

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

М.М. ХАМУДХАНОВ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ
УСТАНОВОК И СИСТЕМ
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

Ташкент - 2020

УДК 621.333.313

Хамудханов М.М. **Моделирование энергосберегающих установок и систем.** Учебное пособие – Ташкент.: 2020. - 222 с.

Данное учебное пособие предназначено для магистрантов специальности 5А310202 – «Энергосбережение (промышленность)» по учебной дисциплине «Моделирование энергосберегающих установок и систем», в которой излагаются основы теории методов формирования математических моделей общепромышленных механизмов, включая их систем электро-приводов и построения энергосберегающих вычислительных алгоритмов рассматриваемых промышленных установок и систем.

Ушбу ўқув дарсликда 5А310202 – “Энергия тежамкорлиги (саноат)” магистратура йўналиши талабаларига мўлжалланган бўлиб, “Энергия тежамкор қурилмалар ва тизимларни моделлаштириш” фанида умум саноат механизмларнинг, шу жумладан уларнинг электр юритма тизимларини математик моделларини шакллантириш методларини назариясининг асослари баяон қилинган ва кўриб чиқилаётган саноат қурилмалари ва тизимлари учун энергия тежамкор хисоблаш алгоритмларини қурилиши.

This tutorial is intended for graduate students of 5A310202 – "Energy saving (industry)" on discipline "Modeling of energy-efficient installations and systems", which results fundamentals of the theory of methods of forming mathematical models of General mechanisms, including the systems of electrical drives and building energy-saving computational algorithms considered industrial plants and systems.

Р е ц е н з е н т ы:

Пирматов Н.Б., докт. техн. наук, проф.

Умаров Ш.Б., канд. техн. наук, доц.

Ташкентский государственный технический университет, 2020.

ВВЕДЕНИЕ

Вычислительная техника и моделирование прочно вошли в жизнь и профессиональную деятельность современного человека. Их применение поистине многообразно и всеобъемлюще. Информатика, включающая в себя все, что связано с моделированием, применением вычислительной техники и программированием, служит в наши дни мощным катализатором научно-технического прогресса. Именно развитию средств вычислительной техники, методов математического моделирования мы обязаны успехами, достигнутыми в модернизации и автоматизации производственных процессов и производств, в разработке новых технологий, в повышении эффективности труда и управления, в совершенствовании системы образования и в ускорении подготовки кадров. Неоценим вклад математического моделирования и вычислительной техники в развитии науки – они играют важную роль в решении фундаментальных проблем математики, физики, химии, атомной энергетики, глобальных климатических проблем и защиты окружающей среды; без них невозможно представить себе современные аэрокосмические исследования и исследования новых материалов на нано уровне.

Достигнутые успехи стимулируют создание новых технологий, получение новых материалов, с заранее задаваемыми свойствами, совершенствованием конструкторских разработок. Быстрое внедрение результатов научных исследований в практику является определяющим фактором научно-технического прогресса. В наши дни решение важнейших научных задач немислимо без применения современных методов математического моделирования и высокопроизводительных вычислительных систем. Интенсивное развитие вычислительной техники и информатики и ее проникновение во все сферы человеческой деятельности ставят перед специалистами важную задачу популяризации достижений в этой области и ознакомление с ними широких кругов общественности. В нашей стране

актуальность этой проблемы подчеркивается в ряде документов правительства о реформировании и модернизации производств, социальной и общественной жизни, направленных на ускорение темпов научно-технического развития на основе широкого внедрения информационно-коммуникационных техник и технологий в экономику, управление и науку Узбекистана.

В решении практических задач все большему числу инженеров в процессе проектирования приходится иметь дело с компьютером. Обычно инженер, составляющий программу, старается построить ее из блоков имеющихся алгоритмов. Такой подход весьма целесообразен, так как экономит время и позволяет использовать навыки математиков и программистов.

Хотя большая часть инженеров и студентов технических специальностей хорошо владеет программированием они, как правило, недостаточно знакомы с особенностями и пределами применимости физического и математического моделирования, вычислительных методов, а также постановки численных экспериментов и проблемами решения задач выбора из имеющегося числа алгоритмов оптимального, наиболее подходящего для решения задачи оптимизации самого технологического процесса.

В деятельности инженера - электрика и конструктора ничто, пожалуй, не вызывает такого удовлетворения, как успешное решение задач, возникающих в процессе проектирования технологических процессов и производств. Действительно, между итерационными методами решения задач моделирования и проектирования и природой творчества инженера-исследователя много общего. Инженер всегда стремился ускорить и автоматизировать механические операции, чтобы высвободить время для творчества. Поэтому естественно его обращение к моделированию технологических процессов и компьютеру, позволяющему выполнять стандартные математические операции с исключительной быстротой и точностью.

Однако новые возможности всегда связаны с дополнительной ответственностью — там, где появляются пути резкого повышения

производительности труда, при неумелом обращении с новой техникой, новыми технологиями могут быть допущены ошибки, снижающие их эффективность. Потратив перед решением задачи небольшое количество времени, на выбор модели, оптимального алгоритма, критерия оптимизации, можно в дальнейшем сэкономить многие дни и месяцы научно-исследовательской деятельности ученого.

Энергосбережение, точнее рационализация производства, распределения и использования всех видов энергии, стало в последние 15... 20 лет наряду с информатизацией и компьютеризацией одним из основных направлений технической политики во всех развитых странах мира. Это связано, во-первых, с ограниченностью и невозобновляемостью всех основных энергоресурсов, во-вторых, с непрерывно возрастающей сложностью их добычи и соответственно стоимостью, в-третьих, с глобальными экологическими проблемами, обозначившимися в последнее годы.

Острый интерес ко всем аспектам энерго- и ресурсосбережения возник в мире на волне нефтяного кризиса 1970-х годов. Обнаружилось, что за последние несколько десятков лет потреблено $2/3$ энергии, израсходованной за всю историю цивилизации, что разведанных основных энергоресурсов хватит меньше чем на 100 лет и сэкономить тонну условного топлива уже сейчас в несколько раз дешевле, чем добыть.

В развитых странах резко — в десятки раз — возросли инвестиции в сферу энергосбережения, стали создаваться специальные программы и организации. Специалисты, а с ними и думающие о будущем руководители, поняли, что энергетические ресурсы планеты совсем не неисчерпаемы и ее грядущее напрямую связано с тем, как сегодня распоряжаются этими ресурсами. Энерго- и ресурсосбережение стало одной из первоочередных и важнейших экологических проблем, решаемых сегодня во всех развитых странах мира.

