{*}{E}_{(\text{ном})} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{бN}}}; \quad \underset{*}{Z}_{(\text{б})} = \underline{Z} \frac{S_{\text{б}}}{U^2_{\text{бN}}} \quad \text{или} \quad \underset{*}{Z}_{(\text{б})} = \underset{*}{Z}_{(\text{ном})} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}} \frac{U^2_{\text{ном}}}{U^2_{\text{бN}}},$$

где $U_{\text{бN}}$ - базисное напряжение той ступени напряжения исходной расчетной схемы, на которой находится элемент, подлежащий приведению.

Обычно в именованных единицах задано сопротивление воздушных линий, кабелей и реакторов, а в относительных единицах при номинальных условиях - сопротивление генераторов и синхронных компенсаторов. Сопротивление неподвижного электродвигателя (сопротивление КЗ) и сопротивление трансформатора в относительных единицах при номинальных условиях определяют по формулам

$$\underset{*}{Z}_{\text{к(ном)}} = \frac{1}{\underset{*}{I}_{\text{п}}}; \quad \underset{*}{Z}_{(\text{ном})} = \frac{u_{\text{к}}\%}{100},$$

где $\underset{*}{I}_{\text{п}}$ - кратность пускового тока по отношению к номинальному току; $u_{\text{к}}\%$ - напряжение короткого замыкания трансформатора в процентах.

В тех случаях, когда отсутствуют данные о фактически используемых в условиях эксплуатации коэффициентах трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, допустимо их принимать равными отношению средних номинальных напряжений сетей, связанных этими трансформаторами и автотрансформаторами. При этом рекомендуется использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений сетей $U_{\text{ср.ном}}$, кВ: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 27; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175.

При выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в именованных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к выбранной основной ступени напряжения, используя при этом приближенный способ учета коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, приведенные значения ЭДС источников энергии и сопротивления различных элементов схемы следует определять по формулам

$$\overset{\circ}{E} = E \frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{срN}}}; \quad \overset{\circ}{\underline{Z}} = \underline{Z} \frac{U^2_{\text{ср.осн}}}{U^2_{\text{срN}}},$$

где $U_{\text{ср.осн}}$ — среднее номинальное напряжение той ступени напряжения сети, которая принята за основную; $U_{\text{срN}}$ — среднее номинальное напряжение той ступени напряжения сети, на которой находится элемент с подлежащими приведению параметрами.

Если ЭДС источника энергии и сопротивление какого-либо элемента расчетной схемы выражены в относительных единицах при номинальных условиях, то при приближенном учете коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов их значения, приведенные к основной ступени напряжения сети, следует находить по формулам

$$\overset{\circ}{E} = \underset{*}{E}_{(\text{ном})} U_{\text{ср.осн}}; \quad \overset{\circ}{\underline{Z}} = \underset{*}{\underline{Z}}_{(\text{ном})} \frac{U^2_{\text{ср.осн}}}{S_{\text{ном}}}.$$

При выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в относительных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к базисным условиям, используя при этом приближенный способ учета коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, базисная мощность выбирается произвольно, а в качестве базисного напряжения любой ступени напряжения сети следует принимать среднее номинальное напряжение соответствующей ступени. В этом случае искомые значения ЭДС источников энергии и сопротивлений элементов схемы замещения в относительных единицах следует определять по формулам

$$\underset{*}{E}_{(\text{б})} = \frac{E}{U_{\text{срN}}} \text{ или } \underset{*}{E}_{(\text{б})} = \underset{*}{E}_{(\text{ном})}; \quad \underset{*}{\underline{Z}}_{(\text{б})} = \underset{*}{\underline{Z}} \frac{S_{\text{б}}}{U^2_{\text{срN}}} \text{ или } \underset{*}{\underline{Z}}_{(\text{б})} = \underset{*}{\underline{Z}}_{(\text{ном})} \frac{S_{(\text{б})}}{S_{\text{ном}}}.$$

Независимо от принятого способа составления схемы замещения прямой последовательности (в именованных или относительных единицах, с учетом фактических коэффициентов трансформации трансформаторов или при приближенном учете этих коэффициентов) в этой схеме должны быть представлены все элементы исходной расчетной схемы, причем источники энергии (генераторы, синхронные компенсаторы, а также электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если они не отделены от расчетной точки КЗ токоограничивающим реактором или трансформатором) и обобщенные нагрузки узлов должны быть введены в схему ЭДС и индуктивными сопротивлениями, соответствующими рассматриваемому моменту времени. Так, при расчете начального значения периодической составляющей они должны быть представлены в исходной схеме замещения сверхпереходными ЭДС и сверхпереходными индуктивными сопротивлениями. Все остальные элементы исходной расчетной схемы должны быть представлены в схеме замещения сопротивлениями прямой последовательности. Трехобмоточные трансформаторы, автотрансформаторы, трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения, а также сдвоенные реакторы должны быть представлены своими схемами замещения.

Составление схемы замещения по точному приведению, используя именованные единицы.

Порядок составления при этом способе следующий:

1. Расчетная схема делится на ступени трансформации.

2. Выбирается произвольно базисная ступень.

3. Определяется сопротивление и ЭДС элементом расчетной схемы при базисных условиях:

- для генераторов: $X''_d = X''_{*d} \cdot \frac{U^2_н \cdot cos(\varphi_н)}{P_н} \cdot (K_1 \cdot K_2 .... K_n)^2$, $E''_Г = E''_{*Г} \cdot U_н \cdot (K_1 \cdot K_2 .... K_n)$;

- для трансформаторов: $X_T = \frac{U_k \cdot U^2_н}{100 \cdot S_н} \cdot (K_1 \cdot K_2 .... K_n)^2$;

- для реактора: $X_P = X_P \cdot (K_1 \cdot K_2 .... K_n)^2$;

- для линии: $X_Л = X_{уд} \cdot l \cdot (K_1 \cdot K_2 .... K_n)^2$

- для системы С: $E''_C = E''_{*C} \cdot U_{ср} \cdot (K_1 \cdot K_2 .... K_n)$,

где $U_н$ - номинальное напряжение элемента, кВ; $P_н$ - номинальная активная мощность элемента, МВт; $S_н$ -номинальная полная мощность элемента, МВА; U_k - напряжение короткого, замыкания трансформатора; $X_{уд}$.- удельное индуктивное сопротивление линии, Ом/км;. l - длина линии, км; , $X_Р$ - сопротивление реактора, Ом; $U_{ср}$ - среднее напряжение ступени, на которой находится элемент, кВ; $K_1 \cdot K_2 ....K_n$ - коэффициенты трансформации трансформатора, определяемые как отношение их линейных номинальных напряжений в направлении от основной (базисной) ступени к ступени, на которой рассматриваемый элемент. Число учтенных ***К*** равняется числу трансформации между базисной ступенью и ступенью, на которой находится рассматриваемый элемент. Для пересчета сопротивления двухобмоточного трансформатора можно брать его любую обмотку, т.е. высокую или низшую. Тогда число учтенных ***К*** в выражении этого трансформатора равняется числу трансформации между приводимой обмоткой и принятой базисной ступенью.

4. Начертить составленную схему замещения.

Составление схемы замещения по приближенному приведению, используя именованные единицы

Выполняется в следующей последовательности:

1. Расчетная схема делится на ступени трансформации.

2. Для каждой ступени напряжения устанавливается среднее напряжение $U_{ср}$.

Принимая для каждой ступени $U_{ср}$ считают, что номинальные напряжения всех элементов, включенных на данной ступени, равны ее среднему напряжению.

3. Выбирается произвольно базисная (основная) ступень и устанавливается величина базисного напряжения $U_б = U_{ср}$, где $U_{ср}$ - среднее напряжение базисной ступени, кВ.

4. Определяются ЭДС и сопротивления элементов расчетной схемы при базисных условиях.

При приближенном приведении коэффициенты трансформации трансформаторов определяются не как отношения их номинальных напряжений, как это делается при точном приведении, а как отношения их соответствующих средних напряжений. При этом напряжения всех промежуточных ступеней сокращаются и остается лишь отношение двух напряжений – основной ступени и той ступени, на которой производится пересчет величин

$$E = \frac{U_б}{U_{ср}} E;\ X = \left(\frac{U_б}{U_{ср}}\right)^2 X\ .$$

Формула пересчета ЭДС и сопротивления конкретных элементов имеет вид:

- для генераторов: $X_d'' = X_d'' \cdot \frac{U_б^2 \cdot cos(\varphi)}{P_н}$, $E_Г'' = E_{*Г}'' \cdot U_б$

- для трансформаторов: $X_Т = \frac{U_k \cdot U_б^2}{100 \cdot S_н}$;

- для реактора: $X_Р = X_р \cdot \frac{U_б^2}{U_{ср}^2}$;

- для линии: $X_Л = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{U_б^2}{U_{ср}^2}$;

- для системы С: $E_С'' = E_{*С}'' \cdot U_б$

где $U_б$ -базисное напряжение основной ступени, кВ; $U_{ср}$ - среднее напряжение той ступени, на которой находится элемент, кВ.

Составление схемы замещения по точному приведению, используя относительные единицы

Выполняется в следующей последовательности:

1. Расчетная схема делится на ступени трансформации.

2. Выбирается произвольно базисная ступень и базисные условия $S_б$, $U_б$.

За базисную мощность $S_б$, которая во всех ступенях трансформации одинакова, рекомендуется принимать $S_б = 100; 1000$; МВА и т.д.

За базисное напряжение можно принять $U_б = U_{ср}$ где $U_{ср}$ - среднее напряжение выбранной базисной ступени (см. шкалу средних номинальных напряжений), кВ.

3. Устанавливаются базисные напряжения на других ступенях трансформации $U_{бi} = \frac{U_б}{K_1 \cdot K_2 ... K_n}$, кВ, где i - номер ступени; $K_1 \cdot K_2 ... K_n$ - коэффициент трансформации трансформаторов, последовательно включенных в схеме.

Определяются как отношение их линейных напряжений в направлении от базисной ступени к ступени, для которой устанавливается $U_{бi}$.

Число учтенных ***K*** равняется числу трансформации между основной и рассматриваемой ступени.

4. Для каждой ступени определяется базисный ток $I_{бi} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{бi}}$.

5. Определяются сопротивления и ЭДС элементов расчетной схемы при базисных условиях:

- для генераторов: $X_d'' = X_d'' \cdot \frac{S_б \cdot cos(\varphi)}{P_н} \cdot \left(\frac{U_н}{U_б}\right)^2$, $E_Г'' = E_{*Г}'' \cdot \frac{U_н}{U_{бi}}$

- для трансформаторов: $X_T = \frac{U_k \cdot S_б}{100 \cdot S_н} \cdot \left(\frac{U_н}{U_{бi}}\right)^2$;

- для реактора $X_P = X_p \cdot \frac{S_б}{U_{бi}^2}$;

- для линии: $X_Л = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{бi}^2}$

- для системы $E_C'' = E_{*C}'' \cdot \frac{U_{срi}}{U_{бi}}$,

где $U_{бi}$, $U_{срi}$ -базисное напряжение (кВ) и среднее напряжение (кВ) той ступени i, на которой находится рассматриваемый элемент.

Приведенные формулы можно использовать для пересчета величины как основной, так и на всех других ступенях трансформации, только очевидно, что для основной ступени не требуется производить приведение базисных единиц (величин).

Для определения сопротивления двухобмоточного трансформатора можно брать любую его обмотку, т.е. высокую или низкую.

Тогда

$U_н$ -номинальное напряжение выбранной обмотки, кВ;

$U_{бi}$ - базисное напряжение той ступени, на которой выбрана обмотка, кВ.

Составление схемы замещения по приближенному приведению, используя относительные единицы

При составлении схемы придерживаются следующей последовательности:

1. Расчетная схема делится на ступени трансформации.

2. Для каждой ступени напряжения i устанавливается среднее напряжение U_{cpi} согласно шкале средних номинальных напряжений (см. выше).

3. Выбирается произвольно базисная мощность $S_б$, которая во всех ступенях трансформации одинакова. Рекомендуется принимать $S_б = 100; 1000$ МВА; и т.д.

4. Для каждой ступени i принимается базисное напряжение, $U_{бi} = U_{cpi}$

и определяется базисный ток $I_{бi} = \dfrac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{бi}}$.

5. Определяется ЭДС и сопротивление элементов расчетной схемы при базисных условиях:

- для генераторов: $X_d^{''} = X_d^{''} \cdot \dfrac{S_б \cdot cos(\varphi)}{P_н}$; $E_Г^{''} = E_{*Г}^{''}$;

- для трансформаторов: $X_T = \dfrac{U_k \cdot S_б}{100 \cdot S_н}$;

- для реактора $X_P = X_p \cdot \dfrac{S_б}{U_{бi}^2}$;

- для линии: $X_Л = X_{уд} \cdot l \cdot \dfrac{S_б}{U_{бi}^2}$

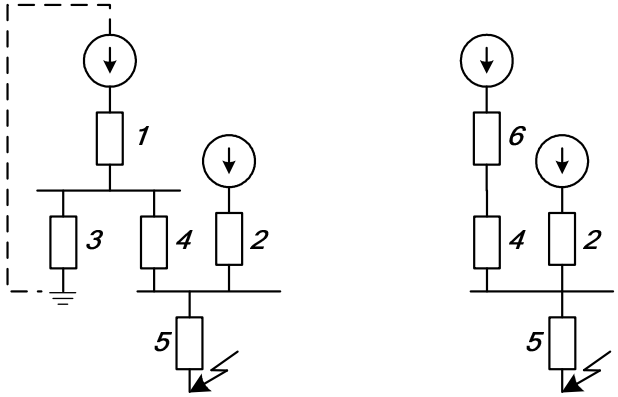
- для системы $E_C^{''} = E_{*C}^{''}$.

Эквивалентные преобразования исходной схемы.

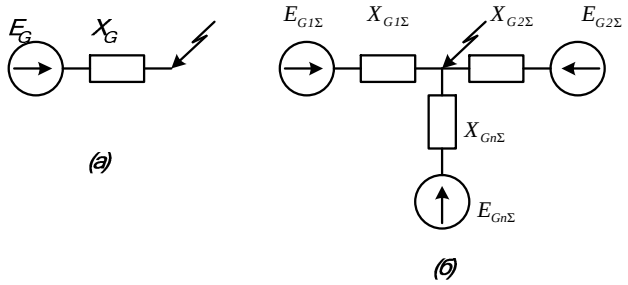
Целью преобразования схемы замещения является ее приведение к простейшему виду. Каждая схема должна быть преобразована до одного результирующего сопротивления соответствующей последовательности относительно точки к.з.

При преобразованиях следует использовать основные приемы эквивалентных преобразований, известные из теории линейных цепей (параллельное и последовательное сложение сопротивлений, преобразование звезды в треугольник и обратно и т.п.).

Первоочередной задачей расчета к.з. является нахождение тока непосредственно в аварийной ветви или в месте короткого замыкания. Поэтому преобразование схемы нужно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразований. С целью, например, при расчете установившегося режима к.з., концы нагрузочных ветвей, э.д.с. которых принимаются равными нулю, не следует соединять с точкой к.з., а лучше объединять эти ветви с генераторами в параллельные ветви.

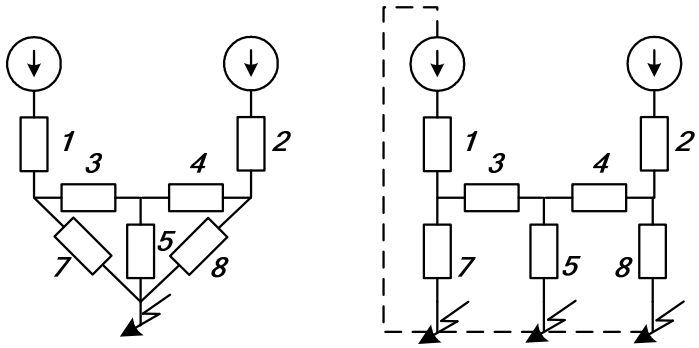


Если схема замещения содержит источники со значительно отличающимися параметрами, то они объединяются так, чтобы каждая группа содержала источники с близкими параметрами. Тогда простейшая схема, к которой приводится любая схема замещения, будет иметь вид, показанный на рисунке (а).

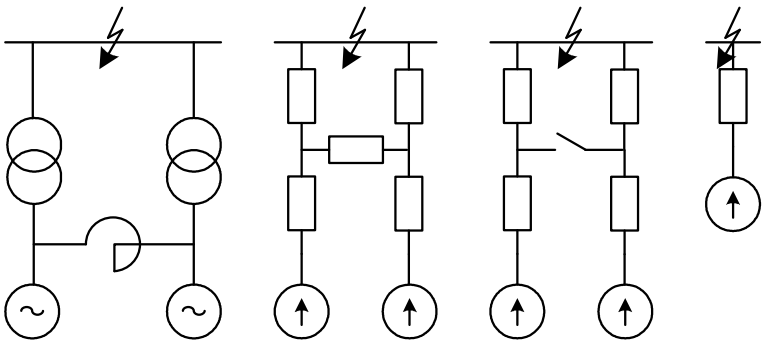


Преобразование схемы замещения системы в случае одной группы источников (а) и n-групп (б)

Когда трехфазное к.з. находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, этот узел можно разрезать, сохранив к.з. на конце каждой образовавшейся ветви. Далее полученную схему нетрудно преобразовать относительно любой из точек к.з., как указывалось ранее, учитывая другие ветви с к.з. как нагрузочные ветви, с э.д.с., равными нулю.



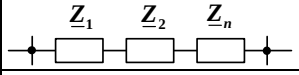
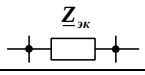
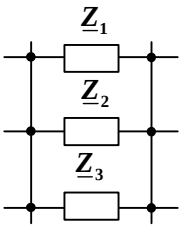
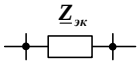
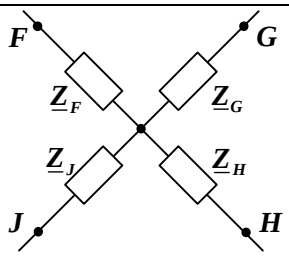
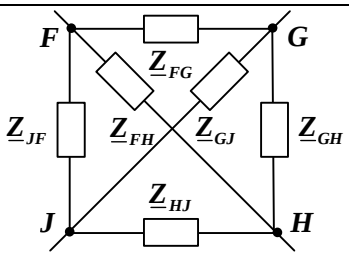
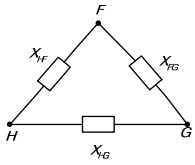
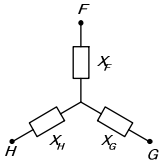
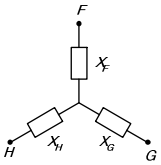
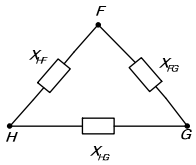
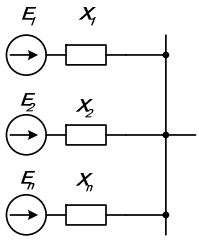
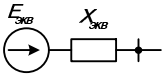
Часто схема замещения бывает симметрична относительно некоторой промежуточной точки. Это обстоятельство позволяет значительно упростить схему



Преобразование, применяемые в расчетах обычных линейных электрических цепей, включают в себя нахождение эквивалентной ЭДС, последовательное и параллельное сложение сопротивлений, преобразование треугольника в звезду и обратно, многолучевой звезды в многоугольник.

Формулы для таких расчетов приведены в таблице.

Основные формулы преобразования схем

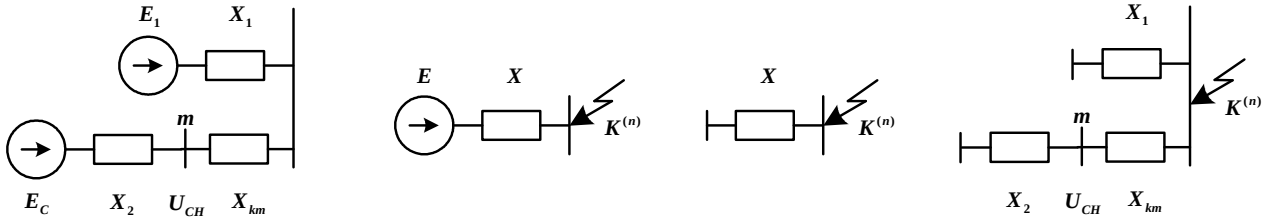
Вид преобразования	Исходная схема	Преобразованная схема	Сопротивление элементов преобразованной схемы
Последовательное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + ... + \underline{Z}_n$
Параллельное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}}$, где $\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}$; $\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2}$; $\underline{Y}_n = \frac{1}{\underline{Z}_n}$ При двух ветвях $\underline{Z}_{эк} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F \underline{Z}_G \sum \underline{Y}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G \underline{Z}_H \sum \underline{Y}$ ....., где $\sum \underline{Y} = \underline{Y}_F + \underline{Y}_G + \underline{Y}_H + \underline{Y}_J$ Аналогично и при большем числе ветвей
Преобразование треугольника в звезду			$X_F = \frac{X_{FG} \cdot X_{HF}}{X_{FG} + X_{HF} + X_{GH}}$, $X_G = \frac{X_{FG} \cdot X_{GH}}{X_{FG} + X_{HF} + X_{GH}}$ $X_H = \frac{X_{HF} \cdot X_{GH}}{X_{FG} + X_{HF} + X_{GH}}$
Преобразование звезды в треугольник			$X_{FG} = X_F + X_G + \frac{X_F X_G}{X_H}$, $X_{HG} = X_H + X_G + \frac{X_H X_G}{X_F}$, $X_{HF} = X_F + X_H + \frac{X_F X_H}{X_G}$.
Замена нескольких источников эквивалентным			$E_{экв} = \frac{1}{Y_{экв}} \sum_{K=1}^{n} Y_K E_K$, *где* $Y_{экв} = Y_1 + Y_2 + ... + Y_n$, $Y_1 = \frac{1}{X_1}; Y_2 = \frac{1}{X_2}; ....; Y_n = \frac{1}{X_n}$ *При двух ветвях* $E_{экв} = \frac{E_1 X_2 + E_2 X_1}{X_1 + X_2}$

Преобразования схем прямой, обратной и нулевой последовательности при расчете несимметричного к.з. целесообразно вести таким образом, чтобы ветвь, отделяющая точку к.з. от узла, в котором требуется построить векторную диаграмму напряжений (шины СН автотрансформатора), по возможности была сохранена до конца преобразований.

Трудности преобразования схем замещения в значительной степени определяются выбранным порядком выполнения операций по упрощению схемы.

Поэтому при преобразовании схем замещения следует придерживаться такого порядка расчетов и записи результатов, который обеспечивает легкую проверку получаемых результатов.

В результате преобразований должна быть получена эквивалентная расчетная схема, несколько вариантов которой приведены на рис.



А) *Б*) *В*) *Г*)

Схема А удобна при определении составляющей прямой последовательности напряжения на шинах СН автотрансформатора (узел m).

Схема Б – используется для расчетов сверхпереходного и установившего токов к.з. и определении результирующего сопротивления прямой последовательности $X_{1\Sigma}$.

Схема В – целесообразна при определении результирующих сопротивлений обратной последовательности $X_{2\Sigma}, X_{0\Sigma}$.

Схема Г аналогична схеме А, но без источников э.д.с. и удобна для определения составляющих прямой и обратной последовательностей напряжения на шинах СН автотрансформатора.

Эквивалентная схема может иметь и другой вид, но основным ее достоинством должна оставаться простота определения токов в ее ветвях.

Расчет трехфазного короткого замыкания.

Порядок расчета токов при трехфазном к.з.

1. Для заданной точки к.з. составляется расчетная схема.
2. Для расчетной схемы составляется ее эквивалентная схема замещения.
3. Схема замещения путем последовательных эквивалентных преобразований приводится к простейшей схеме: результирующий источник - результирующее сопротивление - точка к.з.
4. По упрощенной схеме определяется значение периодической составляющей тока в месте к.з., используя либо аналитический способ определения тока к.з., либо метод типовых кривых.
5. Определяется ударный ток и наибольшее действующее значение тока к.з.

Определение аналитическим способом сверхпереходного, ударного и наибольшего действующего значения тока в месте трехфазного к.з.

При расчетах токов короткого замыкания допускается:

1) не учитывать сдвиг по фазе ЭДС различных синхронных машин и изменение их частоты вращения, если продолжительность КЗ не превышает 0,5 с;

2) не учитывать межсистемные связи, выполненные с помощью электропередачи (вставки) постоянного тока;

3) не учитывать поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и напряжением 330-500 кВ, если их длина не превышает 150 км;

4) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;

5) не учитывать ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;

6) не учитывать влияние активных сопротивлений различных элементов исходной расчетной схемы на амплитуду периодической составляющей тока КЗ, если активная составляющая результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно точки КЗ не превышает 30 % от индуктивной составляющей результирующего эквивалентного сопротивления;

7) приближенно учитывать затухание апериодической составляющей тока КЗ, если исходная расчетная схема содержит несколько независимых контуров;

8) приближенно учитывать электроприемники, сосредоточенные в отдельных узлах исходной расчетной схемы;

9) принимать численно равными активное сопротивление и сопротивление постоянному току любого элемента исходной расчетной схемы.

Наиболее удаленную от расчетной точки КЗ часть электроэнергетической системы допускается представлять в виде одного источника энергии с неизменной по амплитуде ЭДС и результирующим эквивалентным индуктивным сопротивлением. ЭДС этого источника следует принимать равной среднему номинальному напряжению сети, связывающей удаленную и остальную части электроэнергетической системы, а его результирующее эквивалентное сопротивление $X_{\text{с}}$ определять, исходя из известного тока $I_{\text{с}}$ от эквивалентируемой части системы при КЗ в какой-нибудь узловой точке указанной сети:

$$X_{\text{с}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}\, I_{\text{с}}}.$$

Если для этой сети в качестве базисного напряжения принято соответствующее среднее номинальное напряжение, то

$$X_{*\ \text{с(б)}} = \frac{I_{\text{б}}}{I_{\text{с}}},$$

где $I_{\text{б}}$ - базисный ток той ступени напряжения, на которой находится узловая точка.

При отсутствии данных о токе КЗ от удаленной части электроэнергетической системы минимально возможное значение результирующего эквивалентного сопротивления $X_{\text{с}}$ можно оценить, исходя из параметров выключателей, установленных на узловой подстанции, т.е. принимая в формулах ток КЗ от удаленной части системы $I_{\text{с}}$ равным номинальному току отключения этих выключателей.

Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания

При расчете начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ в электроустановках напряжением свыше 1 кВ в исходную расчетную схему должны быть введены все синхронные генераторы и компенсаторы, а также синхронные и асинхронные электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если между электродвигателями и точкой КЗ отсутствуют токоограничивающие реакторы или силовые трансформаторы. В автономных электрических системах следует учитывать и электродвигатели меньшей мощности, если сумма их номинальных токов составляет не менее 1 % от тока в месте КЗ, определенного без учета этих электродвигателей.

Для расчета начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ аналитическим методом по принятой исходной расчетной схеме предварительно следует составить эквивалентную схему замещения, в которой синхронные и асинхронные машины должны быть представлены предварительно приведенными к базисной ступени напряжения или выраженными в относительных единицах при выбранных базисных условиях сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС. Исходные значения сверхпереходных ЭДС следует принимать численно равными их значениям в момент, предшествующий КЗ.

Схему замещения, полученную в соответствии с указаниями п. 5.2.2, следует путем преобразований привести к простейшему виду и определить результирующую эквивалентную ЭДС $E''_{эк}$ (или $\underset{*}{E''}_{эк(б)}$) и результирующее эквивалентное сопротивление $X_{эк}$ (или $\underset{*}{X}_{эк(б)}$) относительно расчетной точки КЗ.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ составляет

$$I_{П0} = \frac{E''_{эк}}{X_{эк}} = \frac{\underset{*}{E''}_{эк(б)}}{\underset{*}{X}_{эк(б)}} I_б ,$$

где $I_б$ - базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится расчетная точка КЗ.

При приближенных расчетах начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ допускается определять, приняв в соответствии с теоремой об активном двухполюснике ЭДС всех источников энергии равными нулю и используя формулу

$$I_{П0} = \frac{U_{|0|}}{\sqrt{3}X_{эк}} = \frac{cU_{ном}}{\sqrt{3}X_{эк}} \text{ или } I_{П0} = \frac{c}{\underset{*}{X}_{эк(б)}} I_б ,$$

где $U_{|0|}$ - напряжение (линейное) в расчетной точке КЗ к моменту возникновения КЗ; $U_{ном}$ - номинальное напряжение (линейное) сети, в которой произошло КЗ; c - коэффициент, который рекомендуется принимать равным:

c = 1,1 - при определении максимального значения тока КЗ;

c = 1,0 - при определении минимального значения тока КЗ.

Расчет апериодической составляющей тока короткого замыкания

Модуль начального значения апериодической составляющей тока КЗ следует определять как разность мгновенных значений периодической составляющей тока в начальный момент КЗ и тока в момент, предшествующий КЗ.

Наибольшее начальное значение апериодической составляющей тока КЗ в общем случае следует принимать равным амплитуде периодической составляющей тока в начальный момент КЗ, т.е.

$$i_{a0} = \sqrt{2} I_{П0} .$$

Это выражение справедливо при следующих условиях:

1) активная составляющая результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно расчетной точки КЗ значительно меньше индуктивной составляющей, вследствие чего активной составляющей можно пренебречь;

2) к моменту КЗ ветвь расчетной схемы, в которой находится расчетная точка КЗ, не нагружена;

3) напряжение сети к моменту возникновения КЗ проходит через нуль.

Для определения апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени предварительно должна быть составлена такая исходная схема замещения, чтобы в ней все элементы исходной расчетной схемы учитывались как индуктивными, так и активными сопротивлениями. При этом синхронные генераторы и компенсаторы, синхронные и асинхронные электродвигатели должны быть учтены индуктивным сопротивлением обратной последовательности (для асинхронных электродвигателей $X_2 \approx X''$) и сопротивлением обмотки статора постоянному току при нормированной рабочей температуре этой обмотки.

Если исходная расчетная схема имеет только последовательно включенные элементы, то апериодическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять по формуле

$$i_{at} = i_{ao} e^{-\frac{t}{T_a}},$$

где T_a — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ; она определяется по формуле

$$T_a = \frac{X_{эк}}{\omega_c R_{эк}},$$

где $X_{эк}$ и $R_{эк}$ - соответственно индуктивная и активная составляющие результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно точки КЗ; ω_c - синхронная угловая частота напряжения сети.

Примечание. В тех случаях, когда при расчете апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени необходимо учесть ток генератора в момент, предшествующий КЗ, следует использовать формулу

$$i_{at} = \sqrt{2} I_{|0|} \sqrt{\left(\frac{I_{п0}}{I_{|0|}}\right)^2 - 2\frac{I_{п0}}{I_{|0|}} \sin\psi_{|0|} + 1} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}$$

где $I_{|0|}$ - ток генератора к моменту КЗ; $\psi_{|0|}$ - угол сдвига фаз сверхпереходной ЭДС и тока генератора к моменту КЗ; T_a - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ в цепи с синхронным генератором.

Если исходная расчетная схема (и соответственно схема замещения) является многоконтурной, то апериодическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений, составленных с учетом как индуктивных, так и активных сопротивлений всех элементов исходной расчетной схемы.

Методика приближенных расчетов апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени зависит от конфигурации исходной расчетной схемы и положения расчетной точки КЗ.

Если исходная расчетная схема является многоконтурной, но все источники энергии связаны с расчетной точкой КЗ общим сопротивлением (или схема содержит только один источник энергии), то при приближенных расчетах апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени допускается считать, что эта составляющая затухает во времени по экспоненциальному закону с некоторой эквивалентной постоянной времени. Существует несколько методов ее определения:

1) с использованием составляющих комплексного результирующего эквивалентного сопротивления схемы замещения относительно точки КЗ, измеренного при промышленной частоте:

$$T_{а.эк} = \frac{\mathrm{Im}\underline{Z}_{эк}}{\omega_c \mathrm{Re}\underline{Z}_{эк}},$$

где $\underline{Z}_{эк}$ - комплексное результирующее эквивалентное сопротивление схемы замещения, измеренное при частоте 50 Hz; $\mathrm{Im}\underline{Z}_{эк}$ - мнимая составляющая комплексного результирующего эквивалентного сопротивления; $\mathrm{Re}\underline{Z}_{эк}$ - действительная составляющая комплексного результирующего эквивалентного сопротивления;

2) с использованием результирующих эквивалентных сопротивлений схемы замещения относительно расчетной точки КЗ, полученных при поочередном исключении из схемы всех активных, а затем всех индуктивных сопротивлений:

$$T_{а.эк} = \frac{X_{эк(R=0)}}{\omega_c R_{эк(x=0)}},$$

где $X_{эк(R=0)}$ - результирующее эквивалентное сопротивление схемы замещения при учете в ней различных элементов расчетной схемы только индуктивными сопротивлениями, т.е. при

исключении всех активных сопротивлений; $R_{эк(x=0)}$ - результирующее эквивалентное сопротивление схемы замещения при исключении из нее всех индуктивных сопротивлений;

3) с использованием составляющих комплексного результирующего эквивалентного сопротивления схемы замещения относительно точки КЗ, измеренного при частоте 20 Hz:

$$T_{а.эк} = 2{,}5\frac{\mathrm{Im}\underline{Z}_{эк(20)}}{\omega_c \mathrm{Re}\underline{Z}_{эк(20)}},$$

где $\underline{Z}_{эк(20)}$ - комплексное результирующее эквивалентное сопротивление схемы замещения относительно расчетной точки КЗ, измеренное при частоте 20 Hz; $\mathrm{Im}\underline{Z}_{эк(20)}$ - мнимая составляющая указанного комплексного сопротивления; $\mathrm{Re}\underline{Z}_{эк(20)}$ - действительная составляющая этого сопротивления.

По отношению к точному решению применение первого метода обычно дает отрицательную погрешность (занижает значения постоянной времени), применение второго метода дает положительную погрешность (завышает значения постоянной времени). Погрешность, связанная с применением третьего метода, по абсолютной величине обычно меньше, чем при использовании первого и второго методов. При аналитических расчетах наиболее простым является второй метод. При расчетах с применением ЭВМ предпочтение следует отдавать первому и третьему методам.

Если расчетная точка КЗ делит исходную расчетную схему на несколько независимых друг от друга частей, то при приближенных расчетах апериодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени ее следует определять как сумму апериодических составляющих токов от отдельных частей схемы, полагая, что каждая из этих составляющих изменяется во времени с соответствующей эквивалентной постоянной времени, т.е.

$$i_{at} = \sum_{i=1}^{m} i_{a0i} e^{-\frac{t}{Ta.эki}},$$

где m - число независимых частей схемы; i_{a0i} - начальное значение апериодической составляющей тока КЗ от i-й части схемы; $T_{a.эki}$ - эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ от i-й части схемы.

Расчет ударного тока короткого замыкания

Способ расчета ударного тока КЗ зависит от требуемой точности расчета и конфигурации исходной расчетной схемы.

Если исходная расчетная схема является многоконтурной, то для получения высокой точности расчета ударного тока КЗ следует решить систему дифференциальных уравнений, составленных для мгновенных значений токов в узлах и падений напряжения в контурах расчетной схемы, и определить максимальное мгновенное значение тока в ветви, в которой находится расчетная точка КЗ.

При расчете ударного тока КЗ с целью проверки проводников и электрических аппаратов по условиям КЗ допустимо считать, что амплитуда периодической составляющей тока КЗ в момент наступления ударного тока равна амплитуде этой составляющей в начальный момент КЗ. Исключение составляют случаи, когда вблизи расчетной точки КЗ включены асинхронные электродвигатели.

Если исходная расчетная схема содержит только последовательно включенные элементы, то ударный ток следует определять по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{п0} K_{уд}$$

где $K_{уд}$ — ударный коэффициент. Последний рекомендуется определять по одной из следующих формул:

$$K_{уд} = 1{,}02 + 0{,}98e^{-\frac{3}{x_{эк}/R_{эк}}} \quad \text{или} \quad K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0{,}5\pi+\varphi_к}{x_{эк}/R_{эк}}}, \text{ где } \varphi_к = \mathrm{arctg}\frac{X_{эк}}{R_{эк}}.$$

В тех случаях, когда $X_{эк}/R_{эк} \geq 5$, ударный коэффициент допустимо определять по формуле $K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$, где T_a - постоянная времени.

Если исходная расчетная схема является многоконтурной, причем все источники энергии связаны с расчетной точкой КЗ общим сопротивлением, то при приближенных расчетах ударного тока КЗ, исходя из ранее принятого допущения о экспоненциальном характере изменения апериодической составляющей тока КЗ, рекомендуется ударный коэффициент определять по формулам:

$$K_{уд} = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{\omega_c T_{а.эк}}} \quad \text{и} \quad K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01(0,5+\varphi_к/\pi)}{T_{а.эк}}},$$

где $T_{а.эк}$ - эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ.

При $X_{эк}/R_{эк} \geq 5$ допустимо также использовать формулу: $K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{а.эк}}}$.

В тех случаях, когда исходная расчетная схема является многоконтурной, но расчетная точка КЗ делит ее на несколько независимых частей, то ударный ток допустимо принимать равным сумме ударных токов от соответствующих частей схемы, т.е.

$$i_{уд} = \sqrt{2}\sum_{i=1}^{m} I_{п0i} K_{удi},$$

где $I_{п0i}$ - начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от *i*-й части схемы; $K_{удi}$ - ударный коэффициент тока КЗ от *i*-й части схемы.

Действующее значение полного тока к.з. за первый период его изменения определяется в соответствии с выражением $I_y = I_n^{''}\sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}$

Мощность к.з. в месте повреждения является условной величиной, определяемой по формуле $S_K = \sqrt{3} U_{НК} I_n^{''}$, где $U_{НК}$ - номинальное напряжение в точке к.з.

Пример расчета

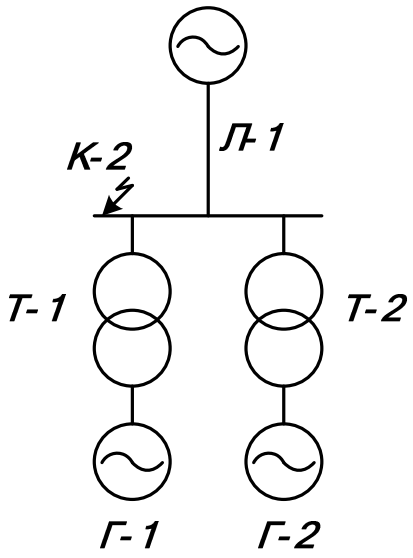


Рис 1. Исходная схема для расчета токов короткого замыкания

На рис.2 показана схема замещения, составленная для расчетной точки к.з. К-2. В схему замещения не вошли кабельная линия 6-10 кВ и воздушная линия Л-2, трансформатор собственных нужд Т-3 и реактор Р.

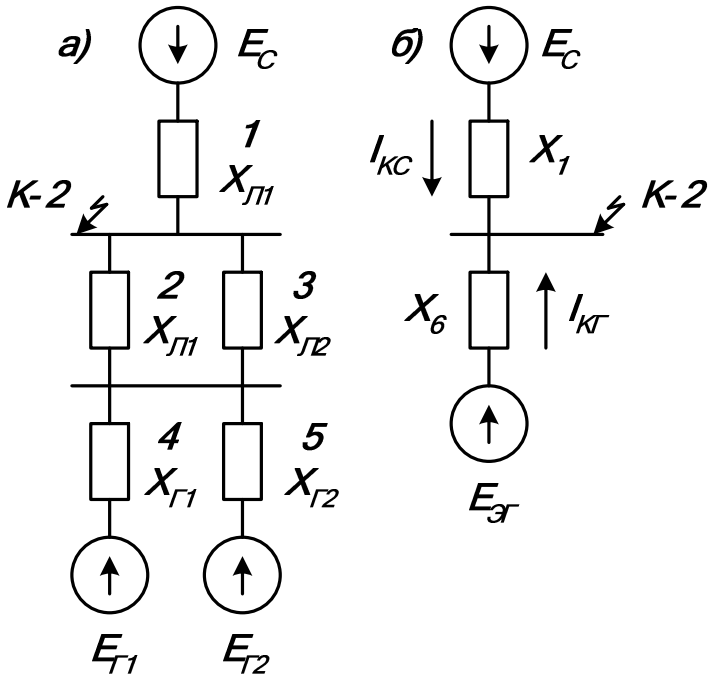


Рис. 2. Схемы замещения для расчета токов к.з.:
а) исходная схема замещения; б) упрощенная схема

Схема замещения (рис. 2, а) преобразуется к простейшему виду (рис. 2, б). При преобразовании система С выделяется в отдельную ветвь. Если в схеме генераторы имеют одинаковые параметры и находятся в одинаковых условиях, по отношению к точке к.з., то их можно заменить одним эквивалентным генератором суммарной мощности. При этом в схеме замещения эти генерирующие ветви следует сложить параллельно.

Преобразование (свертывание) схемы производится в направлении от источников питания к месту к.з. При этом используются известные правила последовательного и параллельного сложения сопротивлений, преобразование треугольника в эквивалентную звезду или обратно и т.п.

Например:

а) определение результирующего сопротивления последовательно соединенных n элементов (например, $X_1, X_2, ...X_n$) $X_\Sigma = X_1 + X_2 + ... + X_n$;

б) определение результирующего сопротивления при параллельном соединении элементов $X_\Sigma = \dfrac{1}{\dfrac{1}{X_1} + \dfrac{1}{X_2} + ... + \dfrac{1}{X_n}}$;

В частных случаях имеем:

- для двух ветвей $X_\Sigma = \dfrac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2}$;

- для трех ветвей: $X_\Sigma = \dfrac{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3}{X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3 + X_2 \cdot X_3}$;

в) замена n генерирующих ветвей, подключенных к общему узлу (т.е. соединенных последовательно) одной эквивалентной ветвью $E_\Sigma = \dfrac{\sum_1^n E_i \cdot Y_i}{\sum_1^n Y_i}$;

где i -номер ветвей; n -число ветвей.

В частном случае для двух генерирующих ветвей имеем: $E_{\Sigma} = \frac{E_1 \cdot X_2 + E_2 \cdot X_1}{X_1 + X_2}$;

г) преобразование сопротивлений X_1, X_2, X_3, соединенных в звезду, в эквивалентный треугольник с сопротивлениями X_{12}, X_{23}, X_{13} и наоборот:

$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}, \quad X_{13} = X_1 + X_3 + \frac{X_1 \cdot X_3}{X_2}, \quad X_{23} = X_2 + X_3 + \frac{X_2 \cdot X_3}{X_1};$$

$$X_1 = \frac{X_{12} \cdot X_{13}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}, \quad X_2 = \frac{X_{12} \cdot X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}, \quad X_3 = \frac{X_{13} \cdot X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}.$$

3. Величина сверхпереходного тока (начального значения периодической составляющей тока) в месте к.з. можно определить как сумму токов всех источников, притекающих к месту к.з. $I_k^{''} = \sum_1^n I_{ki}$; где i - номер ветвей; n-число ветвей.

Например, ток от генераторных ветвей (см. рис. 2, б), выраженный в относительных единицах

$$I_{*КГ}^{''} = \frac{E_{ЭГ}^{''}}{X_6}.$$

Ток от системы С, выраженный в относительных единицах:

$$I_{*КС}^{''} = \frac{E_C^{''}}{X_1};$$

где $X_6 = \frac{X_2 \cdot X_3}{X_2 + X_3} + \frac{X_4 \cdot X_5}{X_4 + X_5}$.

Сверхпереходной ток в месте к.з., выраженный в именованных единицах

$$I_k^{''} = (I_{*КГ}^{''} + I_{*КС}^{''}) \cdot I_б;$$

где $I_б$ -.базисный ток ступени, на которой находится точка к.з., кА.

4. Ударный ток и наибольшее действующее значение тока к.з. определяются начальным периодическим током $I_{ki}^{''}$ и ударным коэффициентом K_{yi} ветвей источников:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot \sum_1^n K_{yi} \cdot I_{ki}^{''};$$

$$I_y = \sum_1^n I_{ki}^{''} \cdot \sqrt{1 + 2(K_{yi} - 1)^2}.$$

Усредненные значения ударного коэффициента для характерных ветвей системы:

- для генераторной ветви $K_y = 1{,}94 \div 1{,}98$;

- для ветви системы, связанной с шинами, где рассматривается к.з., воздушными линиями напряжением 35-220 кВ - $K_y = 1{,}608 \div 1{,}78$;

- для ветви системы, связанной со сборными шинами 6-10 кВ, где рассматривается к.з., через трансформатор $K_y = 1{,}82 \div 1{,}93$;

Например, ударный ток и наибольшее действующее значение тока в месте к.з. в схеме (см. рис.2, б) вычисляем в виде, кА

$$i_{уд}^{''} = \sqrt{2} \cdot (K_{уд} \cdot I_{*КГ}^{''} + K_{уд} \cdot I_{*КС}^{''}) \cdot I_б$$

$$I_y^{''} = (I_{*КГ}^{''} \cdot \sqrt{1 + 2(K_{уГ} - 1)^2} + I_{*КС}^{''} \cdot \sqrt{1 + 2(K_{уС} - 1)^2}) \cdot I_б.$$

где $K_{уГ}$ - ударный коэффициент ветви генератора; $K_{уС}$ - ударный коэффициент ветви системы С; $I_б$ - базисный ток той ступени, на которой находится точка к.з., кА.

Расчет периодической слагающей тока в месте трехфазного к.з. методом типовых кривых

При приближенных расчетах токов КЗ для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных генераторов в произвольный момент времени при радиальной расчетной схеме следует применять метод типовых кривых. Он основан на использовании кривых изменения во времени отношения действующих значений периодической составляющей тока КЗ от генератора в произвольный и начальный моменты времени, т.е. $\gamma_t = I_{пt}/I_{по} = f(t)$, построенных для разных удаленностей точки КЗ. При этом электрическая удаленность точки КЗ от синхронной машины характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока генератора в начальный момент КЗ к его номинальному току, т.е.

$$I_{*\,п0(ном)} = \frac{I_{п0}}{I_{ном}} = I_{*\,п0(б)} \frac{S_б}{S_{ном}},$$

где $I_{*\,п0}$ - начальное значение периодической составляющей тока КЗ от машины в относительных единицах при выбранных базисных условиях; $S_б$ - базисная мощность, МВ·А; $S_{ном}$ - номинальная мощность (полная) синхронной машины, МВ·А.

Типовые кривые учитывают изменение действующего значения периодической составляющей тока КЗ, если отношение действующего значения периодической составляющей тока генератора в начальный момент КЗ к его номинальному току равно или больше двух.

При меньших значениях этого отношения следует считать, что действующее значение периодической составляющей тока КЗ не изменяется во времени, т.е. $I_{пt} = I_{п0} = \text{const}$.

Расчет действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронного генератора в произвольный (фиксированный) момент времени с использованием метода типовых кривых рекомендуется вести в следующем порядке:

1) по исходной расчетной схеме составить эквивалентную схему замещения для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ, в которой синхронную машину следует учесть предварительно приведенными к базисной ступени напряжения или выраженными в относительных единицах при выбранных базисных условиях сверхпереходным сопротивлением и сверхпереходной ЭДС, с помощью преобразований привести схему к простейшему виду и определить действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент КЗ;

2) используя формулу, определить значение величины $I_{*\,п0(ном)}$, характеризующей электрическую удаленность расчетной точки КЗ от синхронной машины;

3) исходя из типа генератора и его системы возбуждения, выбрать соответствующие типовые кривые и по найденному значению $I_{*\,п0(ном)}$ выбрать необходимую кривую (при этом допустима линейная экстраполяция в области смежных кривых);

4) по выбранной кривой для заданного момента времени определить коэффициент γ_t;

5) определить искомое значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины в заданный момент времени

$$I_{пt} = \gamma_t I_{*\,п0(б)} I_б,$$

где $I_б$ - базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится расчетная точка КЗ.

Если исходная расчетная схема содержит несколько однотипных синхронных генераторов, находящихся в одинаковых условиях по отношению к расчетной точке КЗ, то порядок расчета периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени аналогичен изложенному, только при определении значения $I_{*\,п0(ном)}$ в последнюю вместо $S_{ном}$ следует подставлять сумму номинальных мощностей всех этих генераторов.

Учет синхронных и асинхронных электродвигателейпри расчете токов короткого замыкания

Степень влияния синхронных и асинхронных электродвигателей на ток КЗ зависит от характера исходной расчетной схемы, положения расчетной точки КЗ, удаленности последней от электродвигателей и многих других факторов. Условия, при которых расчет начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ должен быть выполнен с учетом синхронных и асинхронных электродвигателей, изложены ранее. Эти условия следует выполнять и при определении периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени. Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей (или с учетом электродвигателей) следует выполнять в соответствии с указаниями, изложенными ранее.

Периодическую составляющую тока КЗ от синхронных или асинхронных электродвигателей в произвольный момент времени следует рассчитывать путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов и выделения из найденного тока его периодической составляющей, используя ЭВМ.

В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ от СД или АД при разных удаленностях точки КЗ в произвольный момент времени при радиальной схеме следует применять метод типовых кривых $\gamma_{tСД} = I_{пtСД}/I_{п0СД}$ и $\gamma_{tАД} = I_{пtАД}/I_{п0АД}$.

Порядок расчета действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронного и асинхронного электродвигателей в произвольный момент времени с использованием этих кривых аналогичен изложенному. Значение периодической составляющей тока в килоамперах в момент времени t равно

$$\left.\begin{aligned} I_{пtСД} &= \gamma_{tСД} \underset{*}{I}_{п0(ном)} I_{номСД} = \gamma_{tСД} \underset{*}{I}_{п0(б)} I_{б}; \\ I_{пtАД} &= \gamma_{tАД} \underset{*}{I}_{п0(ном)} I_{номАД} = \gamma_{tАД} \underset{*}{I}_{п0(б)} I_{б}, \end{aligned}\right\}$$

и

где $I_{номСД}$ и $I_{номАД}$ - номинальные токи соответственно синхронного и асинхронного электродвигателей; $I_б$ - базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находятся точка КЗ и электродвигатель.

Расчет действующего значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени от группы синхронных явнополюсных или асинхронных электродвигателей с учетом влияния удаленных от расчетной точки КЗ источников энергии, но связанных с точкой КЗ общим для этих источников и электродвигателей сопротивлением $X_к$ (ветвь КЗ) рекомендуется проводить в следующей последовательности:

1) группу подлежащих учету синхронных явнополюсных или асинхронных электродвигателей заменить одним эквивалентным ЭД, номинальная мощность которого равна сумме номинальных мощностей заменяемых ЭД, т.е. $S_{ном.эк} = \sum_{i=1}^{i=n} S_{номi}$, где n - число электродвигателей в группе; $S_{номi}$ - номинальная мощность i-го электродвигателя, МВ·А;

2) по исходной расчетной схеме составить соответствующую схему замещения для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ, преобразовать ее в эквивалентную Т-образную схему и определить параметры ветвей последней - ветви двигательной нагрузки (без учета сопротивления двигателей) $X_д$, ветви системы $X_с$ и ветви КЗ общей для двигателей и системы - $X_к$;

3) вычислить периодическую составляющую тока от эквивалентного ЭД в начальный момент КЗ при принятых базисных условиях: $I_{п0д(б)} = \dfrac{\underset{*}{E}''_{0д(б)} - \underset{*}{E}_{с(б)} \underset{*}{X}_{к(б)} / (\underset{*}{X}_{с(б)} + \underset{*}{X}_{к(б)})}{\underset{*}{X}_{с(б)} \underset{*}{X}_{к(б)} / (\underset{*}{X}_{с(б)} + \underset{*}{X}_{к(б)}) + \underset{*}{X}_{д(б)} + \underset{*}{X}''_{д(б)}}$,

где $\underset{*}{E}''_{0д(б)}$ - начальное значение сверхпереходной ЭДС эквивалентного электродвигателя; $\underset{*}{E}_{с(б)}$ - ЭДС удаленных источников энергии (системы); $\underset{*}{X}''_{д(б)}$ - сверхпереходное индуктивное сопротивление эквивалентного электродвигателя;

4) определить значение величины, характеризующей электрическую удаленность расчетной точки КЗ от эквивалентного электродвигателя $I_{*\,\text{п0(ном)}}=\frac{I_{\text{п0}}}{I_{\text{ном}}}=I_{*\,\text{п0д(б)}}\frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном.эк}}}$;

5) по найденному значению $I_{*\,\text{п0(ном)}}$ (в зависимости от типа электродвигателей) выбрать соответствующую типовую кривую (возможна линейная экстраполяция между смежными кривыми) и для заданного момента времени *t* определить коэффициент γ_t;

6) определить действующее значение периодической составляющей тока эквивалентного электродвигателя в момент времени *t* $I_{*\,\text{пtд(б)}}=\gamma_t I_{*\,\text{п0д(б)}}$;

7) вычислить искомое действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ в момент времени *t* $I_{\text{кt}}=\frac{E_{*\,\text{с(б)}}-I_{*\,\text{пtд(б)}}X_{*\,\text{с(б)}}}{X_{*\,\text{с(б)}}+X_{*\,\text{к(б)}}}I_{\text{б}}$, где $I_{\text{б}}$ - базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится точка КЗ.

Учет комплексной нагрузки при расчете токов короткого замыкания

При расчетах токов КЗ следует учитывать влияние каждой комплексной нагрузки, если ток в месте КЗ от той нагрузки составляет не менее 5 % тока в месте КЗ, определенного без учета нагрузки.

В общем случае ток КЗ от комплексной нагрузки следует определять как геометрическую сумму токов от отдельных ее элементов.

В приближенных расчетах допускается эквивалентирование комплексной нагрузки с представлением ее в виде эквивалентной ЭДС и эквивалентного сопротивления.

Эквивалентное сопротивление прямой (обратной) последовательности $Z_{*\,\text{1нг(ном)}}$, $Z_{*\,\text{2нг(ном)}}$ в относительных единицах в зависимости от относительного состава потребителей узла при номинальных условиях допускается рассчитывать по формуле

$$Z_{*\,\text{1нг(ном)}}=S_{\Sigma}\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\frac{S_{\text{i}}}{\sqrt{R_{*\,\text{1i(ном)}}^{2}+X_{*\,\text{1i(ном)}}^{2}}}},$$

где $R_{*\,\text{1i(ном)}}$ и $X_{*\,\text{1i(ном)}}$ - активная и индуктивная составляющие сопротивления прямой (обратной) последовательности *i*-го потребителя, включая составляющие сопротивления элементов, связывающих потребителя с шинами узла; их значения в относительных единицах при суммарной номинальной мощности нагрузка S_{Σ}, кВ·А, и среднем номинальном напряжении той ступени напряжения сети, где она присоединена; S_{i} - полная установленная мощность *i*-го потребителя нагрузки, кВ·А.

Метод расчета тока КЗ от комплексной нагрузки зависит от характера исходной схемы замещения узла и положения точки КЗ. При радиальной расчетной схеме допускается не учитывать влияние статических потребителей (преобразователей, электротермических установок и др.).

При КЗ за общим сопротивлением для различных потребителей узла нагрузки начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ рекомендуется определять, используя выражение $\dot{I}_{\text{п0нг}}=\dot{E}''_{\text{нг}}/(\underline{Z}_{\text{нг}}+\underline{Z}_{\text{вш}})$, где $\dot{E}''_{\text{нг}}$ и $\underline{Z}_{\text{нг}}$ - результирующая ЭДС и сопротивление узла нагрузки. Их значения можно определить по данным табл., в зависимости от относительного состава потребителей; $\underline{Z}_{\text{вш}}$ - внешнее сопротивление до точки КЗ.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени с учетом электродвигателей и статической нагрузки узла рекомендуется определять как $I_{\text{птнг}}=I_{\text{птд}}-I_{\text{ст}}$, где $I_{\text{птд}}$ - периодическая составляющая тока КЗ в

произвольный момент времени от электродвигателей. Она определяется с использованием соответствующих типовых кривых; $I_{ст}$ - суммарный ток статических потребителей до КЗ.

При КЗ за общим для узла нагрузки и системы сопротивлением начальное значение периодической составляющей тока в точке трехфазного КЗ следует определять по формуле

$$\dot{I}_{п0к} = \frac{(\dot{E}_с \underline{Z}_{нг} + \dot{E}''_{нг} \underline{Z}_с)}{\underline{Z}_с \underline{Z}_{нг} + \underline{Z}_с \underline{Z}_к + \underline{Z}_{нг} \underline{Z}_к}$$, где $\dot{E}_с$ и $\dot{E}''_{нг}$ - ЭДС соответственно системы и узла нагрузки; $\underline{Z}_с$ - результирующее сопротивление со стороны системы до сборных шин узла; $\underline{Z}_{нг}$ - эквивалентное сопротивление нагрузки, включая цепь ее подключения; $\underline{Z}_к$ - эквивалентное сопротивление элементов, включенных между точкой КЗ и шинами узла нагрузки.

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ от узла нагрузки

$$\dot{I}_{п0нг} = \frac{(\dot{E}''_{нг} - \dot{U}_м)}{\underline{Z}_{нг}}$$, где $\dot{U}_м$ - напряжение в точке M: $\dot{U}_м = \dot{I}_{п0к} \underline{Z}_к$.

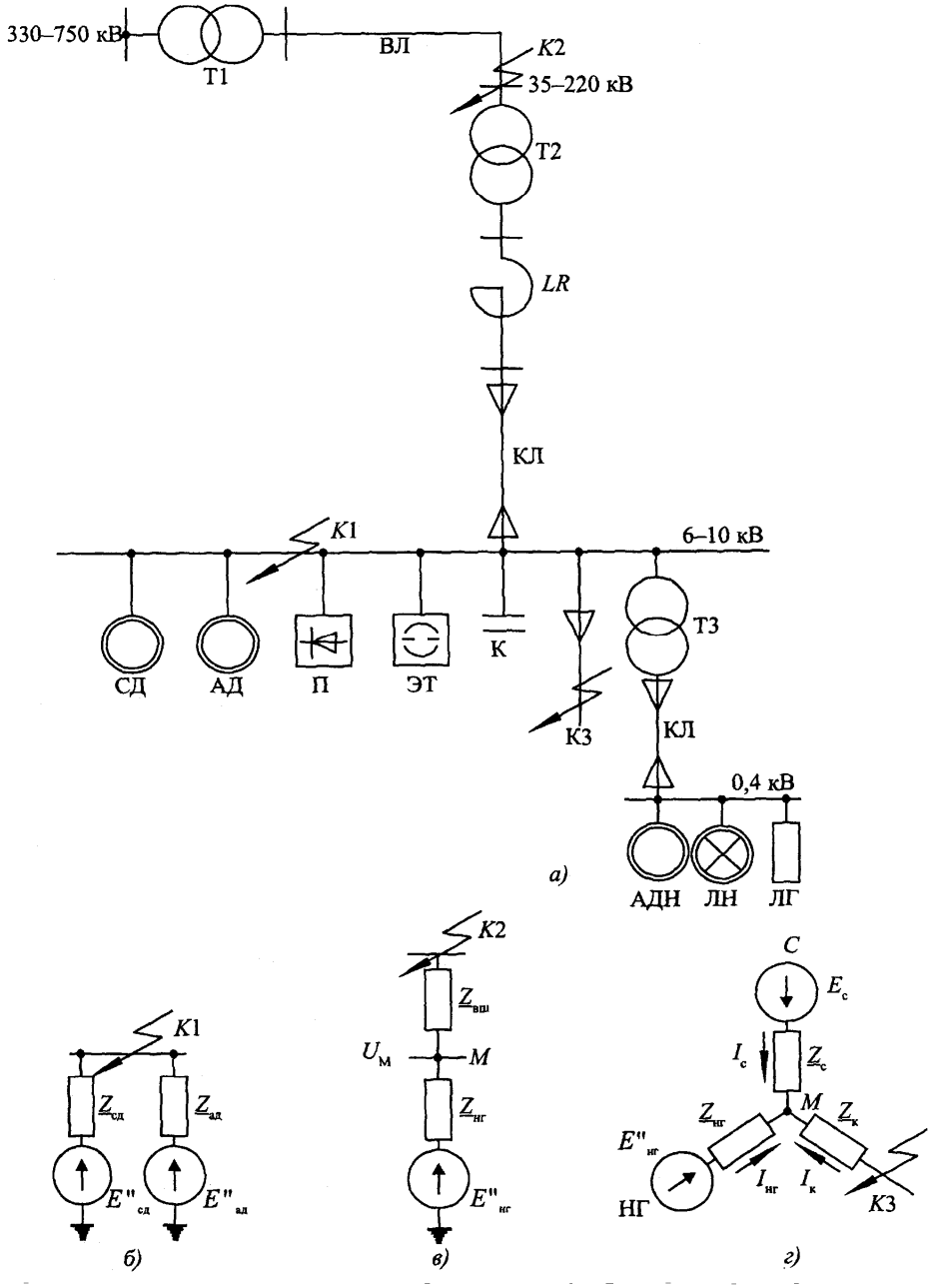


Рис. Схема узла комплексной нагрузки и ее преобразование

Расчет несимметричных коротких замыканий

Для расчета токов при несимметричных КЗ целесообразно использовать метод симметричных составляющих. При этом кроме схемы замещения прямой последовательности для расчета двухфазного КЗ необходимо составить схему замещения обратной последовательности, а для расчета однофазного и двухфазного КЗ на землю - также схему замещения нулевой последовательности.

Схема замещения обратной последовательности по конфигурации аналогична схеме замещения прямой последовательности, т.е. в ней должны быть представлены все элементы исходной расчетной схемы. При этом электрические машины с вращающимся ротором и обобщенные нагрузки узлов должны быть учтены соответствующим сопротивлением обратной последовательности, а ЭДС приняты равными нулю. Индуктивное сопротивление обратной последовательности синхронных и асинхронных электродвигателей допустимо принимать численно равным индуктивной составляющей их сопротивления короткого замыкания. Сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки какого-либо узла в о.е., отнесенное к полной мощности нагрузки и среднему номинальному напряжению той ступени напряжения сети, где эта нагрузка присоединена, следует принимать равным: при напряжении сети 35 кВ и более $X_{*2(\text{ном})} = 0{,}45$ и при напряжении сети менее $X_{*2(\text{ном})} = 0{,}35$.

Схема замещения нулевой последовательности обычно существенно отличается от схем прямой и обратной последовательностей. Ее конфигурация определяется в основном положением расчетной точки КЗ и схемами соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов исходной расчетной схемы. Чтобы составить схему замещения нулевой последовательности, следует допустить, что в точке несимметричного КЗ все фазы соединены между собой накоротко и между этой точкой и землей приложено напряжение нулевой последовательности. Затем, идя от точки КЗ поочередно в разные стороны, необходимо на каждой ступени напряжения исходной расчетной схемы выявить возможные пути циркуляции токов нулевой последовательности (циркуляция этих токов возможна только в тех ветвях, которые образуют контуры для замыкания токов через землю и параллельные ей цепи) и соответственно определить элементы этой схемы, которые должны быть введены в схему замещения. При этом следует иметь в виду, что сопротивление нулевой последовательности трансформатора со стороны обмотки, соединенной в треугольник или звезду с незаземленной нейтралью, бесконечно велико, поэтому трансформаторы с указанными схемами соединения и все находящиеся за ними элементы исходной расчетной схемы в схему замещения нулевой последовательности не входят.

Циркуляция токов нулевой последовательности возможна только в том случае, если обмотка трансформатора, обращенная в сторону расчетной точки КЗ, соединена в звезду с заземленной нейтралью.

Схема замещения нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y_0/Δ, представлена на рис. *а*. Поскольку индуктивное сопротивление $X_{\mu 0}$ во много раз больше сопротивлений рассеяния обмоток X_{I} и X_{II}, то в исходной схеме замещения нулевой последовательности трансформатор с указанной схемой соединения обмоток представляется в виде одного индуктивного сопротивления $X_{\text{т}0} = X_{\text{I}} + X_{\text{II}}$, которое с противоположной стороны (идя от расчетной точки КЗ) соединяется с точкой нулевого потенциала схемы замещения (с землей). Таким образом, если в исходной расчетной схеме за таким трансформатором имеются какие-либо элементы (трансформаторы, генераторы, воздушные или кабельные линии и т.д.), то независимо от их вида и схемы соединения их обмоток эти элементы в схему замещения нулевой последовательности не вводятся. Это объясняется тем, что при соединении обмоток трансформатора по схеме Y_0/Δ ЭДС нулевой последовательности, наводимая в соединенной треугольником обмотке, полностью компенсируется падением напряжения от тока нулевой последовательности в индуктивном сопротивлении рассеяния этой обмотки, вследствие чего напряжение нулевой последовательности на выводах этой обмотки равно нулю.

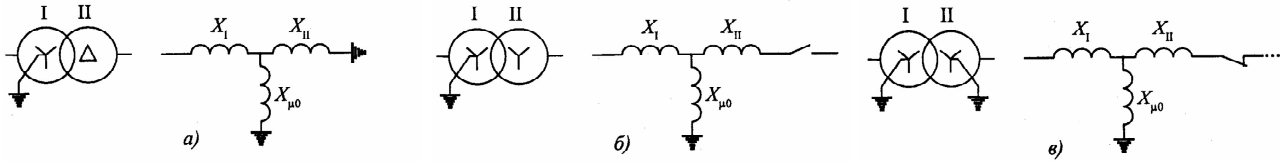


Рис. Схемы замещения нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов

В случае соединения обмоток двухобмоточного трансформатора по схеме Y_0/Y циркуляция токов нулевой последовательности в обмотке, соединенной в звезду, невозможна (см. схему замещения нулевой последовательности такого трансформатора на рис. *б)*. Поскольку у трансформаторов с номинальным напряжением обмоток свыше 1 кВ сопротивление $X_{\mu 0}$ весьма значительно, то в схему замещения нулевой последовательности такие трансформаторы не вводят.

Схема замещения нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y_0/Y_0, представлена на рис. *в*. Очевидно, трансформатор необходимо вводить в исходную схему замещения нулевой последовательности только в том случае, если на стороне обмотки II имеется контур для циркуляции токов нулевой последовательности (имеются в виду электроустановки напряжением свыше 1 кВ, когда $X_{\mu 0} >> X_{\text{I}}+X_{\text{II}}$).

Сопротивление нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, зависит от схемы соединения двух других обмоток. Обычно одна из них соединена треугольником, а другая может быть соединена или треугольником, или в звезду с изолированной нейтралью, или в звезду с заземленной нейтралью. В первом случае компенсация тока нулевой последовательности обмотки, обращенной к расчетной точке КЗ, осуществляется токами обеих обмоток, соединенных треугольником, и схема замещения нулевой последовательности такого трансформатора имеет вид, как показано на рис. *3,2, а*.

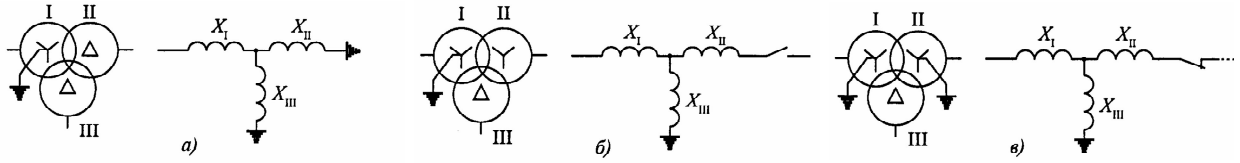


Рис. Схемы замещения нулевой последовательности трехобмоточных трансформаторов

При этом сопротивление нулевой последовательности трансформатора $X_{\text{т}0} = X_{\text{I}} + X_{\text{II}} // X_{\text{III}}$. Во втором случае по обмотке, соединенной в звезду с изолированной нейтралью, протекание тока нулевой последовательности невозможно (см. схему на рис. *б)*, поэтому сопротивление нулевой последовательности такого трансформатора $X_{\text{т}0} = X_{\text{I}} + X_{\text{III}}$. В третьем случае циркуляция тока нулевой последовательности возможна и в обмотке II (см. рис. *в)*, если в сети, электрически связанной с этой обмоткой, обеспечены условия для замыкания этого тока.

Схема замещения нулевой последовательности автотрансформатора, который имеет обмотку, соединенную треугольником, а его нейтраль заземлена наглухо, аналогична схеме замещения нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора, у которого обмотки соединены по схеме $Y_0/Y_0/\Delta$ (см. рис. *в*).

Составление исходной комплексной схемы замещения для расчета несимметричных коротких замыканий

В тех случаях, когда требуется определить токи и напряжения не только в месте несимметричного КЗ, но и в других ветвях и точках расчетной схемы, целесообразно использовать комплексные схемы замещения. Исходные комплексные схемы замещения для расчета двухфазного КЗ и двухфазного КЗ на землю получаются путем соединения

соответственно начал и концов исходных схем замещения различных последовательностей, как показано на рис.



Рис. Комплексная схема замещения для двухфазного КЗ

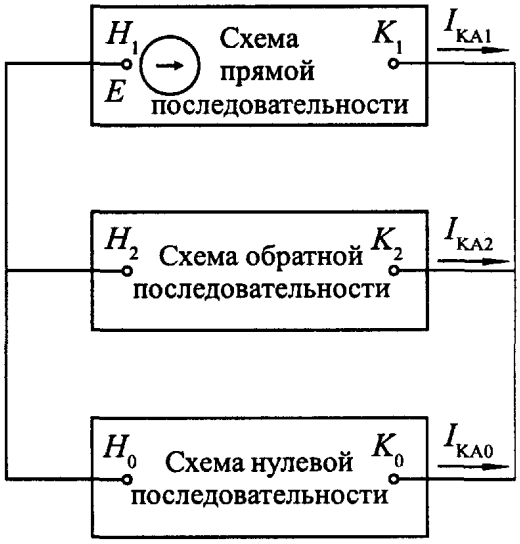
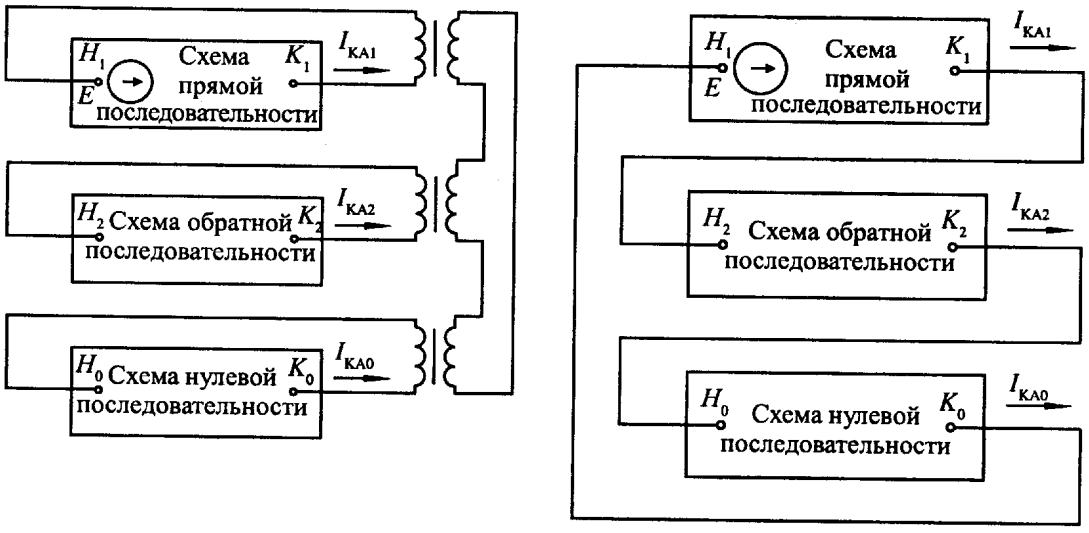


Рис. Комплексная схема замещения для двухфазного КЗ на землю

Комплексную схему замещения для однофазного КЗ, в которой выполняются все соотношения не только для симметричных составляющих тока особой фазы, но и для симметричных составляющих напряжения, можно получить, если схемы замещения отдельных последовательностей соединить между собой с помощью идеальных промежуточных трансформаторов (т.е. трансформаторов, у которых потери мощности и ток намагничивания равны нулю) с коэффициентом трансформации 1:1. Такая комплексная схема замещения приведена на рис. *а*.

При аналитических расчетах допускается использовать упрощенную комплексную схему замещения без промежуточных трансформаторов, которая справедлива только для симметричных составляющих тока особой фазы. Такая комплексная схема представлена на рис. *б*.



а) *б)*

Рис. Комплексные схемы замещения для однофазного КЗ:
а) — точная; *б)* — приближенная

Учет взаимоиндукции линий электропередачи

При определении сопротивления нулевой последовательности воздушных линий электропередачи необходимо учитывать влияние взаимоиндукции от других линий (цепей), проложенных по той же трассе.

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности одной цепи от другой (т.е. между проводом одной цепи и тремя проводами другой цепи) при отсутствии у обеих цепей заземленных тросов, Ом/км, следует определять по формуле

$$X_{\text{I–II0}} = 0{,}435\, lg \frac{D_3}{D_{\text{I–II}}},$$

где $D_3 \approx 935$ м — эквивалентная глубина возврата тока через землю; $D_{\text{I-II}}$ — среднее геометрическое расстояние между цепями I и II, которое определяется расстояниями между каждым проводом (A, B, C) цепи I и каждым проводом (A', B', C') цепи II:

$$D_{\text{I–II}} = \sqrt[9]{D_{AA'} D_{AB'} D_{AC'} D_{BA'} D_{BB'} D_{BC'} D_{CA'} D_{CB'} D_{CC'}}\ .$$

При наличии у цепей заземленных тросов сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности одной цепи от другой следует определять с учетом этих тросов, используя формулу

$$X^{(\text{T})}_{\text{I–II0}} = X_{\text{I–II0}} - X_{\text{IT0}} X_{\text{IIT0}} / X_{\text{T0}},$$

где X_{IT0} и X_{IIT0} — индуктивные сопротивления взаимоиндукции нулевой последовательности между проводами соответственно первой и второй цепей и системой тросов; X_{T0} — индуктивное сопротивление нулевой последовательности системы тросов.

Применяя метод симметричных составляющих для несимметричных трехфазных систем токов и напряжений и пренебрегая влиянием высших гармоник, расчеты режимов несимметричного КЗ в одном месте цепи можно производить аналогично расчету трехфазного КЗ.

Если параметры всех фаз исходной расчетной схемы одинаковы, а причиной нарушения симметрии является короткое замыкание в одном или двух местах, то для расчета токов при несимметричных КЗ следует применять метод симметричных составляющих, так как при указанных условиях этот метод имеет большие преимущества: симметричные системы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей связаны законом Ома только с симметричными системами напряжений одноименной последовательности:

$$\left.\begin{aligned} \Delta\dot{U}_1 &= \dot{I}_1 \underline{Z}_1; \\ \Delta\dot{U}_2 &= \dot{I}_2 \underline{Z}_2; \\ \Delta\dot{U}_0 &= \dot{I}_0 \underline{Z}_0; \end{aligned}\right\}$$

где $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$; $\underline{Z}_0$ - сопротивления соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Поскольку при этом разные фазы симметричной системы любой последовательности находятся в одинаковых условиях (в них соблюдается симметрия токов, напряжений и других электрических величин), то метод симметричных составляющих позволяет использовать эквивалентные схемы замещения различных последовательностей в однолинейном изображении и вести расчеты для одной фазы (она обычно называется особой).

Примечание. При несимметричных КЗ вследствие несимметрии ротора синхронных машин помимо основной гармоники ток КЗ содержит высшие гармонические составляющие. Это существенно затрудняет расчеты токов КЗ. Чтобы иметь возможность применять метод симметричных составляющих в обычной форме как при расчете установившихся токов несимметричных КЗ, так и токов при переходных процессах, допустимо пренебрегать высшими гармоническими составляющими тока КЗ.

Обычно при коротких замыканиях в основных цепях электроэнергетических систем результирующее эквивалентное индуктивное сопротивление расчетной схемы относительно точки КЗ значительно превышает результирующее активное сопротивление (в 10 и более

раз), поэтому расчет периодической составляющей тока при несимметричных КЗ допускается производить, не учитывая активные сопротивления различных элементов расчетной схемы. При этом условии ток прямой последовательности особой фазы в месте любого несимметричного КЗ следует определять по формуле

$$\dot{I}_{\text{кА1}}^{(\text{n})} = \frac{\dot{E}\text{эк}}{j(X_{1\Sigma} + \Delta X^{(\text{n})})},$$

где (n) - вид несимметричного КЗ; $\dot{E}_{\text{эк}}$ - результирующая эквивалентная ЭДС всех учитываемых источников энергии; $X_{1\Sigma}$ - результирующее эквивалентное индуктивное сопротивление схемы замещения прямой последовательности относительно точки несимметричного КЗ; $\Delta X^{(\text{n})}$ - дополнительное индуктивное сопротивление, которое определяется видом несимметричного КЗ (n) и параметрами схем замещения обратной и нулевой (при однофазном и двухфазном КЗ на землю) последовательностей.

Токи обратной и нулевой последовательностей особой фазы в месте несимметричного КЗ связаны с током прямой последовательности соотношениями:

- при двухфазном КЗ $\dot{I}_{\text{кА2}} = -\dot{I}_{\text{кА1}}$;
- при однофазном КЗ $\dot{I}_{\text{кА2}} = \dot{I}_{\text{кА0}} = \dot{I}_{\text{кА1}}$;
- при двухфазном КЗ на землю $\dot{I}_{\text{кА2}} = -\dot{I}_{\text{кА1}} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$ и $\dot{I}_{\text{кА0}} = -\dot{I}_{\text{кА1}} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$.

Модуль полного (суммарного) тока поврежденной фазы в месте несимметричного КЗ связан с модулем соответствующего тока прямой последовательности следующим соотношением:

$$\left|I_{\text{к}}^{(\text{n})}\right| = m^{(\text{n})}\left|I_{\text{к1}}^{(\text{n})}\right|,$$

где $m^{(\text{n})}$ - коэффициент, показывающий, во сколько раз модуль полного (суммарного) тока поврежденной фазы при *n-м* виде несимметричного КЗ в расчетной точке КЗ превышает ток прямой последовательности при этом же виде КЗ и в той же точке.

При расчетах несимметричных КЗ определению подлежит не только ток КЗ, но и напряжение в месте КЗ.

Напряжение прямой последовательности особой фазы в точке несимметричного КЗ любого вида составляет $\dot{U}_{\text{кА1}} = j\dot{I}_{\text{кА1}}\Delta X^{(\text{n})}$.

Напряжения обратной и нулевой (при однофазном и двухфазном КЗ на землю) последовательностей особой фазы в точке КЗ равны соответственно:

- при двухфазном КЗ $\dot{U}_{\text{кА2}} = \dot{U}_{\text{кА1}}$;
- при однофазном КЗ $\dot{U}_{\text{кА2}} = -j\dot{I}_{\text{кА2}}X_{2\Sigma}$ и $\dot{U}_{\text{кА0}} = -j\dot{I}_{\text{кА0}}X_{0\Sigma}$;
- при двухфазном КЗ на землю $\dot{U}_{\text{кА2}} = \dot{U}_{\text{кА0}} = \dot{U}_{\text{кА1}}$.

Структура формулы показывает, что ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определен как ток эквивалентного трехфазного КЗ, удаленного от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $\Delta X^{(\text{n})}$. Последнее не зависит от рассматриваемого момента времени и определяется только результирующими эквивалентными сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей относительно расчетной точки КЗ. Это положение, известное как правило эквивалентности тока прямой последовательности, показывает, что для расчета тока прямой последовательности любого несимметричного КЗ могут быть использованы все методы расчета тока трехфазного КЗ. А для определения модуля результирующего тока КЗ поврежденной фазы достаточно найденный ток прямой последовательности увеличить в $m^{(\text{n})}$ раз.

Аналитические расчеты тока КЗ от синхронной машины в произвольный момент времени при несимметричном КЗ рекомендуется выполнять с использованием метода типовых кривых. При этом расчеты целесообразно вести в следующем порядке:

1) по исходной расчетной схеме составить эквивалентные схемы замещения прямой, обратной и нулевой (при однофазном и двухфазном КЗ на землю) последовательностей,

выразив все параметры в относительных единицах при предварительно выбранных базисных условиях, причем в схеме замещения прямой последовательности синхронную машину следует учесть сверхпереходной ЭДС (предварительно найденной из предшествующего режима) и сверхпереходным сопротивлением;

2) с помощью преобразований привести схемы к простейшему виду и определить $\Delta X^{(n)}$;

3) определить начальное действующее значение тока прямой последовательности

$$I_{*\,1п0(б)} = \frac{E''_{*\,0(б)}}{X_{*\,1\Sigma(б)} + \Delta X^{(n)}_{*\,(б)}};$$

4) определить значение величины $I_{*\,1п0(ном)}$ характеризующей электрическую удаленность расчетной точки КЗ от синхронной машины

$$I_{*\,1п0(ном)} = I_{*\,1п0(б)} \frac{S_б}{S_{ном}};$$

5) в соответствии с типом генератора, его системы возбуждения и найденным значением $I_{*\,1п0(ном)}$ выбрать необходимую типовую кривую и для заданного момента времени определить коэффициент γ_t;

6) определить искомое значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины в заданный момент времени

$$I_{nt} = m^{(n)} \gamma_t I_{*\,1п0(б)} I_б,$$

где $m^{(n)}$ — коэффициент, зависящий от вида КЗ.

Определение токов прямой, последовательности в месте несимметричного к.з.

1. Составляется схема замещения для токов прямой последовательности. Эта схема является обычной схемой, которую составляют для расчета токов при трехфазном к.з., т.к. последние являются токами прямой последовательности. Далее, упрощая схему относительно рассматриваемой точки несимметричного к.з., определяют ее эквивалентную ЭДС E_Σ и суммарное сопротивление

2. Составляется схема замещения для токов обратной последовательности. Схема состоит их трех элементов, как и схема прямой последовательности, т.к. токи прямой и обратной последовательностей протекают по одним и тем же путям.

Отличие: точки приложения ЭДС источников заземляются, т.к. ЭДС обратной последовательности генерирующих ветвей условно принимают равными нулю ($E_2 = 0$); генераторы замещаются со своими сопротивлениями обратной последовательности X_2. (сопротивление X*d заменяется сопротивлением X_2). В данной работе можно принять $X_2 = X''_d$.

Сопротивление трансформаторов, линии и реактора прямой и обратной последовательностей равны.

Далее упрощая схему относительно точки несимметричного к.з. определяют ее суммарное сопротивление $X_{2\Sigma}$.

Конечная схема имеет вид.

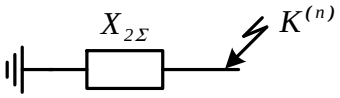


Рис. Упрощенная схема обратной последовательности

3. Составляется схема замещения для токов нулевой последовательности.

Схема существенно отличается от схемы прямой и обратной последовательности, т.к. токи нулевой последовательности протекают по путям, отличным от путей протекания токов при трехфазном к.з.

Токи нулевой последовательности, протекая от места к.з., могут иметь возврат к месту к.з. только через землю и параллельные ей цепи (троссы линий, оболочка кабелей, нулевые провода). Поэтому, приступая к составлению схемы, прежде всего необходимо установить возможные контуры протекания тока нулевой последовательности. Для образования таких контуров необходимо чтобы в цепи, электрически связанной с точкой к.з., имелись заземленные нейтрали элемента (генератора, трансформатора).

Составление схемы следует начинать от точки к.з. Вид этой схемы зависит от количества трансформаторов и схемы соединений их обмоток.

Например, рассмотрим трансформатор, имеющий соединение обмоток Y / Δ. Пусть этот трансформатор на участок сети включен, как на рис.

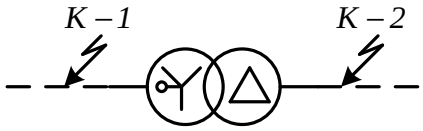


Рис. Вариант включения трансформатора в сеть

Если точка к.з. К-1 со стороны обмотки, соединенной в заземленную звезду, то образуется циркуляция тока нулевой последовательности: через точки к.з. попадает в землю, затем в нейтраль обмотки ВН трансформатора, далее по трем фазам обмотки ВН, линии и обратно к точке к.з. Кроме того, во вторичной обмотке соединенной в треугольник трансформатора наводится ЭДС нулевой последовательности и так как фазы этой обмотки соединены в треугольник, то в них возникает ток нулевой последовательности, не выходящий за пределы треугольника.

Таким образом, в случае к.з. в точке К-1 в схему нулевой последовательности войдет сам трансформатор и элементы от схемы точки к.з. до этого трансформатора , т.е. в схему должны войти все элементы, по которым пойдет ток нулевой последовательности.

Если точка к.з. К-2 со стороны обмотки, соединенной в треугольник то сам трансформатор и элементы от точки к.з. до этого трансформатора в схему не войдет, т.к. через обмотки соединенной в треугольник, ток нулевой последовательности не образуется.

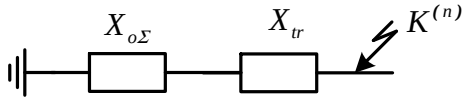


Рис. Схема замещения нулевой последовательности

Пример составления и преобразования схем замещения

Для исходной расчетной схемы, представленной на рис. *а*, составить исходные эквивалентные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей при КЗ на землю в точке *К*1 и преобразовать их в эквивалентные результирующие схемы. Расчеты провести с использованием системы относительных единиц и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформатора. Параметры исходной расчетной схемы приведены ниже.

Генераторы 1 и 2: $P_{ном}$ = 63 МВт; $U_{ном}$ = 10,5 кВ; cos $\varphi_{ном}$ = 0,8; $X''_{*d(ном)}$ = 0,136; $X_{*2(ном)}$ = 0,166; до КЗ генераторы работали в режиме холостого хода с номинальным напряжением.

Реактор 9: $U_{ном}$ = 10 кВ; $I_{ном}$ = 2500 А; X = 0,35 Ом.

Трансформаторы 3 и 4: $S_{ном}$ = 40 МВ·А; n = 121/10,5 кВ; $u_к$ = 10,5 %.

Автотрансформатор: $S_{ном}$ = 125 МВ·А; n = 230/121/10,5 кВ; $u_{кВ\text{-}С}$ = 11 %; $u_{кВ\text{-}Н}$ = 32 %; $u_{кС\text{-}Н}$ = 20%.

Линии 10 и 11: l = 50 км; $X_{1уд}$ =0,4 Ом/км; $X_{0уд}$ =1,2 Ом/км.

Система 8: $S_{ном}$ = 2000 МВ·А; $\underset{*}{X}_{1с(ном)}$ = 1,0; $\underset{*}{X}_{0с(ном)}$ = 1,1.

Исходные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей представлены соответственно на рис. *б*, *в* и *г*.

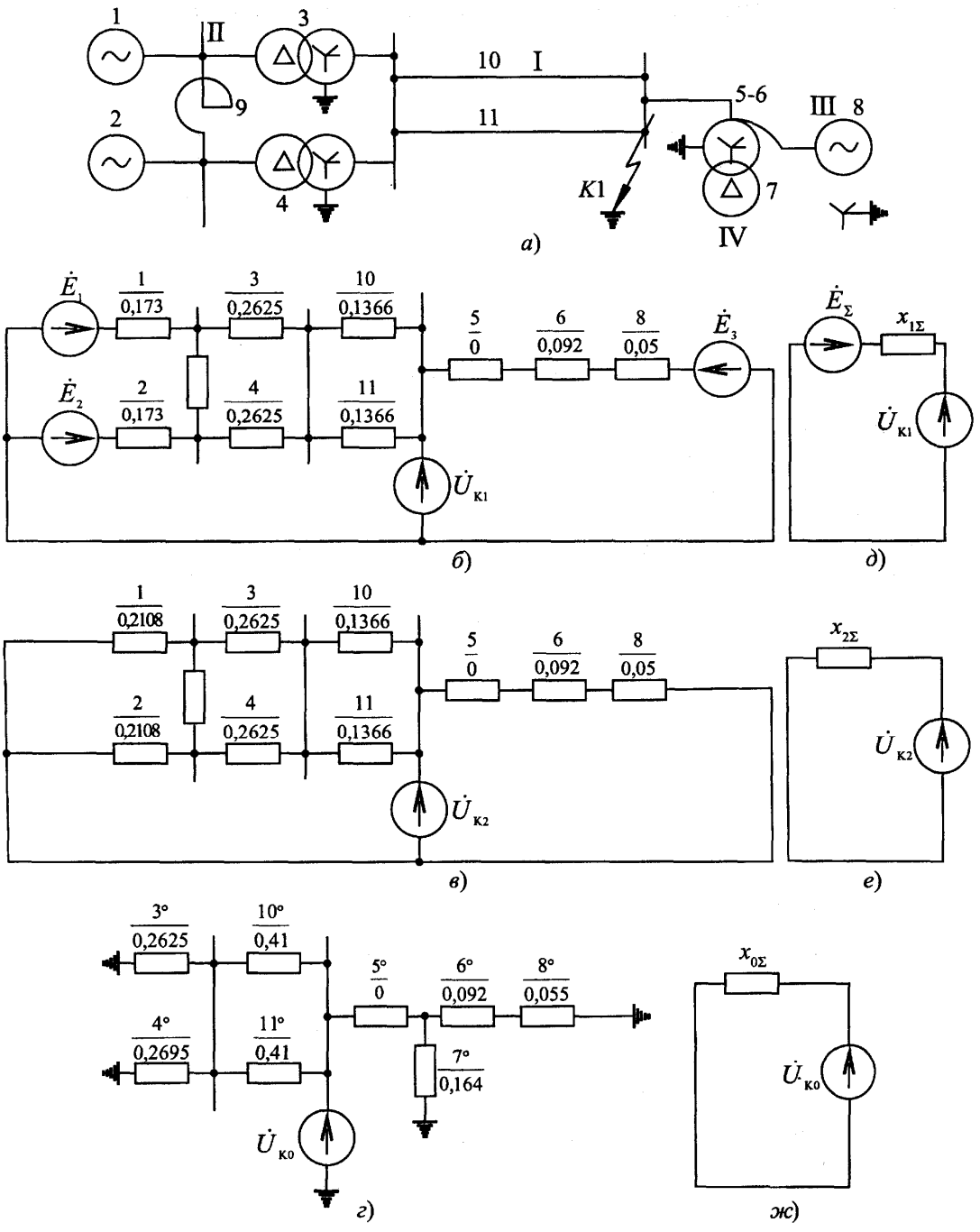


Рис. Пример составления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и определения результирующих ЭДС и сопротивлений при коротком замыкании в точке *К*1

Обмотка низшего напряжения автотрансформатора не нагружена, поэтому она не вводится в схемы замещения прямой и обратной последовательностей.

В качестве базисных единиц выбираем:

$S_б$ = 100 МВ·А и $U_{бI}$ = 121 кВ.

Тогда $U_{\text{бII}} = \frac{1}{121/10{,}5}121 = 10{,}5$ кВ; $U_{\text{бIII}} = \frac{1}{121/230}121 = 230$ кВ; и $U_{\text{бIV}} = \frac{1}{121/10{,}5}121 = 10{,}5$ кВ.

По формуле $X_{*1(\text{б})} = X_{*2(\text{б})} = 0{,}136\frac{100}{63/0{,}8}\cdot\frac{10{,}5^2}{10{,}5^2} = 0{,}173$; $X_{*3(\text{б})} = X_{*4(\text{б})} = \frac{10{,}5}{100}\cdot\frac{100}{40}\cdot\frac{10{,}5^2}{10{,}5^2} = 0{,}2625$.

Для автотрансформатора предварительно находим $X_{*\text{В(ном)}}$, $X_{*\text{С(ном)}}$, $X_{*\text{Н(ном)}}$:

$X_{*\text{В(ном)}} = 0{,}005(11 + 32 - 20) = 0{,}115$; $X_{*\text{С(ном)}} = 0{,}005(11 + 20 - 32) = 0$;

$X_{*\text{Н(ном)}} = 0{,}005(32 + 20 - 11) = 0{,}205$, поэтому $X_{*5(\text{б})} = 0$ и $X_{*6(\text{б})} = 0{,}115\frac{100}{125}\cdot\frac{230^2}{230^2} = 0{,}092$.

Для системы обычно принимают $E = U_{\text{ном}} = U_{\text{ср.ном}}$, поэтому $X_{*8(\text{б})} = 1{,}0\frac{100}{2000}\cdot\frac{230^2}{230^2} = 0{,}05$.

По формуле $X_{*9(\text{б})} = 0{,}35\frac{100}{10{,}5^2} = 0{,}317$; $X_{*10(\text{б})} = X_{*11(\text{б})} = 0{,}4\cdot 50\cdot\frac{100}{121^2} = 0{,}1366$.

ЭДС генераторов $E_{*1(\text{б})} = E_{*2(\text{б})} = \frac{E}{U_{\text{бII}}} = \frac{10{,}5}{10{,}5} = 1$;

ЭДС системы $E_{*3(\text{б})} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{U_{\text{бIII}}} = \frac{230}{230} = 1$.

Схема обратной последовательности отличается от схемы прямой последовательности только тем, что в ней отсутствуют ЭДС, а сопротивления генераторов

$X_{*1\text{б}} = X_{*2(\text{б})} = 0{,}166\frac{100}{63/0{,}8}\cdot\frac{10{,}5^2}{10{,}5^2} = 0{,}2108$.

В схему замещения нулевой последовательности генераторы и реактор не вводятся, так как они находятся за трансформаторами с соединением обмоток по схеме Y_0/Δ, но вводится обмотка низшего напряжения автотрансформатора, соединенная в треугольник.

Сопротивление этой обмотки $X_{*7(\text{б})}^{0} = 0{,}205\frac{100}{125}\cdot\frac{10{,}5^2}{10{,}5^2} = 0{,}164$.

Сопротивления нулевой последовательности системы и линий соответственно равны

$X_{*8(\text{б})}^{0} = 1{,}1\frac{100}{2000}\cdot\frac{230^2}{230^2} = 0{,}055$ и $X_{*10(\text{б})}^{0} = X_{*11(\text{б})}^{0} = 1{,}2\cdot 50\cdot\frac{100}{121^2} = 0{,}41$.

Поскольку $E_{*1(\text{б})} = E_{*2(\text{б})}$, $X_{*1(\text{б})} = X_{*2(\text{б})}$ и $X_{*3(\text{б})} = X_{*4(\text{б})}$, то при КЗ потенциалы с обеих сторон реактора одинаковы, поэтому он может быть закорочен или исключен. Это упрощает задачу преобразования схемы:

$X_{*12(\text{б})} = X_{*1(\text{б})} + X_{*3(\text{б})} + X_{*10(\text{б})} = X_{*13(\text{б})} = X_{*2(\text{б})} + X_{*4(\text{б})} + X_{*11(\text{б})} = 0{,}5721$;

$E_{*4(\text{б})} = E_{*1(\text{б})} /\!/ E_{*2(\text{б})} = \frac{E_{*1(\text{б})}X_{*13(\text{б})} + E_{*2(\text{б})}X_{*12(\text{б})}}{X_{*13(\text{б})} + X_{*12(\text{б})}} = 1$; $X_{*14(\text{б})} = X_{*12(\text{б})} /\!/ X_{*13(\text{б})} = 0{,}286$.