Существенной составляющей этой проблемы стало энергосбережение в сферах, обслуживаемых электрической энергией, поскольку эта энергия универсальна и повсеместно применяется. Энергосбережение сводится к снижению бесполезных потерь энергии. Анализ структуры потерь в сфере производства, распределения и потребления электроэнергии показывает, что определяющая доля потерь — до 90 % — приходится на сферу энергопотребления, тогда как потери при передаче электроэнергии составляют лишь 9... 10 % (в США — 8%, в ФРГ и Японии — 4... 5 %). Очевидно, что основные усилия по энерго-сбережению должны быть сконцентрированы именно в сфере потребления электроэнергии. Экономия энергии за счет повышения эффективности ее использования рассматривается в мировой практике как основное направление развития современной энергетики. Рост эффективности ведет к росту всех показателей экономики страны, снижает техногенную нагрузку на экологию регионов, связанных с производством энергии.

Считается, что в среднем по миру за счет экономии можно сберечь 30 % энергии, а в развитых странах электроэнергия составляет около 20 % от всего расхода энергии. Основным потребителем электроэнергии является электропривод (более 60 %), и именно на него обращено главное внимание мировой технической общественности, работающей в сфере энергосбережения.

Все электроприводы за исключением многочисленных маломощных (доли киловатт) электроприводов бытовой техники можно условно разделить на две большие группы.

Первая используется в агрегатах, обслуживающих технологические процессы, неосуществимые без тонкого управления технологическими координатами, например прокатные станы, бумагоделательные машины, металлообрабатывающие станки, роботы и т.д. К этой группе относятся не более 10 % всех электроприводов, она всегда пользовалась вниманием специалистов, и в ней, как правило, уже осуществлены современные эффективные технические решения.

Вторая группа (около 90% всех электроприводов) используется в простых агрегатах — насосах, вентиляторах, транспортерах, конвейерах и т.д. Этой группе до недавнего времени уделялось мало внимания, так как в подобных агрегатах обычно используются самые простые электроприводы с не всегда правильно выбранными двигателями, но именно в этой группе содержится громадный резерв энерго- и ресурсосбережения.

Это связано главным образом с объективно существующим противоречием: подавляющее большинство таких электроприводов (более 95%) нерегулируемые, а обслуживаемые ими технологические процессы, как правило, нуждаются в управлении какими-либо технологическими координатами: скоростью, давлением, расходом, температурой и т.д. Это управление осуществляется энергетически неэффективно и приводит к большим потерям энергии, порождает несовершенство самого технологического процесса — снижает производительность, надежность и качество продукта.

Характерным примером может служить повсеместно используемый нерегулируемый асинхронный электропривод насосных станций систем водоснабжения. В большинстве случаев он создает избыточный, не требуемый в данный момент напор, т. е. подводит к гидравлической системе лишнюю, бесполезную мощность. За впустую истраченную энергию платит потребитель, кроме того, избыточный напор приводит за счет возрастания утечек к большим потерям воды (7... 9% на каждую лишнюю атмосферу), гидравлическим ударами при пуске системы, разрывам труб и т.д.

Аналогичные последствия применения простейшего электропривода можно обнаружить во многих технологических процессах.

Цена электроэнергии, потребляемой ежегодно средним двигателем в промышленности, почти в 5 раз превосходит цену двигателя. Очевидно, что за время службы двигателя (10... 20 лет) энергетическая составляющая в десятки раз превысит составляющую, связанную с капитальными затратами, в связи с чем забота об оптимизации именно энергетической составляющей является особенно важной.

Возникает вопрос: почему до сих пор в развитых странах мира, включая, и Республику Узбекистан, тераваттчасы дорогой энергии расходуются бесполезно?

Причины этого можно разделить на технические, экономические и организационно-психологические.

Технические: до недавнего времени не было доступных и эффективных средств энергосбережения в электроприводе. В 2000 — 2010-е годы такие средства благодаря успехам силовой и информационной электроники появились, но и после этого в ЕС и США ими оборудовано 10... 15 % всех электроприводов, в Узбекистане — еще меньше.

Экономические: энергосберегающее оборудование немало стоит, оно иногда в разы дороже двигателя, а экономия проявится позже, во время эксплуатации. Так, например, некоторые специалисты отмечают, что часто лица, отвечающие за приобретение оборудования и его эксплуатацию, работают в разных отделах компании и имеют различные интересы: первые экономят бюджет фирмы на стадии приобретения оборудования, а вторые вынуждены мириться с его энергетической неэффективностью. Кроме того, между поставщиками оборудования и конечными пользователями обычно есть несколько посредников со своими интересами.

Отсутствие экономической заинтересованности, как у поставщиков, так и потребителей энергоресурсов — причина медленного внедрения энергосберегающих технологий.

Организационно-психологические: пользователь не хочет иметь какие-либо риски, связанные с надежностью новых технологий, если нормально функционирует старое оборудование. Ни один бизнесмен не станет вмешиваться в хорошо работающее производство, если единственным аргументом служит экономия энергии. Он сделает это только по технической необходимости: либо для увеличения производительности, либо для повышения качества продукта.

1. ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1.1. Математическое и физическое моделирование

Ознакомление с понятиями и терминами Информация, информатика, информационные ресурсы, модель, моделирование. Математическое и физическое моделирование, особенности и отличия, преимущества.

Информация - совокупность сведений в виде образов, изображений, рисунков, графиков, сигналов и др., которые передаются от человека к человеку, от объекта к объекту.

Информатика - отрасль науки, изучающая структуру и общие свойства научной информации, а также вопросы, связанные с ее сбором, хранением, поиском, переработкой, преобразованием, распространением, созданием, использованием в различных сферах человеческой деятельности.

Исследование процессов и аппаратов в масштабах и условиях промышленного производства является, как правило, сложным, длительным и дорогостоящим. Особенностью современных процессов химической технологии, протекающих с высокими скоростями и при высоких температурах и давлениях в многофазных системах, является их большая сложность. Она проявляется в значительном числе и многообразии параметров, определяющих течение процессов, в большом числе внутренних связей между параметрами и в частности, в их взаимном влиянии, причем изменение одного параметра вызывает нелинейное изменение других параметров. Отмеченная сложность углубляется возникновением петель обратных связей между параметрами, а также развитием конкурирующих направлений процесса, изменяющих ход последнего. На процесс накладываются возмущения, статически распределенные во времени.

Внешний потенциал информации о химико-технологическом процессе очень велик. Для того, чтобы пропустить информацию по весьма тесным каналам восприятия, мы вынуждены уменьшить этот потенциал, ограничить

количество возможностей, по которым делается выбор. Это достигается познанием процесса через **модели** – такие системы, которые отражают отдельные, ограниченные процессы. Потоки информации разбиваются на два этапа: на первом модель сравнивается с явлением и считается удовлетворительной, если расхождение невелико; на втором мы сравниваем наше ожидание с показанием модели. Этот процесс называется **моделированием** – изучением закономерностей процессов на моделях при условиях, допускающих распространение полученных результатов на все процессы, подобные изученным, независимо от масштаба аппарата.

Различают два вида моделирования: физическое и математическое.

Под **физической моделью** обычно понимают воспроизведение исследуемого объекта в иных масштабах при сохранении существа процессов в нем происходящих. При физическом моделировании изучение данного явления осуществляется воспроизведением в различных масштабах и изучением физических особенностей и линейных размеров (пример насосный агрегат).

Физическое моделирование дает один и тот же объем информации при изучении моделей различного масштаба. Тем не менее, при этом не всегда возможно получить уверенность в соответствии основных параметров модели и объекта, что затрудняет проведение широких обобщений. Иногда даже результаты физического моделирования могут находиться в противоречии, что объясняется сложностью, соблюдения строгого соответствия всех условий проведения моделирования.

Другим недостатком физического моделирования является то, что при его использовании могут возникнуть осложнения, связанные с необходимостью организации объема замеров на модели. Эта задача, по существу, эквивалентна задаче проведения измерений на реальном полномасштабном процессе.

При этом результаты моделирования до некоторой степени искажаются неизбежными погрешностями, вносимыми методиками и средствами измерения. Эксперимент ведется как бы на фоне помех, зачастую могущих

довольно сильно исказить окончательные выводы. Наличие условий физического моделирования в свою очередь затрудняет обобщение получаемых результатов и может явиться источником ошибок при проектировании.

Общие принципы моделирования вытекают из теории подобия, согласно требованиям, которые должны соблюдаться следующими правилами моделирования:

1) необходимо, чтобы процессы в модели и аппарате натуральной величины (оригинале) описывались одинаковыми дифференциальными уравнениями;

2) модель должна быть геометрически подобна оригиналу;

3) численные значения начальных и граничных условий, выраженных в безразмерной форме, для модели и оригинала должны быть равны;

4) необходимо, чтобы все безразмерные комплексы физических и геометрических величин, влияющих на процесс (критерии подобия) были равны во всех сходственных точках модели и оригинала.

Появление и развитие поколений электронно-вычислительных машин – компьютеров привело к возникновению и развитию метода математического моделирования. Сущность этого метода состоит в том, что деформация модели процесса изучается не на физической модели, как при физическом моделировании, а непосредственно на самой математической модели с помощью компьютеров.

Под **математической моделью** понимается описание реального объекта на каком-либо формальном языке, позволяющем выводить суждения о возможном поведении исследуемого объекта.

При математическом моделировании эксперимент производится на персональном компьютере. При этом исследование изучаемого процесса проводится путем изменения различных параметров, связанных уравнениями математической модели, что позволяет относительно быстро изучить возможные состояния процесса и найти среди них оптимальные.

Математическая модель, отражающая изучаемый процесс, приводится в виде математической записи, которая устанавливает взаимосвязь между параметрами процесса, используя теоретические методы и экспериментальные данные.

Для реализации математической модели необходимо разработать также алгоритмы. Реализация математической модели должна обеспечить прогноз результатов проведения процесса и дать рекомендации по возможным воздействиям на ход процесса для ведения его в оптимальных условиях.

Для детерминированных процессов математическая модель обычно представляется в виде дифференциальных уравнений. Если основные переменные изменяются во времени и пространстве, математическая модель является моделью с распределенными параметрами и дается в виде дифференциальных уравнений в частных производных. Если же переменные изменяются только во времени, то математическая модель представляет собой модель с сосредоточенными параметрами и дается в виде обыкновенных дифференциальных уравнений.

Для стохастических процессов, когда выходные величины не находятся в детерминированном соответствии с входными величинами, то математическая модель приводится в виде статистико-вероятностных соотношений.

Методы математического моделирования позволяют проводить эксперимент на математической модели при полностью контролируемом объеме условий моделирования и исключают возможности воздействия на результаты моделирования не учитываемых случайных факторов. Эти методы в сочетании с современными компьютерными вычислительными средствами позволяют с относительно небольшими материальными затратами исследовать всевозможные варианты аппаратного оформления процесса, изучить его основные свойства и вскрыть резервы его усовершенствования. При этом в рамках используемой модели всегда гарантируется отыскание оптимальных решений.

Всегда следует иметь в виду, что математическое моделирование ни в коей мере не противопоставляется физическому моделированию, а скорее призвано

дополнить его имеющимся арсеналом средств математического описания и численного анализа. По-существу методы физического моделирования также базируются на тождественности математического описания процессов в исследуемом объекте и его физической модели. Однако они не рассматривают конкретных свойств математического описания, а ограничиваются лишь суждением о тождественности объектов на основании сравнения некоторых определяющих комплексов в общих математических уравнениях.

Математическое описание объекта моделирования представляется в общем случае системой уравнений и соотношений, отражающих взаимное влияние различных переменных, которые характеризуют его состояние и поведение, и включающих определенный набор параметров, которые для реализации моделирования должны быть заданы численными значениями.

Реализация моделирования сводится к решению системы уравнений математического описания относительно входящих в нее неизвестных при заданных значениях параметров с помощью определенного алгоритма – алгоритма моделирования. В большинстве случаев при этом используются численные методы, требующие, как правило, применения средств вычислительной техники.

1.2. Способы построения моделей

В зависимости от характера и объема априорной информации об объекте исследования выделяют два способа построения моделей систем управления в формах, принятых в теории управления: аналитический и экспериментальный.

Аналитический способ применяется для построения моделей объектов хорошо изученной природы. В этом случае имеется вся необходимая информация о свойствах объекта, но она представлена в другой форме. В результате идеализации физических объектов появляются структурные модели в виде *схем с сосредоточенными компонентами* (рис. 1.1, а). Типичными представителями физических систем, допускающих такое представление, являются электрические и механические объекты. На рис. 1.1, б изображена

электрическая схема; рис. 1.1, в представляет собой пример механической поступательной системы.