Сопротивление $X_{*15(\text{б})} = X_{*5(\text{б})} + X_{*6(\text{б})} + X_{*8(\text{б})} = 0{,}142$.

При этом $X_{*1\Sigma(\text{б})} = X_{*14(\text{б})} /\!/ X_{*15(\text{б})} = \frac{0{,}286\cdot 0{,}142}{0{,}286 + 0{,}142} = 0{,}095$; $E_{*\Sigma(\text{б})} = E_{*3(\text{б})} /\!/ E_{*4(\text{б})} = 1$.

Аналогичные преобразования схемы обратной последовательности дают $X_{*2\Sigma(\text{б})} = 0{,}097$. Элементарные преобразования схемы нулевой последовательности дают

$X_{*0\Sigma(\text{б})} = 0{,}063$.

Эквивалентные результирующие схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, полученные в результате преобразований рассмотренных исходных схем замещения, представлены соответственно на рис. *д*, *е* и *ж*.

Пример расчета трехфазного и несимметричного короткого замыкания.

Таблица 1 – Характеристики ЛЭП

Длина линий, км				*Удельные параметры, Ом/км*	
Л1	*Л2*	*Л3*	*Л4*	$X_{уд}$	$R_{уд}$
160	*200*	*260*	*30*	*0,36*	*0,07*

Таблица 2 – Состояние нейтрали трансформаторов

Р1	*Р2*	*Р3*	*Р4*	*Р5*
-	-	-	*x*	*x*

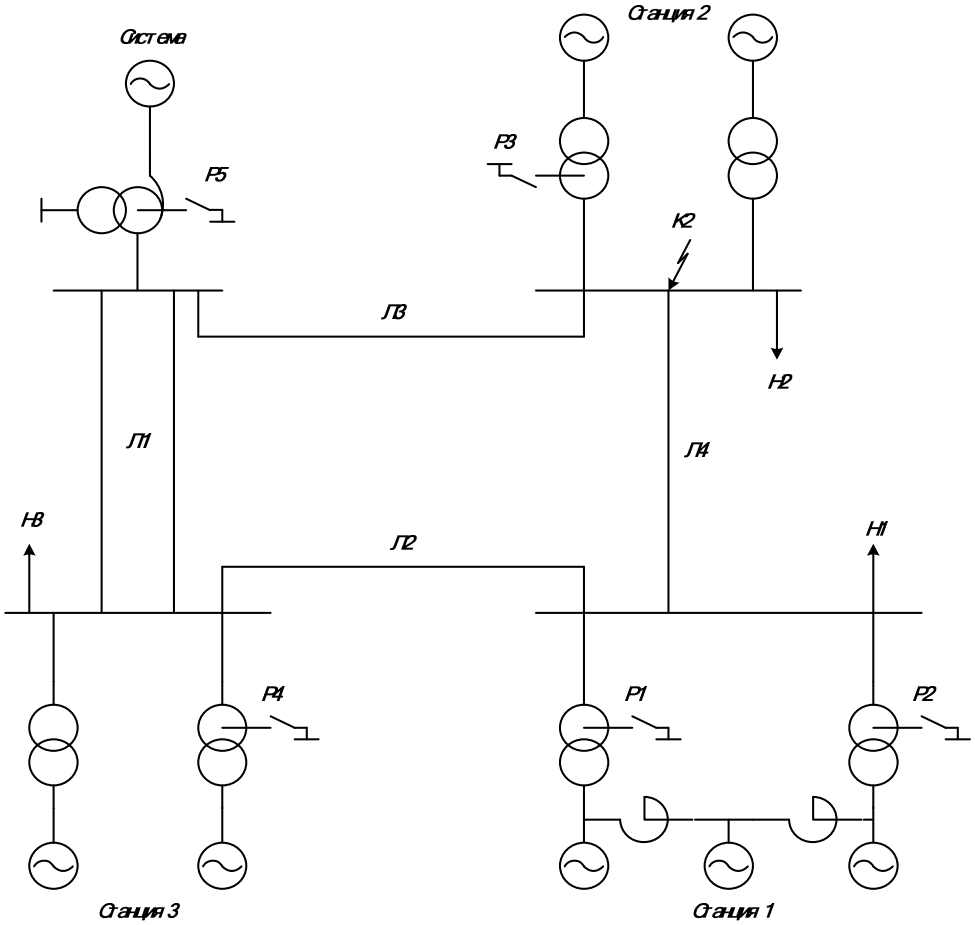
Таблица 3 – Технические данные элементов электрической сети

Станция 1												
Турбогенераторы						*Трансформаторы*				*Реакторы*		
$P_н$, *Мвт*	$Cos\varphi_н$	*xd*	$X''d$	X_2	$x''d/R$	$S_н$, *МВА*	$U_{вн}$, *кВ*	$U_к$, *%*	*X/R*	$U_{ном}$, *кВ*	$X_р$, *Ом*	$X_р/R$
100	*0,85*	*2,4*	*0,183*	*0,223*	*100*	*125*	*242*	*11*	*30*	*10*	*0,45*	*80*

Станция 2									
Турбогенераторы							*Трансформаторы*			
n	$P_н$, *МВт*	$Cos\varphi$	*xd*	$x''d$	x_2	$x''d/R$	$S_н$, *МВА*	$U_{вн}$, *кВ*	$U_к$, *%*	*X/R*
3	*500*	*0,8*	*2,2*	*0,28*	*0,25*	*150*	*630*	*242*	*10,5*	*50*

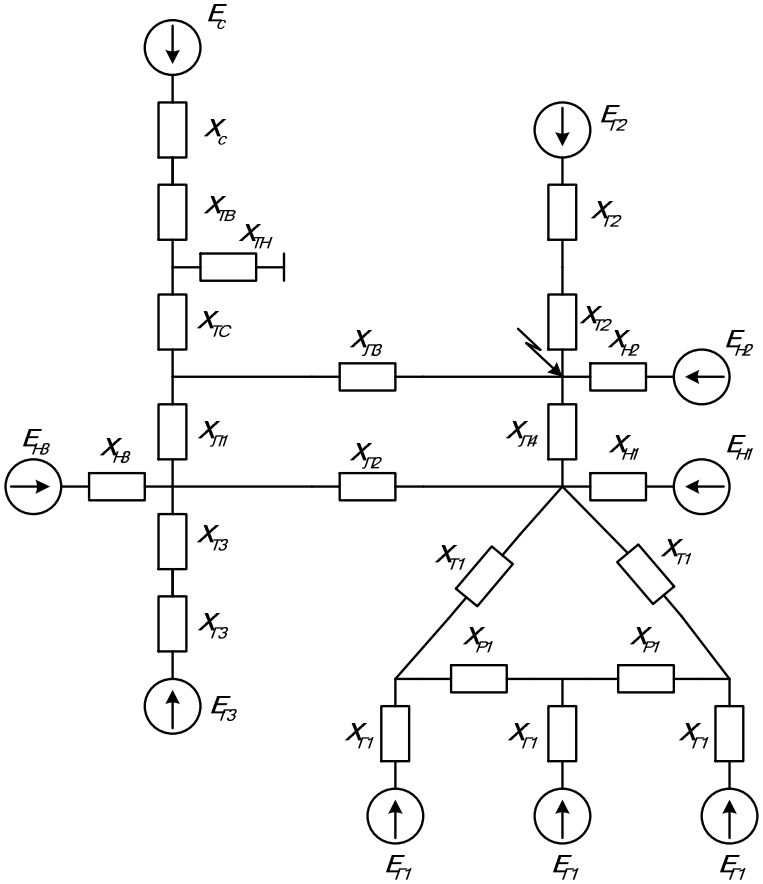
Станция 3									
Турбогенераторы							*Трансформаторы*			
n	$P_н$, *МВт*	$Cos\varphi$	*xd*	$x''d$	x_2	$x''d/R$	$S_н$, *МВА*	$U_{вн}$, *кВ*	$U_к$, *%*	*X/R*
8	*171*	*0,85*	*1.12*	*0,27*	*0,28*	*50*	*200*	*242*	*11*	*30*

Станция 3										
Автотрансформатор							*Система*	*Н1*	*Н2*	*Н3*
S МВА	$U_{вн}$, *кВ*	$U_{сн}$, *кВ*	$U_{кв-н}$	$U_{кс-н}$	$U_{кв-с}$	*X/R*	$S_с$ *МВА*	*S МВА*	*S МВА*	*S МВА*
500	*500*	*230*	*35*	*22*	*11*	*50*	*4500*	*1000*	*200*	*880*



Определение параметров элементов, составление и преобразование схем замещения.

Составляем схему замещения.



Параметры элементов для отдельных последовательностей

Расчёт выполняем в о.е. Базисную мощность принимаем в связи с указанным рядом: 100; 1000; 10000. Принимаем базисную мощность равную $S_б$ = 1000 МВА. Определение параметров схемы замещения.

Генераторы: $E = \sqrt{X_d \cdot Cos\varphi_н)^2 + (X_d \cdot Sin\varphi_н \pm 1)^2}$

$E_{*Г1} = \sqrt{(2.4 \cdot 0.85)^2 + (2.4 \cdot 0.527 + 1)^2} = 2.057$; $E''_{*Г1} = \sqrt{(0.183 \cdot 0.85)^2 + (0.183 \cdot 0.527 + 1)^2} = 0.917$;

$E''_{*Г2} = \sqrt{(0.28 \cdot 0.85)^2 + (0.28 \cdot 0.527 + 1)^2} = 0.862$; $E_{*Г2} = \sqrt{(2.2 \cdot 0.85)^2 + (2.2 \cdot 0.527 + 1)^2} = 1.789$;

$E''_{*Г3} = \sqrt{(0.27 \cdot 0.8)^2 + (0.27 \cdot 0.6 + 1)^2} = 1.165$; $E_{*Г3} = \sqrt{(1.12 \cdot 0.8)^2 + (1.12 \cdot 0.6 + 1)^2} = 1.853$;

$X_{*Г1} = X_{d_1} \cdot \frac{S_б \cdot Cos\varphi_1}{P_{Н1}} = 2.4 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{100} = 20.4$; $X''_{*Г1} = X''_{d_1} \cdot \frac{S_б \cdot Cos\varphi_1}{P_{Н1}} = 0.183 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{100} = 0.183$;

$X_{*2Г1} = X_2 \cdot \frac{S_б \cdot Cos\varphi_1}{P_{Н1}} = 0.223 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{100} = 1.896$; $X_{*Г2} = 2.2 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{500 \cdot 3} = 1.247$;

$X''_{*Г2} = 0.28 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{500 \cdot 3} = 0.159$; $X_{*2Г2} = 0.25 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{500 \cdot 3} = 0.142$;

$X_{*Г3} = 1.12 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{171 \cdot 8} = 0.696$; $X''_{*Г3} = 0.27 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{171 \cdot 8} = 0.168$;

$X_{*2Г3} = 0.28 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{171 \cdot 8} = 0.174$.

Система: $X_{*C} = \frac{S_б}{S_C} = \frac{1000}{4500} = 0.222$.

Для системы конечной мощности рекомендуется принимать: $X_{1C} = X_{2C}$; $E_{C*} = 1$.

Нагрузки:

Нагрузки в схему замещения для сверхпереходного режима входят как источники с параметрами $E''_{H*} = 0.85$, $X''_{H*} = 0.35$, а в установившемся режиме к.з. – $E_{H*\infty} = 0$, $X_{H*\infty} = 1{,}2$. Для обратной последовательности $X_{2H*\infty} = 0{,}35$, для нулевой – $X_{0H*\infty} = 0{,}15$.

Приводим к базисным условиям:

$$X_{*H1} = X''_{*H1} = 1.2 \cdot \frac{S_б}{S_{H1}} = 1.2 \cdot \frac{1000}{1000} = 1.2; \quad X_{*2H1} = X''_{*2H1} = 0.35 \cdot \frac{S_б}{S_{H1}} = 0.35 \cdot \frac{1000}{1000} = 0.35;$$

$$X_{*0H1} = X''_{*H1} = 0.15 \cdot \frac{S_б}{S_{H1}} = 0.15 \cdot \frac{1000}{1000} = 0.15; \; X_{*H2} = X''_{*H2} = 1.2 \cdot \frac{S_б}{S_{H2}} = 1.2 \cdot \frac{1000}{200} = 6;$$

$$X_{*2H2} = X''_{*H2} = 0.35 \cdot \frac{S_б}{S_{H2}} = 0.35 \cdot \frac{1000}{200} = 1.75; \; X_{*0H2} = 0.15 \cdot \frac{S_б}{S_{H2}} = 0.15 \cdot \frac{1000}{200} = 0.75;$$

$$X_{*H3} = X''_{*H3} = 1.2 \cdot \frac{S_б}{S_{H3}} = 1.2 \cdot \frac{1000}{880} = 1.364; \; X_{*2H3} = X''_{*H3} = 0.35 \cdot \frac{S_б}{S_{H3}} = 0.35 \cdot \frac{1000}{880} = 0.398;$$

$$X_{*0H3} = 0.15 \cdot \frac{S_б}{S_{H3}} = 0.15 \cdot \frac{1000}{200} = 0.75.$$

Воздушные линии:

$$X_{*Л1} = X_{*2Л1} = \frac{X_{уд}}{2} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = \frac{0.36}{2} \cdot 160 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0.544; \; X_{*Л2} = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0.36 \cdot 200 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1.361;$$

$$X_{*Л3} = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0.36 \cdot 260 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1.769; \; X_{*Л4} = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0.36 \cdot 30 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0.204.$$

Для одноцепной линии $X_{0Л} = 3X_{Л}$

Для двухцепной линии $X_{0Л} = 4{,}7X_{Л}$

$$X_{*0Л1} = 4.7 \cdot 0.544 = 2.557; \; X_{*0Л2} = 3 \cdot 1.361 = 4.083; \; X_{*0Л3} = 3 \cdot 1.769 = 5.307;$$

$$X_{*0Л4} = 3 \cdot 0.204 = 0.612.$$

Реакторы:

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей реакторов равно:

$$X_{*P} = X_P \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0.45 \cdot \frac{1000}{10.5^2} = 4.082$$

Автотрансформатор:

$$U_{кВ} = 0{,}5 \cdot (U_{кВ-С} + U_{кВ-Н} + U_{кС-Н}) = 0{,}5 \cdot (11 + 35 - 22) = 12 \ \%;$$

$$U_{кС} = 0{,}5 \cdot (U_{кВ-С} + U_{кС-Н} + U_{кВ-Н}) = 0{,}5 \cdot (11 + 22 - 35) = -1 \ \%;$$

$$U_{кВ} = 0{,}5 \cdot (U_{кВ-Н} + U_{кС-Н} - U_{кВ-С}) = 0{,}5 \cdot (35 + 22 - 11) = 23 \ \%.$$

$$X_{ТВ} = \frac{U_{кВ}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_Н} = \frac{12 \cdot 1000}{100 \cdot 500} = 0.24; \; X_{ТС} = \frac{U_{кС}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_Н} = \frac{-1 \cdot 1000}{100 \cdot 500} = -0.02;$$

$$X_{ТН} = \frac{U_{кН}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_Н} = \frac{23 \cdot 1000}{100 \cdot 500} = 0.46.$$

Трансформаторы: $X_{*Т} = X''_{*Т} = \frac{U_к\%}{100} \frac{S_б}{S_Н \cdot n}$.

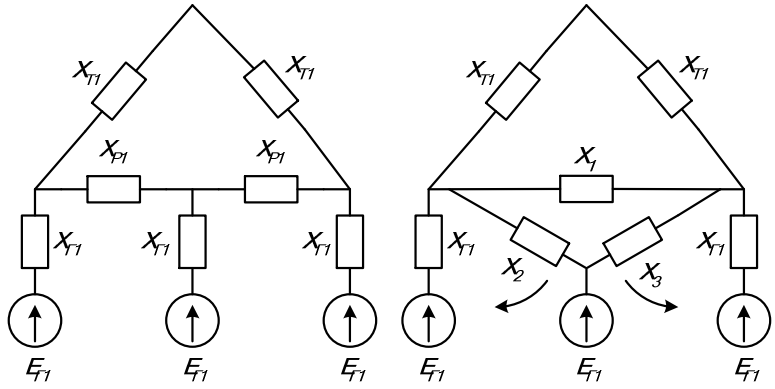
$$X_{*T1} = X_{*2T1} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{125} = 0.88;\ X_{*T2} = X_{*2T2} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{1000}{630 \cdot 3} = 0.056;$$

$$X_{*T3} = X_{*2T3} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{200 \cdot 8} = 0.069;\ X_{*0T1} = 0.85 \cdot 0.88 = 0.75;\ X_{*0T2} = 0.85 \cdot 0.056 = 0.048;$$

$$X_{*0T3} = 0.85 \cdot 0.069 = 0.059.$$

Преобразование схемы прямой последовательности

Преобразуем отдельно X_{T1}, X_P, $X_{\Gamma 1}$

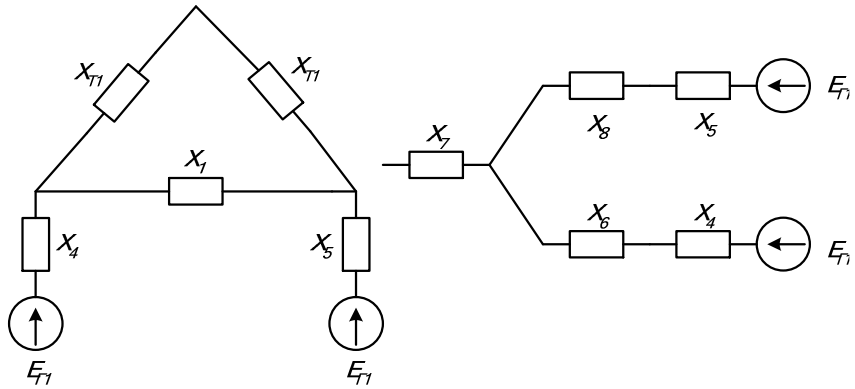


$$X_1 = 2X_P + \frac{X_P^2}{X_{\Gamma 1}} = 2 \cdot 4.082 + \frac{4.082^2}{20.4} = 8.98,$$

$$X_2 = X_3 = X_P + X_\Gamma + \frac{X_P \cdot X_\Gamma}{X_P} = 4.082 + 2 \cdot 20.4 = 44.882,$$

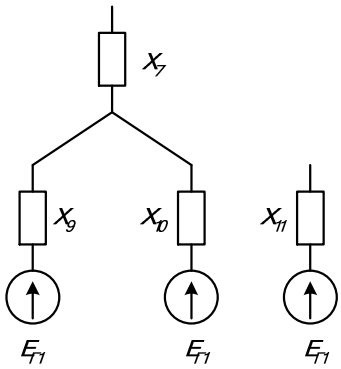
$$X_1^{"} = 2X_P + \frac{X_P^2}{X_{\Gamma 1}^{"}} = 2 \cdot 4.082 + \frac{4.082^2}{0.183} = 18.873,$$

$$X_2^{"} = X_3^{"} = X_P + 2X_{\Gamma 1}^{"} = 4.082 + 2 \cdot 0.183 = 7.193.$$



$$X_4 = \frac{X_2 \cdot X_{\Gamma 1}}{X_2 + X_{\Gamma 1}} = 14.025,\ X_4^{"} = \frac{X_2^{"} \cdot X_{\Gamma 1}^{"}}{X_2^{"} + X_{\Gamma 1}^{"}} = 1.279,\ X_7 = \frac{X_{T1}^2}{2X_{T1} + X_P} = 0.072,$$

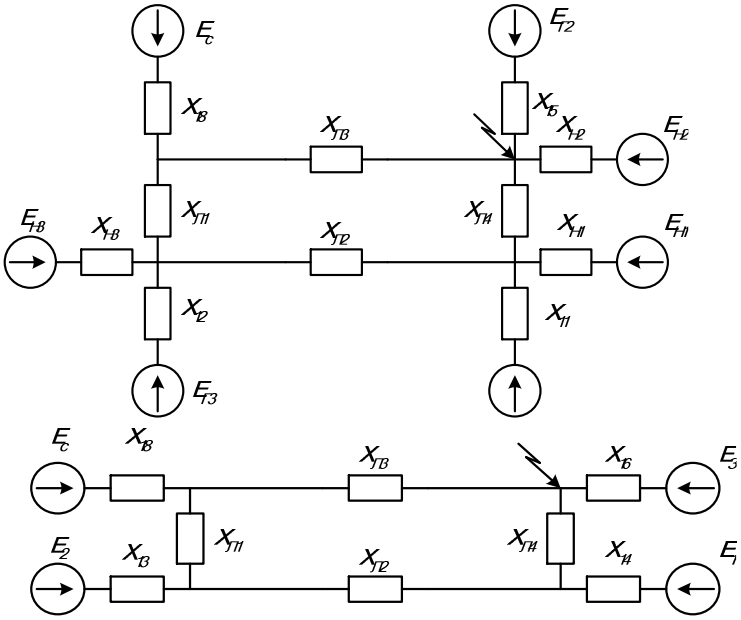
$$X_7^{"} = \frac{X_{T1}^2}{2X_{T1} + X_P^{"}} = 0.038,\ X_6 = X_8 = \frac{X_{T1} \cdot X_1}{2X_{T1} + X_1} = 0.736,\ X_6^{"} = X_8^{"} = \frac{X_{T1}^{"} \cdot X_1^{"}}{2X_{T1} + X_1^{"}} = 0.805.$$



$$X_9 = X_6 + X_4 = 14.761,\ X_9^{"} = X_4^{"} + X_6^{"} = 2.084,\ X_{11} = \frac{X_{10}^2}{2X_{10}} + X_7 = 7.453,\ X_{11}^{"} = \frac{X_{10}^{"\,2}}{2X_{10}^{"}} + X_7^{"} = 1.079$$

$$X_{12} = X_{T3} + X_{3\Gamma} = 0.765,\ X_{12}^{"} = X_{T3}^{"} + X_{3\Gamma}^{"} = 0.237,\ X_{15} = \frac{X_{\Gamma 2} + X_{T2}}{2} = 1.032,$$

$$X_{15}^{"} = \frac{X_{\Gamma 2}^{"} + X_{T2}}{2} = 0.214,\ X_{17} = X_C + X_{BT} = 0.462,\ X_{18} = X_{17} + X_{TC} = 0.442.$$

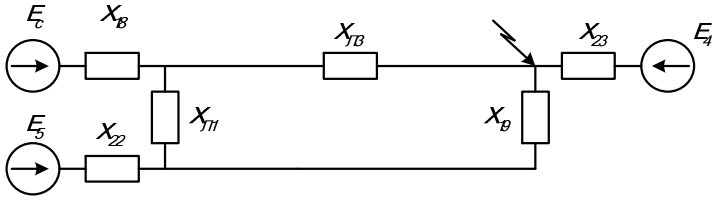


$$E_1 = \frac{E_{\Gamma 1} \cdot X_{H1} + E_{H1} \cdot X_{11}}{X_{11} + X_{H1}} = 0.06,\ E_1^{"} = \frac{E_{\Gamma 1}^{"} \cdot X_{H1}^{"} + E_{H1}^{"} \cdot X_{11}^{"}}{X_{11}^{"} + X_{H1}^{"}} = 0.913,\ X_{14} = \frac{X_{11} \cdot X_{H1}}{X_{11} + X_{H1}} = 0.147,$$

$$X_{14}^{"} = \frac{X_{11}^{"} \cdot X_{H1}^{"}}{X_{11} + X_{H1}^{"}} = 0.269,\ E_3 = \frac{E_{\Gamma 2} \cdot X_{H2} + E_{H2} \cdot X_{15}}{X_{15} + X_{H2}} = 0.301,\ E_3^{"} = \frac{E_{\Gamma 2}^{"} \cdot X_{H2}^{"} + E_{H2}^{"} \cdot X_{15}^{"}}{X_{15}^{"} + X_{H2}^{"}} = 1.06,$$

$$X_{16} = \frac{X_{15} \cdot X_{H2}}{X_{15} + X_{H2}} = 0.135,\ X_{16}^{"} = \frac{X_{15}^{"} \cdot X_{H2}^{"}}{X_{15} + X_{H2}^{"}} = 0.133,\ E_2 = \frac{E_{\Gamma 3} \cdot X_{H3} + E_{H3} \cdot X_{12}}{X_{12} + X_{H3}} = 0.304,$$

$$E_2^{"} = \frac{E_{\Gamma 3}^{"} \cdot X_{H3}^{"} + E_{H3}^{"} \cdot X_{12}^{"}}{X_{12}^{"} + X_{H3}^{"}} = 1.038,\ X_{13}^{"} = \frac{X_{12}^{"} \cdot X_{H3}^{"}}{X_{12} + X_{H3}^{"}} = 0.141,$$



$$X_{19} = X_{Л1} + X_{Л4} + \frac{X_{Л1} \cdot X_{Л4}}{X_{14}} = 3.455,\ X_{19}^{"} = X_{Л1} + X_{Л4} + \frac{X_{Л1} \cdot X_{Л4}}{X_{14}} = 2.617,$$

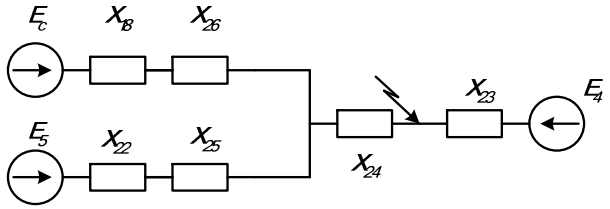
$$X_{20} = X_{Л4} + X_{14} + \frac{X_{Л4} \cdot X_{14}}{X_{Л2}} = 0.373,\ X_{20}^{"} = X_{Л4} + X_{14} + \frac{X_{Л4} \cdot X_{14}}{X_{Л2}} = 0.508,$$

$$X_{21} = X_{Л2} + X_{14} + \frac{X_{Л2} \cdot X_{14}}{X_{Л4}} = 2.488,\ X_{21}^{"} = X_{Л2} + X_{14} + \frac{X_{Л2} \cdot X_{14}}{X_{Л4}} = 3.387,$$

$$E_5 = \frac{E_1 \cdot X_{13} + E_2 \cdot X_{21}}{X_{13} + X_{21}} = 0.292,\ E_5^{"} = \frac{E_1^{"} \cdot X_{13} + E_2^{"} \cdot X_{21}^{"}}{X_{21} + X_{13}^{"}} = 1.033$$

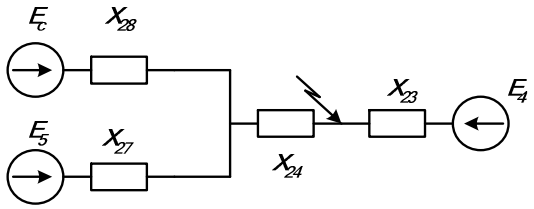
$$X_{22} = \frac{X_{21} \cdot X_{13}}{X_{21} + X_{13}} = 0.119,\ X_{22}^{"} = \frac{X_{21} \cdot X_{13}^{"}}{X_{21} + X_{13}^{"}} = 0.135,\ E_4 = \frac{E_1 \cdot X_{16} + E_3 \cdot X_{20}}{X_{16} + X_{20}} = 0.288,$$

$$E_4^{"} = \frac{E_1 \cdot X_{16} + E_3 \cdot X_{21}}{X_{16} + X_{21}} = 1.055,\ X_{23} = \frac{X_{16} \cdot X_{20}}{X_{16} + X_{20}} = 0.128,\ X_{23}^{"} = \frac{X_{16}^{"} \cdot X_{20}^{"}}{X_{16}^{"} + X_{20}^{"}} = 0.128.$$



$$X_{24} = \frac{X_{Л3} \cdot X_{19}}{X_{Л3} + X_{19} + X_{Л1}} = 1.06,\ X_{24}^{"} = \frac{X_{Л3} \cdot X_{19}^{"}}{\sum X^{"}} = 0.939,\ X_{25} = \frac{X_{Л1} \cdot X_{19}}{\sum X} = 0.326,$$

$$X_{25}^{"} = \frac{X_{Л1} \cdot X_{19}}{\sum X^{"}} = 0.289,\ X_{26} = \frac{X_{Л1} \cdot X_{Л3}}{\sum X} = 0.167,\ X_{26}^{"} = \frac{X_{Л1} \cdot X_{Л3}^{"}}{\sum X^{"}} = 0.195.$$

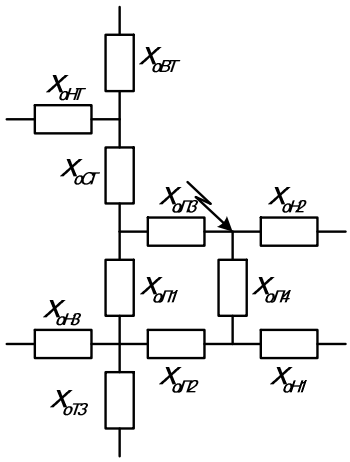


$$X_{27} = X_{22} + X_{25} = 0.445,\ X_{27}^{"} = X_{22}^{"} + X_{25}^{"} = 0.424,\ X_{28} = X_{18} + X_{26} = 0.629,$$

$$X_{28}^{"} = X_{18}^{"} + X_{26}^{"} = 0.658,\ X_{29} = \frac{X_{27} \cdot X_{28}}{X_{27} + X_{28}} + X_{24} = 0.261,\ X_{29}^{"} = \frac{X_{27}^{"} \cdot X_{28}^{"}}{X_{28}^{"} + X_{27}^{"}} + X_{24}^{"} = 1.197.$$

Преобразование схемы замещения обратной последовательности производится аналогично схеме прямой последовательности, без учета ЭДС. Получаем: $X_{30} = 0.146$.

Составление схемы замещения нулевой последовательности производится от точки короткого замыкания с учетом заземления обмоток нейтралей трансформаторов и автотрансформаторов.



$$X_1 = \frac{X_{о3Н} X_{оТ3}}{X_{о3Н} + X_{оТ3}} = 0.055,\ X_2 = X_{оЛ4} + X_{оЛ2} + \frac{X_{оЛ4} X_{оЛ2}}{X_{оН1}} = 21.354,$$

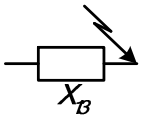
$$X_3 = X_{оН1} + X_{оЛ2} + \frac{X_{оН1} X_{оЛ2}}{X_{оЛ4}} = 5.234,\ X_4 = X_{оЛ4} + X_{оН1} + \frac{X_{оЛ4} X_{оН1}}{X_{оЛ2}} = 5.234,$$

$$X_5 = \frac{X_1 X_3}{X_1 + X_3} = 0.054,\ X_6 = \frac{X_4 X_{о2Н}}{X_4 + X_{о2Н}} = 0.383,\ X_7 = \frac{X_{оЛ3} X_{оЛ1}}{X_{оЛ1} + X_2 + X_{оЛ3}} = 0.464,$$

$$X_8 = \frac{X_{оЛ1} X_2}{X_{оЛ1} + X_2 + X_{оЛ3}} = 1.869,\ X_9 = \frac{X_{оЛ3} X_2}{X_{оЛ1} + X_2 + X_{оЛ3}} = 3.879,\quad X_{10} = X_8 + X_5 = 1.923,$$

$$X_{11} = X_{ТВ} + X_7 = 0.668,\ X_{12} = \frac{X_{11} \cdot X_{10}}{X_{11} + X_{10}} + X_9 = 4.375,\ X_{13} = \frac{X_{12} X_6}{X_{12} + X_6} = 0.349.$$

Аналогично преобразуем схему к виду:



Суммарное индуктивное сопротивление нулевой последовательности равно:

$$X_{13} = 0.349.$$

Сворачивание схемы активных сопротивлений сверхпереходного режима ведётся как в прямой и обратной последовательностях, без учёта нагрузок, *E* и системы.

Суммарное активное сопротивление равно: $R_{26} = 0.002$.

Расчёт периодической составляющей тока трёхфазного к.з.

Для установившегося значения тока: $I = \frac{E}{X} \cdot I_Б = 7.017$ кА.

Для сверхпереходного тока: $I'' = \frac{E''}{X''} \cdot I_Б = 22.833$ кА.

Ударный ток в месте к.з. $i_y = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I'' = 64.575$ кА.

$$T_{*Э} = \frac{X_{рез}}{R_{25}} = 50.773;\ t_б = \frac{1}{wc} = \frac{1}{314} = 3.18 \cdot 10^{-3};\ T_Э = T_{*Э} \cdot t_б = 0.161;\ K_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_Э}} = 2.$$

Мощность к.з. в месте повреждения $S_K = \sqrt{3} \cdot U_{НК} \cdot I'' = 9096$ МВА.

Действующее значение полного тока к.з. за первый период его изменения

$I_y = I'' \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 39.543$ кА.

Расчёт несимметричного короткого замыкания

Для однофазного к.з. $\Delta X^{(1)} = X_{30} + X_{13} = 0.501$.

Начальное значение тока прямой последовательности:

$$I_{n1}^{''(1)} = \frac{E_{\Sigma}^{''} \cdot I_{б}}{X_{1\Sigma}^{''} + \Delta X^{(1)}} = 3.714 \quad \text{кА}.$$

Для однофазного к.з. $m^{(1)} = 3$.

Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$I_{n1}^{(1)} = I_{n2}^{(1)} = I_{n0}^{(1)} = I_{m} \cdot I_{б} = 3.714$ кА

Напряжения отдельных последовательностей в месте к.з. определяем в соответствии с уравнениями II закона Кирхгофа:

$$\left.\begin{aligned} U_{K1}^{(1)} &= j\Delta X^{(1)} \cdot I_{n1}^{(1)} \\ U_{K2}^{(1)} &= 0 - jX_{2\Sigma} \cdot I_{n2}^{(1)} \\ U_{K0}^{(1)} &= 0 - jX_{0\Sigma} \cdot I_{n0}^{(1)} \end{aligned}\right\}$$

Расчёт ведём в именованных единицах $\Delta X^{(1)} = \Delta X \cdot \frac{U_{НК}^{2}}{S_{б}} = 26.503$ Ом ;

$X_{2\Sigma} = X_{30} \cdot \frac{U_{нк}^{2}}{S_{б}} = 7.829$ Ом; $X_{0\Sigma} = X_{13} \cdot \frac{U_{нк}^{2}}{S_{б}} = 18.674$ Ом ;

$U_{K1}^{(1)} = j3.714 \cdot 26.503 = j98.425$, кВ; $U_{K2}^{(1)} = -j3.714 \cdot 7.829 = -j29.076$, кВ;

$U_{K0}^{(1)} = -j3.714 \cdot 18.674 = -j69.349$, кВ.

Определение фазных величин и построение векторных диаграмм .

Для напряжений:

$$\left.\begin{aligned} U_{KB}^{(1)} &= a^{2} \cdot U_{K1}^{(1)} + a \cdot U_{K2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} \\ U_{KC}^{(1)} &= a \cdot U_{K1}^{(1)} + a^{2} \cdot U_{K2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} \end{aligned}\right\}$$

$a = e^{j120} = Cos120 + jSin120 = -0.5 + j0.87$; $a^{2} = e^{j240} = Cos240 + jSin240 = -0.5 - j0.87$;

$a^{2} \cdot U_{K1}^{(1)} = 85.63 - j49.212$, кВ; $a \cdot U_{K2}^{(1)} = 25.296 + j14.538$, кВ;

$U_{KB}^{(1)} = 110.926 - j104.023$, кВ;

$a \cdot U_{K1}^{(1)} = -85.63 - j49.212$, кВ; $a^{2} \cdot U_{K2}^{(1)} = -25.296 + j14.538$, кВ;

$U_{KC}^{(1)} = -110.926 - j104.023$, кВ; $U_{KA}^{(1)} = U_{k1}^{(1)} + U_{k2}^{(1)} + U_{k0}^{(1)} = 0$, кВ.

Для токов:

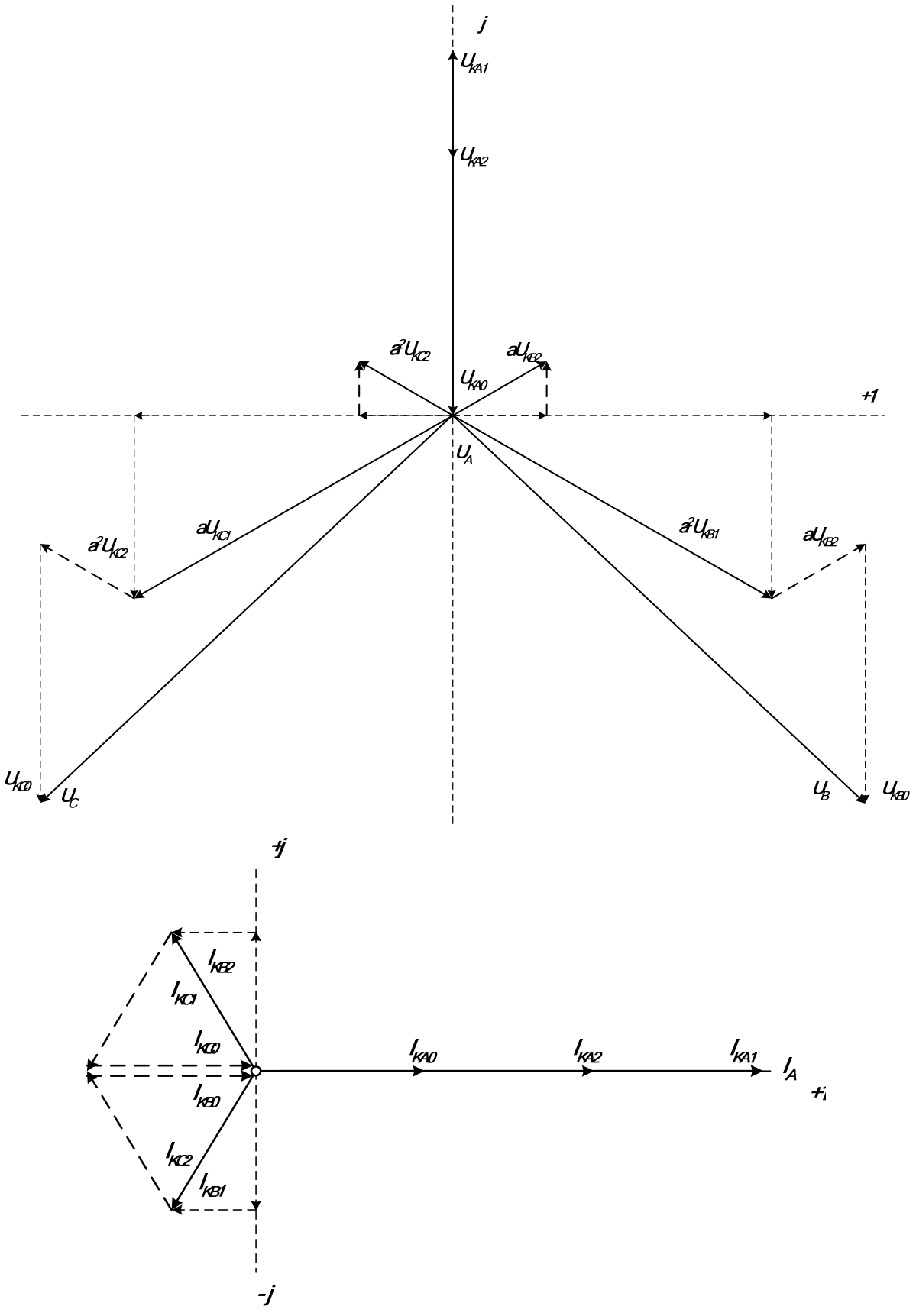
$I_{A}^{(1)} = I_{K1}^{(1)} + I_{K2}^{(1)} + I_{K0}^{(1)} = 3I_{KA1}^{(1)} a$, кА;

$$\left.\begin{aligned} I_{KB}^{(1)} &= a^{2} \cdot I_{K1}^{(1)} + a \cdot I_{K2}^{(1)} + I_{K0}^{(1)} \\ I_{KC}^{(1)} &= a \cdot I_{K1}^{(1)} + a^{2} \cdot I_{K2}^{(1)} + I_{K0}^{(1)} \end{aligned}\right\};$$

$a^{2} \cdot I_{K1}^{(1)} = -1.857 - j3.231$, кА; $a \cdot I_{K2}^{(1)} = -1.857 + j3.231$, кА; $I_{KB}^{(1)} = 0$, кА;

$a \cdot I_{K1}^{(1)} = -1.857 + j3.231$, кА; $a^{2} \cdot I_{K2}^{(1)} = -1.857 - j3.231$, кА; $I_{KC}^{(1)} = 0$, кА.

Построение векторных диаграмм токов и напряжений в точке короткого замыкания.



Для двухфазного короткого замыкания: $\Delta X^{(2)} = X_{30} = 0.148$.

Начальное значение тока прямой последовательности: $I_{n1}^{''(2)} = \dfrac{E_{\Sigma}^{''} \cdot I_{б}}{X_{1\Sigma}^{''} + \Delta X^{(1)}} = 8.71$,

кА.

Для двухфазного к.з. $m = \sqrt{3}$.

Ток обратной последовательности: $I_{kA2}^{(2)} = -I_{kA1}^{(2)} = -8.71$ кА.

Напряжения отдельных последовательностей в месте к.з. определяем в соответствии с уравнениями II закона Кирхгофа:

$$\left.\begin{aligned} U_{K1}^{(2)} &= j\Delta X^{(1)} \cdot I_{n1}^{(2)} \\ U_{K2}^{(2)} &= 0 - jX_{2\Sigma} \cdot I_{n2}^{(2)} \\ U_{K0}^{(2)} &= 0 - jX_{0\Sigma} \cdot I_{n0}^{(2)} \end{aligned}\right\}$$

$U_{K1}^{(2)} = j68.191$, кВ; $U_{K2}^{(2)} = j68.191$, кВ.

Определение фазных величин и построение векторных диаграмм

Для токов:

Ток в фазе А: $I_A = I_{kA1} + I_{kA2} = 0$, кА. Ток в фазе В: $I_B = a^2 I_{kA1} + a\ I_{kA2} = -j15.156$, кА.

Ток в фазе С: $I_C = a\ I_{kA1} + a^2 I_{kA2} = j15.156$, кА.

$a^2 I_{kA1} = -4.355 - j7.578, кА$; $a\ I_{kA2} = 4.355 - j7.578, кА$;

$a\ I_{kA1} = -4.355 + j7.578, кА$; $a^2 I_{kA2} = 4.355 + j7.578, кА$.

Для напряжений:

Напряжение в фазе А: $U_A^{(2)} = U_{K1}^{(2)} + U_{K2}^{(2)} = j136.382\ кВ$.

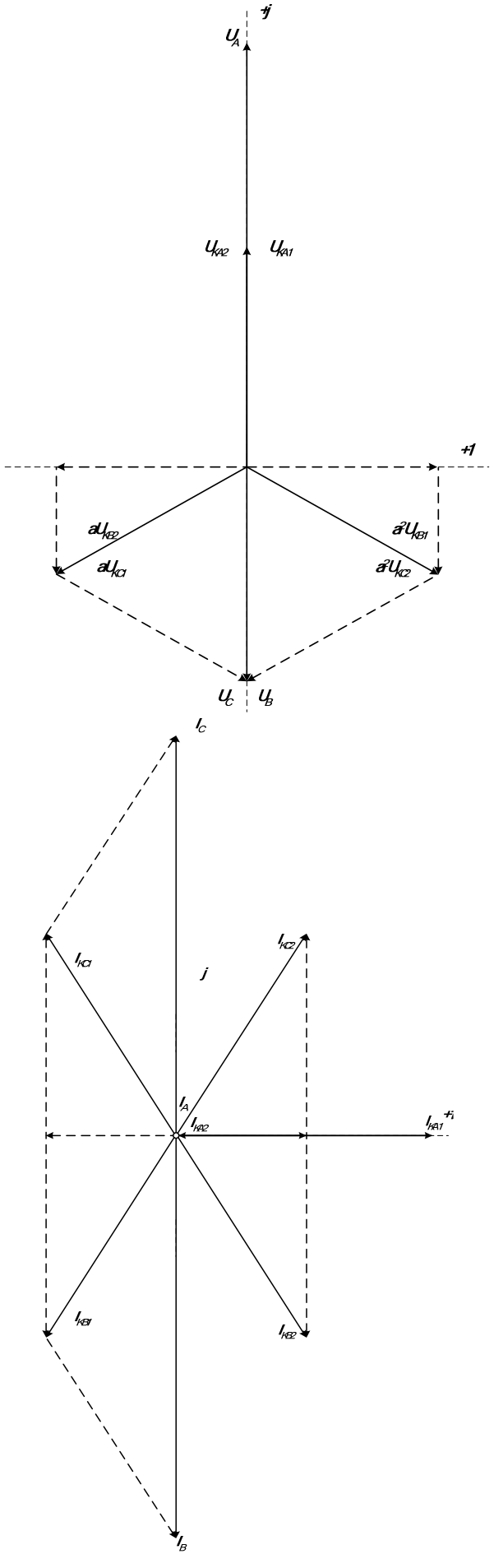
Напряжение в фазе В: $U_B^{(2)} = a^2 \cdot U_{K1}^{(2)} + a\ \cdot U_{K2}^{(2)} = -j68.191\ кВ$.

Напряжение в фазе С: $U_C^{(2)} = a\ \cdot U_{K1}^{(2)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(2)} = -j68.191\ кВ$.

$a^2 \cdot U_{K1}^{(2)} = 59.326 - j34.096\ кВ$; $a\ \cdot U_{K2}^{(2)} = -59.326 - j34.096\ кВ$;

$a\ \cdot U_{K1}^{(2)} = -59.326 - j34.096\ кВ$; $a^2 \cdot U_{K2}^{(2)} = 59.326 - j34.096\ кВ$.

Построение векторных диаграмм токов и напряжений в точке короткого замыкания.



Для двухфазного короткого замыкания на землю:

$$\Delta X^{(1.1)} = \frac{X_{30} \cdot X_{13}}{X_{30} + X_{13}} = \frac{18.674 \cdot 7.829}{7.829 + 18.674} = 5{,}502 \text{ Ом}.$$

Начальное значение тока прямой последовательности:

$$I_{n1}^{''(1.1)} = \frac{E_{\Sigma}^{''} \cdot I_{б}}{X_{1\Sigma}^{''} + \Delta X^{(1)}} = 10{,}447 \text{ кА}.$$

Для двухфазного к.з на землю. $m = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{30} \cdot X_{13}}{X_{30} + X_{13}}}$.

Токи обратной и нулевой последовательностей:

$$I_{kA2}^{(1.1)} = -I_{kA1}^{(1.1)} \cdot \frac{X_{13}}{X_{13} + X_{30}} = -7{,}361 \text{ кА}; \qquad I_{kA0}^{(1.1)} = -I_{kA1}^{(1.1)} \cdot \frac{X_{30}}{X_{13} + X_{30}} = -3{,}086 \text{ кА}.$$

Напряжения отдельных последовательностей в месте к.з. определяем в соответствии с уравнениями II закона Кирхгофа:

$$\left.\begin{aligned} U_{K1}^{(1.1)} &= j\Delta X^{(1.1)} \cdot I_{n1}^{(1.1)} \\ U_{K2}^{(1.1)} &= 0 - jX_{2\Sigma} \cdot I_{n2}^{(1.1)} \\ U_{K0}^{(1.1)} &= 0 - jX_{0\Sigma} \cdot I_{n0}^{(1.1)} \end{aligned}\right\};$$

$U_{K1}^{(1.1)} = j57{,}478$ кВ;
$U_{K2}^{(1.1)} = j57{,}478$ кВ;
$U_{K0}^{(1.1)} = j57{,}478$ кВ.