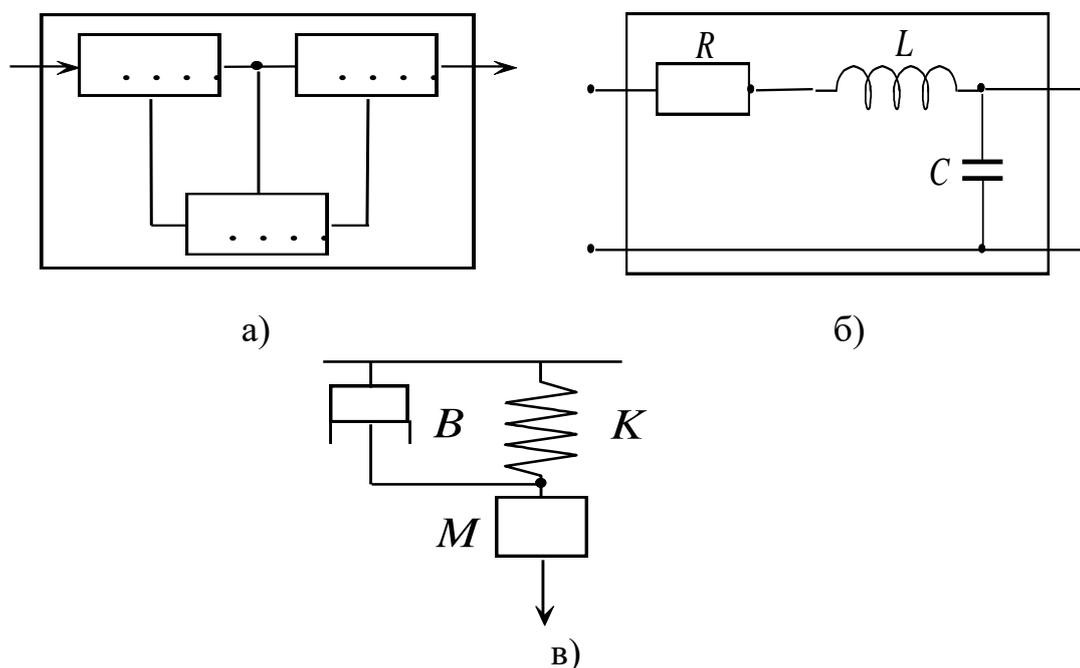


Рис. 1.1. Графическое представление физических систем с сосредоточенными параметрами

Подобные схемы являются моделями, в которых информация об интересующих свойствах объекта представлена в наглядной форме с использованием графических образов, отражающих физическую природу явлений, устройство и параметры объектов. На таких моделях базируются соответствующие дисциплины, например, теоретическая электротехника и теоретическая механика. Принципиальные схемы – стационарные линейные модели с сосредоточенными компонентами.

Методы теории управления абстрагируются от конкретной природы объектов и оперируют более общими – математическими (символьными) моделями.

Аналитический способ моделирования складывается из этапа построения схемы объекта и ее дальнейшего преобразования в математическое описание требуемой формы. При этом принципиальные проблемы моделирования решаются на первом – неформальном этапе. Второй этап оказывается процедурой преобразования форм представления моделей. Это дает

возможность разработать различные компьютерные программы, позволяющие автоматизировать составление уравнений по схемам.

Рассмотрим примеры составления дифференциальных уравнений электрического и механического объектов. Ограничимся классом линейных стационарных моделей.

Существуют три типа пассивных электрических двухполюсников – сопротивление R , емкость C и индуктивность L , описываемые следующими уравнениями для токов $i(t)$ и напряжений $u(t)$:

$$u_R(t) = Ri_R(t);$$

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C(\tau) d\tau$$

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}.$$

Активными двухполюсниками электрических схем являются *источник напряжения* и *источник тока*.

Уравнения связи двухполюсников в конкретной схеме выражаются законами Кирхгофа, представляющими собой условия непрерывности токов и равновесия напряжений:

- первый закон – сумма токов в любом узле равна нулю;
- второй закон – сумма напряжений в любом контуре равна нулю.

Рассмотрим пример электрической схемы, изображенной на рис. 1.1, б. Пусть выходом схемы является напряжение на емкости $u_C(t)$. В соответствии с первым законом имеем:

$$i_R = i_L = i_C = i.$$

Второй закон для единственного контура запишется так:

$$u + u_R + u_L + u_C = 0.$$

Выражая напряжения u_R и u_L через u_C :

$$u_R = RC \frac{du_C}{dt}, \quad u_L = LC \frac{d^2 u_C}{dt^2},$$

получим дифференциальное уравнение второго порядка

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = -u$$

Рассмотрим механическую систему (рис. 1.1, в). Пассивными двухполюсниками механических схем являются механическое сопротивление B , масса M и упругость K , описываемые следующими уравнениями для сил f и перемещений x или скоростей v :

$$f_B(t) = B \frac{dx_B(t)}{dt} = Bv_B(t)$$

$$f_M(t) = M \frac{d^2 x_M(t)}{dt^2} = M \frac{dv_M(t)}{dt}$$

$$f_K(t) = Kx_K(t) = K \int_0^t v_K(\tau) d\tau$$

Идеальными источниками механической энергии являются *источник скорости* и *источник силы*. Уравнения связей механических двухполюсников выражают условия равновесия сил и непрерывности перемещений (скоростей). В соответствии с приведенными ранее уравнениями механических двухполюсников и уравнениями связей записывают дифференциальное уравнение для перемещений:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx = 0$$

В этом однородном уравнении отсутствует правая часть, описывающая внешнее воздействие на механическую систему, т. е. она автономна. Свободные движения автономной системы являются следствием ненулевых начальных условий, например начального смещения $x(0)$ от равновесного состояния.

При моделировании объектов различной природы – электрической, механической поступательной и вращательной, гидравлической или пневматической и др., а также смешанной природы, например электромеханической (двигатели, генераторы), могут быть выделены аналогичные пассивные и активные компоненты. Дальнейшей абстракцией при построении моделей физических объектов с сосредоточенными компонентами является *полюсный граф*. Эти универсальные топологические модели позволяют унифицировать составление уравнений. Специфика предметной области проявляется только на этапе построения схемы и полюсного графа, а также на заключительном этапе интерпретации результатов анализа и синтеза.

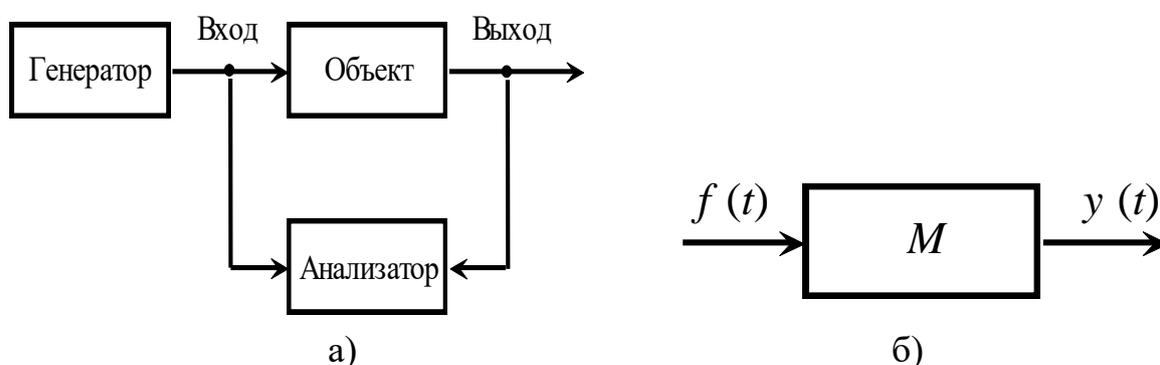


Рис. 1.2. Схема экспериментального исследования объекта

При проектировании систем управления, когда некоторые элементы реально не существуют, аналитический метод построения моделей оказывается единственно возможным.

Если свойства объекта познаны в недостаточной степени, либо происходящие явления слишком сложны для аналитического описания, для построения математических моделей реально существующих объектов применяется *экспериментальный* способ, который заключается в активных экспериментах над объектом или в пассивной регистрации его поведения в режиме нормальной эксплуатации (рис. 1.2, а). В результате обработки данных наблюдений получают модели в требуемой форме. Совокупность этих операций объединяется термином *идентификация объекта*. В результате

идентификации получают модели вход-выход (рис. 1.2, б). Модель зависит не только от свойств объекта, но также от входных сигналов, их разнообразия.

Практически об идентифицируемом объекте всегда имеется какая-то априорная информация, т. е. он не является «черным ящиком». Это дает возможность комбинировать оба способа – вначале аналитически строить структуру модели и определять начальные приближенные значения параметров, а далее обработкой экспериментальных данных уточнять их значения.

1.3. Особенности структурных моделей систем управления

Особенностью математических моделей систем управления является то, что они не только содержат априорную информацию о ее динамических свойствах, необходимую для изучения поведения системы в целом, но также отражают процессы получения и обработки текущей информации о цели системы, состоянии объекта и воздействиях среды для принятия решения по оказанию на объект надлежащего управляющего воздействия. Поскольку модели элементов и систем являются основным материалом в задачах анализ и синтеза (исходными данными и результатами), то им и алгоритмам их преобразования в теории управления отводят важное место.

Понятие модели системы управления неотделимо от понятия структуры. Под *структурой* систем управления понимают *причинно-следственные взаимосвязи элементов (подсистем) направленного действия*. Именно ориентированность элементов и их взаимосвязей отличает модели систем управления от структурных моделей физических систем.

При построении моделей с раскрытой причинно-следственной структурой объект или систему предварительно расчленяют на элементы направленного действия и рассматривают их как преобразователи сигналов. Элементы выделяются, как правило, по функциональному признаку, причем сами эти функции понимаются в контексте операций управления: объект управления; измерительные, преобразовательные и усилительные элементы; управляющее

устройство; исполнительный механизм; управляющий орган. Далее для каждой части строится своя модель, а затем модели частей связывают между собой таким же образом, как соединялись сами части.

Если части системы образуют контуры, то моделирование по частям встречается с принципиальной проблемой: не зная свойств частей, нельзя описать сигналы на их входах; не зная сигналов, нельзя правильно идентифицировать отдельные части. Достоинство моделирования по частям заключается в наглядности механизма преобразования входов в выходы.

Таким образом достоверную математическую модель объекта можно найти аналитическим путем. Для этого необходимо располагать всесторонними сведениями об объекте (конструкции, законах, описывающих протекающие в нем процессы, условиях функционирования и взаимодействия со средой). Однако часто из-за отсутствия достаточных данных получить решение задачи таким путем не удастся. Трудности применения аналитических методов возникают и при описании реальных объектов, процессы в которых имеют сложный характер. Поэтому в подобных случаях эти методы дополняются экспериментальными исследованиями. Преимуществом моделей, полученных теоретическим путем, как правило, является их достаточно общий вид, позволяющий рассматривать поведение объектов в различных возможных режимах.

1.4. Этапы построения математической модели

Создание детерминированной математической модели некоторого объекта моделирования можно представить в виде последовательности следующих этапов:

- 1) постановка задачи моделирования;
- 2) изучение теоретических основ процессов, протекающих в объектах;
- 3) составление математического описания реального процесса;
- 4) разработка алгоритма моделирования;

- 5) оценка адекватности;
- 6) коррекция;
- 7) реализация моделирования.

В постановке задачи ставится цель моделирования, определяются наиболее существенные свойства объекта, которые необходимо отразить в модели, формулируются допущения и ограничения, используемые при ее построении.

Изучение теоретических основ процессов, протекающих в объекте моделирования, как правило, проводится на основе блочного принципа, согласно которому составлению математического описания моделируемого объекта предшествует анализ и выявление закономерностей отдельных «элементарных» процессов, протекающих в объекте. В технологии в качестве таких «элементарных» процессов чаще всего рассматриваются:

- 1) движение потоков фаз;
- 2) электромагнитные и химические превращения;
- 3) массо- и теплоперенос в потоках фаз;
- 4) массо- и теплопередача между потоками фаз;
- 5) изменение агрегатного состояния фаз.

Изучение и исследование подобных сложных процессов без компьютера становится практически невозможным, в особенности на этапе проектирования сложных технологических процессов и производств. Для того, чтобы лучше понять, когда следует, а когда не следует прибегать к помощи компьютера, необходимо рассмотреть этапы процесса проектирования.

В работе инженера (инженера-конструктора и инженера-технолога), проектирующего новое изделие или технологический процесс для удовлетворения нужд потребителей, органически сочетается наука и искусство. Отличительная черта его работы в том, что он не просто изучает достижения науки и искусства, а стремится использовать их для нужд практики. Этапы процесса проектирования показаны на рис. № 1.3.

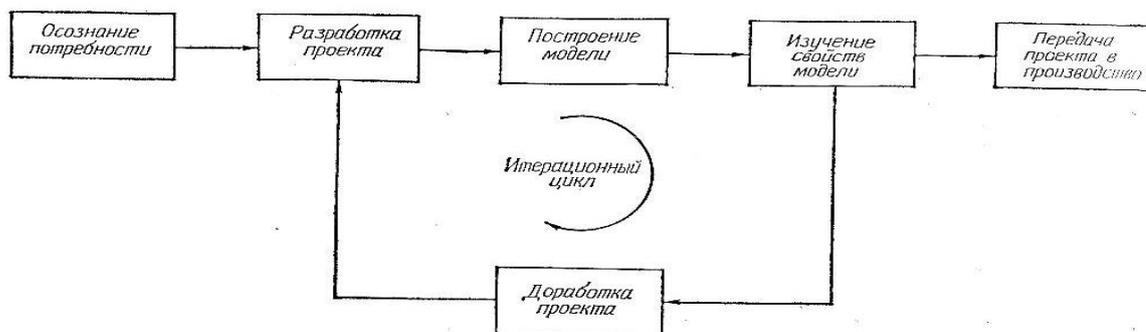


Рис. 1.3. Этапы проектирования

Процесс инженерного творчества начинается обычно с осознания потребности в новом изделии или технологическом процессе. Задача инженера – найти подходящее решение и представить его в таком виде, чтобы можно было приступить к производству.

Проектирование начинается с тщательного изучения возможных решений. Затем собирается информация, позволяющая построить модель разрабатываемого изделия или процесса, чтобы оценить и проверить правильность принятого решения.

Необходимость этого этапа обусловлена экономическими соображениями, так как практическая проверка решения почти всегда обходится очень дорого, отнимает много времени и требует слишком больших материальных и энергетических затрат. Как правило, разрабатывается математическая модель, или используется сочетание простого прототипа и математической модели.