Определение фазных величин и построение векторных диаграмм

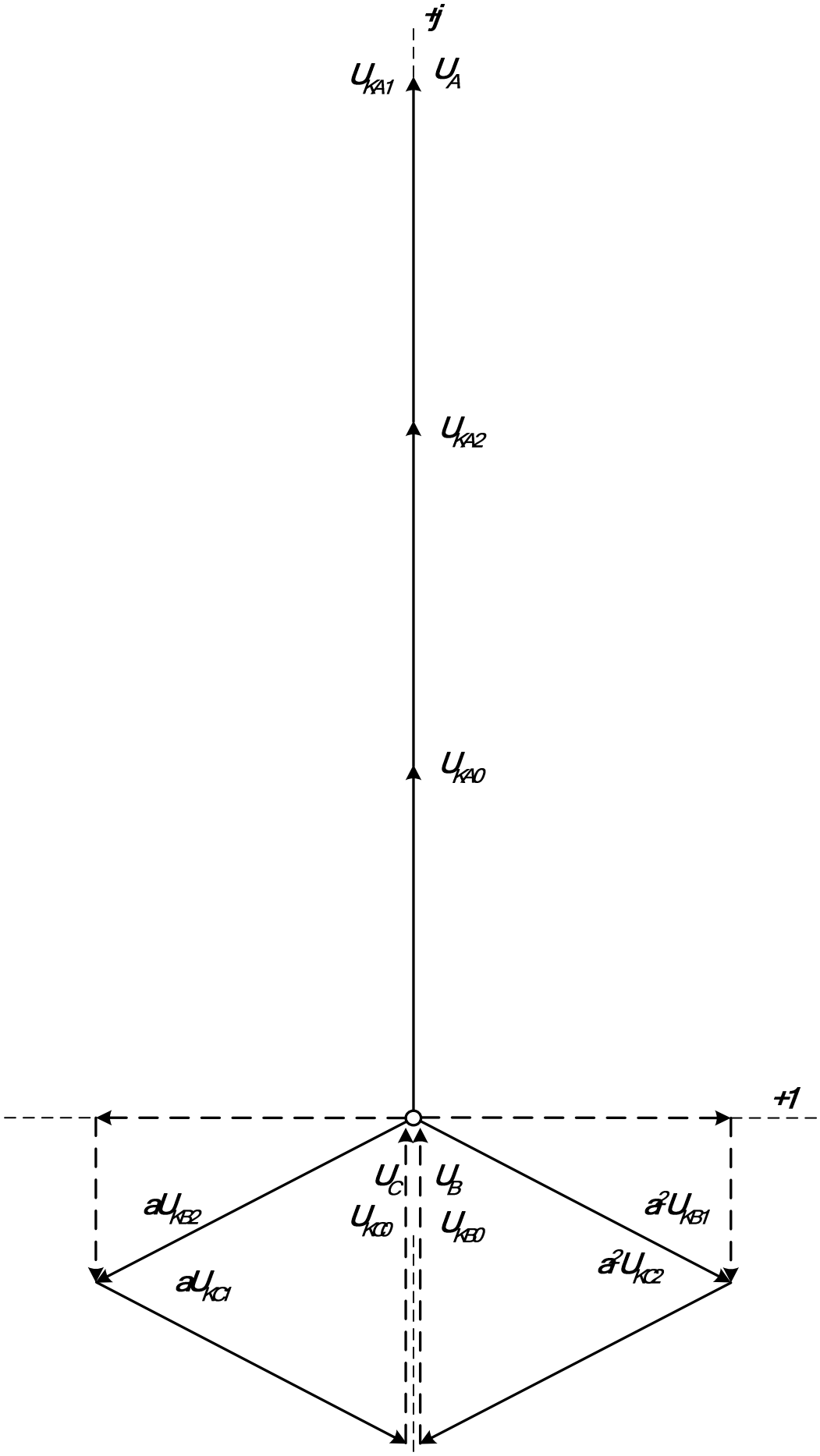
Для токов:

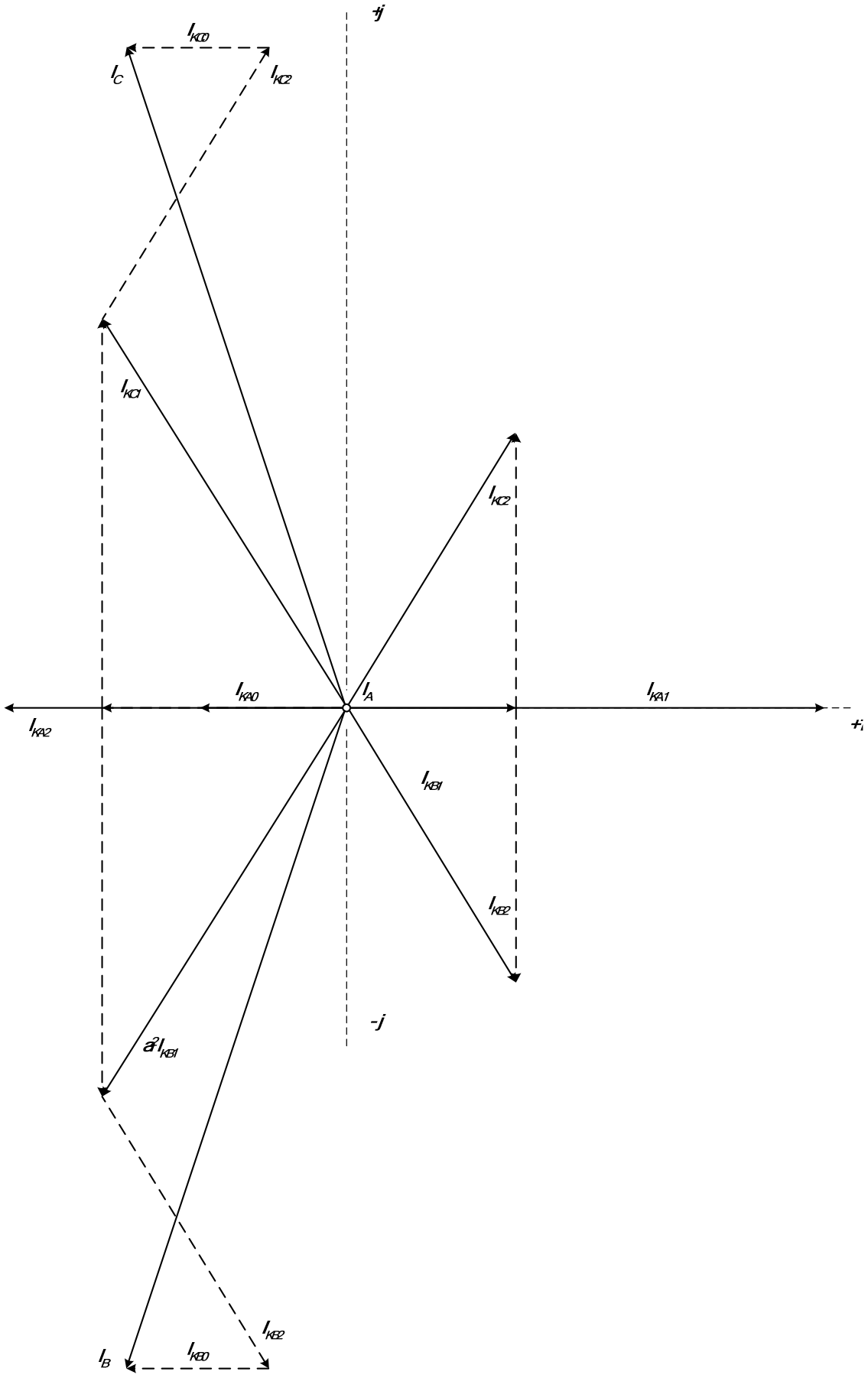
Ток в фазе А: $I_A = I_{kA1} + I_{kA2} = 0$ кА.
Ток в фазе В: $I_B = a^2 I_{kA1} + a\ I_{kA2} + I_{kA0} = -4{,}629 - j15{,}493$ кА.
Ток в фазе С: $I_C = a\ I_{kA1} + a^2 I_{kA2} + I_{kA0} = -4{,}629 + j15{,}493$ кА.
$a^2 I_{kA1} = -5{,}223 - j9{,}089$ кА; $a\ I_{kA2} = 3{,}68 - j6{,}404$ кА;
$a\ I_{kA1} = 3{,}68 + j6{,}404$ кА; $a^2 I_{kA2} = -5{,}223 + j9{,}089$ кА.

Для напряжений:

Напряжение в фазе А: $U_A^{(1.1)} = U_{K1}^{(1.1)} + U_{K2}^{(1.1)} + U_{K0}^{(1.1)} = j172{,}434$ кВ.
Напряжение в фазе В: $U_B^{(1.1)} = a^2 \cdot U_{K1}^{(1.1)} + a\ \cdot U_{K2}^{(1.1)} + U_{K0}^{(1.1)} = 0$ кВ.
Напряжение в фазе С: $U_C^{(1.1)} = a\ \cdot U_{K1}^{(1.1)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(1.1)} + U_{K0}^{(1.1)} = 0$ кВ
$a^2 \cdot U_{K1}^{(1.1)} = 50{,}006 - j28{,}739$ кВ; $a\ \cdot U_{K2}^{(1.1)} = -50{,}006 - j28{,}739$ кВ;
$a\ \cdot U_{K1}^{(1.1)} = -50{,}006 - j28{,}739$ кВ; $a^2 \cdot U_{K2}^{(1.1)} = 50{,}006 - j28{,}739$ кВ.

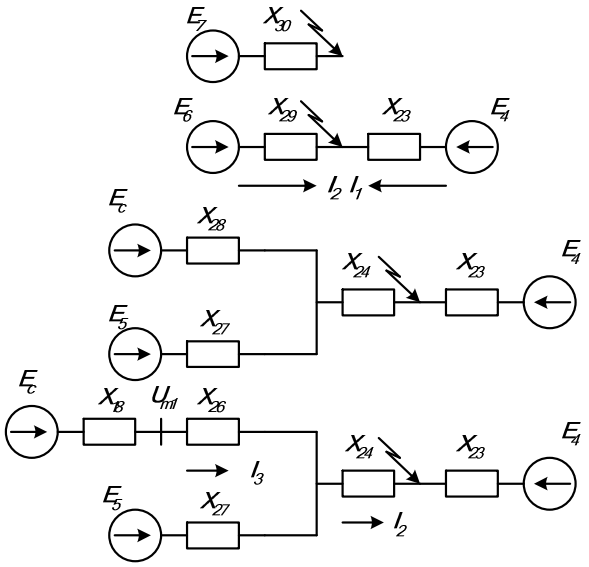
Построение векторных диаграмм токов и напряжений в точке короткого замыкания.




+j
I_{KC0}
I_C
I_{KC2}
I_{KC1}
I_{KC2}
I_{KA0}
I_A
I_{KA1}
I_{KA2}
+i
I_{KB1}
I_{KB2}
-j
$a^2 I_{KB1}$
I_{KB2}
I_B
I_{KB0}

Определение напряжения в удаленной точке на средней стороне автотрансформатора при однофазном коротком замыкании.

Падение напряжения от точки к.з. до шин автотрансформатора для схемы прямой последовательности:



$$X_{29} = 1.197 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.321 \text{ Ом}; \quad X_{28} = 0.658 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.808 \text{ Ом}.$$

$$I_2 = \frac{E_6 - U_{K1}^{(1)}}{X_{29}} = \frac{224.4 - 98.425}{63.321} = 1.986 \text{ кА}.$$

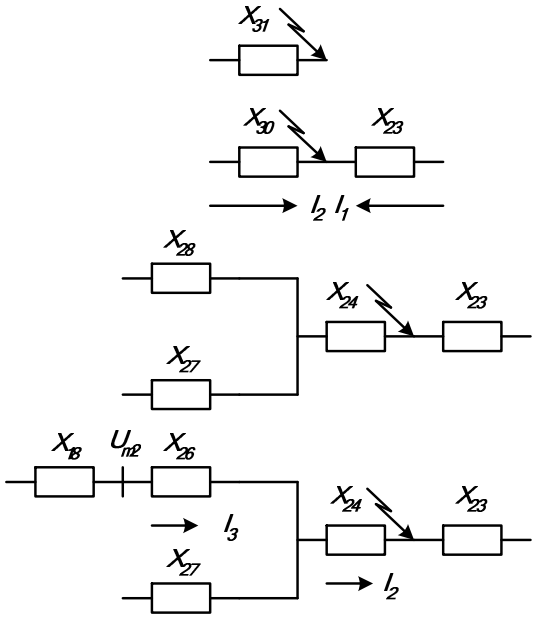
$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 1.986 \cdot \frac{34.808}{34.808 + 22.43} = 1.208 \text{ кА}.$$

$$X_{24} = 0.939 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.673 \text{ Ом}; \quad X_{27} = 0.424 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.43 \text{ Ом};$$

$$X_{26} = 0.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.316 \text{ Ом}.$$

$$U_{m1}^{(1)} = U_{K1}^{(1)} + I_2 \cdot X_{24} + I_3 \cdot X_{26} = 98.425 + 1.986 \cdot 49.673 + 1.208 \cdot 10.316 = 209.54 \text{ кВ}.$$

Обратная последовательность



$$X_{29} = 1.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.235 \text{ Ом}; \quad X_{28} = 0.659 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.843 \text{ Ом}.$$

$$I_2 = \frac{U_{K2}^{(1)}}{X_{29}} = \frac{29.076}{63.235} = 0.46 \text{ кА}.$$

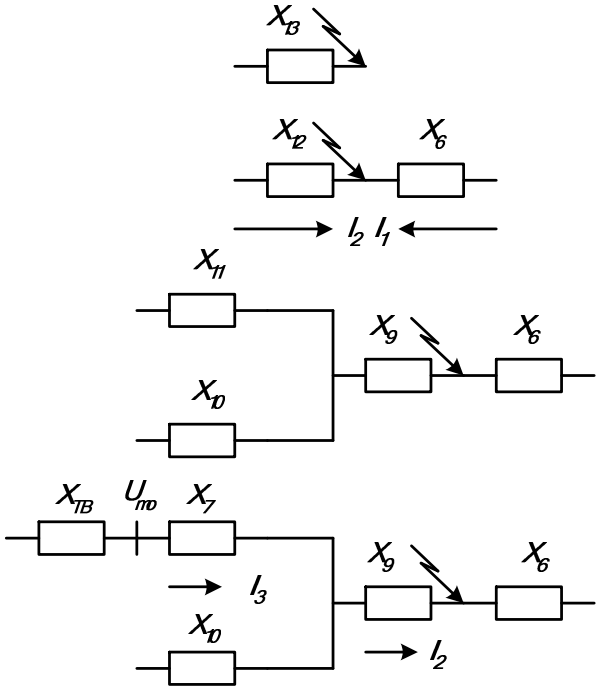
$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 0.46 \cdot \frac{34.843}{34.843 + 22.85} = 0.276 \text{ кА}.$$

$$X_{24} = 0.935 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.435 \text{ Ом}; \; X_{27} = 0.432 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.85 \text{ Ом};$$

$$X_{26} = 0.196 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.392 \text{ Ом}.$$

$$U_{m2}^{(1)} = U_{K2}^{(1)} - I_2 \cdot X_{24} - I_3 \cdot X_{26} = -29.076 - 0.46 \cdot 49.435 - 0.276 \cdot 10.392 = -54.684 \text{ кВ}.$$

Нулевая последовательность



$$X_{12} = 4.375 \cdot \frac{230^2}{1000} = 231.44 \text{ Ом}; \; X_{11} = 0.668 \cdot \frac{230^2}{1000} = 35.337 \text{ Ом};$$

$$X_{10} = 1.923 \cdot \frac{230^2}{1000} = 101.73 \text{ Ом}; \; X_9 = 3.879 \cdot \frac{230^2}{1000} = 205.19 \text{ Ом};$$

$$X_7 = 0.464 \cdot \frac{230^2}{1000} = 24.546 \text{ Ом}.$$

$$I_2 = \frac{U_{K0}^{(1)}}{X_{12}} = \frac{69.349}{231.44} = 0.3 \text{ кА}.$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{11}}{X_{10} + X_{11}} = 0.3 \cdot \frac{35.337}{35.337 + 101.73} = 0.077 \text{ кА}.$$

$$U_{mo}^{(1)} = U_{K0}^{(1)} - I_2 \cdot X_9 - I_3 \cdot X_{11} = -69.349 - 0.3 \cdot 205.19 - 0.077 \cdot 24.546 = -132.796 \text{ кВ}.$$

Определение фазных величин и построение векторной диаграммы на средней стороне автотрансформатора.

Для напряжений:

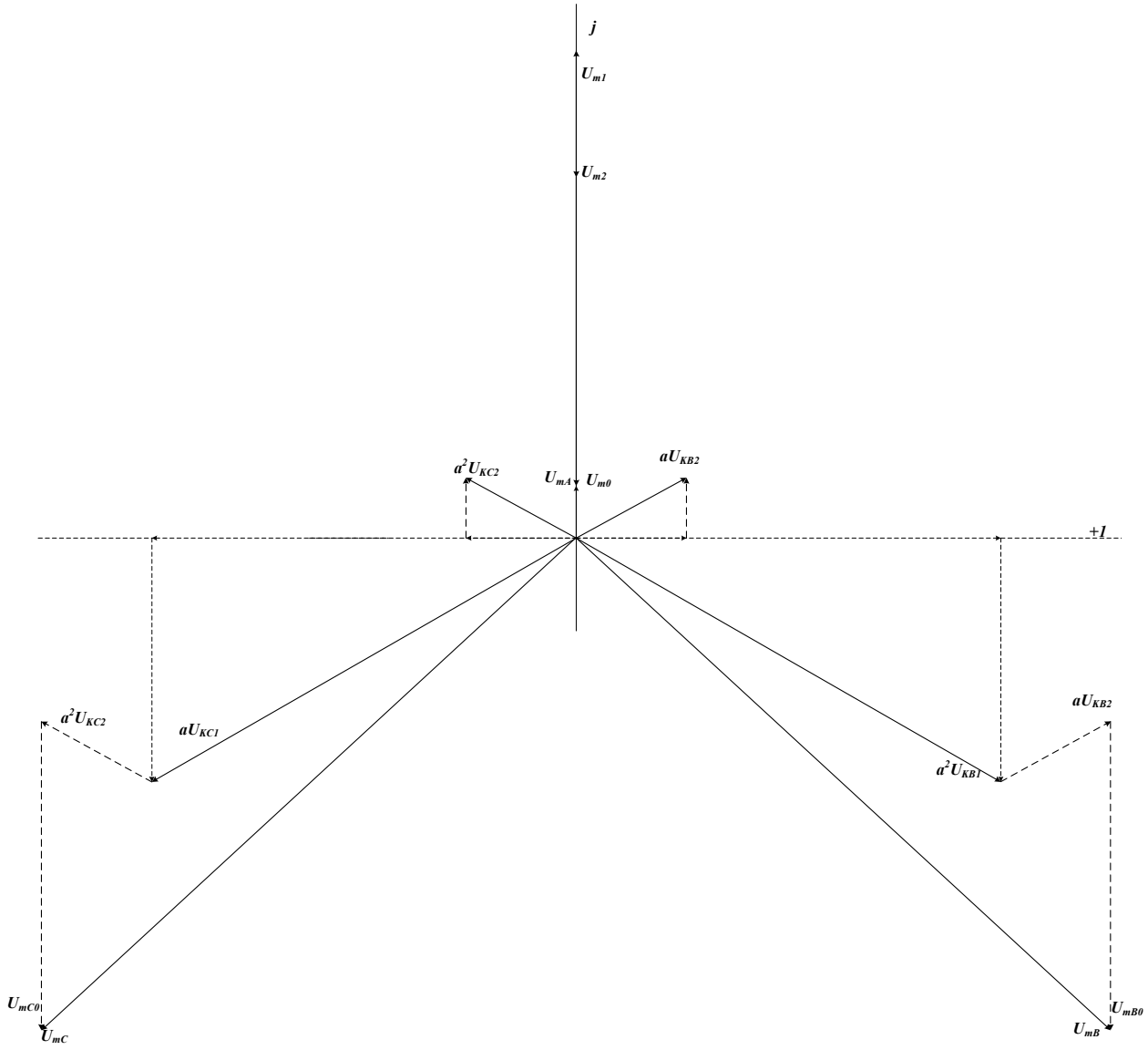
Напряжение в фазе А: $U_A^{(1)} = U_{K1}^{(1)} + U_{K2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} = j209.54 - j54.684 - j132.796 = j22.06\ кВ$.

Напряжение в фазе В: $U_B^{(1)} = a^2 \cdot U_{K1}^{(1)} + a \cdot U_{K2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} = 0\ кВ$.

Напряжение в фазе С: $U_C^{(1)} = a \cdot U_{K1}^{(1)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} = 0\ кВ$

$a^2 \cdot U_{K1}^{(1)} = 182.3 - j104.77\ кВ$; $a \cdot U_{K2}^{(1)} = 47.575 + j27.342\ кВ$

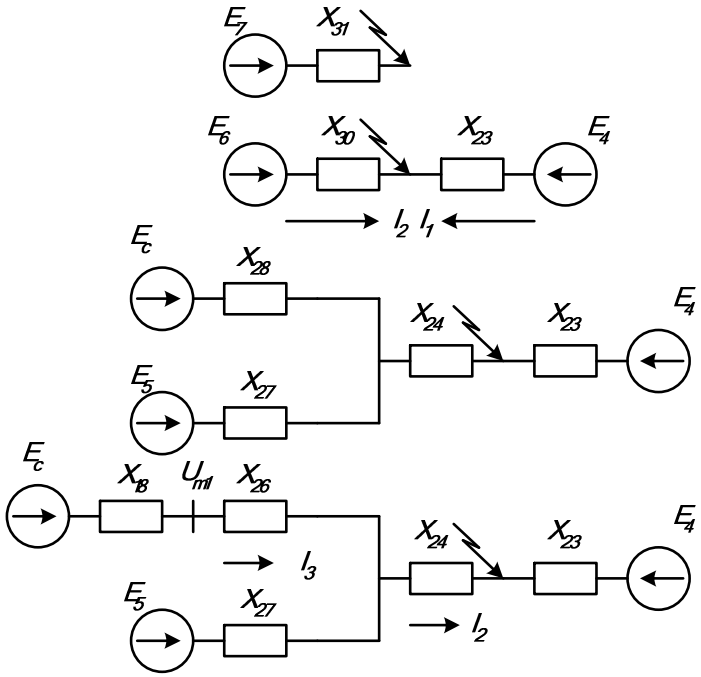
$a \cdot U_{K1}^{(1)} = -182.3 - j104.77\ кВ$; $a^2 \cdot U_{K2}^{(1)} = -47.575 + j27.342\ кВ$



Определение напряжения в удаленной точке на средней стороне автотрансформатора при двухфазном коротком замыкании.

Падение напряжения от точки к.з. до шин автотрансформатора для схемы прямой последовательности:

Прямая последовательность



$$X_{29} = 1.197 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.321 \text{ Ом}; \; X_{28} = 0.658 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.808 \text{ Ом}.$$

$$I_2 = \frac{E_6 - U_{K1}^{(2)}}{X_{29}} = \frac{224.4 - 68.191}{63.321} = 2.464 \text{ кА}.$$

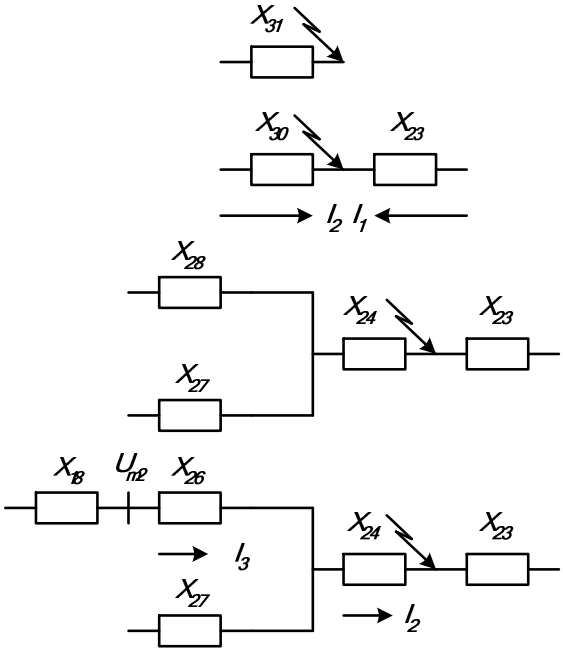
$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 2.464 \cdot \frac{34.808}{34.808 + 22.43} = 1.498 \text{ кА}.$$

$$X_{24} = 0.939 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.673 \text{ Ом}; \; X_{27} = 0.424 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.43 \text{ Ом};$$

$$X_{26} = 0.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.316 \text{ Ом}.$$

$$U_{m1}^{(2)} = U_{K1}^{(2)} + I_2 \cdot X_{24} + I_3 \cdot X_{26} = 68.191 + 2.464 \cdot 49.673 + 1.498 \cdot 10.316 = 206.04 \text{ кВ}.$$

Обратная последовательность



$$X_{29} = 1.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.235 \text{ Ом}; \; X_{28} = 0.659 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.843 \text{ Ом}.$$

$$I_2 = \frac{U_{K2}^{(2)}}{X_{29}} = \frac{68.191}{63.235} = 1.078 \text{ кА}.$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 1.078 \cdot \frac{34.843}{34.843 + 22.85} = 0.651 \text{ кА}.$$

$$X_{24} = 0.935 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.435 \text{ Ом}; \; X_{27} = 0.432 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.85 \text{ Ом};$$

$$X_{26} = 0.196 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.392 \text{ Ом}.$$

$$U_{m2}^{(2)} = U_{K2}^{(2)} - I_2 \cdot X_{24} - I_3 \cdot X_{26} = 68.191 - 1.078 \cdot 49.435 - 0.651 \cdot 10.392 = 8.135 \text{ кВ}.$$

Определение фазных величин и построение векторной диаграммы на средней стороне автотрансформатора.

Для напряжений:

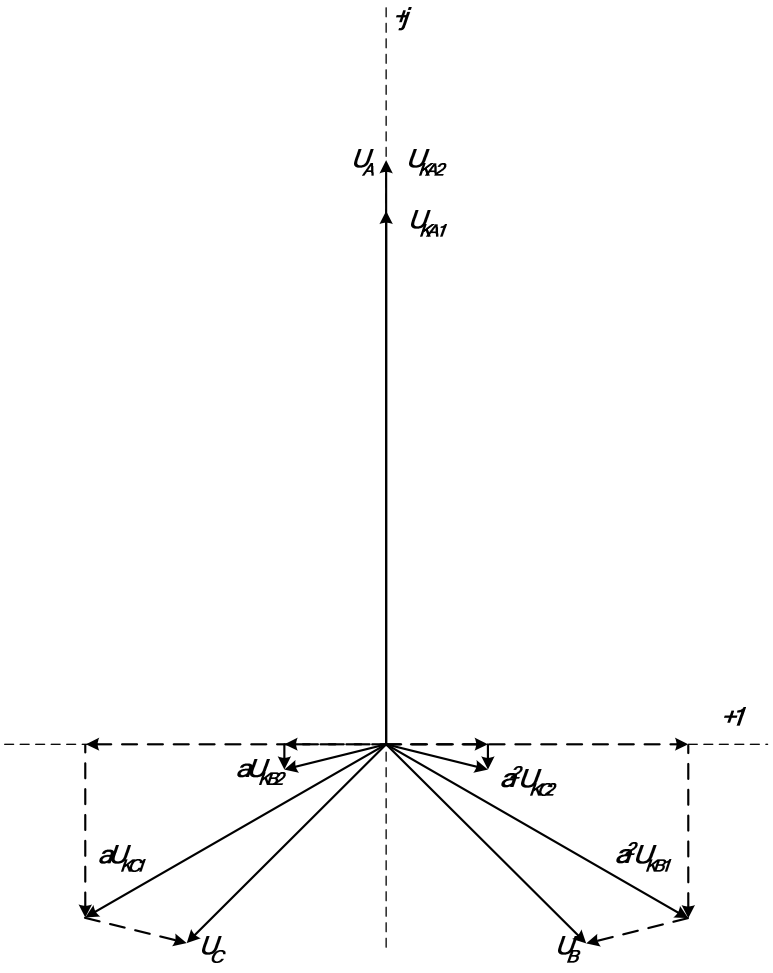
Напряжение в фазе А: $U_A^{(2)} = U_{K1}^{(2)} + U_{K2}^{(2)} = j206.04 + j8.135 = j214.175 \text{ кВ}$.

Напряжение в фазе В: $U_B^{(2)} = a^2 \cdot U_{K1}^{(2)} + a \cdot U_{K2}^{(2)} = 172.177 - j107.087 \text{ кВ}$.

Напряжение в фазе С: $U_C^{(2)} = a \cdot U_{K1}^{(2)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(2)} = -172.177 - j107.087 \text{ кВ}$.

$a^2 \cdot U_{K1}^{(2)} = 179.255 - j103.02 \text{ кВ}$; $a \cdot U_{K2}^{(2)} = -7.077 - j4.067 \text{ кВ}$.

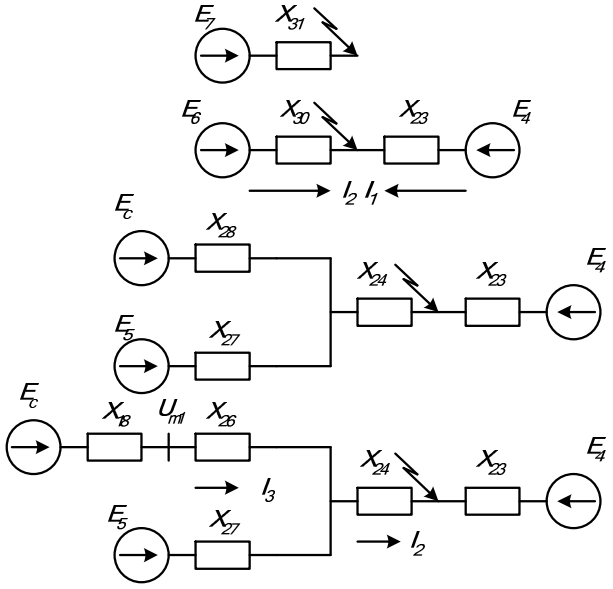
$a \cdot U_{K1}^{(2)} = -179.255 - j103.02 \text{ кВ}$; $a^2 \cdot U_{K2}^{(2)} = 7.077 - j4.067 \text{ кВ}$.



Определение напряжения в удаленной точке на средней стороне автотрансформатора при двухфазном коротком замыкании на землю.

Падение напряжения от точки к.з. до шин автотрансформатора для схемы прямой последовательности:

Прямая последовательность



$$X_{29} = 1.197 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.321 \text{ Ом};\ X_{28} = 0.658 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.808 \text{ Ом}.$$

$$I_2 = \frac{E_6 - U_{K1}^{(1.1)}}{X_{29}} = \frac{224.4 - 57.478}{63.321} = 2.633 \text{ кА}.$$

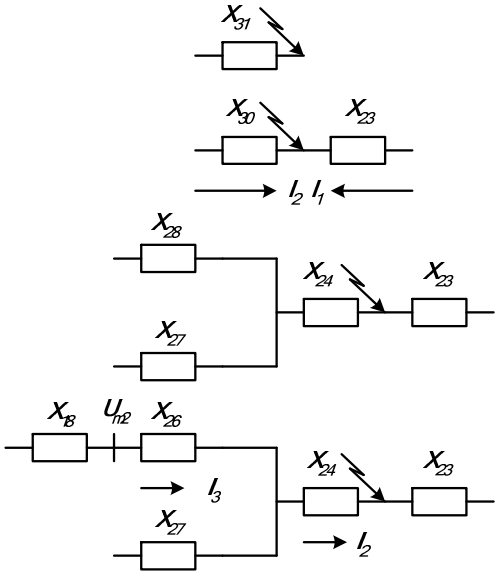
$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 2.633 \cdot \frac{34.808}{34.808 + 22.43} = 1.601 \text{ кА}.$$

$$X_{24} = 0.939 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.673 \text{ Ом};\ X_{27} = 0.424 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.43 \text{ Ом};$$

$$X_{26} = 0.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.316 \text{ Ом}.$$

$$U_{m1}^{(1.1)} = U_{K1}^{(1.1)} + I_2 \cdot X_{24} + I_3 \cdot X_{26} = 57.478 + 2.633 \cdot 49.673 + 1.601 \cdot 10.316 = 204.783 \text{ кВ}.$$

Обратная последовательность



$$X_{29} = 1.195 \cdot \frac{230^2}{1000} = 63.235 \text{ Ом}; \; X_{28} = 0.659 \cdot \frac{230^2}{1000} = 34.843 \text{ Ом}.$$

$$I_2 = \frac{U_{K2}^{(1.1)}}{X_{29}} = \frac{57.478}{63.235} = 0.909 \text{ кА}.$$

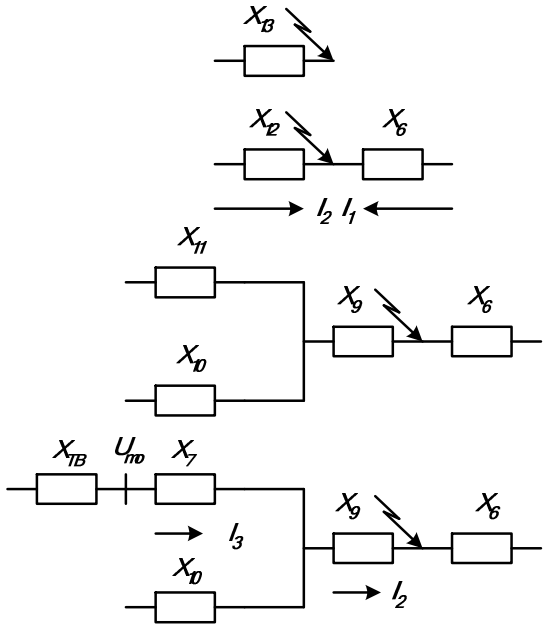
$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{28}}{X_{28} + X_{27}} = 0.909 \cdot \frac{34.843}{34.843 + 22.85} = 0.549 \text{ кА}.$$

$$X_{24} = 0.935 \cdot \frac{230^2}{1000} = 49.435 \text{ Ом}; \; X_{27} = 0.432 \cdot \frac{230^2}{1000} = 22.85 \text{ Ом};$$

$$X_{26} = 0.196 \cdot \frac{230^2}{1000} = 10.392 \text{ Ом}.$$

$$U_{m2}^{(1.1)} = U_{K2}^{(1.1)} - I_2 \cdot X_{24} - I_3 \cdot X_{26} = 57.478 - 0.909 \cdot 49.435 - 0.549 \cdot 10.392 = 6.836 \text{ кВ}.$$

Нулевая последовательность



$$X_{12} = 4.375 \cdot \frac{230^2}{1000} = 231.44 \text{ Ом}; \quad X_{11} = 0.668 \cdot \frac{230^2}{1000} = 35.337 \text{ Ом};$$

$$X_{10} = 1.923 \cdot \frac{230^2}{1000} = 101.73 \text{ Ом}; \quad X_9 = 3.879 \cdot \frac{230^2}{1000} = 205.19 \text{ Ом};$$

$$X_7 = 0.464 \cdot \frac{230^2}{1000} = 24.546 \text{ Ом}.$$

$$I_2 = \frac{U_{K0}^{(1.1)}}{X_{12}} = \frac{57.478}{231.44} = 0.248 \text{ кА}.$$

$$I_3 = I_2 \cdot \frac{X_{11}}{X_{10} + X_{11}} = 0.248 \cdot \frac{35.337}{35.337 + 101.73} = 0.064 \text{ кА}.$$

$$U_{mo}^{(1.1)} = U_{K0}^{(1.1)} - I_2 \cdot X_9 - I_3 \cdot X_{11} = 57.478 - 0.248 \cdot 205.19 - 0.064 \cdot 24.546 = 5.02 \text{ кВ}.$$

Определение фазных величин и построение векторной диаграммы на средней стороне автотрансформатора.

Для напряжений:

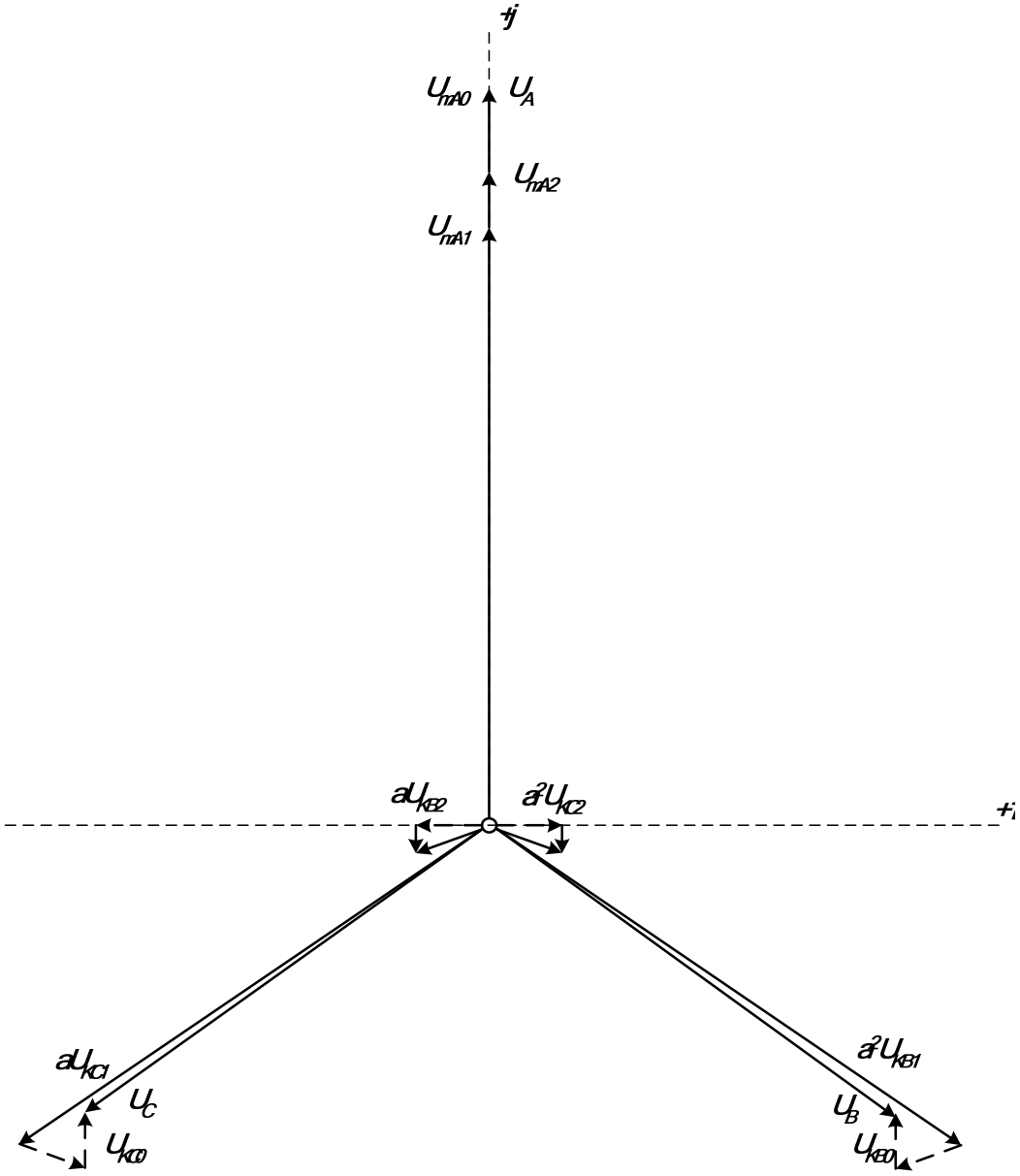
Напряжение в фазе А: $U_A^{(1.1)} = U_{K1}^{(1.1)} + U_{K2}^{(1.1)} + U_{K0}^{(1.1)} = j204.783 + j6.836 + j5.02 = j216.639 \text{ кВ}$.

Напряжение в фазе B: $U_B^{(1.1)} = a^2 \cdot U_{K1}^{(1.1)} + a \cdot U_{K2}^{(1.1)} + U_{K0}^{(1.1)} = 172.214 - j100.79\ кВ.$

Напряжение в фазе C: $U_C^{(1.1)} = a \cdot U_{K1}^{(1.1)} + a^2 \cdot U_{K2}^{(1.1)} + U_{K0}^{(1.1)} = -172.214 - j100.79\ кВ.$

$a^2 \cdot U_{K1}^{(1.1)} = 178.161 - j102.391\ кВ;\ \ a \cdot U_{K2}^{(1.1)} = -5.947 - j3.418\ кВ.$

$a \cdot U_{K1}^{(1.1)} = -178.161 - j102.391\ кВ;\ \ a^2 \cdot U_{K2}^{(1.1)} = 5.947 - j3.418\ кВ.$



Заключение

В заключение приводится краткая характеристика основных результатов расчета симметричных и несимметричных КЗ.

Дается оценка уровней токов КЗ и величин остаточного напряжения, приводятся основные показатели курсовой работы и характеристики используемых методов расчета.

Графическая часть курсового проекта

Курсовая работа разрабатывается в соответствии с заданием и сопровождается графической частью (1 лист формата А-1). Чертежи, графики, схемы должны соответствовать требованиям ЕСКД.

В качестве примера приведен лист графической части курсовой работы.

ИСХОДНАЯ СХЕМА

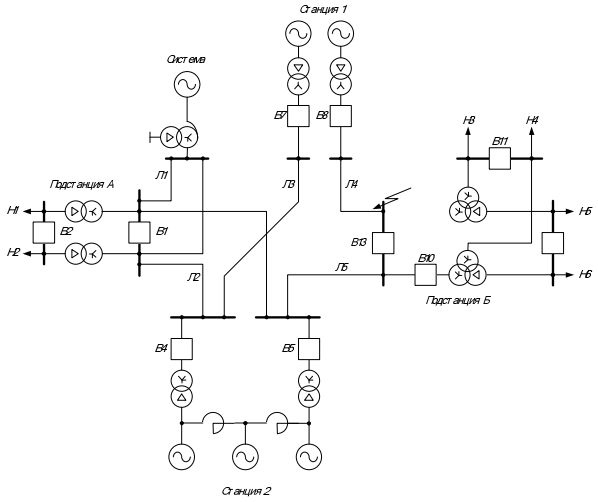


СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

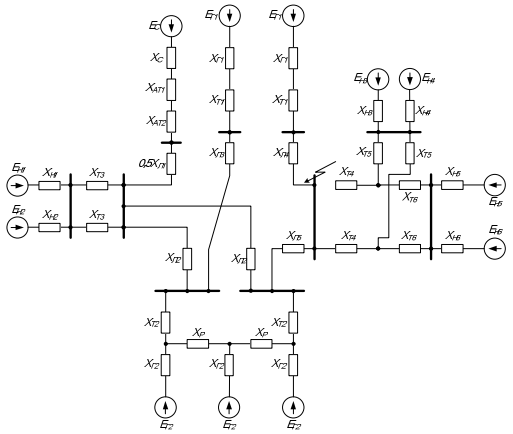


СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

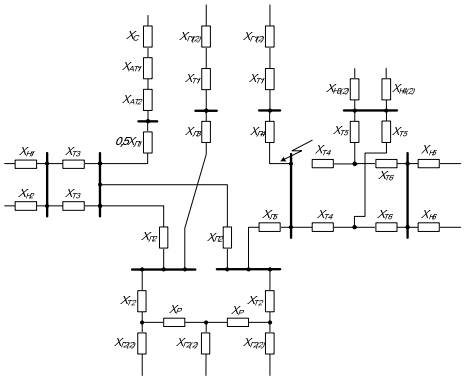
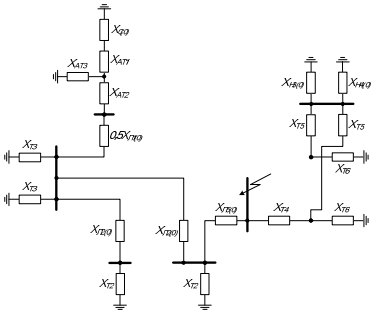
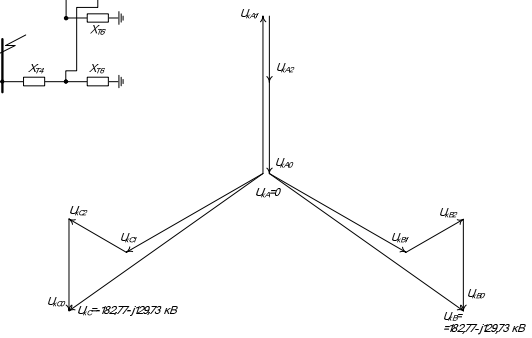
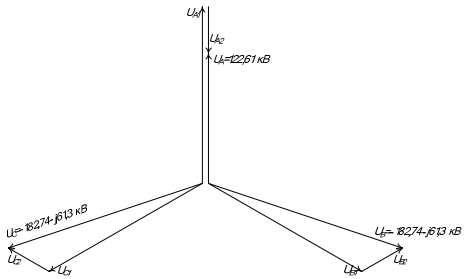


СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

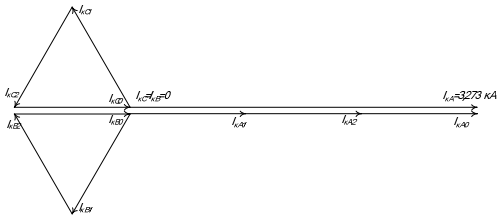


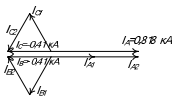
Векторные диаграммы напряжений при однофазном коротком замыкании





Векторные диаграммы токов при однофазном коротком замыкании





Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Расчёт нач. схемы замещения, результаты расчёта токов КЗ	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.						У		
Провер.						Лист 1	Листов 1	
Т. Контр.								
Рецензент					Расчёт электромагнитных переходных процессов	АмГУ Кафедра энергетики		
Н. Контр.								
Утвердил								

4.2. Методические рекомендации по выполнению курсовой работы «Оценка устойчивости простейшей электроэнергетической системы».

Изложены в учебном пособии: Методические указания по выполнению курсовой работы по курсу «Электромеханические переходные процессы в электрических системах», составитель *Степанов А.С.* – Благовещенск, 1989, 32с.

В настоящее время пособие перерабатывается, подготовлен электронный вариант: *Козлов А.Н., Степанов А.С.* **Электромеханические переходные процессы:** Пособие к решению задач и курсовому проектированию.. Пособие находится в стадии апробации: записывается студентам на их носители с просьбой все: неясные моменты обсуждать с разработчиками пособия.

При выполнении курсовой работы можно также воспользоваться учебным пособием: **Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях**. Учебное пособие для вузов. / Под ред. В.А.Строева. - М: Знак, 1996. Это учебное пособие (электронный вариант) включено в электронную библиотеку кафедры энергетики. Студенты могут записать его на свои носители.

5. Самостоятельная работа студентов

Самостоятельная работа студента включает в себя изучение лекционного материала и дополнительной литературы по дисциплине при подготовке к практическим занятиям, а также задания, закрепляющие изученный материал и являющиеся основой для выполнения курсового проекта.

В качестве заданий на самостоятельную работу студент получает вариант комплексного задания по расчету токов коротких замыканий в электрической сети (на энергообъекте) и в домашних условиях подготавливает последовательную разработку предложенных там вопросов.