Как уже отмечалось выше, построив модель, приступают к изучению ее свойств, стремясь выяснить, в какой мере разрабатываемое изделие соответствует своему назначению. Обычно с первой попытки не удается найти удовлетворительное решение, однако приобретенный опыт позволяет наметить пути его совершенствования.

Этапы построения модели и изучения ее свойств повторяются до тех пор, пока не появится уверенность, что найдено наилучшее возможное решение. Вслед за этим проект передается в производство.

2. АЛГОРИТМ И АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ЗАДАЧ, ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕГО АЛГОРИТМА

Понятие алгоритма, типы алгоритмов, способы записи алгоритмов для различных исполнителей. Графический способ записи алгоритмов. Основные базовые структуры: линия, слияние, узел обработки или функциональный узел, следование, развилка, цикл или повторение. Программная реализация алгоритма на компьютере. Оценка адекватности модели реальному объекту.

2.1. Алгоритм и алгоритмизация задач

Алгоритм – это система точных и полных предписаний о содержании и последовательности выполнения конечного числа действий, необходимых для решения любой задачи данного типа.

Применительно к решению задач на компьютере алгоритм представляет собой последовательность арифметических и логических действий над данными, приводящую к вычислению решения задачи при изменении исходных данных в достаточно широких пределах.

Термин Алгоритм – латинская транслитерация имени среднеазиатского ученого Мухаммеда Бен Муса аль-Хорезми (787 - 850 гг.)

Свойства и требования к алгоритмам:

- **Дискретности** или **прерывности** (выполнив одну директиву можно приступить к выполнению следующей);
- **Понятности** (алгоритмы должны составляться на определенного исполнителя);
- **Определенности** или **детерминированности** (алгоритм должен содержать предписания, смысл которых может восприниматься однозначно, разные исполнители – результат один; у исполнителя не должна возникнуть потребность в принятии самостоятельного решения; в алгоритме нет места для произвола исполнителя);
- **Массовости** (алгоритм для решения самого широкого класса задач);
- **Результативности** (при точном исполнении предписаний – обязательно

получение решения).

Способы описания алгоритмов: (пример расчета поверхности цилиндрического тела).

Словесный ($S = p \cdot R \cdot R + p \cdot D \cdot h$) $S = S_1 + S_2$;

Табличный ($R, h, p \cdot R, p \cdot R \cdot R$, и т.д.)

Графический (изображение отдельных предписаний в виде определенных геометрических фигур).

Из существующих способов описания алгоритмов наиболее часто используют графический способ описания алгоритмов, т.е. в виде блок-схемы. Алгоритм представляется графически в виде последовательности блоков, внутри которой описывается операция, которую он выполняет – вычисления, проверка и т.д. Все блоки блок-схемы имеют сквозную нумерацию. Обозначения, принятые в блок-схемах, приведены в таблице 2.1.

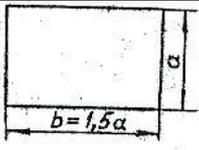
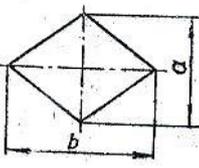
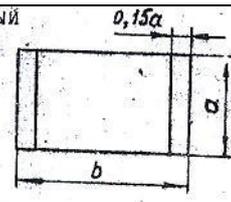
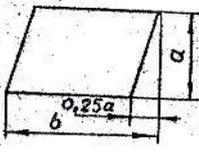
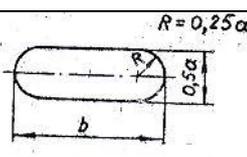
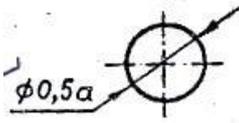
Типы алгоритмов. Алгоритмы могут быть линейными, разветвляющимися и циклическими. В **линейном** вычислительном процессе операции, описанные в блоках, выполняются последовательно одна за другой, т.е. естественный порядок выполнения блоков не нарушается. В **разветвляющемся** вычислительном процессе в зависимости от выполнения (или невыполнения) какого-либо условия вычисления осуществляются по одной или другой ветви.

(Пример: вычисление действительных корней квадратного уравнения $A \cdot X^2 + B \cdot X + C = 0$; в этой блок-схеме имеется 2 разветвления. После ввода коэффициентов уравнения проверяется равенство нулю коэффициента A . Если $A = 0$, то осуществляется переход на вычисление и затем печатание одного действительного корня X .

Таблица 2.1.

Состав, наименование, обозначение обязательных символов и отображаемые ими функции в алгоритме

Наименование	Обозначение	Определение отображаемой функции
		Выполнение операций

Процесс		или группы операций, в результате которых изменяется значение, форма представления или расположение данных
Решение (ветвление по условию)		Выбор направления выполнения алгоритма или программы в зависимости от некоторых переменных условий
Предопределенный процесс (например, подпрограмма)		Использование ранее созданных и отдельно написанных алгоритмов или программ
Ввод - вывод		Преобразование данных в форму, пригодную для обработки (ввод) или регистрации результатов обработки (вывод)
Пуск – останов (терминал, прерывание)		Начало, конец, прерывание процесса обработки данных или выполнения программы
Соединитель		Указание связи между прерванными линиями потока для символов, представленных на одном листе

Если A не равен нулю, то осуществляется переход на вычисление дискриминанта D . Такой переход называется условным, т.к. он осуществляется при выполнении какого-то логического условия. После проверки знака D вычислительный процесс опять разветвляется. Если D меньше нуля, то выдается сообщение «уравнение действительных корней не имеет». Если D больше или равен нулю, то происходит вычисление и затем печать двух действительных корней уравнения. После определения корней и вывода результатов, вычислительный процесс прекращается.

На практике часто бывает необходимым производить вычисления по одним и тем же математическим зависимостям при различных исходных данных. Это

приводит к тому, что отдельные участки вычислительного процесса многократно повторяются. Многократно повторяющийся участок называется циклом.

Базовые структуры: Следование, обозначение обработки, узел обработки; развилка, обозначение проверки, предикатный узел. Цикл, обозначение повторения, **цикл - ПОКА, цикл - ДО.**

Как было уже отмечено выше, реализация моделирования сводится к решению системы уравнений математического описания относительно входящих в нее неизвестных при заданных значениях параметров с помощью определенного алгоритма – алгоритма моделирования. В большинстве случаев при этом используются численные методы, требующие, как правило, применения средств вычислительной техники.

При разработке алгоритма моделирования к системе уравнений математического описания предъявляются следующие требования:

1. Совместность входящих в нее уравнений, т.е. отсутствие в решаемой системе противоречивых уравнений, делающих невозможным её решение.

2. Независимость всех уравнений, т.е. отсутствие уравнений, являющихся следствием других и, следовательно, автоматически выполняющихся при решении последних.

3. Число неизвестных N должно быть равно числу уравнений M системы, т.е. число степеней свободы $F = N - M$ должно быть = нулю.

Если F меньше нуля, то это означает, что в системе имеются «лишние» уравнения, зависимые или противоречивые, которые следует исключить.

Если же F больше нуля, то это означает, что для определения всех неизвестных имеющихся в системе уравнений недостаточно и такая система может иметь бесчисленное множество решений.

Для ее определенности следует либо добавить, если возможно, соответствующее число совместных независимых уравнений, либо часть первоначально выбранных неизвестных считать параметрами и задавать для них численные значения.

2.2. Построение моделирующего алгоритма

Если задача построения математического описания химико-технологического процесса в значительной мере формализуется с использованием типовых гидродинамических моделей, включающих источники, то задача построения моделирующего алгоритма для конкретного математического описания остается многовариантной, допускающей использование различных вычислительных методов, что может привести к созданию различных моделирующих алгоритмов, существенно отличающихся по точности, быстродействию или необходимому объему памяти компьютеров. Вместе с тем, существует целый ряд типовых вычислительных схем, знание которых позволяет значительно облегчить задачу построения моделирующего алгоритма, выбрать наиболее эффективные пути решения отдельных подзадач, сократить время разработки алгоритма в целом.

К числу типовых вычислительных схем относятся решение одного уравнения с одной неизвестной, решение систем линейных алгебраических уравнений, решение систем нелинейных уравнений, интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений и их систем и т.п. Кроме того, в практике моделирования имеется целый ряд специфических задач, для которых более целесообразно использовать не общие методы их решения, а специально разработанные алгоритмы. Например, если уравнения системы включают каждое в отдельности лишь относительно небольшое число неизвестных из общего числа неизвестных системы, то возможно построение алгоритма, требующего существенно меньшего объема вычислений для решения системы, чем применение общих методов.

Особое значение при построении моделирующих алгоритмов имеют место вычислительные схемы, используемые для решения краевых задач для систем дифференциальных уравнений. Эти задачи, как правило, возникают при математическом описании объектов с противотоком фаз и требуют значительных вычислительных затрат.

3. ПРИНЦИПЫ ЭНЕРГО - И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

3.1. Электропривод и технологические процессы

Электроприводом называют систему, состоящую из обязательного элемента – электродвигателя (ЭД), электрического (ЭП), механического (МП) и информационного (ИП) преобразователей. Электропривод связан электрической сетью с системой электроснабжения, рабочий орган соединяет его с технологической установкой, через информационные каналы связи электропривод взаимодействует с автоматизированной системой управления (АСУ) верхнего уровня или человеком – оператором.

На рис. 3.1 показана общая структура электропривода. В многочисленных простых электроприводах часть элементов – электрический, а иногда и механический преобразователи – могут отсутствовать, а информационный преобразователь трансформируется в простой пускатель, осуществляющий команды «включить - выключить».

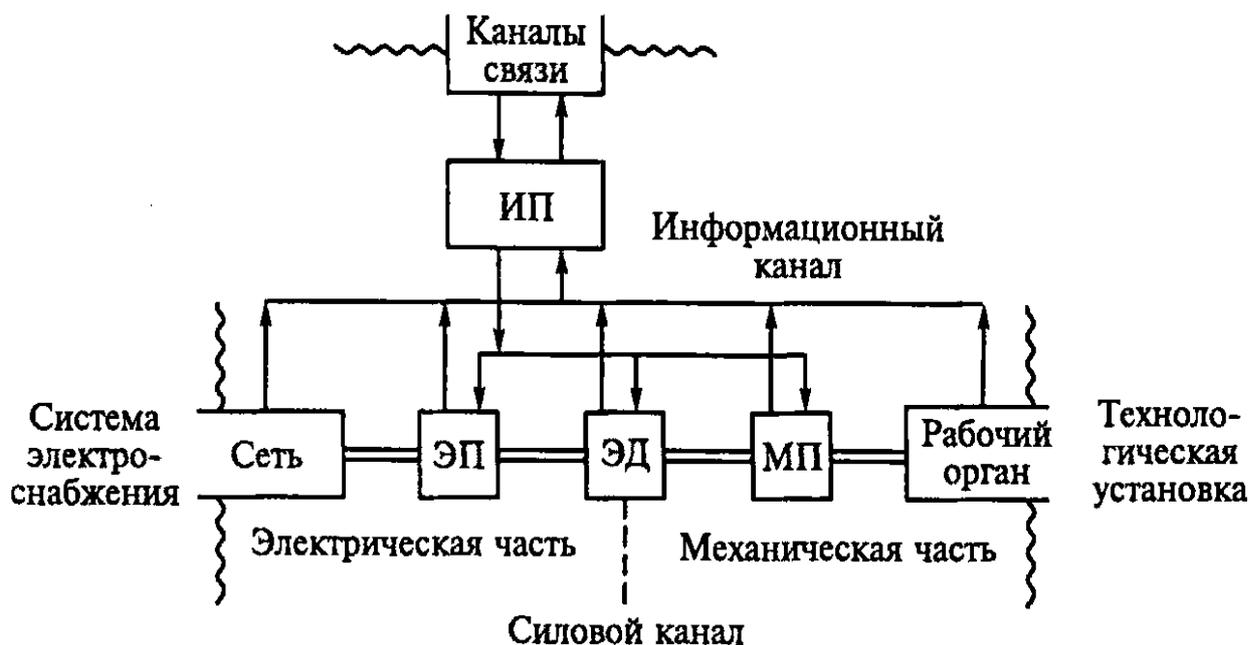


Рис. 3.1. Структура электропривода

Электропривод осуществляет преобразование электрической энергии в механическую (и обратное) с управлением – примитивным, сложным или очень сложным – потоком преобразуемой энергии.

3.2. Структура и области применения электропривода

Электропривод используется практически во всех технологиях, связанных с движением и механической работой, за исключением автономных транспортных средств (самолетов, некоторых типов судов), в которых используются неэлектрические двигатели.

Среди бесчисленного множества агрегатов, оборудованных электроприводом, выделим основных потребителей электроэнергии – это насосы, обеспечивающие водоснабжение городов, поселков, посевных сельскохозяйственных культур, перекачивающие другие жидкие среды, и вентиляторы, используемые в системах вентиляции производственных и других помещений, туннелей, шахт, на котлах тепловых станций, в системах воздушного отопления школ, больниц, общественных зданий и пр.

На рис. 3.2 приведена доля потребления электрической энергии выше отмеченными агрегатами в промышленности и коммерческом секторе.