При самостоятельной работе с учебниками следует обязательно вести конспект изучаемых разделов в соответствии с указаниями по темам, приведенным ниже. Контроль за степенью усвоения материала рекомендуется осуществлять с помощью вопросов для самопроверки. По мере изучения разделов курса студент выполняет домашние задания, позволяющие практически закрепить полученные теоретические звания и приобрести инженерные навыки в решении отдельных практических вопросов, связанных с изучаемой дисциплиной.

При этом каждый студент имеет возможность реализации полученных знаний в учебных программных комплексах, разработанных кафедрой энергетики: "TKZ - 3000", "AZOV", "ZAPUSK", а также программных комплексах других ВУЗов, ориентированных на преподавателей, студентов и людей, занимающихся самоподготовкой в области электроснабжения, таких как Elsnab 8 версия - "Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей" и ACPE – Account of the course project on electro supply - Программа для автоматизации расчетов курсового проекта по электроснабжению сельских населенных пунктов. Эти программы защищены авторскими правами, сертифицированы и являются бесплатными при использовании в некоммерческих целях. Также, в ряде случаев, целесообразно использование пакета автоматизации математических расчетов «MathCad».

Дополнительный контроль усвоения материала осуществляется на каждой лекции, для этого предусмотрен 5 минутный опрос студентов по ранее (и самостоятельно) изученному теоретическому материалу.

На контрольных точках курсового проектирования предусмотрена сдача отдельных частей теоретического материала и комплексного задания.

Объем и формы контроля самостоятельной работы отличаются для студентов дневной и заочной (в том числе сокращенной) форм обучения и приведены ниже в таблице графика выполнения самостоятельной работы студентов.

Выполнение самостоятельной работы предусматривает использование следующих методических разработок:

1. Мохов В.Б., Бирило И.А. Методические указания к курсовому проектированию «Районная электрическая сеть» - Благовещенск, 1993.
2. Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения. Уч. пособие. Изд-во АмГУ, Благовещенск, 2002.
3. Учебно-методический комплекс по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы».

В данных методических разработках представлены все необходимые методические указания в области расчета токов коротких замыканий и даны проверочные задания по дисциплине. Представленная в этих разработках последовательность реализации вопросов, посвященных рассмотрению последовательности выполнения курсового проекта, практических занятий, заданий на самостоятельную работу, а также приведенные примеры ее расчетов соответствуют стадийности выполнения курсового проекта и комплексного задания по дисциплине.

Следует помнить о том, что при изучении отдельных теоретических вопросов курса используются знания, полученные в ранее изученных дисциплинах.

График самостоятельной работы студентов

Для специальности 140204

Номер недели	Номер темы	Вопросы, изучаемые на лекции	Занятия (номера)		Используемые нагляд. и метод. пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
			практич. (семин.)	лаборат.		содерж.	часы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,1	Понятие о переходном режиме. Причины возникновения переходных процессов. Основные понятия. Особенности электромагнитных переходных процессов. Схемы замещения основных силовых элементов. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов и сдвоенных реакторов. Составление расчетных схем замещения			Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Составление расчетных схем замещения	3	блиц-опрос
2	2	Виды коротких замыканий (к.з), причины их возникновения и последствия. Назначение расчётов переходных процессов и требования к ним. Основные допущения, принимаемые при расчетах.	1		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Назначение расчётов переходных процессов и требования к ним.	4	блиц-опрос
3	2,2	Общий порядок расчета к.з. Использование системы относительных единиц. Составление схемы замещения системы и определение её параметров в именованных и в относительных единицах.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Определение параметров схемы замещения в относительных единицах.	3	контрольная работа
4	3	Трёхфазное к.з. в неразветвлённой цепи, подключённой к источнику синусоидального напряжения. Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании (КЗ) в цепи без трансформаторов.	2		Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании	4	блиц-опрос
5	3,4	Физическая сущность возникновения составляющих тока к.з. Ударный ток к.з. и условия его возникновения. Методы определения ударного коэффициента. Особенности переходного процесса при КЗ в разветвленной цепи. Переходный процесс при включении в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Переходный процесс при КЗ за трансформатором. Основные параметры синхронной машины (СМ). Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Определение ударного коэффициента и ударного тока	3	блиц-опрос
6	4	Влияние АРВ на установившейся режим к.з. Расчёт установившегося тока к.з. в сложных системах.	3		Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Виды АРВ	3	блиц-опрос
7	4,5	Переходные и сверхпереходные параметры синхронного генератора. Схема замещения синхронной машины в начальный момент к.з. Расчёт начального сверхпереходного тока в сложных системах.			Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Расчёт установившегося тока к.з. в сложных системах.	4	защита индивиду-альных домашних заданий

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	5	Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины без учета и с учетом влияния демпферных контуров.	4		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ	3	блиц-опрос
9	5,6	Влияние асинхронных электродвигателей и комплексных нагрузок в начальный момент КЗ. Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ. Математическая модель синхронной машины, отражающая основные закономерности электромагнитных переходных процессов в машине.			РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ.	3	контрольная работа
10	6	Линейные преобразования дифференциальных уравнений переходного процесса. Уравнения Парка-Горева. Переходные процессы в синхронной машине без учета влияния демпферных контуров. Характеристическое уравнение и его корни. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов. Изменение тока якоря при трехфазном КЗ. Влияние системы возбуждения на переходный процесс. Переходные процессы при гашении магнитного поля синхронной машины и неуспешном повторном включении на КЗ.	5		Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Определение постоянных времени затухания свободных составляющих токов	4	блиц-опрос
11	6,7	Переходные процессы в синхронной машине с учетом влияния демпферных контуров. Переходные процессы в контурах ротора при разомкнутой обмотке якоря. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов контуров ротора. Влияние на переходный процесс замкнутой обмотки якоря. Особенности переходных процессов в асинхронных машинах. ГОСТ и РД по расчету токов к.з.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Особенности переходных процессов в асинхронных машинах	3	блиц-опрос, коллоквиум
12	7	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых.	6		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых.	3	блиц-опрос
13	7,7	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом спрямленных характеристик.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом спрямленных характеристик.	4	защита индивидуальных домашних заданий

1	2	3	4	5	6	7	8	9
14	7	Особенности расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В.	6		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	расчет токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В.	3	комплексное задание
15	8,8	Условия, при которых допустимо применение метода симметричных составляющих для анализа несимметричных режимов в трехфазных цепях, содержащих синхронные машины. Параметры электрических машин, трансформаторов (автотрансформаторов), обобщенных нагрузок, воздушных линий электропередач и кабелей по отношению к токам разных последовательностей.			Крючков И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах	Определение параметров элементов по отношению к токам разных последователь-ностей.	3	коллоквиум
16	8	Граничные условия и основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений при несимметричных КЗ и обрывах фаз.	7		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Нахождение граничных условий	4	блиц-опрос
17	8,8	Векторные диаграммы напряжений и токов при несимметриях разного вида. Учет группы соединения трансформаторов (автотрансформаторов) при определении токов в разных ветвях и напряжений в произвольных точках расчетной схемы. Правило эквивалентности тока прямой последовательности при несимметричных режимах и его использование			Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Использование правила эквивалентности тока прямой последовательности при несимметричных режимах	3	блиц-опрос
18	8	. Комплексные схемы замещения. Сравнение токов при несимметричных КЗ разного вида.	7		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Составление комплексных схем замещения	3	контрольная работа

Для специальности 140205

Номер недели	Номер темы	Вопросы, изучаемые на лекции	Занятия (номера)		Используемые нагляд. и метод. пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
			практич. (семин.)	лаборат.		содерж.	часы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,1	Задачи курса. Понятие о переходном режиме. Причины возникновения переходных процессов. Основные понятия. Особенности электромагнитных переходных процессов. Схемы замещения основных силовых элементов. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов и сдвоенных реакторов. Составление расчетных схем замещения			Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Составление расчетных схем замещения	4	блиц-опрос
2	2	Виды коротких замыканий (к.з), причины их возникновения и последствия. Назначение расчётов переходных процессов и требования к ним. Основные допущения, принимаемые при расчетах.	1		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Назначение расчётов переходных процессов и требования к ним.	5	блиц-опрос
3	2,2	Общий порядок расчета к.з. Использование системы относительных единиц. Составление схемы замещения системы и определение её параметров в именованных единицах. Определение параметров схемы замещения в относительных единицах.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Определение параметров схемы замещения в относительных единицах.	4	контрольная работа
4	3	Трёхфазное к.з. в неразветвлённой цепи, подключённой к источнику синусоидального напряжения. Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании (КЗ) в цепи без трансформаторов.	2		Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании	4	блиц-опрос
5	3,4	Физическая сущность возникновения составляющих тока к.з. Ударный ток к.з. и условия его возникновения. Методы определения ударного коэффициента. Особенности переходного процесса при КЗ в разветвленной цепи. Переходный процесс при включении в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Переходный процесс при КЗ за трансформатором. Основные параметры синхронной машины (СМ). Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Определение ударного коэффициента и ударного тока	5	блиц-опрос
6	4	Влияние АРВ на установившейся режим к.з. Расчёт установившегося тока к.з. в сложных системах.	3		Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Виды АРВ	5	блиц-опрос
7	4,5	Переходные и сверхпереходные параметры синхронного генератора. Схема замещения синхронной машины в начальный момент к.з. Расчёт начального сверхпереходного тока в сложных системах.			Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Расчёт установившегося тока к.з. в сложных системах.	4	защита индивиду-альных домашних заданий

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	5	Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины без учета и с учетом влияния демпферных контуров.	4		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ	4	блиц-опрос
9	5,6	Влияние асинхронных электродвигателей и комплексных нагрузок в начальный момент КЗ. Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ. Математическая модель синхронной машины, отражающая основные закономерности электромагнитных переходных процессов в машине.			РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ.	5	контрольная работа
10	6	Линейные преобразования дифференциальных уравнений переходного процесса. Уравнения Парка-Горева. Переходные процессы в синхронной машине без учета влияния демпферных контуров. Характеристическое уравнение и его корни. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов. Изменение тока якоря при трехфазном КЗ. Влияние системы возбуждения на переходный процесс. Переходные процессы при гашении магнитного поля синхронной машины и неуспешном повторном включении на КЗ.	5		Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Определение постоянных времени затухания свободных составляющих токов	4	блиц-опрос
11	6,7	Переходные процессы в синхронной машине с учетом влияния демпферных контуров. Переходные процессы в контурах ротора при разомкнутой обмотке якоря. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов контуров ротора. Влияние на переходный процесс замкнутой обмотки якоря. Особенности переходных процессов в асинхронных машинах. ГОСТ и РД по расчету токов к.з.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Особенности переходных процессов в асинхронных машинах	5	блиц-опрос, коллоквиум
12	7	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых.	6		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых.	4	блиц-опрос
13	7,7	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом спрямленных характеристик.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом спрямленных характеристик.	4	защита индивиду-альных домашних заданий
14	7	Особенности расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В.	6		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	расчет токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В.	5	комплексное задание

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	8,8	Условия, при которых допустимо применение метода симметричных составляющих для анализа несимметричных режимов в трехфазных цепях, содержащих синхронные машины. Параметры электрических машин, трансформаторов (автотрансформаторов), обобщенных нагрузок, воздушных линий электропередач и кабелей по отношению к токам разных последовательностей.			Крючков И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах	Определение параметров элементов по отношению к токам разных последователь-ностей.	4	коллоквиум
16	8	Граничные условия и основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений при несимметричных КЗ и обрывах фаз.	7		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Нахождение граничных условий	4	блиц-опрос
17	8,8	Векторные диаграммы напряжений и токов при несимметриях разного вида. Учет группы соединения трансформаторов (автотрансформаторов) при определении токов в разных ветвях и напряжений в произвольных точках расчетной схемы. Правило эквивалентности тока прямой последовательности при несимметричных режимах и его использование			Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Использование правила эквивалентности тока прямой последовательности при несимметричных режимах	4	блиц-опрос
18	8	. Комплексные схемы замещения. Сравнение токов при несимметричных КЗ разного вида.	7		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Составление комплексных схем замещения	4	контрольная работа

Для специальности 140211

Номер недели	Номер темы	Вопросы, изучаемые на лекции	Занятия (номера)		Используемые нагляд. и метод. пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
			практич. (семин.)	лаборат.		содерж.	часы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,1	Задачи курса. Понятие о переходном режиме. Причины возникновения переходных процессов. Основные понятия. Особенности электромагнитных переходных процессов. Схемы замещения основных силовых элементов. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов и сдвоенных реакторов. Составление расчетных схем замещения			Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Составление расчетных схем замещения	4	блиц-опрос
2	2	Виды коротких замыканий (к.з), причины их возникновения и последствия. Назначение расчётов переходных процессов и требования к ним. Основные допущения, принимаемые при расчетах.	1		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Назначение расчётов переходных процессов и требования к ним.	4	блиц-опрос
3	2,2	Общий порядок расчета к.з. Использование системы относительных единиц. Составление схемы замещения системы и определение её параметров в именованных единицах. Определение параметров схемы замещения в относительных единицах.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Определение параметров схемы замещения в относительных единицах.	3	контрольная работа
4	3	Трёхфазное к.з. в неразветвлённой цепи, подключённой к источнику синусоидального напряжения. Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании (КЗ) в цепи без трансформаторов.	2		Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании	4	блиц-опрос
5	3,4	Физическая сущность возникновения составляющих тока к.з. Ударный ток к.з. и условия его возникновения. Методы определения ударного коэффициента. Особенности переходного процесса при КЗ в разветвленной цепи. Переходный процесс при включении в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Переходный процесс при КЗ за трансформатором. Основные параметры синхронной машины (СМ). Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Определение ударного коэффициента и ударного тока	4	блиц-опрос
6	4	Влияние АРВ на установившейся режим к.з. Расчёт установившегося тока к.з. в сложных системах.	3		Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Виды АРВ	3	блиц-опрос
7	4,5	Переходные и сверхпереходные параметры синхронного генератора. Схема замещения синхронной машины в начальный момент к.з. Расчёт начального сверхпереходного тока в сложных системах.			Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Расчёт установившегося тока к.з. в сложных системах.	4	защита индивиду-альных домашних заданий
8	*5*	*Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины без учета и с учетом влияния демпферных контуров.*	*4*		*Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.*	*Расчет начального значения период. составляющей тока КЗ*	*4*	*блиц-опрос*

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	5,6	Влияние асинхронных электродвигателей и комплексных нагрузок в начальный момент КЗ. Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ. Математическая модель синхронной машины, отражающая основные закономерности электромагнитных переходных процессов в машине.			РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ.	3	контрольная работа
10	6	Линейные преобразования дифференциальных уравнений переходного процесса. Уравнения Парка-Горева. Переходные процессы в синхронной машине без учета влияния демпферных контуров. Характеристическое уравнение и его корни. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов. Изменение тока якоря при трехфазном КЗ. Влияние системы возбуждения на переходный процесс. Переходные процессы при гашении магнитного поля синхронной машины и неуспешном повторном включении на КЗ.	5		Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Определение постоянных времени затухания свободных составляющих токов	4	блиц-опрос
11	6,7	Переходные процессы в синхронной машине с учетом влияния демпферных контуров. Переходные процессы в контурах ротора при разомкнутой обмотке якоря. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов контуров ротора. Влияние на переходный процесс замкнутой обмотки якоря. Особенности переходных процессов в асинхронных машинах. ГОСТ и РД по расчету токов к.з.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Особенности переходных процессов в асинхронных машинах	3	блиц-опрос, коллоквиум
12	7	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых.	6		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых.	3	блиц-опрос
13	7,7	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом спрямленных характеристик.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом спрямленных характеристик.	3	защита индивиду-альных домашних заданий
14	7	Особенности расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В.	6		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	расчет токов короткого замыкания в электроустанов ках напряжением до 1000 В.	4	комплексное задание

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	8,8	Условия, при которых допустимо применение метода симметричных составляющих для анализа несимметричных режимов в трехфазных цепях, содержащих синхронные машины. Параметры электрических машин, трансформаторов (автотрансформаторов), обобщенных нагрузок, воздушных линий электропередач и кабелей по отношению к токам разных последовательностей.			Крючков И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах	Определение параметров элементов по отношению к токам разных последователь-ностей.	3	коллоквиум
16	8	Граничные условия и основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений при несимметричных КЗ и обрывах фаз.	7		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Нахождение граничных условий	4	блиц-опрос
17	8,8	Векторные диаграммы напряжений и токов при несимметриях разного вида. Учет группы соединения трансформаторов (автотрансформаторов) при определении токов в разных ветвях и напряжений в произвольных точках расчетной схемы. Правило эквивалентности тока прямой последовательности при несимметричных режимах и его использование			Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Использование правила эквивалентност и тока прямой последовательн ости при несимметричны х режимах	3	блиц-опрос
18	8	. Комплексные схемы замещения. Сравнение токов при несимметричных КЗ разного вида.	7		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Составление комплексных схем замещения	4	контрольная работа

Для специальности 140203

Номер недели	Номер темы	Вопросы, изучаемые на лекции	Занятия (номера)		Используемые нагляд. и метод. пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
			практич. (семин.)	лаборат.		содерж.	часы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,1	Задачи курса. Понятие о переходном режиме. Причины возникновения переходных процессов. Основные понятия. Особенности электромагнитных переходных процессов. Схемы замещения основных силовых элементов. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов и сдвоенных реакторов. Составление расчетных схем замещения			Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Составление расчетных схем замещения		блиц-опрос
2	2	Виды коротких замыканий (к.з), причины их возникновения и последствия. Назначение расчётов переходных процессов и требования к ним. Основные допущения, принимаемые при расчетах.	1		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Назначение расчётов переходных процессов и требования к ним.		блиц-опрос
3	2,2	Общий порядок расчета к.з. Использование системы относительных единиц. Составление схемы замещения системы и определение её параметров в именованных единицах. Определение параметров схемы замещения в относительных единицах.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Определение параметров схемы замещения в относительных единицах.	2	контрольная работа
4	3	Трёхфазное к.з. в неразветвлённой цепи, подключённой к источнику синусоидального напряжения. Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании (КЗ) в цепи без трансформаторов.	2		Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании		блиц-опрос
5	3,4	Физическая сущность возникновения составляющих тока к.з. Ударный ток к.з. и условия его возникновения. Методы определения ударного коэффициента. Особенности переходного процесса при КЗ в разветвленной цепи. Переходный процесс при включении в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Переходный процесс при КЗ за трансформатором. Основные параметры синхронной машины (СМ). Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Определение ударного коэффициента и ударного тока		блиц-опрос
6	4	Влияние АРВ на установившейся режим к.з. Расчёт установившегося тока к.з. в сложных системах.	3		Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Виды АРВ		блиц-опрос
7	4,5	Переходные и сверхпереходные параметры синхронного генератора. Схема замещения синхронной машины в начальный момент к.з. Расчёт начального сверхпереходного тока в сложных системах.			Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Расчёт установившегося тока к.з. в сложных системах.	2	защита индивиду-альных домашних заданий

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	5	Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины без учета и с учетом влияния демпферных контуров.	4		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ		блиц-опрос
9	5,6	Влияние асинхронных электродвигателей и комплексных нагрузок в начальный момент КЗ. Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ. Математическая модель синхронной машины, отражающая основные закономерности электромагнитных переходных процессов в машине.			РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Расчет периодической составляющей тока при удаленных КЗ.		контрольная работа
10	6	Линейные преобразования дифференциальных уравнений переходного процесса. Уравнения Парка-Горева. Переходные процессы в синхронной машине без учета влияния демпферных контуров. Характеристическое уравнение и его корни. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов. Изменение тока якоря при трехфазном КЗ. Влияние системы возбуждения на переходный процесс. Переходные процессы при гашении магнитного поля синхронной машины и неуспешном повторном включении на КЗ.	5		Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. "Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования	Определение постоянных времени затухания свободных составляющих токов		блиц-опрос
11	6,7	Переходные процессы в синхронной машине с учетом влияния демпферных контуров. Переходные процессы в контурах ротора при разомкнутой обмотке якоря. Постоянные времени затухания свободных составляющих токов контуров ротора. Влияние на переходный процесс замкнутой обмотки якоря. Особенности переходных процессов в асинхронных машинах. ГОСТ и РД по расчету токов к.з.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Особенности переходных процессов в асинхронных машинах		блиц-опрос, коллоквиум
12	7	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых.	6		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом типовых кривых.		блиц-опрос
13	7,7	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом спрямленных характеристик.			Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения	Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени методом спрямленных характеристик.		защита индивиду-альных домашних заданий
14	7	Особенности расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В.	6		РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования	расчет токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В.		комплексное задание

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	8,8	Условия, при которых допустимо применение метода симметричных составляющих для анализа несимметричных режимов в трехфазных цепях, содержащих синхронные машины. Параметры электрических машин, трансформаторов (автотрансформаторов), обобщенных нагрузок, воздушных линий электропередач и кабелей по отношению к токам разных последовательностей.			Крючков И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах	Определение параметров элементов по отношению к токам разных последователь-ностей.	2	коллоквиум
16	8	Граничные условия и основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений при несимметричных КЗ и обрывах фаз.	7		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Нахождение граничных условий		блиц-опрос
17	8,8	Векторные диаграммы напряжений и токов при несимметриях разного вида. Учет группы соединения трансформаторов (автотрансформаторов) при определении токов в разных ветвях и напряжений в произвольных точках расчетной схемы. Правило эквивалентности тока прямой последовательности при несимметричных режимах и его использование			Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Использование правила эквивалентности тока прямой последовательност и при несимметричных режимах		блиц-опрос
18	8	. Комплексные схемы замещения. Сравнение токов при несимметричных КЗ разного вида.	7		Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.	Составление комплексных схем замещения	2	контрольная работа

Задания для самостоятельной работы студентов.

В процессе изучения дисциплины (после каждого практического занятия) студенты последовательно разрабатывают предложенные в задании вопросы и защищают их согласно графику, указанному в учебно-методической (технологической) карте дисциплины. На последнем практическом занятии студенты защищают комплексное задание целиком, с его анализом и оценкой принятых инженерных решений.

Тема 1. Основные сведения об электромагнитных переходных процессах

Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит различие между электромагнитными и электромеханическими переходными процессами в электрической системе ?
2. Какие короткие замыкания называются металлическими ?
3. Перечислить основные виды коротких замыканий (к.з.). Относительная вероятность их возникновения в электрических системах.
4. Какие виды к.з. могут возникнуть в трехфазной системе с глухозаземленной нейтралью ?
5. Какие виды нарушения режима относятся к продольной и поперечной несимметрии ?
6. Что понимают под расчетом электромагнитного переходного процесса?
7. Перечислите задачи, для практического решения которых производят расчеты электромагнитных переходных процессов.
8. В чем заключаются основные допущения, принимаемые при расчетах электромагнитных переходных процессов ?

Тема 2. Система относительных единиц. Составление схем замещения

Вопросы для самопроверки

1. Какие преимущества и недостатки системы относительных единиц по сравнению с системой именованных единиц ?
2. Какими соображениями следует руководствоваться при выборе базисных условий?
3. Почему в случае применения системы относительных единиц результат расчета режима к.з. не зависит от выбора базисных условий, хотя в процессе расчета численные значения величин при разных базисных условиях получаются различными?
4. Относительные реактивности двух генераторов одинаковы. Определите, в каком соотношении находятся их реактивности, выраженные в Омах, если: номинальные мощности генераторов одинаковы, а их номинальные напряжения составляют соответственно $U_н$ и $nU_н$; номинальные напряжения генераторов одинаковы, а их номинальные мощности составляют соответственно $S_н$ и $nS_н$.
5. В цепи установлен реактор с $x_р$=5% при $I_н$=150 А и U= 6кВ, который предполагается заменить реактором на $I_н$= 300 А. Определить, какова должна быть относительная (в процентах) реактивность этого реактора при номинальном напряжении а) 6 кВ; б) 10 кВ, чтобы после замены реактивность цепи осталась прежней.
6. С какой целью магнитосвязанные цепи представляют схемой замещения?
К чему сводится составление такой схемы замещения ?
7. На чем основано составление приближенной схемы приведения (приближенное приведение) ?
8. Каков порядок расчета при точном приведении в относительных единицах ?

Тема 3. Короткое замыкание в простейшей трехфазной цепи

Вопросы для самопроверки

1. Из каких слагающих состоит кривая изменения тока при внезапном к.з. в неразветвленной цепи, питаемой от источника бесконечной мощности ? Как они изменяются во времени ?
2. Какое влияние оказывает предшествующий ток на величину апериодической слагающей тока к.з., какого максимального значения может достигать последняя?
3. Что называется фазой включения ? При какой фазе включения и в какой момент времени после возникновения к.з. наступает максимум мгновенного значения полного тока ?
4. Что называется ударным током к.з. и какие упрощающие условия принимают при его определении ?
5. Что понимается под эквивалентной постоянной времени $T_{а.-э}$ и как практически можно оценить ее значение?
6. Что показывает ударный коэффициент и каковы пределы его изменений?
7. Какие упрощения принимают при определении действующих значений полных величин отдельных слагающих тока к.з.?
8. Как обосновать, что при расчетах токов к.з. контуром намагничивания трансформаторов нужно пренебречь?

Тема 4. Установившийся режим короткого замыкания

Вопросы для самопроверки

1. Как определить установившийся ток генератора при к.з. на его выводах, если известны номинальные данные генератора, относительный ток возбуждения и ОКЗ ?
2. Какое влияние на режим к.з. оказывает нагрузка ? Как она учитывается в расчетах ?
3. Что такое критическое сопротивление и как оно определяется?
4. Что называется отношением короткого замыкания (ОКЗ) и как оно связано с реактивностью генератора?
5. В чем проявляется действие АРВ в установившемся режиме к.з.?
6. Какие режимы генераторов при наличии АРВ возможны в установившемся режиме к.з? Чем они характеризуются?

Тема 5. Начальный момент внезапного режима

Вопросы для самопроверки

1. В силу каких причин магнитный поток в воздушном зазоре машины в начальный момент нарушения режима претерпевает изменения?
2. Что называется переходной э.д.с. и каким свойством она обладает?
3. Что называется переходной реактивностью машины и от каких факторов зависит ее величина ?
4. Что называется сверхпереходными э.д.с. и реактивностями?
5. Как практически оценивается сверхпереходная реактивность асинхронного двигателя ?
6. Какими параметрами вводятся в схему замещения генераторы и нагрузки при практическом расчете начального сверхпереходного тока ?
7. В чем особенность определения ударного коэффициента для асинхронных двигателей ?

Тема 6. Внезапное короткое замыкание синхронной машины

Вопросы для самопроверки

1. Укажите, какая связь существует между соответствующими слагающими токов в цепях статора и ротора при внезапном к.з. синхронной машины без демпферных обмоток ?
2. Как изменяется величина постоянной времени Та с увеличением индуктивного сопротивления в цепи статора генератора ?
3. Чем вызвана и от чего зависит вторая гармоника тока статора при коротком замыкании ?
4. В чем проявляется влияние демпферных обмоток на протекание процесса внезапного к.з. синхронной машины?
5. Как сказывается действие АРВ на протекании процесса внезапного к.з. синхронной машины ?
6. Что называется критическим временем? Как оно изменяется с изменением $x_{ВН}$?
7. В чем различие кривых изменения периодической слагающей тока статора генератора с АРВ три Te = 0 и Te ≠0?
8. Какое ограничение и почему ставятся в выражении для периодической слагающей тока статора генератора с АРВ ?

Тема 7. Практические метода расчета переходного процесса при трехфазных коротких замыканиях

Вопросы для самопроверки

1. Каковы общие дополнительные допущения, применяемые в практических расчетах КЗ ?
2. На чем основан метод расчетных кривых ?
3. Учитывается ли влияние нагрузки в методе расчетных кривых ?
4. Почему при пользовании расчетными кривыми ветвь "системы" нельзя, объединять с ветвями генераторов заданной суммарной мощности в один эквивалентный источник?
5. Какая предельная погрешность метода расчетных кривых ?
6. Как производится расчет токов к.з. от источника бесконечной мощности (S= ∞) ?
7. Какими э.д.с. и сопротивлениями должны быть введены в схему замещения генераторы и нагрузки для расчета начального сверхпереходного тока ?
8. Как определяется ударный коэффициент для двигательной и обобщенной нагрузки ?
9. Какими сопротивлениями вводятся генераторы при расчете токов к.з. методом расчетных кривых ?
10. Как производится расчет короткого замыкания при x_p>3?
11. При каких условиях установившийся ток к.з. достигает значений больше начального тока ?
12. В чем отличие результирующего сопротивления схемы от расчетного сопротивления и в каких случаях они равны?
13. Как производится расчет для выбора выключателя по отключающей способности?
14. В чем заключается дополнительные уточнения метода расчетных кривых?

Тема 8. Форсировка возбуждения и развозбуждение синхронных машин

Вопросы для самопроверки

1. Что такое релейная форсировка возбуждения?

1. В чем заключаются различия систем возбуждения с самовозбуждением и с независимым возбуждением с точки зрения протекания процессов при форсировке возбуждения?

2. Каковы особенности процессов в системе с последовательным возбуждением?

3. В чем преимущества системы возбуждения с компаундированием?

4. Сформулировать требования и АГП.

5. Из каких соображений выбирается величина разрядного сопротивления при гашении поля ?

6. В чем недостаток АГП с разрядным сопротивлением?

7. Как обеспечить постоянную скорость гашения поля ?

8. Что такое дугогасящая решетка и какие есть способы построения схем с дугогасящей решеткой.

Тема 9. Основные положения при исследовании несимметричных повреждений

Вопросы для самопроверки

1. Чем вызвано образование высших гармоник при несимметричных режимах синхронной машины ?

2. Какими средствами можно уменьшить высшие гармоники, образующиеся при несимметричных режимах ?

3. В чем заключается сущность метода симметричных составляющих и в чем состоят принципиальные трудности применения его для практических расчетов несимметричных переходных процессов ?

4. На каком допущении основано использование метода симметричных составляющих для практических расчетов несимметричных переходных процессов?

5. Запишите основные уравнения второго закона Кирхгофа для каждой последовательности при произвольном виде поперечной и продольной несимметрии.

Тема 10. Параметры элементов систем и схемы замещения для токов отдельных последовательностей

Вопросы для самопроверки

1. При каком условии сопротивление элемента для токов любой последовательности одинаково ?

2. Какая величина принимается в качестве сопротивления обратной последовательности асинхронного двигателя?

3. Какое влияние на величину реактивности нулевой последовательности трансформатора оказывает: а) соединение обмоток? б) конструкция магнитопровода?

4. Почему реактивное сопротивление воздушной линии для токов нулевой последовательности значительно больше, чем для токов прямой и обратной последовательностей ?

5. Почему при наличии заземленных тросов сопротивление нулевой последовательности линии имеет меньшее значение, чем при отсутствии тросов?

6. В чем заключается трудность определения сопротивления нулевой последовательности кабеля?

7. В чем заключается принципиальное различие в составлении схем отдельных последовательностей при поперечной и при продольной несимметриях?

8. Как изменяются векторные диаграммы токов и напряжений при переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, обмотки которого соединены по группе Y /Δ - II ?

Тема 11. Однократная поперечная и продольная несимметрия

Вопросы для самопроверки

1. Составить комплексные схемы замещения для различных видов несимметричных коротких замыканий.
2. При каком допущении справедливо правило эквивалентности прямой последовательности ? В чем заключается ценность этого правила для расчета переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях?
3. С помощью каких мер можно снизить величину тока однофазного короткого замыкания ?
4. Каков порядок расчета несимметричных коротких замыканий при помощи метода расчетных кривых?
5. Как определяются дополнительные сопротивления для однофазного и двухфазного к.з. на землю?
6. Чему равен коэффициент m при определении полного тока к.з. по величине тока прямой последовательности для различных видов несимметричных коротких замыканий?
7. Соотношения между током трехфазного к.з. и током несимметричных к.з. в данной точке схемы.
8. Какое влияние оказывает нагрузка при несимметричных к.з. ?

6. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ

Выполнение домашних заданий и контрольных работ предусматривает использование учебно-методического пособия Мясоедов Ю.В., Гоголева Л.Б. Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения. Изд-во АмГУ, Благовещенск, 2002, в котором приведены методические указания и рекомендации, даны краткие теоретические сведения и подробно показаны примеры решения задач.

Следует помнить о том, что при изучении отдельных теоретических вопросов курса используются знания, полученные в ранее изученных дисциплинах.

Поэтому для закрепления полученных ранее знаний и практической их привязки к изучаемому курсу целесообразно использовать следующие методические разработки:

4. Мохов В.Б., Бирило И.А. Методические указания к курсовому проектированию «Районная электрическая сеть» - Благовещенск, 1993.

5. Ю.В. Мясоедов, Н.В.Савина, А.Н.Козлов. Автоматизация в курсовом и дипломном проектировании. Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2000.

6. Савина Н.В., Мясоедов Ю.В., Дудченко Л.Н. Электрические сети в примерах и расчетах. Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 1999.

7. Ю.В. Мясоедов, Н.В. Савина, А.Г. Ротачева. Проектирование электрической части электростанций и подстанций. Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2002.

Студент выполняет вариант, соответствующий последним двум цифрам его шифра.

Задания на самостоятельную работу подобраны таким образом, что полностью совпадают с тематикой практических занятий. В процессе самостоятельной работы студенты должны усовершенствовать полученные знания из курса лекций и закрепленные на практических занятиях.

Тема 1. Система относительных единиц. Схемы замещения и их параметры. Способы преобразования схем замещения. При изучении данного материала необходимо получить ясное представление об определении параметров схем замещения при заданных сопротивлениях отдельных элементов схемы замещения в Омах или в относительных единицах. Оценить какие преимущества и недостатки имеют системы относительных единиц по сравнению с системой именованных единиц. Усвоить выражения для определения в относительных величинах сопротивлений различных элементов схемы при точном и приближенном их приведении к общим условиям (базисным). Уяснить выбор расчетных условий режима к. з. в зависимости от назначения расчета и возможность применять различные допущения для упрощения расчетов токов к.з. Представлять, что определяет мощность к.з. в системе и для каких режимов сети она задается. Представлять себе на чем основано составление приближенной схемы приведения (приближенное приведение) и к чему сводится составление схемы замещения.

Тема 2. Переходные процессы в сети с источником бесконечной мощности. Влияние нагрузки на ток к.з. Пуск двигателей как короткое замыкание. Взаимное влияние двигателей при пуске. Выяснить из каких слагающих состоит кривая изменения тока при внезапном к.з. в неразветвленной цепи, питаемой от источника бесконечной мощности, оценить характер их изменения во времени. Рассмотреть какое влияние оказывает предшествующий ток на величину апериодической слагающей тока к.з., какого максимального значения может достигать последняя. Уяснить при какой фазе включения и в какой момент времени после возникновения к.з. наступает максимум мгновенного значения полного тока. Рассмотреть определение эквивалентной постоянной времени $T_{а.-э}$ и ее практическую оценку. Изучить определение установившегося тока генератора при к.з. на его выводах при известных номинальных данных. Оценить влияние на режим к.з. нагрузки и ее в расчетах. Рассмотреть режимы генераторов при наличии АРВ в установившемся режиме к.з.

Тема 3. Определение составляющих тока к.з. в начальный момент времени. Расчет ударного тока короткого замыкания. Рассмотреть упрощающие условия, которые

принимают при определении ударного тока КЗ и что показывает ударный коэффициент, оценить каковы пределы его изменений. Уяснить какие упрощения принимают при определении действующих значений полных величин отдельных слагающих тока к.з. Получить представление о пренебрежение при расчетах токов к.з. контуром намагничивания трансформаторов

Тема 4. Метод типовых кривых. Определение токов к.з. для заданного момента времени. При расчётах режимов переходных процессов К.З., т.е. когда учитывается изменение процесса во времени от начального режима до установившегося режима К.З., обычно пользуются методом типовых кривых. Метод типовых кривых наиболее прост для практического применения, но он позволяет с достаточной точностью определять ток только в точке К.З. Следует уяснить, что для применения типовых кривых нужно определить расчётное сопротивление генерирующих ветвей, т.е. удалённость места К.З., приведённого к номинальным данным эквивалентных машин. При использовании метода типовых кривых ветви нагрузок не должны включать в схему замещения, так как построение кривых зависит от значения суммы сопротивлений (сверхпереходного сопротивления генератора и сопротивление ветви К.З.) . Оценить расчёт режима К.З. при нескольких источниках питания может производится по обобщённому методу путём замены нескольких источников питания одним эквивалентным. Выполнить индивидуальный учёт отдельных источников питания производится при резко отличающихся мощностях, удалённостях К.З., по типу генераторов (турбогенераторы и гидрогенераторы), наличии АРВ.

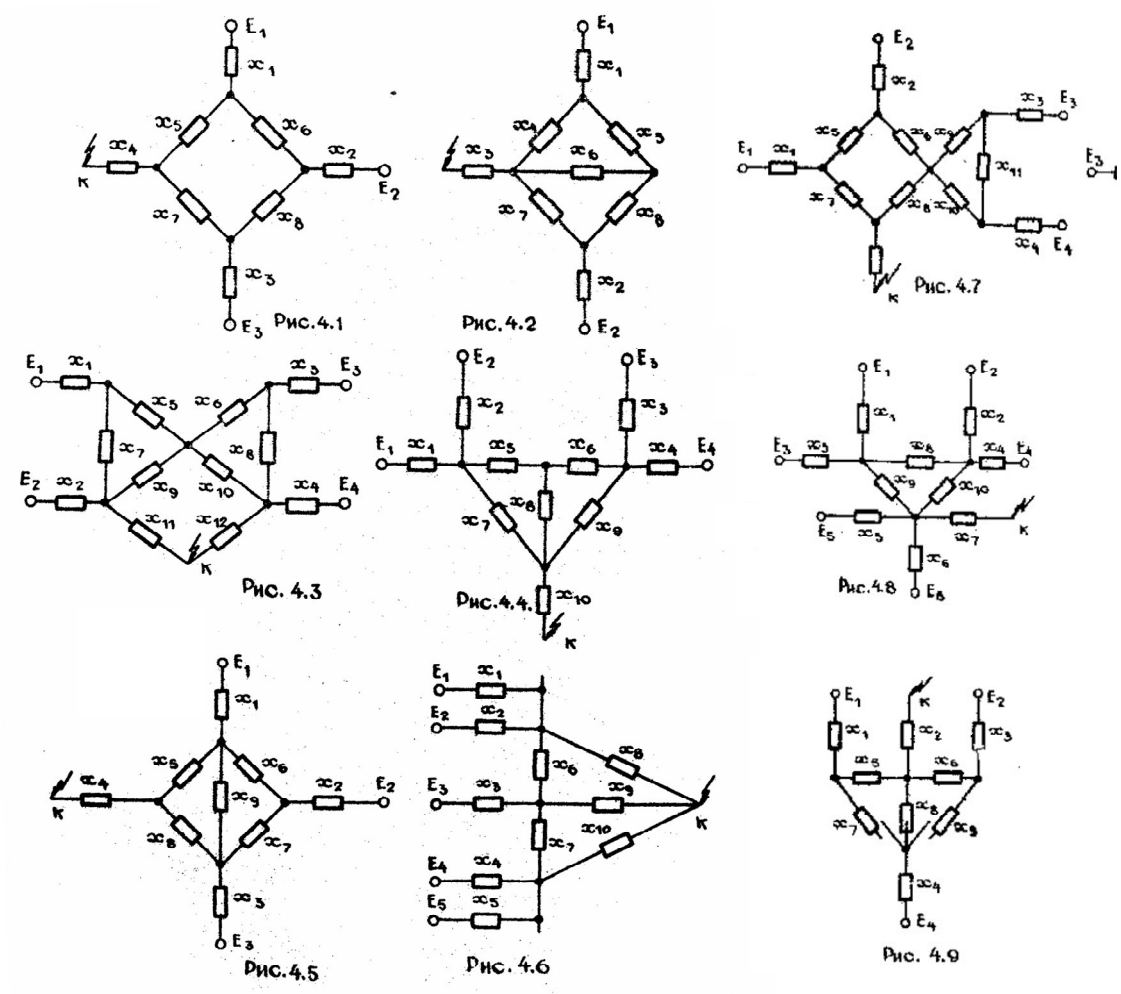
Тема 5. Способы ограничения токов к.з. Выбор параметров токоограничивающих реакторов. Рассмотреть мероприятия по ограничению токов КЗ. Выяснить, в каких случаях целесообразно использовать схемные решения, а когда – использовать токоограничивающие реакторы. Рассмотреть величины ограничиваемых токов КЗ в обоих случаях. Осуществить выбор параметров трансформаторов с расщепленной обмоткой, одинарных и сдвоенных реакторов с целью ограничения токов КЗ до приемлемых величин с точки зрения отключающей способности выключателей, термической и электродинамической стойкости.

Тема 6. Граничные условия и векторные диаграммы при несимметричных к.з. Расчет токов несимметричных к.з. Сопоставление несимметричных и трехфазных к.з. Комплексные схемы замещения при поперечной несимметрии. Рассмотреть применение метода симметричных составляющих для несимметричных трёхфазных систем токов и напряжений. Составить соответствующие комплексные схемы, из которых определяются токи некоторых эквивалентных трёхфазных К.З. согласно правилу эквивалентности тока прямой последовательности. Поэтому необходимо научится рассчитывать сопротивления и составлять схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей, а также комплексные схемы для основных видов несимметричного К.З. Оценить влияние на реактивность нулевой последовательности трансформатора: а) соединения обмоток б) конструкции магнитопровода. Разобраться почему реактивное сопротивление воздушной линии для токов нулевой последовательности значительно больше, чем для токов прямой и обратной последовательностей. Рассмотреть как изменяются векторные диаграммы токов и напряжений при переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y/Δ - II

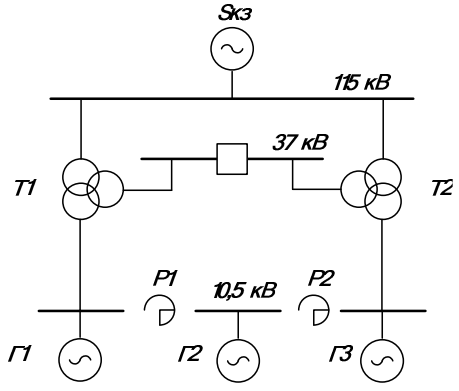
Тема 7. Переходные процессы при продольной несимметрии. Комплексные схемы замещения при продольной несимметрии. Следует хорошо усвоить правило эквивалентности прямой последовательности, согласно которому для расчёта переходного процесса при любом несимметричном коротком замыкании могут быть применены все практические методы и приёмы расчёта переходного процесса при трёхфазном коротком замыкании. Особое внимание уделить методу расчётных кривых. Составить комплексные схемы замещения для различных видов продольной несимметрии. Сравнить продольную несимметрию и установить аналогию с несимметричными короткими замыканиями.

Задания на самостоятельную работу

Задача 1. Для схем приведенных на рис., указать наиболее целесообразные пути их преобразования относительно точки к.з. для двух случаев: а) сопротивления и э.д.с. схем замещения одинаковы; б) сопротивления и э.д.с. схем замещения различны.



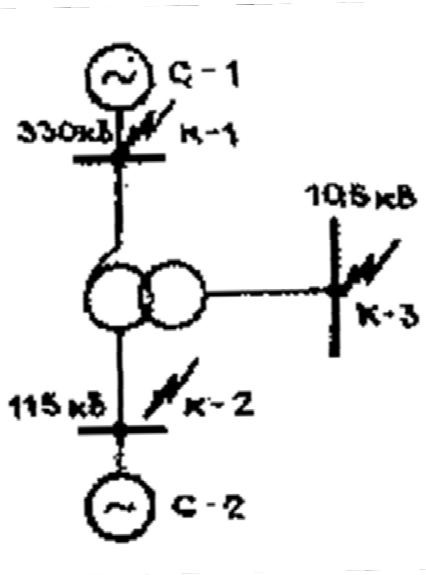
Задача 2. Для ограничения токов короткого замыкания при КЗ на стороне генераторного напряжения предполагается сборные шины 10,5 кВ разбить на 3 секции и смежные секции соединить через реакторы на номинальный ток 3000 А при номинальном напряжении 10 кВ. Получается при этом схема станции представленная на рис. Секционный выключатель на шинах 37 кВ нормально включен. Требуется определить, какой реактивности должны быть реакторы Р-1 и Р-2 (на указанные параметры они изготовляются с реактивностью 8,10,12%), чтобы при трехфазном к.з. на любой из секций шин 10,5 кВ величины начальных сверхпереходных токов были практически одинаковы.



№ варианта	**Трансформаторы**				**Система**	**Генераторы**		
	$S_н$, МВА	$U_{ВС}$, %	$U_{ВН}$, %	$U_{СН}$, %	$S_{кз}$, МВА	Р, МВт	Cos φ	x”d, о.е.
1	90	10	17	7	1100	40	0,8	0,13
2	70	11	16	5	1000	20	0,8	0,14
3	80	12	18	6	900	30	0,9	0,15
4	60	9	16	7	1200	30	0,9	0,16
5	100	8	15	7	1100	60	0,8	0,14
6	110	7	14	7	1300	65	0,85	0,15
7	120	10	17	7	900	70	0,9	0,13
8	90	1	16	5	800	45	0,75	0,19
9	80	12	15	6	700	35	0,8	0,20
10	70	9	18	8	1000	25	0,9	0,21

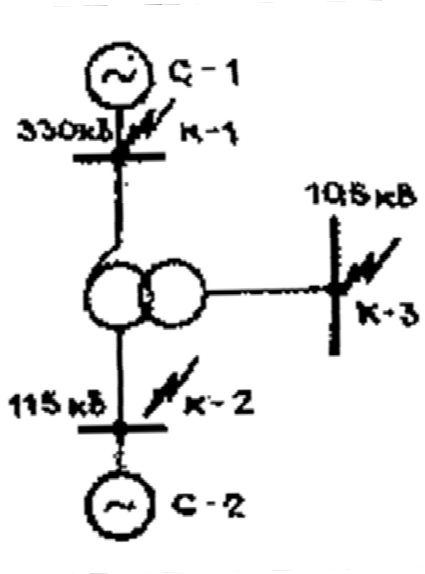
Задача 3. Автотрансформатор АТ схемы рис.4.11, имеющий параметры 120 МВА; 330/115/10,5 кВ; $U_{ВС}$ = 10%, $U_{ВН}$= 23,4%, $U_{СН}$=12%, связывает две системы С-1 и С-2. При этом известно, что в начальный момент трехфазного короткого замыкания в точке К-1 мощность короткого замыкания $S_н$=6800 МВА, К-2 мощность короткого замыкания $S_н$= 3900 МВА.

Определить мощность короткого замыкания при трехфазном коротком в точке К-3 заданной схемы. Исходные данные для расчета приведены в таблице.



№ варианта	**Трансформатор**				**Воздушные линии**		**Кабельная линия**		
	$S_н$	$U_{ВС}$	$U_{ВН}$	$U_{СН}$	l	$x_{уд}$	l	$x_{уд}$	$r_{уд}$
	МВА	%			км	Ом/км	км	Ом/км	Ом/км
1	200	10	17	8	100	0,4	0,9	0,3	0,06
2	190	11	16	6	110	0,45	0,8	0,4	0,08
3	180	12	18	7	110	0,4	0,7	0,5	0,1
4	170	9	10	8	130	0,45	0,9	0,3	0,06
5	160	8	15	9	140	0,4	0,8	0,4	0,08
6	150	7	14	8	130	0,45	0,7	0,5	0,1
7	140	10	17	8	110	0,4	0,6	0,3	0,06
8	130	11	16	6	120	0,45	0,5	0,4	0,08
9	120	12	15	7	90	0,4	0,4	0,5	0,1
10	110	9	18	9	150	0,45	0,9	0,3	0,06

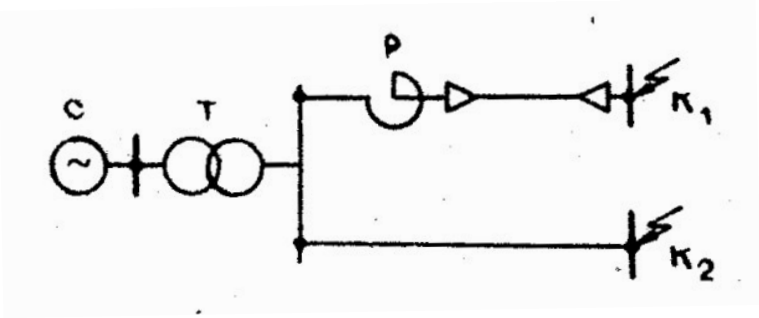
Задача 4. От шин трансформаторов, присоединенных к узлу системы С, отходят воздушные линии. Схема установки и параметры элементом приведены на рис.



Требуется определить $U_к$, % трансформатора Т-2 при условии, что при трехфазном коротком замыкании в конце каждой линии (точки $К_1$ и $К_2$) периодические слагающие токов будут одинаковы. Исходные данные для расчета приведены в табл.

№ вариа нта	**Трансформаторы**					**Воздушные линии**			
	Т1		Т		Т2	Л-1		Л-2	
	$S_н$	$U_к$	$S_н$	$U_к$	$S_н$	l	$x_{уд}$	l	$x_{уд}$
	МВА	%	МВА	%	МВА	км	Ом/км	Км	Ом/км
1	10	10	60	8	30	1,0	0,3	0,9	0,4
2	20	11	70	9	40	1,5	-	1,5	-
3	30	12	80	10	50	1,2	-	3	-
4	15	13	90	11	70	1,3	-	1,5	-
5	25	14	100	12	65	1,8	-	1,6	-
6	35	15	120	11	90	1,1	-	1,4	-
7	15	10	110	8	80	1,2	-	1,8	-
8	20	12	90	9	60	1,4	-	1,7	-
9	30	12	80	13	40	1,6	-	1,2	-
10	40	13	70	12	20	1,2	-	1,1	-

Задача 5. От шин трансформатора, присоединенного к узлу системы С, отходят воздушная линия и кабельная линия. Схема установки и параметры элементов приведены на рис. Требуется определить, какой реактивности должен быть выбран реактор Р, включаемый в цепь кабельной линии, чтобы при трехфазных коротких замыканиях в конце каждой линии (точки К1 и К2) периодические слагающие токов были одинаковы. Исходные данные для расчета приведены в табл.



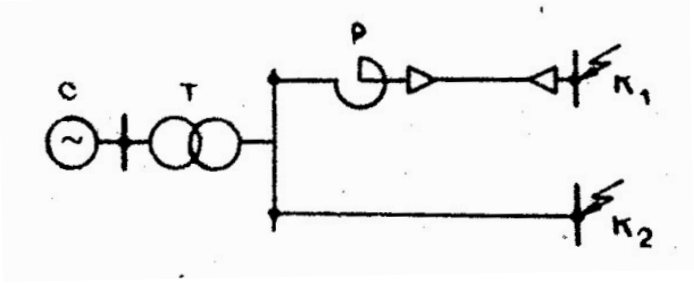
№ варианта	**Реактор**		**Кабельная линия**			**Воздушная линия**	
	$U_н$	$I_н$	l	$x_{уд}$	$r_{уд}$	l	$x_{уд}$
	кВ	кА	км	Ом/км	Ом/км	км	Ом/км
1	6,6	0,4	1	0,08	0.4	3	0.5
2	10	0,2	0,9	0,06	0.3	4	0.4
3	10,5	0,2	0,8	0,08	0.4	5	0.5
4	7	0,35	0,7	0,06	0.3	6	0.4
5	6,6	0,4	1,1	0,08	0.4	4	0.5
6	10	0,3	1,2	0,06	0.3	3	0.4
7	10,5	0,3	1,3	0,08	0.4	5	0.5
8	7	0,4	1,4	0,06	0.3	7	0.4
9	8	0,35	1,5	0,08	0.4	6	0.5
10	9	0,3	1,6	0,06	0.3	4	0.4

Задача 6. Известно, что при трехфазном коротком замыкании в некотором узле сети 115 кВ электрической системы начальная мощность короткого замыкания составляет 2000 МВА. К этому узлу предполагается присоединить понижающую подстанцию.
Требуется определить, какова может быть наибольшая номинальная мощность понижающего трансформатора этой подстанции ($U_к$=10,5), чтобы при трехфазном коротком замыкании за ним начальная мощность короткого замыкания не превышала 350 МВА.

Задача 7. В цепи установлен реактор Р1, параметры которого приведены в табл. Этот реактор предполагается заменять другим, Р2, с большим на 50% номинальным током. Определить какова должна быть реактивность этого реактора (в процентах) при номинальном напряжении 6,6 кВ и 10,5 кВ, чтобы после замены сопротивление цепи осталось прежним. Исходные данные для расчета приведены в табл.

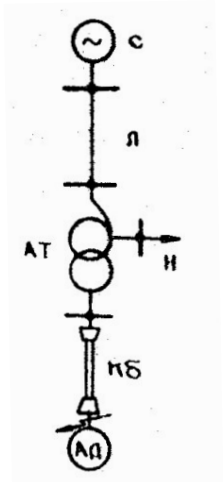
№ варианта		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Реактор Р1	$U_н$,кВ	6,6	6,7	7	2,6	8	6,6	6,9	7	7,1	6,9
	$I_н$,кА	0,15	0,2	0,25	0,2	0,18	0,14	0,12	0,35	0,4	0,5
	$X_р$,%	5	6	7	8	9	10	7	8	6	7

Задача 8. При трехфазном коротком замыкании в точке К (рис.) определить ударный ток к.з. и остаточное напряжение на шинах низшего напряжения подстанции. При этом учесть, что система – источник бесконечной мощности напряжением 230 кВ, напряжение короткого замыкания трансформатора: $U_{ВС}$ = 12,5%, $U_{ВН}$= 23,5%, $U_{СН}$=8,0%. Потери активной мощности в трансформаторе даны на фазу. Расчет выполнен в именованных и относительных единицах. Исходные данные для расчета приведены в табл.



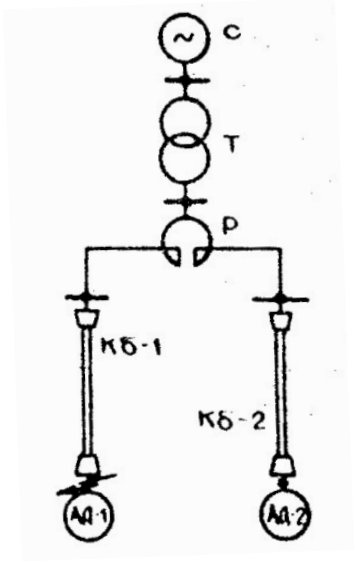
№ варианта	Трансформатор				Реактор				Кабель		Синхронный двигатель			Нагрузка
	$S_н$	$U_{нв}$	$U_{нс}$	$U_{нн}$	$I_н$	$U_н$	x	$P_н$	l	s	$P_н$	Cos φ	X"d	$S_у$
	МВА	кВ			А	кВ	%	кВт	м	А – мм^2	МВт	Отн.един		МВА
1	90	220	115	11	400	10	5	4,3	50	А-120	4,5	0,95	0,23	55
2	20	209	37	6,6	300	6	5	2,8	85	А-95	2,8	0,93	0,18	10
3	60	215	115	11	300	10	5	3,4	10	А-120	4,2	0,92	0,22	33
4	40	226	37	6,6	400	6	4	2,6	70	А-70	2,4	0,90	0,20	25
5	120	215	115	11	500	10	6	4,9	90	А-120	3,5	0,91	0,24	60
6	80	209	37	6,6	500	6	5	3,3	65	А-70	1,8	0,90	0,18	45
7	90	237	115	6,6	600	6	5	3,8	80	А-95	2,0	0,93	0,21	50
8	120	203	37	11	400	10	4	3,9	50	А-95	3,0	0,94	0,19	50
9	30	237	37	6,6	200	6	5	2,0	60	А-70	1,6	0,92	0,21	18

Задача 9. На зажимах асинхронного двигателя произошло трехфазное короткое замыкание. Определить ударный ток в месте к.з. и остаточное напряжение на шинах 6 кВ в начальный момент к.з. При расчетах учесть, что асинхронный двигатель работал с нагрузкой 70% и cos φ = 0,8. Система – источник бесконечной мощности. Для линии $\gamma_{уд}$=0,4 Ом/км. Использовать средние параметры обобщенной нагрузки. Расчет выполнить точным и приближенным приведением в относительных единицах.



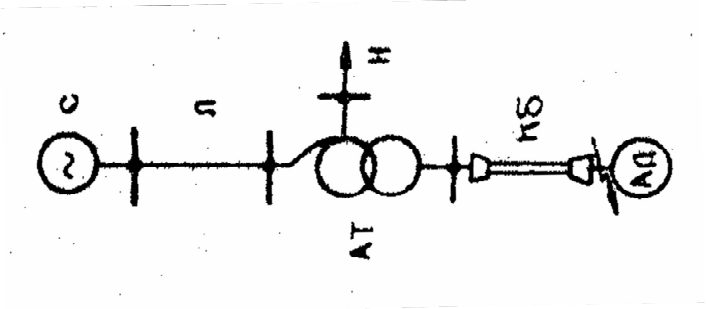
№ варианта	**Автотрансформатор**					**Асинхронный двигатель**				**Нагрузка**	**Линия**		**Кабель**	
	$S_н$	Номинальное напряжение обмоток	$U_{вс}$	$U_{вн}$	$U_{сн}$	$P_н$	Cos φ	$U_н$	$I_{пуск}$	$S_н$	Марка провода	l	Марка провода	l
	МВА	кВ	%			МВт	о.е.	кВ	о.е.	МВА	А-мм^2	км	А-мм^2	м
1	40	220 121 6,6	10	34	23	3,2	0,85	6	4,7	25	А-120	100	А-95	80
2	60	226 121 6,6	10	34	23	4,5	0,86	6	4,3	40	А-120	110	А-95	90
3	80	214 121 6,6	10	34	23	3,8	0,85	6	4,6	50	А-150	115	А-95	75
4	80	209 121 6,6	10	34	23	2,1	0,84	6	5,0	55	А-150	130	А-70	60
5	120	214 121 6,6	11	37	23	2,8	0,84	6	4,5	80	А-185	120	А-95	90
6	120	203 121 6,6	11	37	23	4,5	0,86	6	4,3	70	А-240	150	А-95	50
7	180	214 121 6,6	11	37	23	3,8	0,85	6	4,6	95	А-300	250	А-95	60
8	180	209 121 6,6	11	37	23	2,1	0,84	6	5,0	80	А-300	110	А-70	35

Задача 10. На выводах асинхронного двигателя АД-1 произошло трехфазное к.з. Определить величину ударного тока к.з. через 0,1 сек. В месте к.з., а также остаточное напряжение на шинах АД-2. При расчете учесть, что двигатель работает с номинальной нагрузкой. Система имеет мощность 200 МВА и $x''_{d\Sigma}$= 0.15. Потери короткого замыкания трансформатора принять равными 1% его полной мощности. Потери в реакторе даны на фазу, коэффициент связи равен 0,5. Параметры обеих кабельных линий одинаковы.



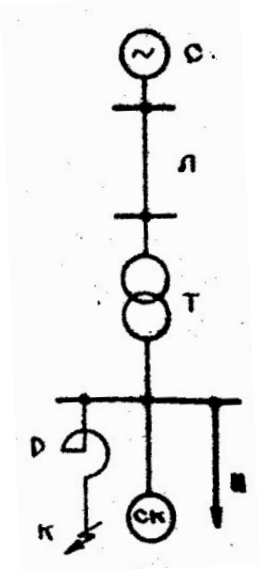
№ варианта	**Трансформатор**				**Реактор**				**Кабель**		**Двигатель**		
	$S_н$	$U_н$		$U_к$	$I_н$	$U_н$	x	$P_н$	l	s	$P_н$	Cos φ	$I_{ПУСК}$
	МВА	кВ		%	А	кВ	%	кВт	м	А–мм^2	МВт	Отн.един	
30	15,0	110	6,6	10,5	600	6	6	8,6	100	А-95	2,0	0,83	5,1
31	10,0	107	6,6	10,5	600	6	4	6,3	75	А-70	1,5	0,82	4,8
32	31,5	113	11	10,5	600	10	4	8,0	90	А-95	2,8	0,74	4,5
33	20,0	105	6,6	11,0	1000	6	4	8,5	125	А-95	1,8	0,82	5,0
34	40,5	110	11	17,0	1000	10	6	16,0	80	А-95	3,2	0,85	4,7
35	60,0	113	11	17,0	1000	10	4	11,1	150	А-120	4,5	0,86	4,3
36	40,5	105	6,6	10,5	600	6	4	6,3	60	А-70	2,1	0,84	5,0
37	70,0	110	11	10,5	1000	10	6	16,0	100	А-120	3,8	0,85	4,6
38	60,0	105	6,6	10,5	600	6	6	8,6	50	А-70	1,6	0,82	5,2

Задача 11. На зажимах асинхронного двигателя произошло трехфазное короткое замыкание. Определить периодическую составляющую тока при пуске асинхронного двигателя и максимальное значение его пускового тока. При расчетах учесть, что асинхронный двигатель работал с нагрузкой 70% и cos φ = 0,8. Система – источник бесконечной мощности. Для линии $\gamma_{уд}$=0,4 Ом/км. Использовать средние параметры обобщенной нагрузки. Расчет выполнить точным и приближенным приведением в относительных единицах.



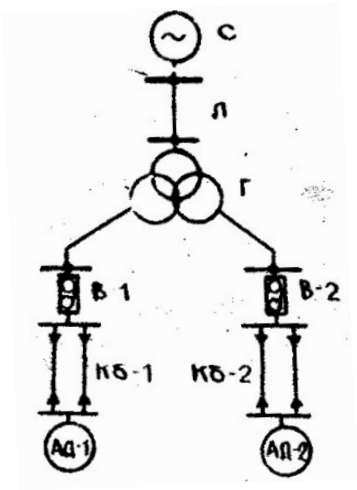
вариант	Автотрансформатор					Двигатель				Нагрузка	Линия		Кабель	
	$S_н$	$U_{ном}$ обмоток	$U_{вс}$	$U_{вн}$	$U_{сн}$	$P_н$	Cos φ	$U_н$	$I_{пуск}$	$S_н$	Марка провода	l	Марка провода	l
	МВА	кВ	%			МВт	о.е.	кВ	о.е.	МВА	А-мм^2	км	А-мм^2	м
1	40	220/121/6,6	10	34	23	3,2	0,85	6	4,7	25	А-120	100	А-95	80
2	60	226/121/6,6	10	34	23	4,5	0,86	6	4,3	40	А-120	110	А-95	90
3	80	214/121/6,6	10	34	23	3,8	0,85	6	4,6	50	А-150	115	А-95	75
4	80	209/121/6,6	10	34	23	2,1	0,84	6	5,0	55	А-150	130	А-70	60
5	120	214/121/6,6	11	37	23	2,8	0,84	6	4,5	80	А-185	120	А-95	90
6	120	203/121/6,6	11	37	23	4,5	0,86	6	4,3	70	А-240	150	А-95	50
7	180	214/121/6,6	11	37	23	3,8	0,85	6	4,6	95	А-300	250	А-95	60
8	180	209/121/6,6	11	37	23	2,1	0,84	6	5,0	80	А-300	110	А-70	35

Задача 12. При трехфазном коротком замыкании в точке К (рис.4.17) определить наибольшее значение периодической составляющей тока и остаточное напряжение на шинах подстанции. При расчете принять, что система – источник бесконечной мощности. Потери активной мощности в реакторе даны на одну фазу. Нагрузку рассмотреть как обобщенную. Напряжение короткого замыкания трансформатора $U_к$= 10%.



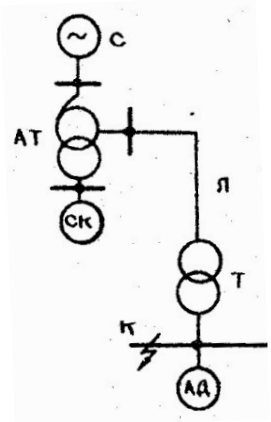
вариант	Трансформатор		Синхронный компенсатор				Нагрузка	Реактор				Линия	
	$S_н$	Номинальное напряжение	$S_н$	$U_н$	x”d	$S_{нагр}$	$S_н$	$I_н$	$U_н$	x	$P_н$	S	l
	МВА	кВ	МВА	кВ	О.е.	МВАр	МВА	А	кВ	%	кВт	АС-мм^2	км
1	40	105 6,6	5,0	6,3	0,16	4,5	30	400	6	4	2,6	АС-95	100
2	40	107 11,0	15,0	10,5	0,15	12,0	35	300	10	4	3,2	АС-95	70
3	60	113 6,6	10,0	6,6	0,20	8,0	50	500	6	5	3,8	АС-120	50
4	60	110 1,0	15,0	10,5	0,18	10,0	45	400	10	4	3,9	АС-120	75
5	90	107 6,6	15,0	6,6	0,15	15,0	75	500	6	5	3,8	АС-185	60
6	90	110 11,0	30,0	10,5	0,27	25,0	70	400	10	5	4,3	АС-185	40

Задача 13. Определить периодическую слагающую тока при одновременном пуске двух двигателей (рис.) и максимальное мгновенное значение тока на высокой стороне трансформатора в этих условиях. Найти напряжение на зажимах двигателей в этих условиях и выбрать реактор для сети 6 кВ, обеспечивающей снижение тока трансформатора в рассматриваемых условиях на 25%. При расчете принять, что система имеет мощность 300 МВА и $x''_{d\Sigma}$=0,32. Сопротивление шины 0,4 Ом/км.



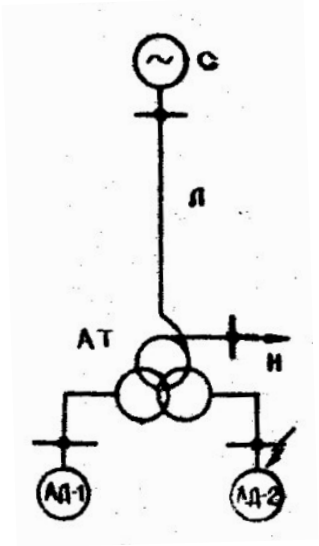
вариант	**Трансформатор**			**Асинхронный двигатель**				**Кабель**		**Линия**		**Система**
	$S_н$	Номинальное напряжение	$U_к$	$P_н$	cosφ	$U_н$	$I_{ПУСК}$	A-n*s	$l_{нб}$	Марка провода	l	$U_с$
	МВА	кВ	%	кВт	д.е.	кВ	о.е.	А-мм^2	м	АС-120	км	кВ
1	10	113 6.6	10.5	4*200	0.85	6.0	5.0	А-2*150	100	АС-120	100	106
2	15	110 6.6	10.5	4*200	0.85	6.0	5.1	А-2*150	80	АС-120	60	110
3	20	107 6.6	10.5	5*000	0.84	6.0	4.8	А-2*150	65	АС-120	70	105
4	30	220 6.6	12.0	5*500	0.86	6.0	5.0	А-2*150	50	АС-120	150	210
5	40	226 6.6	12.0	5*500	0.86	6.0	5.0	А-2*150	70	АС-120	110	215
6	60	214 6.6	12.0	7*500	0.85	6.0	4.6	А-2*185	50	АС-150	140	205
7	90	205 6.6	12.0	8*700	0.87	6.0	4.5	А-3*150	60	АС-150	120	207

Задача 14. Определить максимальное значение тока трехфазного короткого замыкания в точке К (рис.) и остаточное напряжение на зажимах СК. При расчете принять: система – источник бесконечной мощности; для автотрансформатора $U_{вс}$=8%, $U_{вн}$=28%, $U_{сн}$=18%; для трансформатора $U_к$=10%. Считать, что для шин кВ $x_{уд}$=0,4 Ом/км.



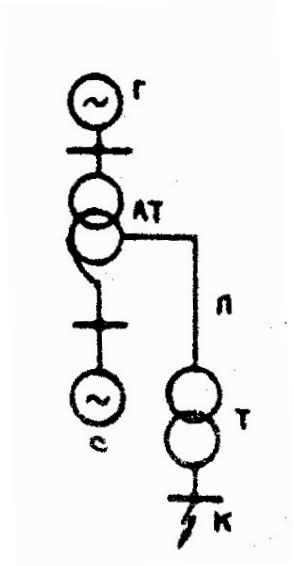
№ варианта	**Автотрансформатор**				**Синхронный компенсатор**			**Трансформатор**		**Асинхронный двигатель**				**Линия**
	$S_н$	Номинальное напряжение			$S_н$	$U_н$	x”d	$S_н$	Номинал. напряжение	$P_н$	cosφ	$U_н$	$I_{ПУСК}$	l
	МВА	кВ			МВА	кВ	о.е	МВА	кВ	МВт	д.е	кВ	о.е	км
1	30	220	121	11	15	10,5	0,18	15	110 6,6	3,5	0,85	6	5,5	100
2	30	226	121	11	15	10,5	0,18	20	113 6,6	4,2	0,84	6	5,0	85
3	60	214	121	11	30	10,5	0,27	30	107 6,6	5,5	0,86	6	5,0	110
4	60	226	121	11	30	10,5	0,27	20	113 6,6	3,8	0,84	6	5,4	70
5	90	220	121	11	30	10,5	0,27	30	110 6,6	4,5	0,86	6	6,0	125
6	90	205	121	11	75	10,5	0,19	20	107 3,3	3,0	0,82	3	5,8	130
7	120	220	121	11	75	10,5	0,19	60	110 6,6	7,5	0,85	6	4,6	65

Задача 15. При трехфазном коротком замыкании в точке К (рис.) определить величину ударного тока к.з. и остаточное напряжение на нагрузке для рассматриваемых условий. При расчетах принять, что система – источник бесконечной мощности; удельное сопротивление линии – 0,4 Ом/км; нагрузку на шинах 110 кВ рассматривать как обобщенную.



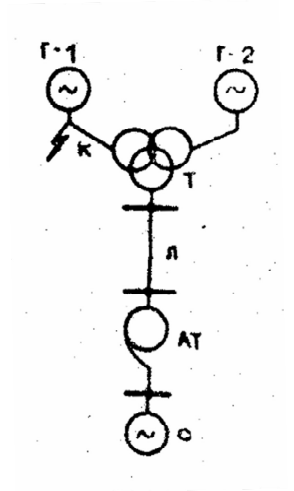
№ варианта	**Автотрансформатор**							**Асинхронный двигатель**				**Нагрузка**	**Линия**
	$S_н$	Номинальное напряжение			$U_{вс}$	$U_{вн}$	$U_{сн}$	$P_н$	cosφ	$U_н$	$I_{ПУСК}$	$S_н$	l
	МВА	кВ			%	%	%	МВт	д.е	кВ	о.е	МВА	км
1	90	154	121	6,6	4	42	38	7,5	0,85	6	4,6	60	170
2	90	220	121	6,6	10	34	23	5,8	0,86	6	5,0	50	200
3	120	226	121	6,6	11	37	23	6,0	0,85	6	4,9	85	160
4	120	205	121	6,6	11	37	23	4,5	0,86	6	6,0	70	180
5	60	214	121	6,6	11	37	23	3,5	0,85	6	5,5	35	210
6	180	220	121	6,6	13	12	18	7,5	0,85	6	4,6	100	130
7	180	205	121	6,6	13	12	18	6,0	0,85	6	4,9	90	175

Задача 16. При поочередном трехфазном и двухфазном к.з. в точке К схемы (рис.) построить кривые изменения во времени токов к.з. в месте к.з. При расчетах учесть, что напряжения короткого замыкания автотрансформатора равны $U_{вс}$=11%, $U_{вн}$=37%, $U_{сн}$=23%; для трансформатора Т $U_к$=10,5%. Для линии принять $x_{уд}$=0,4 Ом/км.



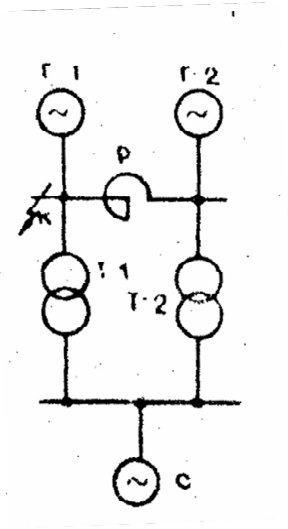
вариант	**Генератор**		**Автотрансформатор**			**Трансформатор**		**Линия**	**Система**
	$S_н$	$U_н$	x”d	Номинальное напряжение		$S_н$	Номинальное напряжение	l	$x_с$
	МВА	кВ	о.е	$S_н$, МВА	кВ	МВА	кВ	км	Ом
1	235.0	15.75	0.19	240	230/115/15.75	90	115 10.5	30	26.0
2	111.0	13.80	0.22	120	230/115/13.80	60	115 10.5	45	35.0
3	166.5	18.00	0.12	180	230/115/18.00	75	115 6.3	40	22.0
4	117.5	10.50	0.18	120	230/115/10.50	40	115 6.3	50	40.5
5	71.5	13.80	0.21	80	230/115/13.80	40	115 10.5	65	37.0
6	353.0	20.00	0.20	360	230/115/20.00	20	115 10.5	60	15.0
7	264.7	15.75	0.24	300	230/115/15.75	90	115 6.3	40	18.5
8	176.5	1800	0.21	180	230/115/18.00	80	115 6.3	55	13.2
9	587.5	20.00	0.23	600	500/230/20.00	180	230 10.5	100	2.8

Задача 17. При трехфазном коротком замыкании в точке К определить наибольшее значение периодической составляющей тока и остаточное напряжение на шинах подстанции. При расчете принять, что система – источник бесконечной мощности. Напряжение короткого замыкания трансформатора $U_к$= 10%.



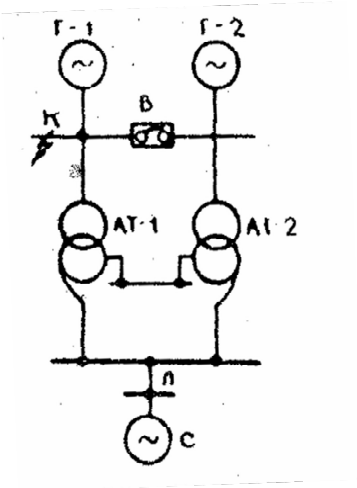
№ варианта	**Генераторы Г-1, Г-2**			**Трансформатор**			**Автотранс-форматор**		**Линия**
	$S_н$	$U_н$	x”d	$S_н$	Ном. напряжение		$S_н$	Ном. напряжение	l
	МВА	кВ	о.е	МВА	кВ		МВА	кВ	км
1	117,5	13,8	0,18	240	230	13,8	500	230	110
2	166,3	18,0	0,12	360	230	18,0	500	230	85
3	71,3	13,8	0,21	120	230	13,8	500	230	175
4	111,0	13,8	0,22	180	230	13,8	500	230	130
5	66,0	10,5	0,21	120	230	10,5	500	230	150
6	123,5	13,8	0,14	240	230	13,8	500	230	80
7	85,5	15,75	0,23	180	230	15,75	500	230	125
8	176,5	18,0	0,21	360	230	18,0	500	230	100
9	75,0	6,3	0,22	120	230	6,3	500	230	160

Задача 18. При двухфазном коротком замыкании в точке К (рис.) построить кривые изменения во времени токов к.з.



№ варианта	**Генераторы Г-1, Г-2**			**Трансформаторы Т-1, Т-2**			**Реактор**			**Система**
	$S_н$	$U_н$	x”d	$S_н$	Ном. Напряжение	$U_к$	$I_н$	$U_н$	X	X_0
	МВА	кВ	о.е	МВА	кВ	%	А	кВ	%	Ом
1	62,5	10,5	0,14	60,0	230 10,5	14	3000	10	12	24,0
2	75,0	10,5	0,13	60,0	230 10,5	13	3000	10	10	18,5
3	37,5	6,3	0,15	40,0	115 6,3	10,5	2500	6	12	8,2
4	66,0	10,5	0,21	60,0	115 10,5	10,5	3000	10	12	5,8
5	31,3	6,3	0,13	30,0	115 6,3	10,5	2000	6	8	6,7
6	20,0	6,3	0,22	30,0	115 6,3	10,5	1500	10	8	4,6
7	50,0	10,5	0,20	40,0	230 10,5	13	2000	10	10	15,0
8	71,5	10,5	0,21	60,0	230 10,5	14	4000	10	12	13,1
9	37,5	6,3	0,14	60,0	115 6,3	10,5	3000	10	8	7,3

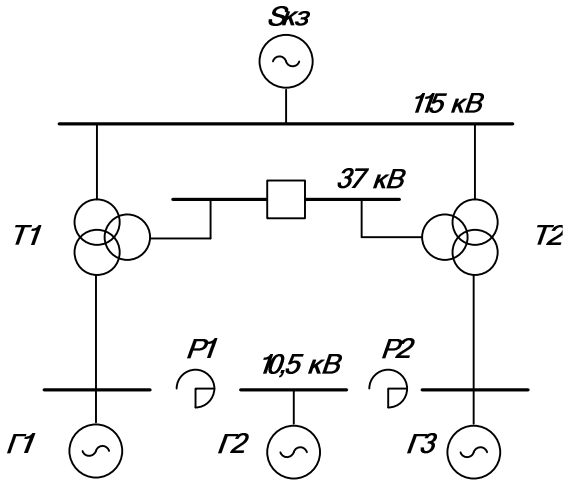
Задача 19. При двухфазном коротком замыкании на землю в точке К построить кривые изменения во времени токов к.з.



№ варианта	**Генераторы Г-1, Г-2**			**Автотрансформаторы АТ-1,2**							**Линия**
	$S_н$	$U_н$	x”d	$S_н$	Ном. напряжение обмоток			$U_{вс}$	$U_{вн}$	$U_{сн}$	l
	МВА	кВ	о.е	МВА	кВ			%	%	%	км
1	62,5	6,3	0,14	40	230	115	6,3	10,0	34,0	24,0	100
2	66,0	6,3	0,21	60	230	115	6,3	10,0	34,0	24,0	85
3	71,5	10,5	0,22	80	230	115	10,5	10,0	34,0	24,0	110
4	117,5	10,5	0,17	80	230	115	10,5	10,0	34,0	24,0	75
5	123,5	13,8	0,16	120	230	115	13,8	12,0	37,0	25,0	60
6	111,0	13,8	0,22	90	230	115	13,8	10,0	34,0	24,0	90
7	176,5	18,0	0,21	120	230	115	18,0	12,0	37,0	25,0	50
8	166,5	18,0	0,13	180	230	115	18,0	13,0	12,0	18,0	65
9	235,0	18,0	0,19	240	230	115	18,0	13,0	12,0	18,0	50

Задача 20. Для схемы и данных ее элементов, приведенных в табл. составить схемы замещения нулевой последовательности при однофазном к.з. на зажимах генератора Г-1. Определить величину тока к.з. в заданных условиях для разных моментов времени. При расчетах считать, что генераторы и система имеют глухозаземленную нейтраль. Схема соединения обмоток Г-1 и Г-2 - звезда с нулем. Схема соединения обмоток трансформаторов Y0-Y0-Y0.

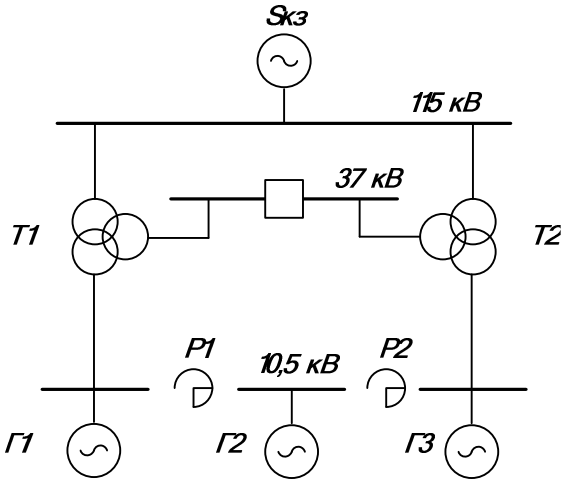
Реакторы Р-1 и Р-2 одинаковые и имеют следующие параметры: $U_н$ = 10,5 кВ, $I_н$ = 2000 А, $x_р$ == 6%; сопротивление нулевой последовательности генератора Хо = 4,5X_d “.



№ варианта	Трансформаторы				Система	Генераторы		
	$S_н$	$U_{ВС}$	$U_{ВН}$	$U_{СН}$	$S_{кз}$	P	Cos φ	x”d
	МВА	%			МВА	МВт	О.е.	
1	90	10	17	7	1100	40	0,8	0,13
2	70	11	16	5	1000	20	0,8	0,14
3	80	12	18	6	900	30	0,9	0,15
4	60	9	16	7	1200	30	0,9	0,16
5	100	8	15	7	1100	60	0,8	0,14
6	110	7	14	7	1300	65	0,85	0,15
7	120	10	17	7	900	70	0,9	0,13
8	90	1	16	5	800	45	0,75	0,19
9	80	12	15	6	700	35	0,8	0,20
10	70	9	18	8	1000	25	0,9	0,21

Задача 21. Для схемы и данных ее элементов, приведенных в табл. составить схемы замещения нулевой последовательности при однофазном к.з. на зажимах генератора Г-1. Определить величину тока к.з. в заданных условиях для разных моментов времени. При расчетах считать, что генераторы и система имеют глухозаземленную нейтраль. Схема соединения обмоток Г-1 и Г-2 - звезда с нулем. Схема соединения обмоток трансформаторов Д0-Y0-Y0.

Реакторы Р-1 и Р-2 одинаковые и имеют следующие параметры: $U_н$ = 10,5 кВ, $I_н$ = 2000 А, $x_р$ == 6%; сопротивление нулевой последовательности генератора Хо = 4,5X_d “.



№ варианта	Трансформаторы				Система	Генераторы		
	$S_н$	$U_{ВС}$	$U_{ВН}$	$U_{СН}$	$S_{кз}$	P	Cos φ	x”d
	МВА	%			МВА	МВт	О.е.	
1	90	10	17	7	1100	40	0,8	0,13
2	70	11	16	5	1000	20	0,8	0,14
3	80	12	18	6	900	30	0,9	0,15
4	60	9	16	7	1200	30	0,9	0,16
5	100	8	15	7	1100	60	0,8	0,14
6	110	7	14	7	1300	65	0,85	0,15
7	120	10	17	7	900	70	0,9	0,13
8	90	1	16	5	800	45	0,75	0,19
9	80	12	15	6	700	35	0,8	0,20
10	70	9	18	8	1000	25	0,9	0,21

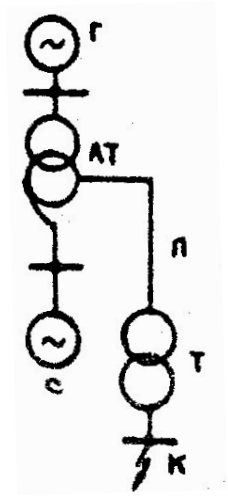
Задача 22. Для схемы и ее данных, приведенных в табл. определить величину периодической составляющей тока однофазного к.з. при к.з. поочередно в точках К1, К2, К3 при условии, что системы С1 и С2 имеют заземленную нейтраль и их сопротивления нулевой последовательности $x_{0\Sigma}$=6х" для схемы соединения обмоток трансформатора Y_0 / Y_0 и Y_0 /Δ Автотрансформатор АТ схемы имеющий параметры 120 МВА; 330/115/10,5 кВ; $U_{ВС}$ = 10%, $U_{ВН}$= 23,4%, $U_{СН}$=12%, связывает две системы С-1 и С-2. При этом известно, что в начальный момент трехфазного короткого замыкания в точке К1 мощность короткого замыкания $S_н$=6800 МВА, К2 мощность короткого замыкания $S_н$= 3900 МВА.

№ варианта	**Трансформатор**				**Воздушные линии**		**Кабельная линия**		
	$S_н$	$U_{ВС}$	$U_{ВН}$	$U_{СН}$	l	$x_{уд}$	l	$x_{уд}$	$r_{уд}$
	МВА	%			км	Ом/км	км	Ом/км	Ом/км
1	200	10	17	8	100	0,4	0,9	0,3	0,06
2	190	11	16	6	110	0,45	0,8	0,4	0,08
3	180	12	18	7	110	0,4	0,7	0,5	0,1
4	170	9	10	8	130	0,45	0,9	0,3	0,06
5	160	8	15	9	140	0,4	0,8	0,4	0,08
6	150	7	14	8	130	0,45	0,7	0,5	0,1
7	140	10	17	8	110	0,4	0,6	0,3	0,06
8	130	11	16	6	120	0,45	0,5	0,4	0,08
9	120	12	15	7	90	0,4	0,4	0,5	0,1
10	110	9	18	9	150	0,45	0,9	0,3	0,06

Задача 23. Для схемы рис. и ее данных, приведенных в табл. сопоставить величины ударных токов к.з. При к.з. в точке К1 при поочередных трехфазных, двухфазных и однофазных к.з. При расчетах принять, что система имеет бесконечную мощность, заземленную нейтраль, а схема соединения обмоток трансформаторов Т-1 и Т-2
От шин трансформаторов, присоединенных к узлу системы С, отходят воздушные линии. Схема установки и параметры элементом приведены на рис.
.

№ варианта	**Трансформаторы**					**Воздушные линии**			
	Т1		Т		Т2	Л-1		Л-2	
	$S_н$	$U_к$	$S_н$	$U_к$	$S_н$	l	$x_{уд}$	l	$x_{уд}$
	МВА	%	МВА	%	МВА	км	Ом/км	Км	Ом/км
1	10	10	60	8	30	1,0	0,3	0,9	0,4
2	20	11	70	9	40	1,5	-	1,5	-
3	30	12	80	10	50	1,2	-	3	-
4	15	13	90	11	70	1,3	-	1,5	-
5	25	14	100	12	65	1,8	-	1,6	-
6	35	15	120	11	90	1,1	-	1,4	-
7	15	10	110	8	80	1,2	-	1,8	-
8	20	12	90	9	60	1,4	-	1,7	-
9	30	12	80	13	40	1,6	-	1,2	-
10	40	13	70	12	20	1,2	-	1,1	-

Задача 24. Для схемы рис. и ее данных, приведенных в табл. сопоставить величины ударных токов к.з. При к.з. в точке К1 при поочередных трехфазных, двухфазных и однофазных к.з. При расчетах принять, что система имеет бесконечную мощность, заземленную нейтраль, а схема соединения обмоток трансформаторов Т-1 и Т-2 Y0/Y0.
Сопротивление нулевой последовательности генератора $X_0 = 5X_d$ “.
При расчетах учесть, что напряжения короткого замыкания автотрансформатора равны $U_{вс}$=11%, $U_{вн}$=37%, $U_{сн}$=23%; для трансформатора Т $U_к$=10,5%. Для линии принять $x_{уд}$=0,4 Ом/км.



№ варианта	**Генератор**		**Автотрансформатор**			**Трансформатор**		**Линия**	**Система**
	$S_н$	$U_н$	x”d	Номинальное напряжение		$S_н$	Номинальное напряжение	l	$x_с$
	МВА	кВ	о.е	$S_н$, МВА	кВ	МВА	кВ	км	Ом
1	235.0	15.75	0.19	240	230|115|15.75	90	115 10.5	30	26.0
2	111.0	13.80	0.22	120	230|115|13.80	60	115 10.5	45	35.0
3	166.5	18.00	0.12	180	230|115|18.00	75	115 6.3	40	22.0
4	117.5	10.50	0.18	120	230|115|10.50	40	115 6.3	50	40.5
5	71.5	13.80	0.21	80	230|115|13.80	40	115 10.5	65	37.0
6	353.0	20.00	0.20	360	230|115|20.00	20	115 10.5	60	15.0
7	264.7	15.75	0.24	300	230|115|15.75	90	115 6.3	40	18.5
8	176.5	1800	0.21	180	230|115|18.00	80	115 6.3	55	13.2
9	587.5	20.00	0.23	600	500|230|20.00	180	230 10.5	100	2.8

7. Перечень программных продуктов, реально используемых в практике деятельности выпускников

В процессе обучения студенты используют промышленные разработки необходимые для последующей их реализации в практической деятельности:

1. Учебные программные комплексы для ПЭВМ, разработанные кафедрой энергетики: "ZAPUSK", "CURSE2", "KRNET", "TKZ3000", "Механическая часть ВЛ", "Расчет электрической сети", а также программные комплексы других ВУЗов, ориентированные на преподавателей, студентов и людей, занимающихся самоподготовкой в области электроснабжения, такие как Elsnab8 "Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей" и ACPE – Account of the course project on electro supply. Программа для автоматизации расчетов курсового проекта по электроснабжению сельских населенных пунктов. Эти программы защищены авторскими правами, сертифицированы и являются бесплатными при использовании в некоммерческих целях.
2. Промышленные программно-вычислительные комплексы: "SDO-6", "RASTR" и Пакет автоматизации математических расчетов «MathCad».

Основными компьютерными программами для выполнения курсового проекта являются:

1. Программа расчета для PC "ZAPUSK" – Расчеты систем электроснабжения.

Программа разработана в Приазовском государственном техническом университете и Амурском государственном университете. Авторы программного комплекса: Савина Н.В., Мясоедов Ю.В., Подгорный А.А. Программа позволяет произвести расчет мощности трехфазных и однофазных электрических нагрузок силовой и осветительной сети, определить координаты центра электрических нагрузок, осуществить технико-экономическое сравнение вариантов распределительной сети. В программе предусмотрена возможность выполнить расчёты токов трехфазного и однофазного к.з.

2. Программа расчета для PC Elsnab8 "Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей".

Программа разработана в Ставропольском государственном аграрном университете. Авторы программного комплекса: Лысаков А.А., Коноплёв Е.В., Нагорный А.В., Ивашин А.В. Данный программный комплекс предназначен для расчета сельскохозяйственных сетей ВН и НН и расчета электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.

Программа позволяет произвести расчет высоковольтных сельскохозяйственных сетей с трансформаторными подстанциями и соответственно с их потребителями, а так же представлен расчет низковольтной сети трансформаторной подстанции с низковольтными потребителями. Программа рекомендуется для внедрения в учебный процесс на факультетах электрификации и автоматизации, а так же на любых других, имеющих дисциплину "Электроснабжение". Программа запатентована (Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612738 "Электроснабжение сельского хозяйства") и скоро намечается ее выход под грифом УМО.

3. ACPE – Account of the course project on electro supply. Программа для автоматизации расчетов курсового проекта по электроснабжению сельских населенных пунктов.

Программа разработана в Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. Авторы программного комплекса: Наумов И.В., Шпак Д.А., Лыткин А.А.

Программа позволяет произвести расчет мощности нагрузки жилых домов, определить координаты места установки ТП, выполнить расчёт электрических нагрузок, осуществить выбор сечений проводов ВЛ, провести проверку сети на допустимые колебания напряжения при пуске двигателя. В программе предусмотрена возможность выполнить расчёты токов трехфазного и однофазного к.з. и на их основе произвести расчёт заземляющего устройства.

8. Методические указания по применению современных информационных технологий

1. Компьютерный учебный лабораторный комплекс по переходным процессам.
2. Презентации, слайды, технические характеристик, каталоги по электрическому оборудованию, типовые проекты ОАО «ПО Элтехника» (Санкт-Петербург), ОАО «Чебоксарский электроаппаратный завод», ОАО «Ангарский электроаппаратный завод».
3. Электронные схема системы электроснабжения и план города Благовещенска.
4. Схемы, таблицы, рисунки под медиакомплекс.
5. Тренажер городской распределительной электрической сети.
6. Плакаты по дисциплине.
7. Комплект индивидуальных заданий по дисциплине.
8. Ю.В. Мясоедов. Электронный учебник «Переходные процессы».
9. Учебные и промышленные программно-вычислительные комплексы "ZAPUSK", , "TKZ3000", "Elsnab8", "ACPE", "AZOV", а также пакет автоматизации математических расчетов «MathCad».

9. Методические указания по организации межсессионного контроля знаний студентов

В процессе изучения дисциплины предусмотрены следующие виды промежуточного контроля знаний студентов:

пятиминутный блиц-опрос опрос студентов на каждой лекции по пройденному материалу;

выполнение 4 контрольных работ по рассмотренным темам;

проведение 2 коллоквиумов по лекционному материалу;

студенты, не посещающие лекционные и практические занятия, представляют рефераты по пропущенным темам;

выполнение индивидуальных домашних заданий с последующей их защитой;

комплексные задания по разработке подстанции.

Блиц – опрос проводится в начале каждой лекции в течение 5 минут, вопросы, выносимые на опрос, формулируются из материала лекции, при этом на лекциях для студентов указывается по каким разделам лекционного материала будет проводиться опрос и формулируются сами вопросы.

Контрольные работы предусматриваются по следующим темам:

составление и преобразование схем замещения;

расчет токов трехфазных КЗ;

расчет токов несимметричных коротких замыканий;

метод типовых кривых.

Коллоквиумы включают в себя вопросы посвященные как ранее изученным разделам в других дисциплинах с точки зрения использования полученных знаний в области переходных процессов, так и по структурным разделам курса: симметричные и несимметричные КЗ. ». Вопросы на коллоквиумы представлены в разделе 11.

Рефераты по пропущенным темам выполняются студентами по тематике пропущенных лекций.

10. Фонд тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний

Фонд тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний по дисциплине входит составной частью в фонд тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний по специальности 140211 – Электроснабжение, утвержденный УМО по образованию в области энергетики и электротехники.

Контрольные экзаменационные задания (КЭЗ) представлены либо как единая ситуационная задача, требующая построения алгоритма решения в виде последовательно описываемых этапов, каждый из которых характеризует технологическую или (и) конструктивную проблему, либо состоят из отдельных вопросов, составленных таким образом, чтобы выбор охватываемых ими проблем обеспечивал проверку умений по тем базовым и специальным дисциплинам, которые формируют профессиональный уровень выпускника (т.е. несут в себе информацию, непосредственно связанную с обобщенными задачами профессиональной деятельности будущих специалистов).

Ответы на вопросы контрольных заданий обязательно требуют от экзаменуемых использования знаний и умений по дисциплине. Вопросы КЭЗ не имеют рецептурно-справочный характер. Во всех случаях в КЭЗ нет вопросов, не соответствующих хотя бы одному из требований к знаниям и умениям студентов.

Все КЭЗ индивидуальны и повторяющихся вопросов нет. При этом вопросы составлены так, чтобы трудоемкость требуемых конкретных ответов всех КЭЗ была приблизительно одинакова. Вопросы имеют как качественный, так и количественный характера (в виде задач).

Задачи для решения четко сформулированы, имеют совершенно определенную физическую и инженерную основу. Они имеют однозначный ответ, получение которого не требует громоздких вычислений.

В тексте задач нет сведений справочного характера и подсказок о теоретических принципах решения, поскольку именно они должны быть самостоятельно найдены экзаменуемым.

Результаты ответа на контрольное задание определяются дифференцированно (по 4-х балльной системе): оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно», которые объявляются в тот же день.

Оценка «отлично» выставляется студенту при условии решения всех заданий с использованием современных методов расчета, нормативных и организационных документов, проявившему инженерный и творческий подход к поставленным задачам и обоснованность принятых решений.

Оценка «хорошо» выставляется студенту при условии решения 80% заданий с использованием современных методов расчета, нормативных и организационных документов, использовавшему стандартные и типовые инженерные решения и обосновавшему принятые решения с технико-экономической точки зрения.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту при условии решения не менее 50% заданий с использованием современных методов расчета, нормативных и организационных документов, использовавшему стандартные и типовые инженерные решения.

В случае несоблюдения вышеуказанных критериев студенту выставляется оценка «неудовлетворительно».

Критерии оценки должны быть единообразны по всем вопросам контрольных заданий, а их основополагающим принципом при ответе на качественный вопрос должно быть четкое соответствие анализа физической и инженерной картины рассматриваемого процесса или устройства (а, также, при необходимости, их математического описания) требованиям ГОС в рамках регламентированных видов профессиональной деятельности.

При ответе на количественный вопрос (задачу) ответ считается полноценным, если получено не только правильное численное значение искомого параметра, но и приведено

решение с обоснованием выбора расчетных зависимостей (форму) и правомочности их применения, а также даны ссылки на необходимые сведения, заимствованные из справочников и других источников.

Ответы на вопросы качественного характера не должны сводиться к простому пересказу той, или иной главы учебника. Конкретный ответ на такой вопрос должен требовать от экзаменуемого некоторого анализа и синтеза известных ему положений, вытекающих из изучения базовых и специальных дисциплин.

В качестве примера подробно приведены вопросы для самопроверки и варианты различных типов тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы», остальные находятся в фонде специальности 140211 – Электроснабжение, находящемся в учебно-методическом кабинете кафедры энергетики.

Примеры контрольных экзаменационных заданий

Каждое задание содержит комплекс вопросов, позволяющих оценить подготовку студента по данной дисциплине в соответствии с требованиями оценочных и диагностических средств по специальности 140211 – Электроснабжение.

При этом задания могут быть теоретического и расчетного плана, а также иметь комплексный характер.

Ниже приведены варианты различных типов тестовых и контрольных заданий.

Аннотация
к тестам по контролю остаточных знаний по дисциплине
"Переходные процессы в электроэнергетических системах"

Тесты предназначены для контроля остаточных знаний по дисциплине "Переходные процессы в электроэнергетических системах", являющейся базовый и читаемой в 6 семестре студентам направления «Электроэнергетика».

Представлено 6 вариантов тестовых заданий. Каждый вариант включает 20 заданий.

В качестве примера приведено одно тестовое задание, остальные тестовые задания приведены в разделе 11.

При разработке тестов использовались следующие формы:

а) открытого типа "Дополнить";
б) закрытая с одним правильным ответом;
в) на установление правильной последовательности;
г) задание с несколькими правильными ответами типа: "Подчеркнуть относящиеся к…".

Время, отводимое на выполнение всех заданий, составляет два часа аудиторных занятий или 1 час 20 мин астрономического времени тестирования.

При оценке результатов студентов оценка:

"отлично" соответствует более 15 правильных ответов;
"хорошо" - более 10 до 15 включительно правильных ответов;
"удовлетворительно" - 10 правильных ответов;
"неудовлетворительно" - менее 10 правильных ответов.

Тестовые задания

Вариант № 1

1. Одной из причин возникновения электромагнитных переходных процессов в ЭЭС является …
   а) регулирование напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой;
   б) возникновение местной несимметрии;
   в) проведение оперативных переключений персоналом энергопредприятий;
   г) резкое увеличение электрической нагрузки энергосистемы.
2. Наиболее распространенным видом КЗ в энергосистемах при глухозаземленной нейтрали является …
   а) трехфазное;
   б) двухфазное;
   в) двухфазное на землю;
   г) однофазное.
3. Одной из целей расчета электромагнитных переходных процессов является …
   а) выбор и проверка электрических аппаратов и проводников;
   б) выбор мощности силовых трансформаторов;
   в) выбор количества проводов в расщепленной фазе;
   г) определение допустимого расстояния между фазным проводом ЛЭП и землей.
4. Дополнить средний ряд напряжений 515; …; 230; 115; …; …; 20; 18; …; …; 6,3; 3,15 кВ
   а) 340; 37; 24; 15,75; 13,8
   б) 330; 35; 27; 15; 13
   в) 330; 37,5; 24; 15,75; 13,8
   г) 340; 37,5; 24; 15,75; 13
5. Для синхронной машины при чисто индуктивной цепи статора поперечная составляющая начального значения периодической слагающей тока возникшего переходного процесса или так называемого начального сверхпереходного тока определяется …

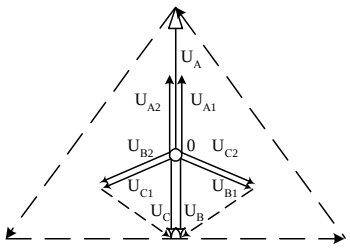
   а) $I''_{q|0|}=\dfrac{E''_{d|0|}}{x''_{q|0|}+x_{вн}}$; *б)* $I''_{q|0|}=\dfrac{E''_{q|0|}}{x''_{q|0|}+x_{вн}}$; *в)* $I''_{d|0|}=\dfrac{E''_{q|0|}}{x''_{d|0|}+x_{вн}}$; *г)* $I''_{q|0|}=\dfrac{E''_{q|0|}}{x''_{q|0|}}$.

6. ДОПОЛНИТЬ:
   Основные допущения, применяемые при расчете электромагнитных переходных процессов, – это _____
7. ДОПОЛНИТЬ:
   Начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ определяется по выражению_____
8. ДОПОЛНИТЬ:
   Ударный коэффициент при трехфазном КЗ определяется по выражению … и зависит от … _____
9. ДОПОЛНИТЬ:
   Мощность КЗ определяется по выражению … _____
10. ДОПОЛНИТЬ:
    Короткое замыкание - это …_____
11. Для случая однофазного КЗ выбрать дополнительное сопротивление $\Delta x^{(n)}$

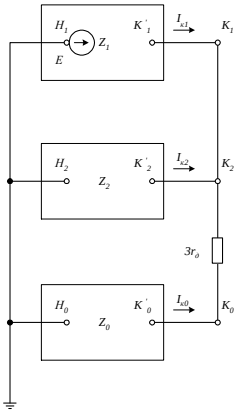
    а) $\Delta x^{(n)}=x_{2\Sigma}$; ***б)*** $\Delta x^{(n)}=x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma}$; ***в)*** $\Delta x^{(n)}=\dfrac{x_{2\Sigma}\cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma}}$.

и значение коэффициента $m^{(n)}$ ***а)*** $m^{(n)}=\sqrt{3}$; ***б)*** $m^{(n)}=3$; ***в)*** $m^{(n)}=\sqrt{3}\sqrt{1-\dfrac{x_{2\Sigma}\cdot x_{0\Sigma}}{\left(x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma}\right)^2}}$.

12. Данная векторная диаграмма напряжений в месте короткого замыкания соответствует



а) однофазному КЗ;
б) двухфазному КЗ;
в) двухфазному КЗ на землю.



13. Приведенная комплексная схема замещения соответствует случаю …

а) двухфазного замыкания на землю через дугу;
б) двухфазного замыкания через дугу;
в) однофазного замыкания через дугу;
г) при наличии сопротивления в одной фазе;
д) при наличии одинаковых сопротивления в двух фазах.

14. Началом схемы нулевой последовательности считается точка, в которой …
    а) объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей;
    б) возникла рассматриваемая несимметрия;
    в) объединены ветви с нулевым потенциалом.
15. Сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, в схему нулевой последовательности …
    а) не вводится;
    б) вводится своей величиной;
    в) должно быть введено утроенной величиной.
16. Схема обратной последовательности является …

а) обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима или процесса, генераторы и нагрузки введены в нее соответствующими реактивностями и ЭДС, а остальные элементы - неизменными сопротивлениями;

б) обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима или процесса, генераторы и нагрузки введены в нее соответствующими реактивностями и ЭДС, равными нулю, а остальные элементы - неизменными сопротивлениями;

в) схемой, которая в значительной мере определяется соединением обмоток участвующих трансформаторов и прочих элементов.

17. Представленная ниже последовательность расчета периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени

Составление схемы замещения, в которую источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями;

Преобразование схемы замещения с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;

Нахождение расчетного сопротивления $x_{расч} = x_{\Sigma} \frac{S_{н\Sigma}}{U_{ср}^2}$ *или* $x_{расч} = x_{*\Sigma} \frac{S_{н\Sigma}}{S_{б}}$.

Выбор соответствующих кривых и нахождение для заданного момента времени относительной величины тока $I_{*}nt$.

Нахождение периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени $I_{nt} = I_{*nt} \cdot I_{н\Sigma}$, *где* $I_{н\Sigma} = \frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_{ср}}$ относится к …

а) методу расчетных кривых при $x_{расч} \le 3$;

б) методу расчетных кривых при $x_{расч} \ge 3$;

в) методу типовых кривых при наличии в схеме только источников конечной мощности;

г) методу типовых кривых при наличии в схеме источников конечной мощности и системы.

18. Для метода типовых кривых при наличии в схеме только источников конечной мощности выбрать правильную последовательность действий …

Составление схемы замещения, в которую источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями;

Преобразование схемы замещения с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;

Преобразование схемы замещения с выделением двух групп источников с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;

Определение начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ $I_{к,0}$;

Определение начального значения периодической составляющей тока в генераторной ветви $I_{Г,0} = \frac{E''_{Г,0} - I_{к,0}x_к}{x_Г}$;

Нахождение отношения тока $I_{*Г,0} = \frac{I_{Г,0}}{I_{Гном}}$ *или* $I_{*Г,0} = \frac{I_{*Г,0[б]}}{I_{*Гном[б]}}$, *а также* $\frac{I_{Г,0}}{I_{к,0}}$.

Нахождение отношения тока по выражению $I_{*Г,0} = \frac{I_{Г,0}}{I_{Гном}}$ *или* $I_{*Г,0} = \frac{I_{*Г,0[б]}}{I_{*Гном[б]}}$.

Выбор соответствующих кривых и нахождение для заданного момента времени в зависимости от $I_{*Г,0}$ относительной величины $\gamma_t = \frac{I_{Гt}}{I_{Г,0}}$.

Выбор соответствующих кривых и нахождение для заданного момента времени в зависимости от $I_{*Г,0}$ относительной величины $\gamma_t = \frac{I_{Гt}}{I_{Г,0}}$, а затем, в зависимости от γ_t и $\frac{I_{Г,0}}{I_{к,0}}$, для заданного момента времени находится $\gamma_{кt} = \frac{I_{кt}}{I_{к,0}}$.

Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени $I_{Г,t} = \gamma_t \cdot I_{Г,0} = \gamma_t \cdot I_{*Г,0}I_{н\Sigma}$, *где* $I_{н\Sigma} = \frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_{ср}}$.

Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени $I_{к,t} = \gamma_{к,t} \cdot I_{Г,0} = \gamma_t \cdot I_{к,0}$.

19. ДОПОЛНИТЬ:

Для составления схемы замещения нулевой последовательности следует выявить возможные пути циркуляции токов нулевой последовательности на каждой ступени напряжения, начиная от точки КЗ, при этом необходимо руководствоваться следующим …

1) 2) 3)

20. ДОПОЛНИТЬ:

Основные уравнения второго закона Кирхгофа при поперечной несимметрии отдельно для каждой последовательности будут иметь вид …

1) 2) 3)

Вариант № 2

1. Простое замыкание возможно …
   а) в сети с изолированной нейтралью;
   б) в сети с компенсированной нейтралью;
   в) в сети с глухозаземленной нейтралью;
   г) в сети с компенсированной нейтралью.
2. Частный случай поперечной несимметрии – это …
   а) отключение одной из фаз ЛЭП;
   б) трехфазное КЗ;
   в) работа трех однофазных электроприемников равной мощности, включенных соответственно на междуфазное напряжение АВ, ВС, СА;
   г) двухфазное КЗ.
3. Одной из целей расчета электромагнитных переходных процессов является …
   а) выбор устройств релейной защиты и определение их уставок;
   б) выбор силовых трансформаторов по условию допустимого нагрева;
   в) выбор конструкции фазы ЛЭП;
   г) определение допустимого расстояния между фазным проводом ЛЭП и землей.
4. Выбрать общие выражения для определения приведенных к основной ступени значений отдельных величин цепи (приближенное приведение) …

$$а)\ \dot{E} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)E; \dot{U} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)U; Z = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)^2 Z; \dot{I} = \frac{1}{(k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)} I;$$

$$б)\ \dot{E} = \frac{U_{србаз}}{U_{ср}} E; \dot{U} = \frac{U_{србаз}}{U_{ср}} U; Z = \left(\frac{U_{србаз}}{U_{ср}}\right)^2 Z; \dot{I} = \frac{U_{ср}}{U_{србаз}} I;$$

$$в)\ \dot{E} = \frac{U_{ср}}{U_{србаз}} E; \dot{U} = \frac{U_{ср}}{U_{србаз}} U; Z = \left(\frac{U_{ср}}{U_{србаз}}\right)^2 Z; \dot{I} = \frac{U_{србаз}}{U_{ср}} I;$$

$$б)\ \dot{E} = \frac{U_{србаз}}{U_{ср}} E; \dot{U} = \frac{U_{србаз}}{U_{ср}} U; Z = \left(\frac{U_{србаз}}{U_{ср}}\right)^2 Z; \dot{I} = \frac{U_{србаз}}{U_{ср}} I;$$

5. Обобщенная нагрузка, участвующая при расчете токов КЗ имеет следующие данные …

$$а)\ E''_{нагр} = 0,8\ и\ x''_{нагр} = 0,35;\ б)\ E''_{нагр} = 0,35\ и\ x''_{нагр} = 0,85;$$

$$в)\ E''_{нагр} = 0,9\ и\ x''_{нагр} = 0,45;\ г)\ E''_{нагр} = 0,85\ и\ x''_{нагр} = 0,35.$$

6. ДОПОЛНИТЬ:

   Допущения, применяемые при практических методах расчета электромагнитных переходных процессов, – это _____

7. ДОПОЛНИТЬ:

   Наибольшее значение апериодической составляющей тока трехфазного КЗ определяется по выражению … _____

8. ДОПОЛНИТЬ:

   Приближенный учет системы заключается … _____

9. ДОПОЛНИТЬ:

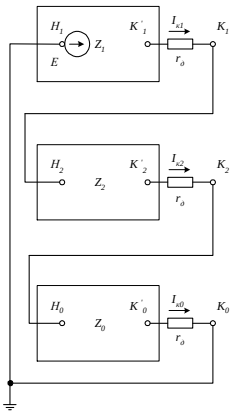
   Расчетное время КЗ – это … _____

10. ДОПОЛНИТЬ:

    Двойное замыкание - это … _____

11. Началом схемы прямой или обратной последовательности считается точка, в которой …

а) объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей;



б) возникла рассматриваемая несимметрия;

в) объединены ветви с нулевым потенциалом.

12. Приложенное напряжение нулевой последовательности при поперечной несимметрии вводится в схему

а) в месте несимметрии относительно земли, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко;

б) в месте несимметрии относительно земли, непосредственно к поврежденным фазам;

в) в месте, где объединены свободные концы генерирующих и нагрузочных ветвей;

г) в месте несимметрии в рассечку фазных проводов, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко.

13. Приведенная комплексная схема замещения соответствует случаю …

а) двухфазного замыкания на землю через дугу;

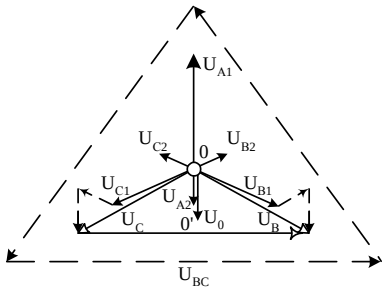
б) двухфазного замыкания через дугу;

в) однофазного замыкания через дугу;

г) при наличии сопротивления в одной фазе;

д) при наличии одинаковых сопротивлений в двух фазах.

14. Данная векторная диаграмма напряжений в месте короткого замыкания соответствует



а) однофазному КЗ;

б) двухфазному КЗ;

в) двухфазному КЗ на землю.

15. Вставить в таблицу вид КЗ соответствующий приведенным выражениям для дополнительного сопротивления $\Delta x^{(n)}$ и значения коэффициента $m^{(n)}$

Вид КЗ	Дополнительное сопротивление $\Delta x^{(n)}$	Значение коэффициента $m^{(n)}$
…	$x_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
…	$x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$	3
…	$\dfrac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$	$\sqrt{3}\sqrt{1 - \dfrac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}$

16. Схема нулевой последовательности является …

а) обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима или процесса, генераторы и нагрузки введены в нее соответствующими реактивностями и ЭДС, а остальные элементы - неизменными сопротивлениями;
б) обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима или процесса, генераторы и нагрузки введены в нее соответствующими реактивностями и ЭДС, равными нулю, а остальные элементы - неизменными сопротивлениями;
в) схемой, которая в значительной мере определяется соединением обмоток участвующих трансформаторов и прочих элементов.

17. Представленная ниже последовательность расчета периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени

1) Составление схемы замещения, в которую источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями;
2) Преобразование схемы замещения с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;
3) Нахождение расчетного сопротивления $x_{расч} = x_{\Sigma}\frac{S_{н\Sigma}}{U_{ср}^2}$ *или* $x_{расч} = x_{*\Sigma}\frac{S_{н\Sigma}}{S_{б}}$.
4) Нахождение для заданного момента времени относительной величины тока $I_{*nt} = \frac{1}{x_{расч}}$.
5) Нахождение искомой величины $I_{It}^{(3)}$ - $I_{nt} = I_{*nt}\cdot I_{н\Sigma} = I_{н\Sigma}\frac{1}{x_{расч}}$, *где* $I_{н\Sigma} = \frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_{ср}}$.

относится к …

а) методу расчетных кривых при $x_{расч} \le 3$;
б) методу расчетных кривых при $x_{расч} \ge 3$;
в) методу типовых кривых при наличии в схеме только источников конечной мощности;
г) методу типовых кривых при наличии в схеме источников конечной мощности и системы.

18. Для метода типовых кривых при наличии в схеме источников конечной мощности и системы выбрать правильную последовательность действий …

- Составление схемы замещения, в которую источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями;
- Преобразование схемы замещения с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;
- Преобразование схемы замещения с выделением двух групп источников с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;
- Определение начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ $I_{к,0}$;
- Определение периодической составляющей тока в генераторной ветви $I_{Г,0} = \frac{E''_{Г,0} - I_{к,0}x_{к}}{x_{Г}}$;
- Нахождение отношения тока $I_{*Г,0} = \frac{I_{Г,0}}{I_{Гном}}$ *или* $I_{*Г,0} = \frac{I_{*Г,0[б]}}{I_{*Гном[б]}}$, *а также* $\frac{I_{Г,0}}{I_{к,0}}$.
- Нахождение отношения тока по выражению $I_{*Г,0} = \frac{I_{Г,0}}{I_{Гном}}$ *или* $I_{*Г,0} = \frac{I_{*Г,0[б]}}{I_{*Гном[б]}}$.
- Выбор соответствующих кривых и нахождение в зависимости от $I_{*Г,0}$ относительной величины $\gamma = \frac{I_{Гt}}{I_{Г,0}}$.

- Выбор соответствующих кривых и нахождение в зависимости от $I_{*Г,0}$ относительной величины $\gamma_t = \frac{I_{Гt}}{I_{Г,0}}$, а затем в зависимости от γ_t и $\frac{I_{Г,0}}{I_{к,0}}$ для заданного момента времени находится $\gamma_{кt} = \frac{I_{кt}}{I_{к,0}}$.
- Нахождение искомой величины $I_{Пt}^{(3)}$ - $I_{Г,t} = \gamma_t \cdot I_{Г,0} = \gamma_t \cdot I_{*Г,0} I_{нΣ}$, *где* $I_{нΣ} = \frac{S_{нΣ}}{\sqrt{3} U_{ср}}$.
- Нахождение искомой величины $I_{Пt}^{(3)}$ - $I_{к,t} = \gamma_{к,t} \cdot I_{Г,0} = \gamma_t \cdot I_{к,0}$.

19. Как влияет токоограничивающий реактор в схеме на величину тока и остаточного напряжения в месте КЗ …
    а) снижает ток КЗ и увеличивает остаточное напряжение;
    б) увеличивает ток КЗ и снижает остаточное напряжение;
    в) увеличивает ток КЗ и увеличивает остаточное напряжение;
    г) снижает ток КЗ и снижает остаточное напряжение.
20. ДОПОЛНИТЬ:

    Сопротивления трехобмоточного трансформатора при расчете токов симметричного КЗ определяются следующим образом …

Вариант № 3

1. Одной из разновидностей короткого замыкания является …
   а) замыкание одной фазы на землю в системе с изолированной нейтралью;
   б) замыкание одной или нескольких фаз на землю в системе с глухозаземленной нейтралью;
   в) отключение коммутационного аппарата на подстанции или электростанции;
   г) работа линии электропередачи в неполнофазном режиме.
2. Частный случай продольной несимметрии – это …
   а) отключение одной из фаз ЛЭП;
   б) двухфазное КЗ;
   в) обрыв фазного провода ЛЭП, когда один конец провода лежит на земле, а другой остается подвешенным;
   г) подключение однофазной нагрузки к ЛЭП.
3. Одним из расчетных условий для выбора и проверки выключателя является …
   а) металлическое КЗ;
   б) определение наименьшей величины тока КЗ;
   в) данные о числе и месте расположения заземленных нейтралей в схеме;
   г) несимметричное КЗ.
4. Постоянная времени затухания свободной составляющей при КЗ определяется по выражению …

$$а)\ T_a = \frac{X_\Sigma}{\omega R_\Sigma};\ б)\ T_a = \frac{R_\Sigma}{\omega X_\Sigma};\ в)\ T_a = \frac{\omega}{X_\Sigma R_\Sigma};\ г)\ T_a = \omega X_\Sigma R_\Sigma.$$

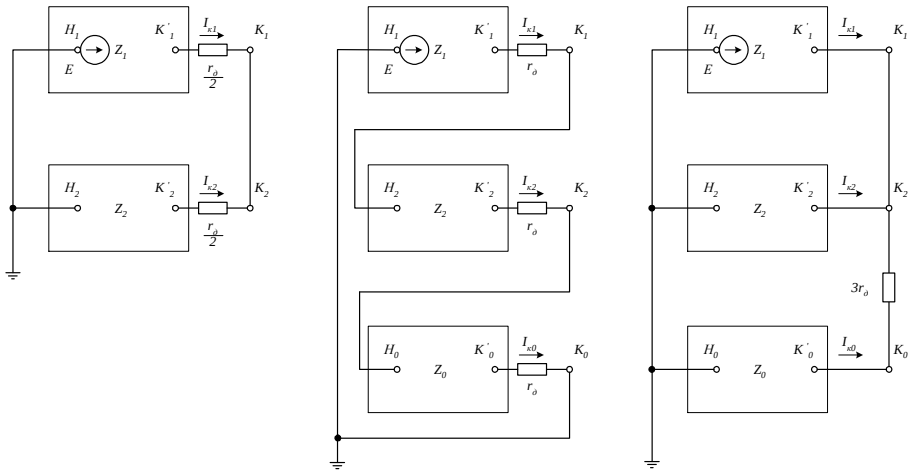
5. Сверхпереходная ЭДС синхронного генератора в именованных единицах в режиме перевозбуждения определяется по выражению …

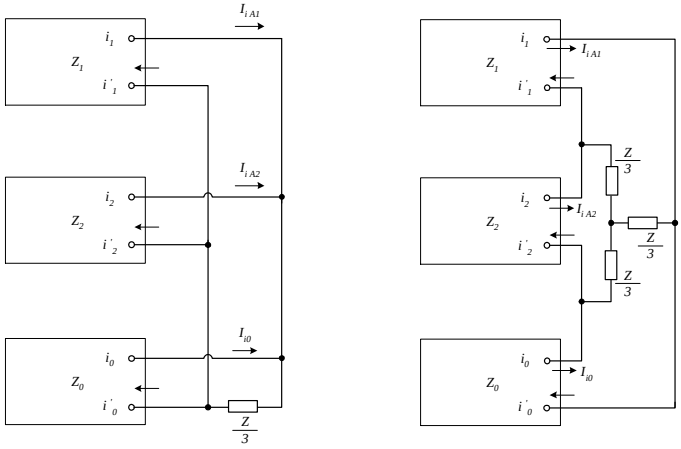
$$а)\ E''_\phi = \sqrt{\left(U_{\phi|0|} + I_{|0|} x''_d \sin\varphi_{|0|}\right)^2 + \left(I_{|0|} x''_d \cos\varphi_{|0|}\right)^2};$$

$$б)\ E''_\phi = \sqrt{\left(U_{\phi|0|} - I_{|0|} x''_d \sin\varphi_{|0|}\right)^2 + \left(I_{|0|} x''_d \cos\varphi_{|0|}\right)^2};$$

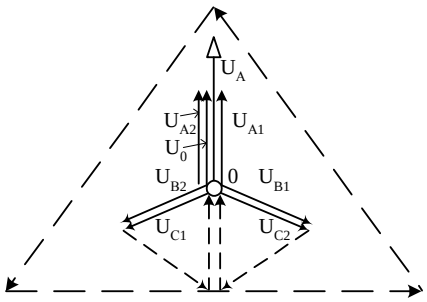
$$в)\ E''_\phi = U_{\phi|0|} + I_{|0|} x''_d; \qquad г)\ E''_\phi = \sqrt{\left(U_{\phi|0|} + I_{|0|} x''_d \sin\varphi_{|0|}\right)^2}.$$

6. ДОПОЛНИТЬ:
   Допущения, применяемые при определении ударного тока КЗ, – это …
   _____
7. ДОПОЛНИТЬ:
   Апериодическая составляющая тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени определяется по выражению … _____
8. ДОПОЛНИТЬ:
   Понятие “система”, используемое при расчете токов КЗ, – это …
   _____
9. ДОПОЛНИТЬ:
   Что понимается под расчетом электромагнитных переходных процессов …
   _____
10. ДОПОЛНИТЬ:
    Простое замыкание - это … _____
11. Расставить номера для приведенных комплексных схем замещения …
    1) при наличии одинаковых сопротивления в двух фазах;
    2) двухфазного замыкания через дугу;
    3) при наличии сопротивления в одной фазе;
    4) однофазного замыкания через дугу;
    5) двухфазного замыкания на землю через дугу.





12. Данная векторная диаграмма напряжений в месте короткого замыкания соответствует



   а) однофазному КЗ;
   б) двухфазному КЗ;
   в) двухфазному КЗ на землю.

13. Учитывая, что токи обратной и нулевой последовательностей особой фазы в месте несимметричного КЗ связаны с током прямой последовательности, выбрать необходимые соотношения для двухфазного КЗ на землю

   а) $\underline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{кA2}} = -\underline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{кA1}}$; ***б)*** $\underline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{кA2}} = \underline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{кA1}} = \underline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{кA0}}$;

   в) $\underline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{кA2}} = -\underline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{кA1}} \dfrac{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{0\Sigma}}}{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{2\Sigma}} + \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{0\Sigma}}}$, $\underline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{кA0}} = -\underline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{кA1}} \dfrac{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{2\Sigma}}}{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{2\Sigma}} + \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{0\Sigma}}}$.

14. Концом схемы нулевой последовательности считается точка, в которой …
   а) объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей;
   б) возникла рассматриваемая несимметрия;
   в) объединены ветви с нулевым потенциалом.
15. Приложенное напряжение нулевой последовательности при продольной несимметрии вводится в схему
   а) в месте несимметрии относительно земли, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко;
   б) в месте несимметрии относительно земли, непосредственно к поврежденным фазам;

в) в месте, где объединены свободные концы генерирующих и нагрузочных ветвей;
г) в месте несимметрии в рассечку фазных проводов, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко.

16. Граничными условиями для двухфазного КЗ являются …

а) $I_{кB}^{(1)}=0;\quad I_{кC}^{(1)}=0;\quad U_{кA}^{(1)}=0;$

б) $I_{кA}^{(2)}=0;\quad I_{кB}^{(2)}=-I_{кC}^{(2)};\quad U_{кB}^{(2)}-U_{кC}^{(2)}=0;$

в) $I_{кA}^{(1,1)}=0;\quad U_{кB}^{(1,1)}=0;\quad U_{кC}^{(1,1)}=0.$

17. Представленная ниже последовательность расчета периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени

6) Составление схемы замещения, в которую источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями;
7) Преобразование схемы замещения с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;
8) Нахождение отношения тока по выражению

$$I_{*Г,0}=\frac{I_{Г,0}}{I_{Гном}}\ \textit{или}\ I_{*Г,0}=\frac{I_{*Г,0[б]}}{I_{*Гном[б]}}.$$

9) Выбор соответствующих кривых и нахождение для заданного момента времени в зависимости от $I_{*Г,0}$ относительной величины $\gamma_t=\frac{I_{Гt}}{I_{Г,0}}$.
10) Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени

$$I_{Г,t}=\gamma_t\cdot I_{Г,0}=\gamma_t\cdot I_{*Г,0}I_{нΣ},\ где\ I_{нΣ}=\frac{S_{нΣ}}{\sqrt{3}U_{ср}}.$$

относится к …

а) методу расчетных кривых при $x_{расч}\le 3$;
б) методу расчетных кривых при $x_{расч}\ge 3$;
в) методу типовых кривых при наличии в схеме только источников конечной мощности;
г) методу типовых кривых при наличии в схеме источников конечной мощности и системы.

18. ДОПОЛНИТЬ:
Правило эквивалентности прямой последовательности при поперечной несимметрии …
_____
_____

19. При замене на подстанции двухобмоточных трансформаторов на двухобмоточные трансформаторы с обмоткой НН, расщепленной на две, величина тока КЗ на секции шин …

а) увеличится;
б) уменьшится;
в) не изменится.

20. ДОПОЛНИТЬ:
Сопротивление генератора при расчете токов симметричного КЗ определяется следующим образом …

Вариант № 4

1. Переходное сопротивление, образующееся в месте замыкания, в общем случае состоит из …
   а) сопротивления электрической дуги;
   б) сопротивления электрической дуги и сопротивлений прочих элементов пути тока от одной фазы к другой или от фазы на землю;
   в) сопротивления элемента, вызвавшего замыкание между фазами или фазой и землей;
   г) полного сопротивления цепи короткого замыкания.
2. Одним из самоустраняющихся повреждений ЛЭП является …
   а) обрыв фазного провода ЛЭП;
   б) отключение ЛЭП устройствами релейной защиты;
   в) перекрытие по поверхности гирлянды изоляторов ЛЭП, вызванное грозовым разрядом;
   г) преднамеренное КЗ на подстанции с отделителем и короткозамыкателем.
3. В качестве базисных единиц при расчете переходных процессов берутся …
   а) ток, напряжение, мощность, частота;
   б) ток, напряжение, мощность, сопротивление;
   в) сопротивление, напряжение, мощность, частота;
   г) ток, напряжение, мощность.
4. Для синхронной машины при чисто индуктивной цепи статора продольная составляющая начального значения периодической слагающей тока возникшего переходного процесса или так называемого начального сверхпереходного тока определяется …

$$а)\ I''_{d|0|}=\frac{E''_{q|0|}}{x''_{d|0|}+x_{вн}};\ б)\ I''_{d|0|}=\frac{E''_{d|0|}}{x''_{d|0|}+x_{вн}};\ в)\ I''_{q|0|}=\frac{E''_{d|0|}}{x''_{q|0|}+x_{вн}};\ г)\ I''_{d|0|}=\frac{E''_{d|0|}}{x''_{d|0|}}.$$

5. Сверхпереходная ЭДС синхронного компенсатора в именованных единицах в режиме недовозбуждения определяется по выражению …

$$а)\ E''_{ф}=\sqrt{\left(U_{ф|0|}+I_{|0|}x''_{d}\sin\varphi_{|0|}\right)^2+\left(I_{|0|}x''_{d}\cos\varphi_{|0|}\right)^2};$$

$$б)\ E''_{ф}=\sqrt{\left(U_{ф|0|}-I_{|0|}x''_{d}\sin\varphi_{|0|}\right)^2+\left(I_{|0|}x''_{d}\cos\varphi_{|0|}\right)^2};$$

$$в)\ E''_{ф}=U_{ф|0|}-I_{|0|}x''_{d};\quad г)\ E''_{ф}=\sqrt{\left(U_{ф|0|}-I_{|0|}x''_{d}\sin\varphi_{|0|}\right)^2}.$$

6. ДОПОЛНИТЬ:

Задачи, требующие расчета электромагнитных переходных процессов, – это … _____

7. ДОПОЛНИТЬ:

Ударный ток трехфазного КЗ определяется по выражению … _____

8. ДОПОЛНИТЬ:

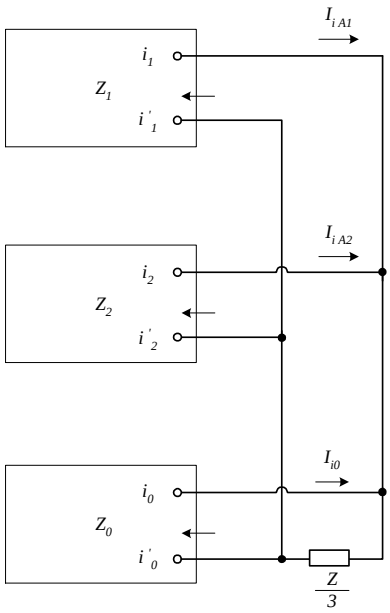
В каких случаях можно эквивалентировать между собой источники конечной мощности и источники с ЭДС, неизменной во времени … _____

9. ДОПОЛНИТЬ: Остаточное напряжение - это … _____

10. ДОПОЛНИТЬ:

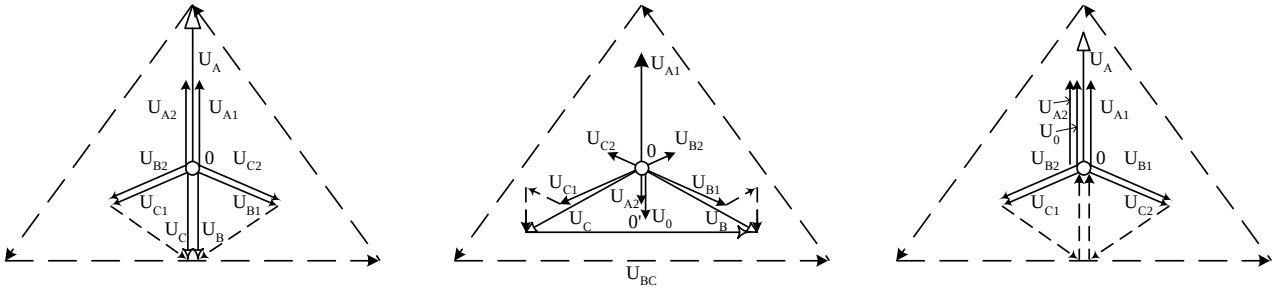
Сложное замыкание - это … _____

11. Приведенная комплексная схема замещения соответствует случаю …



а) двухфазного замыкания на землю через дугу;
б) двухфазного замыкания через дугу;
в) однофазного замыкания через дугу;
г) при наличии сопротивления в одной фазе;
д) при наличии одинаковых сопротивления в двух фазах.

12. Расставить номера для приведенных векторных диаграмм напряжений в месте короткого



замыкания

1) Однофазное КЗ;
2) Двухфазное КЗ;
3) Двухфазное КЗ на землю.

13. Учитывая, что токи обратной и нулевой последовательностей особой фазы в месте несимметричного КЗ связаны с током прямой последовательности, выбрать необходимые соотношения для двухфазного КЗ

$$а)\ \underline{I}_{кА2} = -\underline{I}_{кА1}; \qquad б)\ \underline{I}_{кА2} = \underline{I}_{кА1} = \underline{I}_{кА0};$$

$$в)\ \underline{I}_{кА2} = -\underline{I}_{кА1}\frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma}},\quad \underline{I}_{кА0} = -\underline{I}_{кА1}\frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma}}.$$

14. Концом схемы прямой или обратной последовательности считается точка, в которой …
    а) объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей;
    б) возникла рассматриваемая несимметрия;
    в) объединены ветви с нулевым потенциалом.
15. Циркуляции токов нулевой последовательности при поперечной несимметрии возможна …

а) при наличии хотя бы одной заземленной нейтрали;

б) при наличии как минимум двух заземленных нейтралей;

в) даже при отсутствии заземленных нейтралей, если при этом имеется замкнутый контур через обходные пути той же электрически связанной цепи.

16. Граничными условиями для двухфазного КЗ на землю являются …

а) $\boldsymbol{I_{кB}^{(1)}=0;\quad I_{кC}^{(1)}=0;\quad U_{кA}^{(1)}=0;}$

б) $\boldsymbol{I_{кA}^{(2)}=0;\quad I_{кB}^{(2)}=-I_{кC}^{(2)};\quad U_{кB}^{(2)}-U_{кC}^{(2)}=0;}$

в) $\boldsymbol{I_{кA}^{(1,1)}=0;\quad U_{кB}^{(1,1)}=0;\quad U_{кC}^{(1,1)}=0.}$

17. Представленная ниже последовательность расчета периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени

Составление схемы замещения, в которую источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями;

Преобразование схемы замещения с выделением двух групп источников с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;

Определение начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ $I_{к,0}$;

Определение начального значения периодической составляющей тока в генераторной ветви $I_{Г,0}=\dfrac{\boldsymbol{E''_{Г,0}-I_{к,0}x_к}}{\boldsymbol{x_Г}}$;

Нахождение отношения тока по выражению

$$\boldsymbol{I_{*Г,0}=\frac{I_{Г,0}}{I_{Гном}}\ или\ I_{*Г,0}=\frac{I_{*Г,0[б]}}{I_{*Гном[б]}},\quad а\ также\ \frac{I_{Г,0}}{I_{к,0}}.}$$

Выбор соответствующих кривых и нахождение для заданного момента времени в зависимости от $\boldsymbol{I_{*Г,0}}$ относительной величины $\gamma_t=\dfrac{\boldsymbol{I_{Гt}}}{\boldsymbol{I_{Г,0}}}$, а затем, в зависимости от γ_t и $\dfrac{\boldsymbol{I_{Г,0}}}{\boldsymbol{I_{к,0}}}$, для заданного момента времени находится $\gamma_{кt}=\dfrac{\boldsymbol{I_{кt}}}{\boldsymbol{I_{к,0}}}$.

Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени

$$\boldsymbol{I_{к,t}=\gamma_{к,t}\cdot I_{Г,0}=\gamma_t\cdot I_{к,0}.}$$

относится к …

а) методу расчетных кривых при $x_{расч}\le 3$;

б) методу расчетных кривых при $x_{расч}\ge 3$;

в) методу типовых кривых при наличии в схеме только источников конечной мощности;

г) методу типовых кривых при наличии в схеме источников конечной мощности и системы.

18. ДОПОЛНИТЬ:

Правило эквивалентности прямой последовательности при поперечной несимметрии …

_____

_____

19. При реконструкции районной электрической сети линию электропередачи, питающую тупиковую двухтрансформаторную подстанцию, заменили на двухцепную. Как изменится ли величина тока КЗ на шинах ВН подстанции …

а) увеличится;

б) уменьшится;

в) не изменится.

20. ДОПОЛНИТЬ:

    Сопротивление реактора при расчете токов симметричного КЗ определяется следующим образом …

Вариант № 5

1. Короткое замыкание называют металлическим, если …
   а) сопротивление электрической дуги мало;
   б) переходное сопротивление мало;
   в) длина электрической дуги достаточно велика;
   г) перегорает элемент, вызвавший замыкание, и возникает электрическая дуга.
2. Одним из самоустраняющихся повреждений ЛЭП является …
   а) обрыв фазного провода ЛЭП;
   б) отключение ЛЭП устройствами релейной защиты;
   в) схлестывание проводов ЛЭП при ветровом напоре;
   г) преднамеренное КЗ на подстанции с отделителем и короткозамыкателем.
3. При приведении параметров элементов схемы замещения к основной ступени под коэффициентом трансформации понимается …
   а) отношение напряжения обмотки, обращенной в сторону места возникновения повреждения к напряжению обмотки, элементы которой подлежат приведению;
   б) отношение напряжения обмотки, обращенной в сторону основной ступени, к напряжению другой его обмотки, находящейся ближе к ступени, элементы которой подлежат приведению;
   в) отношение напряжения обмотки ВН к напряжению обмотки НН;
   г) отношение напряжения обмотки, элементы которой подлежат приведению, к напряжению обмотки, обращенной в сторону основной ступени.
4. Устройство АРВ генераторов при возникновении КЗ способствует …
   а) увеличению токов и напряжений в месте КЗ;
   б) поддержанию напряжения в месте КЗ на постоянном уровне;
   в) работе генератора в синхронном режиме;
   г) снижению величины токов и напряжений.
5. Сверхпереходная ЭДС асинхронного двигателя в именованных единицах определяется по выражению …

а) $E''_{ф} = \sqrt{\left(U_{ф|0|} + I_{|0|} x''_{АД} \sin\varphi_{|0|}\right)^2 + \left(I_{|0|} x''_{АД} \cos\varphi_{|0|}\right)^2}$; *в)* $E''_{ф} = U_{ф|0|} + I_{|0|} x''_{АД}$;

б) $E''_{ф} = \sqrt{\left(U_{ф|0|} - I_{|0|} x''_{АД} \sin\varphi_{|0|}\right)^2 + \left(I_{|0|} x''_{АД} \cos\varphi_{|0|}\right)^2}$; *г)* $E''_{ф} = \sqrt{\left(U_{ф|0|} - I_{|0|} x''_{АД} \sin\varphi_{|0|}\right)^2}$.

6. ДОПОЛНИТЬ: Основные методы преобразования схем замещения, используемые при расчетах токов КЗ, – это …

   _____

7. ДОПОЛНИТЬ:
   Действующее значение полного тока трехфазного КЗ определяется по выражению …

   _____

8. ДОПОЛНИТЬ:
   Записать условие эквивалентирования между собой синхронных двигателей различной мощности …

   _____

9. ДОПОЛНИТЬ:
   Расчетные условия для выбора и проверки выключателя по условиям работы при КЗ …

   _____

10. ДОПОЛНИТЬ:
    Под симметричным КЗ понимается …

    _____

11. Для случая двухфазного КЗ выбрать дополнительное сопротивление $\Delta x^{(n)}$ и коэффициент $m^{(n)}$

$$а)\ \Delta x^{(n)} = x_{2\Sigma};\qquad б)\ \Delta x^{(n)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma};\qquad в)\ \Delta x^{(n)} = \frac{x_{2\Sigma}\cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}.$$

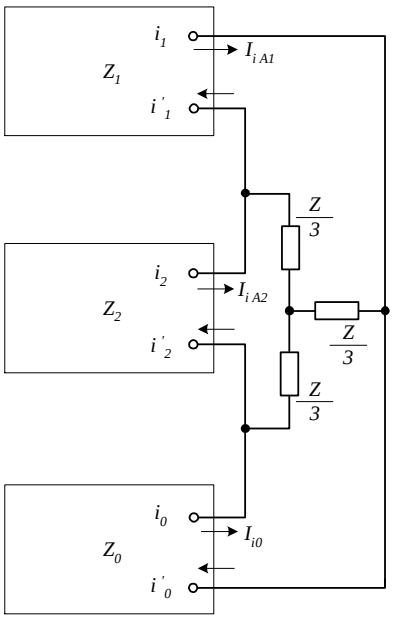
$$а)\ m^{(n)} = \sqrt{3};\qquad б)\ m^{(n)} = 3;\qquad в)\ m^{(n)} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma}\cdot x_{0\Sigma}}{\left(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}\right)^2}}.$$

12. Учитывая, что токи обратной и нулевой последовательностей особой фазы в месте несимметричного КЗ связаны с током прямой последовательности, выбрать необходимые соотношения для однофазного КЗ

$$а)\ \underline{I}_{кА2} = -\underline{I}_{кА1};$$

$$б)\ \underline{I}_{кА2} = \underline{I}_{кА1} = \underline{I}_{кА0};$$

$$в)\ \underline{I}_{кА2} = -\underline{I}_{кА1}\frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}},\quad \underline{I}_{кА0} = -\underline{I}_{кА1}\frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}.$$



13. Приведенная комплексная схема замещения соответствует случаю …

а) двухфазного замыкания на землю через дугу;
б) двухфазного замыкания через дугу;
в) однофазного замыкания через дугу;
г) при наличии сопротивления в одной фазе;
д) при наличии одинаковых сопротивления в двух фазах.

14. В практических приближенных расчетах разрешается принимать сопротивление обратной последовательности синхронной машины равным … а) $x_2 \approx 1{,}45x'_d$; б) $x_2 \approx 1{,}22x''_d$; в) $x_2 \approx x''_d$.

15. Циркуляции токов нулевой последовательности при продольной несимметрии возможна …

а) при наличии хотя бы одной заземленной нейтрали;

б) при наличии как минимум двух заземленных нейтралей;

в) при наличии заземленных нейтралей с обеих сторон от места, где приложено напряжение нулевой последовательности;

16. Граничными условиями для однофазного КЗ являются …

а) $I_{кB}^{(1)}=0;\quad I_{кC}^{(1)}=0;\quad U_{кA}^{(1)}=0;$

б) $I_{кA}^{(2)}=0;\quad I_{кB}^{(2)}=-I_{кC}^{(2)};\quad U_{кB}^{(2)}-U_{кC}^{(2)}=0;$

в) $I_{кA}^{(1,1)}=0;\quad U_{кB}^{(1,1)}=0;\quad U_{кC}^{(1,1)}=0.$

17. Для метода расчетных кривых при $x_{расч}\leq 3$ выбрать правильную последовательность действий …

- Составление схемы замещения, в которую источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями;
- Преобразование схемы замещения с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;
- Нахождение расчетного сопротивления по выражению

$$x_{расч}=x_{\Sigma}\frac{S_{н\Sigma}}{U_{ср}^2}\ \textit{или}\ x_{расч}=x_{*\Sigma}\frac{S_{н\Sigma}}{S_{б}}.$$

- Выбор соответствующих кривых и нахождение для заданного момента времени относительной величины тока I_{*nt}.
- Нахождение для заданного момента времени относительной величины тока $I_{*nt}=\frac{1}{x_{расч}}$.
- Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени

$$I_{nt}=I_{*nt}\cdot I_{н\Sigma},\ \textit{где}\ I_{н\Sigma}=\frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_{ср}}.$$

- Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени

$$I_{nt}=I_{*nt}\cdot I_{н\Sigma}=I_{н\Sigma}\frac{1}{x_{расч}},\ \textit{где}\ I_{н\Sigma}=\frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_{ср}}.$$

18. ДОПОЛНИТЬ:
Ток прямой последовательности особой фазы в месте КЗ при любом несимметричном коротком замыкании определяется по выражению …
_____

19. С целью снижения величины тока однофазного КЗ в энергосистемах, имеющих глухозаземленные нейтрали, принимают следующие меры…

а) устанавливают в нейтраль дугогасящий реактор;
б) частично разземляют нейтрали;
в) включают в нейтраль активное сопротивление.

20. ДОПОЛНИТЬ: Сопротивление двухобмоточного трансформатора с обмоткой низшего напряжения, расщепленной на две, при расчете токов симметричного КЗ определяется следующим образом …

Вариант № 6

1. Короткое замыкание является симметричным, если это …

   а) однофазное КЗ;
   б) двухфазное КЗ;
   в) трехфазное КЗ;
   г) двухфазное КЗ на землю.

2. Преднамеренное КЗ – это …

   а) перенапряжения, вызванные проведением различных высоковольтных испытаний;

   б) отключение фазы ЛЭП для ремонта;

   в) работа устройств электрической сварки;

   г) срабатывание короткозамыкателя на подстанции с отделителем и короткозамыкателем.

3. Выбрать общие выражения для определения приведенных к основной ступени значений отдельных величин цепи (точное приведение)

$$а)\ \dot{E} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)E;\ \dot{U} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)U;\ Z = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)^2 Z;\ \dot{I} = \frac{1}{(k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)} I;$$

$$б)\ \dot{E} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)E;\ \dot{U} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)U;\ Z = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)Z;\ \dot{I} = \frac{1}{(k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)} I;$$

$$в)\ \dot{E} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)E;\ \dot{U} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)U;\ Z = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)^2 Z;\ \dot{I} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)I;$$

$$г)\ \dot{E} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)E;\ \dot{U} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)U;\ Z = (k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)^2 Z;\ \dot{I} = \frac{1}{(k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n)I};$$

4. Если у явнополюсной синхронной машины без демпферных обмоток внезапно произошло изменение сопротивления цепи статора (при этом внешнее сопротивление является чисто индуктивным $x_{вн}$), то начальный переходной ток определяется …

$$а)\ I'_{d|0|} = \frac{E'_{q|0|}}{x'_{d|0|} + x_{вн}};\ б)\ I'_{d|0|} = \frac{E'_{d|0|}}{x'_{d|0|} + x_{вн}};\ в)\ I'_{q|0|} = \frac{E'_{q|0|}}{x'_{d|0|} + x_{вн}};\ г)\ I'_{d|0|} = \frac{E'_{q|0|}}{x'_{d|0|}}.$$

5. Сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя в именованных единицах определяется по выражению …

$$а)\ x''_{АД} = \frac{1}{K_п} \cdot \frac{U^2_{ном} \cos\varphi_{ном}\eta}{P_{ном}};$$

$$б)\ x''_{АД} = \frac{1}{K_п};$$

$$в)\ x''_{АД} = \frac{U^2_{ном} \cos\varphi_{ном}\eta}{P_{ном}};$$

$$г)\ x''_{АД} = \frac{1}{K_п} \cdot \frac{U^2_{ном}}{P_{ном}};$$

6. ДОПОЛНИТЬ: Основные методы расчета электромагнитных переходных процессов, – это …

_____

7. ДОПОЛНИТЬ: Если точка КЗ делит схему на радиальные не зависимые друг от друга ветви, то при приближенных расчетах ударный ток трехфазного КЗ определяется по выражению …

_____

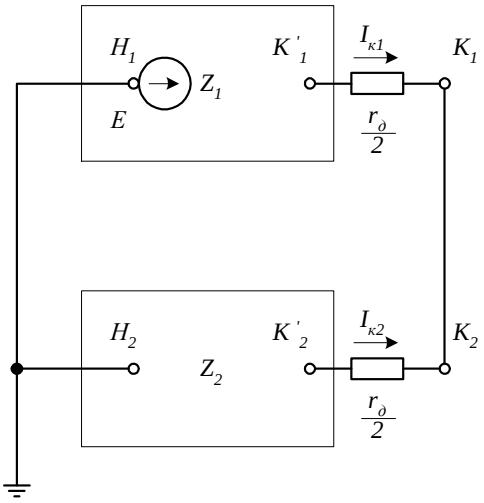
8. ДОПОЛНИТЬ: Записать выражения для определения тока КЗ от системы для различных моментов времени …

9. ДОПОЛНИТЬ: Расчет для выбора выключателей по отключающей способности заключается в следующем …

_____

10. ДОПОЛНИТЬ: Под несимметричным КЗ понимается …

_____



11. Приведенная комплексная схема замещения соответствует случаю …
а) двухфазного замыкания на землю через дугу;
б) двухфазного замыкания через дугу;
в) однофазного замыкания через дугу;
г) при наличии сопротивления в одной фазе;
д) при наличии одинаковых сопротивления в двух фазах.

12. Для случая двухфазного КЗ на землю выбрать соответствующее дополнительное сопротивление $\Delta x^{(n)}$

$$а)\ \Delta x^{(n)} = x_{2\Sigma};\qquad б)\ \Delta x^{(n)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma};\quad в)\ \Delta x^{(n)} = \frac{x_{2\Sigma}\cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}.$$

и значение коэффициента $m^{(n)}$

$$а)\ m^{(n)} = \sqrt{3};\qquad б)\ m^{(n)} = 3;\qquad в)\ m^{(n)} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma}\cdot x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}.$$

13. Учитывая, что токи обратной и нулевой последовательностей особой фазы в месте несимметричного КЗ связаны с током прямой последовательности, необходимо правильно расставить номера для необходимых соотношений

$$\underline{I}_{кА2} = -\underline{I}_{кА1};$$
$$\underline{I}_{кА2} = \underline{I}_{кА1} = \underline{I}_{кА0};$$
$$\underline{I}_{кА2} = -\underline{I}_{кА1}\frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}},\quad \underline{I}_{кА0} = -\underline{I}_{кА1}\frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}.$$

1) однофазное КЗ;
2) 2) двухфазное КЗ на землю;
3) 3)двухфазное КЗ.

14. В практических приближенных расчетах разрешается принимать сопротивление нулевой последовательности синхронной машины равным …
а) $x_0 \approx 1{,}45x'_d$;
б) $x_0 \approx 1{,}22x''_d$;
в) $x_2 \approx x''_d$;
г) $x_2 \approx (0{,}15 \div 0{,}6)x''_d$

15. Схема прямой последовательности является …
а) обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима или процесса, генераторы и нагрузки введены в нее соответствующими реактивностями и ЭДС, а остальные элементы - неизменными сопротивлениями;

б) обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима или процесса, генераторы и нагрузки введены в нее соответствующими реактивностями и ЭДС, равными нулю, а остальные элементы - неизменными сопротивлениями;

в) схемой, которая в значительной мере определяется соединением обмоток участвующих трансформаторов и прочих элементов.

16. Расставить правильные номера для граничных условий следующих видов КЗ …

$$I_{кB}^{(1)}=0;\quad I_{кC}^{(1)}=0;\quad U_{кA}^{(1)}=0;$$
$$I_{кA}^{(2)}=0;\quad I_{кB}^{(2)}=-I_{кC}^{(2)};\quad U_{кB}^{(2)}-U_{кC}^{(2)}=0;$$
$$I_{кA}^{(1,1)}=0;\quad U_{кB}^{(1,1)}=0;\quad U_{кC}^{(1,1)}=0.$$

1) двухфазное КЗ;
2) двухфазное КЗ на землю;
3) однофазное КЗ.

17. Для метода расчетных кривых при $x_{расч}\geq 3$ выбрать правильную последовательность действий …

- Составление схемы замещения, в которую источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями;
- Преобразование схемы замещения с целью нахождения результирующего сопротивления относительно места КЗ;
- Нахождение расчетного сопротивления по выражению $x_{расч}=x_{\Sigma}\frac{S_{н\Sigma}}{U_{ср}^2}$ *или* $x_{расч}=x_{*\Sigma}\frac{S_{н\Sigma}}{S_{б}}$.
- Выбор соответствующих кривых и нахождение для заданного момента времени относительной величины тока I_{*nt}.
- Нахождение для заданного момента времени относительной величины тока $I_{*nt}=\frac{1}{x_{расч}}$.
- Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени

$$I_{nt}=I_{*nt}\cdot I_{н\Sigma},\ где\ I_{н\Sigma}=\frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_{ср}}.$$

- Нахождение искомой величины периодической составляющей тока КЗ для заданного момента времени

$$I_{nt}=I_{*nt}\cdot I_{н\Sigma}=I_{н\Sigma}\frac{1}{x_{расч}},\ где\ I_{н\Sigma}=\frac{S_{н\Sigma}}{\sqrt{3}U_{ср}}.$$

18. ДОПОЛНИТЬ: Полный ток поврежденной фазы в месте КЗ при любом несимметричном коротком замыкании определяется по выражению …

_____

19. При расщеплении фазы ЛЭП на три провода величина тока КЗ …
    а) уменьшится;
    б) увеличится;
    в) не изменится.

20. ДОПОЛНИТЬ: Сопротивление линии при расчете токов симметричного КЗ определяется следующим образом …

Контрольные работы

В процессе изучения дисциплины (после каждого практического занятия) студенты последовательно разрабатывают предложенные в задании вопросы и защищают их согласно графику, указанному в учебно-методической (технологической) карте дисциплины.

На последнем практическом занятии студенты защищают комплексное задание целиком, с его анализом и оценкой принятых инженерных решений.

Все задачи, включённые в задания, даны в нескольких вариантах, поэтому каждый студент получает шифр индивидуального задания, выдаваемый руководителем.

Задание на контрольную работу № 1.

Задача № 1. Схема, представленная на рис. 1. содержит 5 ступеней трансформации, взаимно связанных пятью трансформаторами.

Требуется:

а) составить схему замещения, выразив её элементы в относительных и именованных единицах с точным и приближённым приведением элементов схемы замещения;

б) преобразовать схему замещения относительно заданной точки короткого замыкания;

в) определить начальный сверхпереходный ток при трёхфазном КЗ в точке K_n;

г) оценить погрешность расчёта (в процентах) при приближённом приведении элементов схемы замещения, сравнив результаты расчёта с результатами точного приведения.

Исходные данные приведены в таблице.

П р и м е ч а н и я .

1. Расчёты по пунктам б, в, г, по заданию руководителя выполнить в именованных или в относительных единицах.
2. Система характеризуется как источник бесконечной мощности.
3. Для линий всех напряжений принимать X_0 = 0.4 Ом/ км.
4. Для трансформаторов 1–4 принимать: при высшем напряжении (ВН) 330 кВ U_k = 13,5%, при ВН 230 кВ U_k = 12%, при ВН 115 кВ U_k =10,5%, при ВН 37 кВ U_k = 9%.

Таблица 1

Вариант	Точка К.З.	Линии				Генераторы					
						Г1, Г2					
		ℓ 1км	ℓ 2км	ℓ 3км	ℓ 4км	Sн, МВА	X"d, о.е.	Uн, кВ	Sн, МВА	X"d, о.е.	Uн, кВ
1	1	60	60	20	20	37.5	0.20	10.50	37.5	0.12	6.30
2	2	50	50	30	30	62.5	0.22	15.75	50.0	0.18	10.50
3	3	40	40	25	25	71.5	0.16	15.75	37.5	0.28	10.50
4	4	40	40	20	20	31.3	0.13	6.30	71.5	0.21	6.30
5	5	70	70	40	40	66.0	0.21	6.30	62.5	0.14	15.75
6	1	50	50	20	20	50.0	0.20	10.50	62.5	0.18	10.50
7	2	60	60	40	40	31.3	0.13	10.50	50.0	0.15	6.30
8	3	30	30	14	14	20.0	0.22	6.30	50.0	0.20	6.30
9	4	25	25	10	10	20.0	0.20	10.50	37.5	0.16	6.30
10	5	40	40	18	18	37.5	0.23	6.30	37.5	0.20	6.30

Продолжение таблицы 1

№№ вариантов	ТРАНСФОРМАТОРЫ												
	Т1 ,Т2			Т3, Т4			Т5						
	Sн МВА	Uв кВ	Uн кВ	S МВА	Uв,кВ	Uн, кВ	Sн МВА	Uв кВ	Uс, кВ	Uн, кВ	Uк в-с %	Uк в-н %	Uк с-н %
1	40	121	37	60	35	10,00	120	37	10	6,30	8,0	16	7,0
2	60	220	110	60	110	15,75	160	110	37	10,00	12,5	20	6,5
3	120	220	110	80	110	15,75	180	115	35	11,00	10,5	32	28
4	120	220	35	80	37	6,00	240	35	10	6,00	10,5	32	28
5	60	220	121	80	121	6,00	120	117	37	15,75	12,5	20	6,5
6	80	330	220	60	220	10,50	120	220	121	10,00	12,5	20	6,5
7	80	330	121	60	118	10,00	120	121	35	6,00	10,5	32	28
8	60	121	37	60	37	6,30	160	35	10	6,30	10,5	32	28
9	60	121	35	40	35	10,00	120	35	10	6,00	10,5	32	28

10	**80**	**115**	**35**	**40**	**37**	**6,00**	**160**	**37**	**11**	**6,30**	**10,5**	**18**	**6,3**

Задача №2. В точке K_n схемы (рис. 2.) произошло трёхфазное КЗ. Требуется:

а) Составить схему замещения и элементы в именованных и относительных единицах с точным и приближённым приведением элементов схемы замещения;

б) преобразовать схему замещения относительно заданной точки КЗ (K_n) ;

в) рассчитать начальный сверхпереходный ток короткого замыкания, полагая, что генераторы предварительно работали на холостом ходу с номинальным напряжением;

г) оценить погрешность расчета (в процентах) при приближенном приведении элементов схемы замещения, сравнив результаты расчёта с результатами точного приведения.

Исходные данные приведены в таблице.

Примечания.

1. Расчёты по пунктам б,в,г по выполнить в именованных и относительных единицах.
2. Система характеризуется как источник бесконечной мощности.
3. Для линий всех напряжений принимать X_0 =0.4 Ом/км.
4. Для трансформаторов 1–3 принимать: при высшем напряжении (ВН) 330 кВ. U_k = 13,5%, при ВН 230 кВ. U_k = 12%, при ВН 115 кВ. U_k =10,5%, при ВН 37 кВ. U_k = 9%.

Задача № 3. Для условий схемы на рис. 3 требуется:

а) составить схему замещения, выразив её элементы в именованных и относительных единицах с точным и приближённым приведением элементов схемы замещения;

б) преобразовать схему замещения относительно заданной точки трёхфазного короткого замыкания (K_n);

в) определить ударный ток при трёхфазном коротком замыкании в точке ;

г) оценить погрешность расчёта (в процентах) при приближённом приведении элементов схемы замещения, сравнив результаты расчёта с результатами точного приведения.

Исходные данные приведены в таблице.

П р и м е ч а н и я .

1. Расчёты по пунктам б, в, г, выполнить в именованных и относительных единицах.
2. Для линий всех напряжений принимать X_0 = 0.4 Ом/ км.

№ В-та	**Точка к.з**	**Линии** $\ell_1 \ell_2, \ell_3$ **км**		**Генераторы**						**Трансформаторы**												
				Г1, Г2			**Г3**			**Т1, Т2**			**Т3**			**АТ**						
				Sн МВА	**X"d,o.e.**	**Uн,, кВ**	**Sн МВА**	**X"d,o.e.**	**Uн,, кВ**	**Sн МВА**	**Uв кВ**	**Uн кВ**	**Sн МВА**	**Uв кВ**	**Uн кВ**	**Sн МВА**	**Uв кВ.**	**Uс кВ.**	**Uн кВ**	**Uк в-с, %**	**Uк в-н, %**	**Uк с-н, %**
1	**1**	**20**	**10**	**59,0**	**0,15**	**10,50**	**24,0**	**0,15**	**10,50**	**120**	**330**	**220**	**60**	**117**	**10,5**	**120**	**220**	**115**	**11,0**	**10,5**	**32,0**	**28,0**
2	**2**	**30**	**8**	**50,0**	**0,20**	**15,75**	**24,0**	**0,13**	**15,76**	**240**	**325**	**230**	**60**	**110**	**15,7**	**240**	**230**	**115**	**15,5**	**11,0**	**30,0**	**27,0**
3	**3**	**25**	**15**	**32,0**	**0,18**	**10,50**	**30,0**	**0,24**	**6,30**	**180**	**330**	**225**	**80**	**121**	**10,0**	**240**	**220**	**117**	**6,3**	**10,5**	**18,0**	**6,0**
4	**4**	**27**	**12**	**66,0**	**0,21**	**10,50**	**31,3**	**0,14**	**6,30**	**120**	**240**	**121**	**80**	**37**	**11,0**	**180**	**120**	**35**	**6,0**	**10,5**	**18,0**	**6,0**
5	**5**	**45**	**20**	**37,5**	**0,17**	**15,75**	**20,0**	**0,22**	**10,50**	**120**	**240**	**117**	**60**	**38**	**15,5**	**90**	**115**	**37**	**10,0**	**12,5**	**20,0**	**6,5**
6	**6**	**60**	**14**	**62,5**	**0,14**	**6,30**	**37,5**	**0,15**	**15,75**	**80**	**230**	**117**	**80**	**35**	**6,0**	**120**	**110**	**38**	**15,0**	**12,5**	**20,0**	**6,5**
7	**1**	**50**	**7**	**66,0**	**0,19**	**15,75**	**40,0**	**0,26**	**6,30**	**240**	**240**	**150**	**80**	**117**	**15,0**	**120**	**154**	**115**	**6,0**	**9,5**	**34,0**	**23,0**
8	**2**	**70**	**6**	**71,5**	**0,29**	**15,75**	**37,5**	**0,21**	**6,30**	**240**	**240**	**154**	**80**	**115**	**15,0**	**180**	**154**	**110**	**6,3**	**11,5**	**37,0**	**23,0**
9	**3**	**75**	**22**	**75,0**	**0,24**	**10,50**	**52,0**	**0,19**	**10,50**	**120**	**330**	**240**	**90**	**120**	**10,0**	**180**	**230**	**121**	**10,5**	**13,0**	**12,0**	**18,0**
10	**4**	**40**	**5**	**59,0**	**0,22**	**6,30**	**50,0**	**0,16**	**10,50**	**360**	**225**	**150**	**90**	**120**	**6,3**	**240**	**156**	**115**	**11,0**	**9,2**	**18,3**	**8,0**
11	**5**	**80**	**30**	**52,0**	**0,16**	**6,30**	**20,0**	**0,20**	**15,75**	**360**	**330**	**225**	**90**	**110**	**6,0**	**360**	**230**	**115**	**15,0**	**9,2**	**30,5**	**20,0**
12	**5**	**90**	**17**	**81,0**	**0,28**	**10,50**	**31,3**	**0,21**	**15,75**	**240**	**330**	**235**	**60**	**117**	**10,5**	**360**	**220**	**120**	**15,5**	**10,0**	**34,0**	**24,0**

№ вар-та	Точка к.з	Линии				Генераторы						Система		Трансформатор							
		ℓ_1	ℓ_2	ℓ_3	ℓ_4	Г1 , Г2			Г3 , Г4			U_c ,кВ	$S_{к.з.}$ МВА	Т1 , Т2				Т3 , Т4			
		километры.				**Sн МВА**	**X"d, о.е.**	**Uн,, кВ.**	**Sн МВА**	**X"d, о.е.**	**Uн,, кВ.**			Sн МВА	**Uв кВ**	**Uн кВ**	Uк %	Sн МВА	**Uв кВ**	**Uн кВ**	Uк %
1	1	20	40	10	30	59,0	0,15	15,75	24,0	0,13	10,5	115	2500	60	117	15,50	10,5	32	121	11,0	11,0
2	2	30	60	20	30	52,0	0,25	10,5	24,0	0,17	6,0	115	2000	60	121	11,00	10,5	32	115	6,3	11,0
3	3	25	50	25	40	118	0,18	10,0	31,3	0,18	10,0	230	4000	120	230	11,00	9,5	40	220	10,0	10,5
4	4	25	50	40	30	118	0,20	15,5	37,5	0,20	10,0	154	3000	120	150	15,75	9,5	40	155	10,5	9,5
5	5	10	20	8	12	72	0,23	10,0	30,0	0,24	15,5	154	3500	80	154	10,00	10,0	32	160	15,7	9,0
6	1	20	40	30	10	88	0,32	15,5	20,0	0,15	6,3	230	4500	80	240	15,75	9,0	25	230	6,0	10,0
7	2	30	50	25	15	130	0,20	16,0	37,5	0,29	10,0	340	5000	240	340	15,75	9,5	40	340	10,5	9,5
8	3	15	40	10	8	104	0,26	10,5	62,5	0,14	15,5	340	5000	240	330	11,00	10,0	60	340	15,7	9,0

9	4	40	30	25	20	100	0,22	10,5	59,0	0,17	6,3	230	2800	160	240	10,50	10,0	60	225	6,5	10,5
10	5	30	55	40	20	75	0,19	6,3	66,0	0,23	6,0	115	2200	80	117	6,00	11,0	60	117	6,0	11,0

Задание на контрольную работу № 2.

Задача № 1. В точке К заданной схемы (рис. 4)произошло трёхфазное короткое замыкание.

Определить наибольшую и наименьшую величины периодической слагающей тока в месте короткого замыкания, а также тока, поступающего через автотрансформатор к месту К.З. Решение задачи выполнить, используя метод расчётных кривых.

Примечания

1. Система С характеризуется как источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 230 кВ.

2. Генераторы снабжены АРВ.

3. Рассмотреть варианты: выключатель «В» включён и выключен, короткое замыкание в точке К1или К2.

4. Для линии принимать Х0= 0.4 Ом/км.

Исходные данные приведены в таблице.

№№ вар-иан-тов	Генераторы			Автотрансформаторы							Линия ℓ, км
	Т1, Т2			АТ1, АТ2							
	Sн, МВА	Uн, кВ	X"d, о.е.	Sн, МВА	Uв, кВ	Uс, кВ	Uн, кВ	Uк в-с, %	Uк в-н, %	Uк с-н, %	
1	62,5	6,3	0,14	40	230	115	6,3	10	34	24	100
2	66,0	6,3	0,21	60	230	117	6,3	10	34	24	85
3	59,0	6,3	0,17	40	225	110	6,0	9	32	20	70
4	71,5	10,5	0,22	80	240	121	10,5	10	34	24	110
5	117,5	10,5	0,18	80	240	115	10,5	10	34	24	75
6	123,5	13,8	0,16	120	230	115	13,8	12	37	25	60
7	111,0	13,8	0,22	90	230	115	13,8	10	34	24	90
8	176,5	18,0	0,21	120	230	117	18,0	12	37	25	50
9	166,5	18,0	0,13	180	230	115	18,0	13	12	18	65
10	235,0	18,0	0,19	240	230	115	18,0	13	12	18	50

Задание № 2. В точке К заданной схемы (рис. 5) произошло трёхфазное короткое замыкание.

Определить наибольшую и наименьшую величины периодической слагающей тока в месте К.З., а также тока, поступающего к месту К.З. от обоих генераторов. Решение задачи выполнить, используя метод расчётных кривых.

Исходные данные приведены в таблице.

Примечания

1. Генераторы снабжены АРВ.

2. Система характеризуется как источник бесконечной мощности, либо конечной S = 5400 , МВА.

3. Для линии принимать Х0= 0.4 Ом/км.

4.Рассмотреть варианты: отсутствует генератор Г1, мощности Г2 в 4 раза больше мощности генератораГ1, при тех же параметрах.

№№ вариантов	Генераторы			Трансформатор							Линия ℓ, км
	Г1, Г2			АТ							
	Sн	Uн	X"d	Sн	Uв	Uс	Uн	Uк в-с	Uк в-н	Uк с-н	
1	66,0	10,5	0,19	120	154	115	10,5	12	12	16	145
2	71,5	13,8	0,23	120	154	115	13,8	12	12	16	200
3	75,0	15,7	0,22	120	154	115	15,7	12	12	16	150
4	11,5	13,8	0,18	240	230	115	13,8	13	12	18	160
5	123,5	13,8	0,20	240	240	121	13,8	12	12	16	175
6	166,5	18,0	0,16	360	230	115	18,0	12	12	16	140
7	111,0	6,3	0,15	240	121	35	6,3	10	34	24	120
8	130,0	10,5	0,14	120	115	37	10,5	10	34	24	80
9	166,5	10,5	0,23	240	230	115	10,5	10	34	24	70

10	**235,0**	**18,0**	**0,22**	**480**	**115**	**37**	**18,0**	**12**	**37**	**25**	**50**

Задача № 3. В конце линии заданной схемы (рис. 6) произошло короткое замыкание, вид которого для каждого варианта указан в таблице.

Определить ток несимметричного К.З. в момент времени t =0.5 с и составить комплексную схему замещения.

Примечания

1. Тип генераторов в вариантах 1-5 – гидро; в вариантах 6-10 – турбо. Генераторы снабжены АРВ.

2. Для трансформаторов принимать: при ВН 230 кВ Uк=14%, при ВН 115кВ Uк=10.5%.

3. Для одноцепной линии принимать X0= 0.4 Ом/км, для двухцепной X0= 0.2 Ом/км. (Двухцепная линия в чётных вариантах).

4. Рассмотреть следующие схемы соединения обмоток трансформаторов, генераторов, нагрузки: звезда с глухозаземленной нейтралью; треугольник.

№№ вари-антов	**Вид К.З**	**Генератор**			**Трансформатор**					**Линия**		**Нагрузка**
		Sн, МВА	**X"d, о.е.**	**X2, о.е.**	**T1**		**T2**			ℓ **,км**	$\frac{x_0}{x_1}$	**Sн, МВА**
					Sн, МВА	**Uв, кВ**	**Sн, МВА**	**Uв, кВ**	**Uн, кВ**			
1	**(1)**	**264,7**	**0,19**	**0,27**	**120**	**115**	**90**	**115**	**10,5**	**50**	**3,5**	**75**
2	**1,1**	**264,7**	**0,24**	**0,27**	**240**	**230**	**180**	**230**	**10,5**	**60**	**4,0**	**140**
3	**1**	**103,5**	**0,20**	**0,26**	**90**	**115**	**90**	**115**	**6,3**	**40**	**3,3**	**60**
4	**1,1**	**103,5**	**0,22**	**0,26**	**90**	**230**	**120**	**230**	**10,5**	**70**	**4,5**	**100**
5	**1**	**127,8**	**0,18**	**0,22**	**120**	**115**	**120**	**115**	**10,5**	**90**	**5,0**	**85**
6	**1,1**	**127,8**	**0,19**	**0,22**	**90**	**115**	**60**	**115**	**6,3**	**35**	**3,2**	**45**
7	**1**	**117,5**	**0,14**	**0,17**	**120**	**115**	**90**	**115**	**10,5**	**45**	**3,4**	**60**
8	**1,1**	**166,5**	**0,13**	**0,15**	**180**	**230**	**120**	**230**	**10,5**	**95**	**5,5**	**110**
9	**1,1**	**235,0**	**0,20**	**0,24**	**240**	**230**	**120**	**230**	**10,5**	**95**	**5,1**	**90**
10	**1**	**235,0**	**0,22**	**0,25**	**180**	**115**	**60**	**115**	**6,3**	**50**	**3,5**	**50**
11	**1,1**	**236,0**	**0,20**	**0,28**	**240**	**230**	**180**	**230**	**10,5**	**85**	**4,2**	**120**
12	**1**	**166,5**	**0,18**	**0,23**	**120**	**115**	**90**	**115**	**6,3**	**75**	**4,8**	**70**
13	**1,1**	**117,5**	**0,16**	**0,20**	**120**	**230**	**90**	**230**	**10,5**	**60**	**4,0**	**100**
14	**1**	**81,0**	**0,28**	**0,30**	**90**	**115**	**60**	**115**	**6,3**	**50**	**3,3**	**80**

Задача № 4. Определить на каком расстоянии ℓ (км) от станции заданной схемы (рис. 7) может произойти двухфазное короткое замыкание на линии, либо однофазном, при котором начальный и установившийся токи одинакова. Составить комплексную схему замещения.

Примечания

1. Генератор снабжён АРВ.

2. Для линий всех напряжений X0= 0.4 Ом/км.

3. Исходные данные приведены в таблице. Генератор имеет заземлённую нейтраль, схема соединения обмотки трансформатора - звезда с глухозаземленной нейтралью; звезда с глухозаземленной нейтралью - треугольник

	Генератор					**Трансформатор**				**Линия**
	Sн, МВА	**Uн, кВ**	x_d **, о.е.**	x''_d **, о.е.**	x_2 **, о.е.**	**Sн, МВА**	**Uв, кВ**	**Uн, кВ**	**Uк, %**	$\frac{x_0}{x_1}$
1	**30,0**	**6,3**	**1,60**	**0,24**	**0,25**	**40,5**	**37**	**6,3**	**8,0**	**3,7**
2	**37,5**	**6,3**	**2,10**	**0,19**	**0,15**	**40,5**	**115**	**6,3**	**10,5**	**3,6**
3	**60,0**	**10,5**	**1,80**	**0,20**	**0,15**	**120,0**	**115**	**10,5**	**10,5**	**3,5**
4	**66,0**	**10,5**	**1,70**	**0,20**	**0,22**	**120,0**	**230**	**10,5**	**9,5**	**3,2**
5	**81,0**	**6,3**	**2,00**	**0,19**	**0,17**	**120,0**	**115**	**6,3**	**9,5**	**3,3**
6	**117,0**	**13,8**	**1,51**	**0,28**	**0,22**	**180,0**	**230**	**13,8**	**11,8**	**3,3**
7	**130,0**	**13,8**	**1,40**	**0,25**	**0,22**	**180,0**	**154**	**13,8**	**10,5**	**3,5**
8	**166,5**	**13,8**	**1,65**	**0,24**	**0,22**	**180,0**	**230**	**13,8**	**10,5**	**3,2**
9	**166,5**	**18,0**	**1,24**	**0,18**	**0,16**	**240,0**	**230**	**18,0**	**12,0**	**3,3**
10	**235,5**	**18,0**	**1,26**	**0,17**	**0,16**	**360,0**	**230**	**18,0**	**20,0**	**3,5**

Задание контрольную работу № 3.

Задача № 1. Станция работает через электропередачу на шины системы неограниченной мощности. Схема системы показана на рис. 8, её параметры приведены в таблице.

Определить запасы статической устойчивости системы в следующих случаях.

а) при отсутствии АРВ

б) при АРВ пропорционального типа,

в) при АРВ силового действия.

Примечания

1. Для решения задач пользоваться упрощенными выражениями для угловых характеристик мощности при $E'_q = cons$; предварительно проработать пример 10.5, стр. 189 /2/ .2. Параметры схемы замещения определить в относительных единицах, пользуясь точным или приближённым приведением (по указанию руководителя).

3. Для линии всех напряжений принимать X0= 0.4 Ом/км. В вариантах 1-10 напряжение ЛЭП равно 230 кВ, в вариантах 11-20 – 115кВ.

4. Для автотрансформатора принимать : в вариантах 1-10 $U_0(_U_в) = 500кВ$, $U_н = 230кВ$, $U_г = 14\%$, в вариантах 11-20 $U_н = 115кВ$, $U_н = 115кВ$, $U_г = 13\%$.

№№ вар	Генератор				Трансформатор				АТ	ЛЭП	Нагрузка	
	Sн, МВА	Uн, кВ	Xd, о.е.	X'd о.е.	Sн, МВА	Uн, кВ	Uв, кВ	Uк%	Sн, МВА	ℓ, км	P, МВТ	COS φ
1	75,0	10,5	1,60	0,23	90	10,5	242	10	90	200	60	0,90
2	125,0	10,5	1,90	0,28	120	10,5	237	13	180	150	90	0,85
3	66,0	10,5	0,94	0,21	90	10,5	242	11	90	230	50	0,90
4	71,5	13,8	0,63	0,28	90	13,5	242	12	90	180	50	0,80
5	111,0	13,8	0,90	0,30	120	13,5	237	10	120	240	80	0,90
6	117,5	13,8	1,51	0,20	120	13,5	242	13	120	300	90	0,90
7	123,5	13,8	0,51	0,19	180	13,5	237	11	120	220	160	0,85
8	166,5	18,0	1,24	0,18	180	18,0	242	12	180	220	120	0,80
9	176,5	18,0	1,42	0,32	180	18,0	237	10	180	260	150	0,85
10	235,0	18,0	1,62	0,27	240	18,0	242	11	240	300	180	0,90
11	59,0	6,3	1,45	0,22	60	6,3	115	9	60	110	70	0,80
12	62,5	6,3	1,32	0,17	90	6,3	121	10	90	120	80	0,85
13	66,0	6,3	1,12	0,20	60	6,3	117	10	60	130	90	0,90
14	81,0	10,5	1,54	0,26	90	10,5	121	9	90	150	100	0,80
15	88,0	10,5	1,36	0,23	90	10,5	127	11	90	170	120	0,85
16	104,0	10,5	1,48	0,24	120	10,5	121	12	120	200	100	0,90
17	118,0	13,8	1,40	0,21	120	13,8	115	10	120	250	100	0,80
18	130,0	13,8	0,68	0,18	120	13,8	115	10	120	180	110	0,90
19	167,0	18,0	1,38	0,19	180	18,0	121	11	120	200	140	0,85
20	176,5	18,0	1,50	0,28	180	18,0	121	12	120	120	100	0,85

Задача № 2. В начале одной из линий электропередачи (точка К), произошло короткое замыкание. Вид К.З. задаётся преподавателем. Определить предельное время отключения короткого замыкания по условию динамической устойчивости, полагая, что постоянная инерции генератора равна 8 с. Схема системы и параметры те же, что и в задаче № 1.

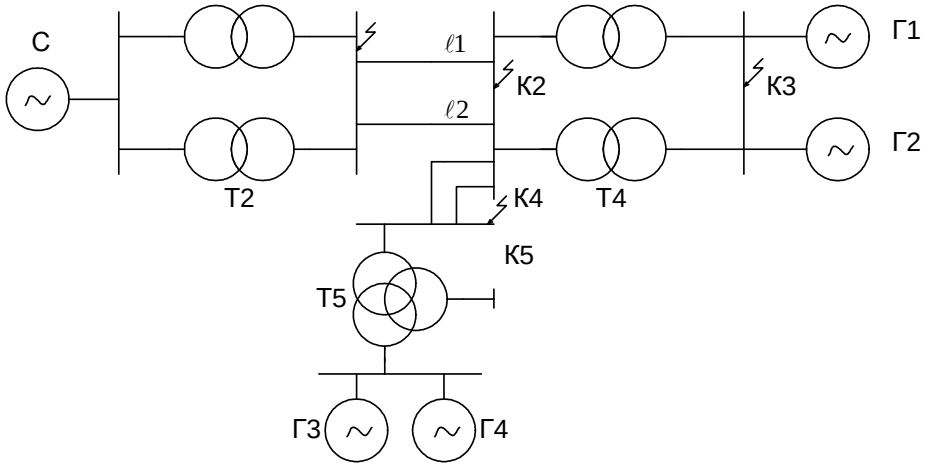


Рис. 1

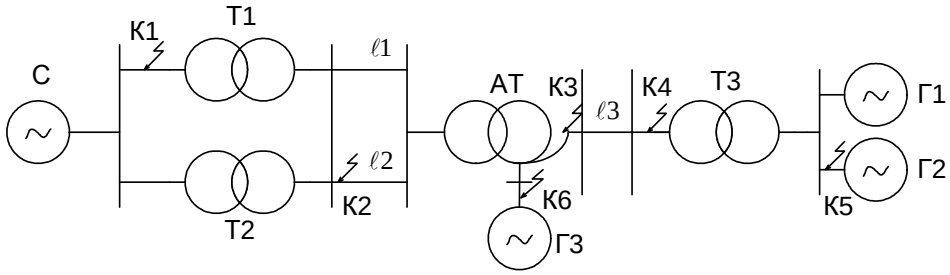


Рис. 2

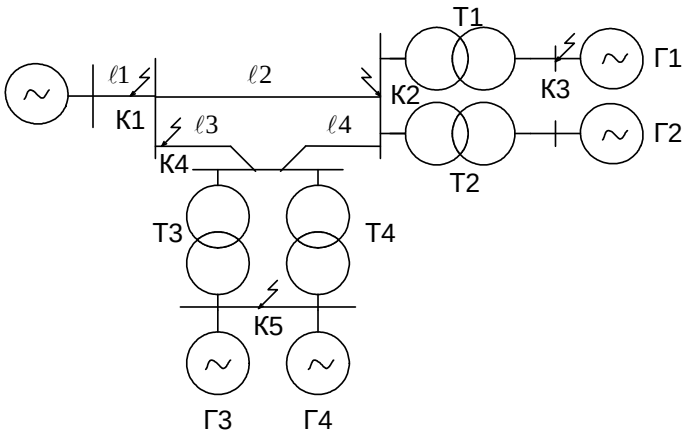


Рис. 3

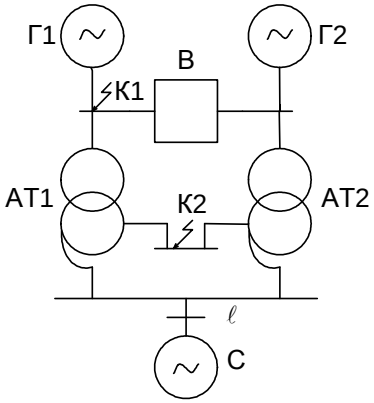


Рис. 4

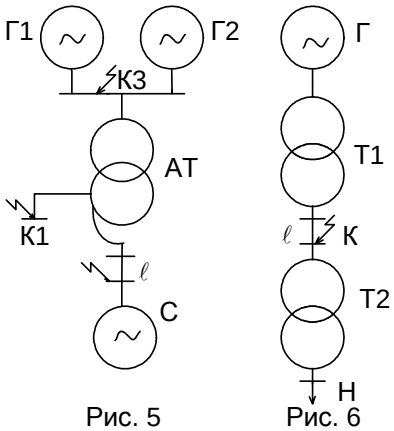


Рис. 5

Рис. 6

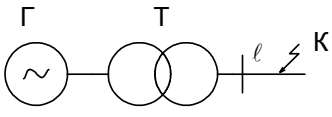


Рис. 7

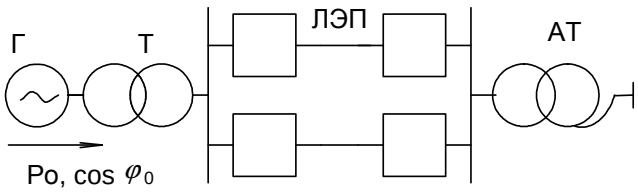


Рис.8

Вопросы для самопроверки
при защите курсового проекта

1. Расскажите об организации и методах проектирования энергетических объектов.
2. Расскажите о типах электрических станций и их особенностях.
3. Какими нормативными материалами пользуются проектировщики?
4. Расскажите о стадиях проектирования электрической станции.
5. Перечислите критерии, используемые для сравнения различных вариантов электроустановки.
6. Перечистите основные требования, предъявляемые к главным схемам электрических соединений станции.
7. Перечислите исходные данные, необходимые для выбора главной схемы.
8. Какую схему следует выбрать для подключения потребителей первой категории?
9. Изложите порядок выбора силовых трансформаторов.
10. В каких случаях применяются автотрансформаторы?
11. Каковы условия выбора и проверки высоковольтных выключателей и разъединителей?
12. В каких случаях используются секционные и линейные реакторы?
13. Изложите порядок выбора линейного реактора.
14. Изложите порядок выбора и проверки сборных шин генераторного напряжения
15. В каких случаях используются комплектные токопроводы?
16. Каковы условия и порядок выбора кабеля?
17. Изложите основные требования к компоновке и конструкции РУ.
18. В каких случаях сооружаются ЗРУ 35—220 кВ?
19. Перечислите факторы, определяющие тип и конструкцию РУ.
20. Объясните преимущества применения типовых и комплектных РУ.
21. Расскажите о принципах компоновки и конструкции кабельных сооружении, аккумуляторного блока.
22. Как выполняется защита оборудования от внешних и внутренних перенапряжений?
23. Изложите порядок проектирования заземления.
24. Изложите основные принципы организации управления на мощных тепловых станциях.
25. Перечислите факторы, определяющие структуру управления станцией.
26. Как производится выбор источников и схемы оперативного тока?
27. В каких случаях целесообразно использование переменного оперативного тока?
28. Как осуществляется дистанционное управление высоковольтными выключателями и блокировка от неправильных действий?
29. Изложите принципы проектирования измерительной подсистемы?
30. Как проектируются щиты управления?

Вопросы к экзамену

1. Основные понятия об электромагнитных и электромеханических переходных процессах в электрической системе.
2. Основные виды коротких замыканий. Относительная вероятность их возникновения в электрических системах.
3. Какие виды нарушения режима относятся к продольной и поперечной несимметрии.
4. Основные допущения при расчете электромагнитных переходных процессов.
5. Преимущества и недостатки системы относительных единиц по сравнению с системой именованных единиц.
6. Приведение ЭДС и сопротивлений элементов схемы к выбранным базисным условиям.
7. Составление схемы замещения при расчете в относительных единицах. Точное и приближенное приведение.
8. Составление схемы замещения при расчете в именованных единицах. Точное и приближенное приведение.
9. Преобразование схем замещения.
10. Процесс трехфазного к.з. в неразветвленной цепи. Кривые изменения тока и ее слагающие.
11. Условия, определяющие максимальное значение апериодической составдяющей тока.
12. Условия возникновения максимума мгновенного значения полного тока. Ударный ток и ударный коэффициент.
13. Определение эквивалентной постоянной времени апериодической составляющей тока в разветвленной цепи.
14. Действующие значения полных величин и их отдельных слагающих. Основные упрощения.
15. Определение установившегося режима к.з. Основные характеристики и параметры синхронной машины.
16. Схема замещения неявнополюсной синхронной машины в установившемся режиме.
17. Векторные диаграммы неявнополюсных и явнополюсных синхронных машин.
18. Приведение цепи ротора к статору.
19. Как учитывается в расчетах влияние нагрузки на режим к.з.
20. Расчет при отсутствии автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Влияние АРВ.
21. Баланс магнитных потоков синхронной машины в нормальном установившемся режиме и в момент возникновения к.з.
22. Переходные ЭДС и сопротивление. Схема замещения СМ без демпферных контуров в начальный момент внезапного нарушения режима. Векторная диаграмма.
23. Сверхпереходные ЭДС и сопротивление. Схема замещения СМ с демпферными обмотками в начальный момент нарушения режима в осях **d** и **q**. Векторная диаграмма.
24. Сравнение реактивностей синхронной машины.
25. Характеристика двигателей и нагрузки.
26. Практический расчет начального сверхпереходного и ударного токов при к.з., несинхронном включении генераторов, пуске двигателей.
27. Внезапное к.з. СМ без демпферных обмоток.
28. Влияние и приближенный учет демпферных обмоток.
29. Влияние АРВ при внезапном к.з.
30. Основные допущения при практических методах расчета к.з.
31. Различия между практическими методами.
32. Метод расчетных и типовых кривых. Порядок расчета по общему изменению.
33. Порядок расчета по индивидуальному изменению. Приближенный учет системы.
34. Учет электродвигателей при расчете токов к.з.
35. Расчет токов к.з. в сетях до 1000 В.

36. Высшие гармоники при несимметричном режиме синхронной машины.
37. Метод симметричных составляющих при расчете токов к.з.
38. Сопротивления элементов схемы для токов обратной и нулевой последовательности.
39. Схемы отдельных последовательностей, определение результирующих ЭДС и сопротивлений.
40. Граничные условия, соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений в месте поперечной несимметрии.
41. Векторные диаграммы токов и напряжений для места несимметрии.
42. Комплексные схемы замещения для различных видов поперечной несимметрии.
43. Правило эквивалентности прямой последовательности для поперечной несимметрии.
44. Сравнение видов короткого замыкания.
45. Применение практических методов к расчету переходного процесса при однократной поперечной несимметрии.
46. Однократная продольная несимметрия.
47. Граничные условия, соотношения между симметричными составляющими токов при продольной несимметрии.
48. Векторные диаграммы токов в месте разрыва чисто индуктивной цепи, комплексные схемы замещения.
49. Способы и технические средства ограничения токов к.з.
50. Координация уровней токов к.з.

Вопросы к коллоквиуму №1

1. Чем вызываются ПП? Система и близкое КЗ
2. Относительное значение величин. Как выбираются базисные условия
3. Понятие приближенного и точного приведения
4. Действия при наличии симметрии в схеме при расчете КЗ
5. Что такое КЗ? Назначения расчетов КЗ
6. Замена трехлучевой Y на двухлучевую, Y с n лучами на Y с n-1 лучом
7. Для чего используется система ОЕ. Шкала средних напряжений
8. Основные допущения при расчете КЗ
9. Относительное значение величин E, U, I, Z, S и их приведенные значения
10. Рассечение ветвей в узле с ЭДС. Принцип составления схемы замещения
11. Базисные величины выбираются для всех ступеней напряжения или нет?
12. Как проводится расчет КЗ при наличии в схеме Системы и Генераторов
13. Металлическое КЗ. Самоустраняющиеся КЗ
14. Наиболее опасные последствия КЗ. Результат сворачивания схемы замещения
15. Когда можно объединять между собой генерирующие источники
16. Как приводятся E,U,I,Z к основной ступени при точном приведении в ОЕ
17. Переходное сопротивление КЗ, его составляющие
18. Для чего применяется АПВ. Что называется расчетом ЭМПП
19. Приближенное приведение E,U,I,Z к основной ступени в ИЕ
20. Преобразование Y с лучами, содержащими ЭДС
21. Сопротивление генератора, ВЛ и КЛ, трансформатора, реактора при точном приведении в ОЕ. Система и удаленное КЗ.
22. Сложное КЗ. Основная причина ЭМПП
23. Необходимость точного и приближенного учета расчетных условий
24. Как приводятся E,U,I,Z к основной ступени при точном приведении в ИЕ
25. Использование замены нагрузочных ветвей генерирующими ветвями с E=0
26. Сопротивление генератора, ВЛ и КЛ, трансформатора, реактора при приближенном приведении в ОЕ. Понятие точного приведения
27. Виды КЗ. Преднамеренное КЗ. Преобразование Δ в Y
28. Понятие расчетных условий. Преобразование Y в Δ

29. Как приводятся E,U,I,Z к основной ступени при приближенном приведении в ОЕ. Рассечение схемы в узле с точкой КЗ
30. Сопротивление генератора, ВЛ и КЛ, трансформатора, реактора при точном приведении в ИЕ. Понятие ударного коэффициента
31. Вероятность возникновения КЗ. Последствия КЗ
32. Расчетные условия при выборе выключателей. Мощность КЗ
33. Что понимается под коэффициентом трансформации при приведении элементов. Симметричные и несимметричные КЗ
34. Сопротивление генератора, ВЛ и КЛ, трансформатора, реактора при приближенном приведении в ИЕ. Использование таблицы значений x/r
35. Расчетные условия при выборе средств РЗ и А
36. Сопротивления двухобмоточного и трехобмоточного трансформатора, автотрансформатора
37. Принцип наложения собственно аварийного режима на предшествующий
38. Применение собственных и взаимных проводимостей
39. Практические методы расчета ЭМПП. Общие замечания
40. Допущения для практических методов расчета
41. Ошибки практических методов расчета
42. Влияние нагрузки на ток к.з. Ударный ток к.з.
43. Приближенный учет системы. Система бесконечной мощности
44. Расчет для выбора выключателя по отключающей способности
45. Метод типовых кривых
46. Метод расчетных кривых

Вопросы к коллоквиуму №2

1. Оборванный провод ЛЭП лежит на земле – вид несимметрии и ее причины
2. К чему приводит ток КЗ. Путь тока при простом КЗ
3. Простое замыкание. Двойное замыкание на землю
4. Продольная, поперечная и сложная несимметрия
5. Основные положения в несимметричных ЭМПП
6. Синхронные машины. x_2 и x_0
7. Кабели, реакторы, ВЛ. x_2 и x_0
8. Трансформаторы. x_2 и x_0
9. Обобщенная нагрузка. x_2 и x_0. Учет сопротивления заземления нейтрали
10. Схемы прямой и обратной последовательности
11. Схемы нулевой последовательности
12. Начало и конец схемы последовательности
13. Результирующая ЭДС и сопротивление продольной и поперечной несимметрии
14. Однократная поперечная несимметрия
15. Двухфазное к.з.
16. Двухфазное к.з. на землю
17. Векторные диаграммы для различных видов несимметричных к.з.
18. Учет переходного сопротивления в месте к.з.
19. Правило эквивалентирования прямой последовательности
20. Комплексные схемы замещения
21. Практические методы расчета при однократной поперечной несимметрии
22. Однократная продольная несимметрия