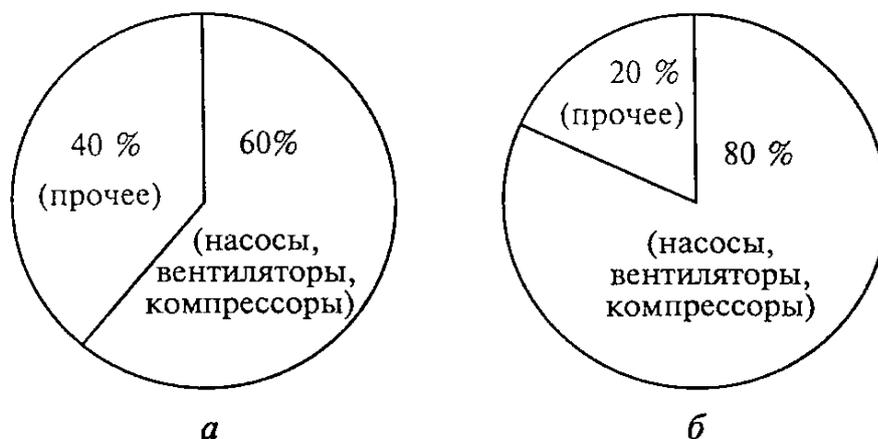


Рис. 3.2. Потребление электроэнергии электроприводом

а - промышленный сектор; *б* - коммерческий сектор.

Очень важно, что именно насосы и вентиляторы – основные потребители электроэнергии – до настоящего времени во всем мире оборудованы простейшим электроприводом и обладают громадным ресурсом энерго- и ресурсосбережения.

Среди других потребителей, имеющих также широкое распространение в промышленности и сельском хозяйстве, лифты, подъемные краны, конвейеры,

транспортеры, агрегаты для обработки древесины, размельчения твердых видов сырья, шаровые мельницы, различные миксеры и пр.

Эти потребители, как и множество неназванных, также обычно снабжены простыми электроприводами и заключают в себе немалые резервы экономии электроэнергии.

Если весь электропривод потребляет порядка 60% от всей вырабатываемой электроэнергии, то на долю массового – простого – электропривода приходится около 50%. При этом, подавляющее число приводных электродвигателей общепромышленных механизмов (около 99%) составляют небольшие и средние электродвигатели, потребляющие основную долю электрической энергии.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО КАНАЛА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1. Процесс преобразования в технологических установках электрической энергии в механическую энергию.

Электрическая энергия преобразуется в механическую энергию в силовом канале электропривода. Рассмотрим этот канал подробнее на примере простого электропривода насоса с регулируемым расходом воды.

В силовой канал входят следующие элементы (рис. 4.1,а):

- питающий трансформатор (Тр) со счетчиком отпускаемой энергии (Сч. эн);
- подводящая воздушная или кабельная линия (Лин);
- электродвигатель (Дв);
- рабочая машина – насос (Нас);
- задвижка, регулирующая расход воды (Задв);
- технологическая часть – гидравлическая магистраль (Маг.) – с измерителями потребляемой энергии – расходомером (Расх) и манометром (Ман).

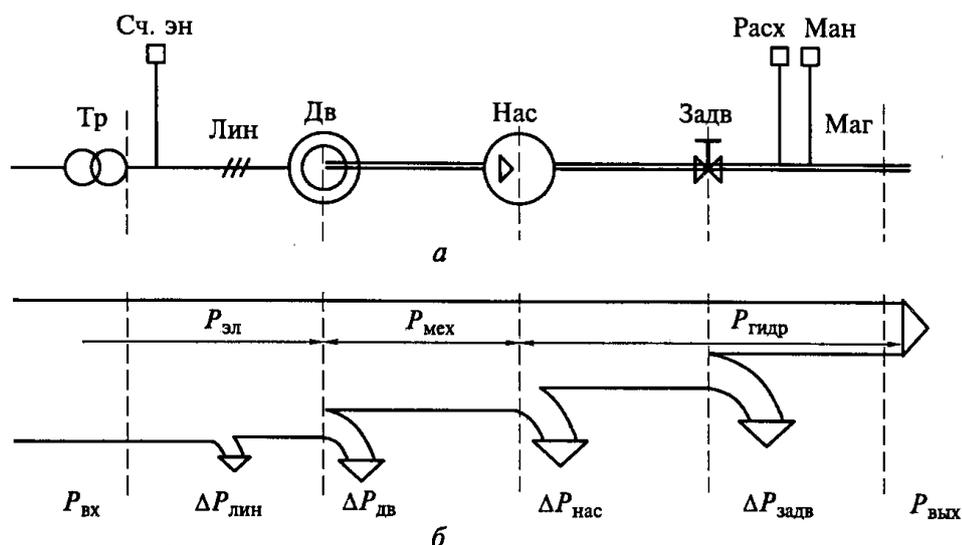


Рис. 4.1. Силовой канал электропривода (а) и диаграмма передачи мощности от источника к потребителю (б)

На рис. 4.1,б в сильно упрощенном виде, отражающем лишь главные черты энергетического процесса, представлена диаграмма передачи мощности от источника (трансформаторной подстанции) к потребителю (системе водоснабжения).

Потребляемая мощность $P_{вх}$, Вт, при трехфазной сети переменного тока пропорциональна произведению двух основных величин, определяющих процесс: фазного напряжения U_{ϕ} , В, и фазного тока I_{ϕ} , А, с учетом угла сдвига φ между ними:

$$P_{вх} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos\varphi. \quad (4.1)$$

Механическая мощность $P_{мех}$, Вт, определяется угловой скоростью ω , рад/с, и моментом M , $H \cdot м$:

$$P_{мех} = M\omega. \quad (4.2)$$

Угловая скорость ω , рад/с, связана с частотой вращения n , об/мин, соотношением $\omega = \pi n / 30$. Далее мы будем использовать обе эти величины.

Гидравлическая мощность $P_{гидр}$ определяется давлением p , Па, и расходом Q , $м^3/с$:

$$P_{гидр} = pQ, \quad (4.3)$$

или в практических единицах гидравлическая мощность $P_{гидр}$, кВт, определяется напором H , м вод. ст., и расходом Q , м³/ч:

$$P_{гидр} = HQ/367.$$

Источник электроэнергии обеспечивает одну из определяющих мощность величин (обычно напряжение). Вторая – ток (и, следовательно, мощность) – целиком определяется потребителем и каналом связи источник – потребитель. У потребителя также одна из величин задается системой (в рассматриваемом случае – давление), вторая определяется технологическим процессом (расход).

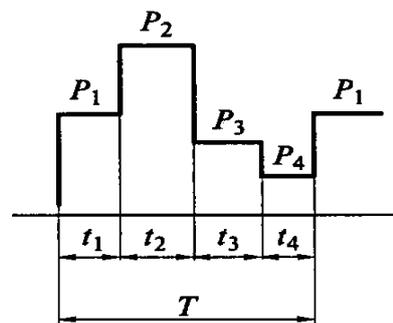


Рис. 4.2. Цикл работы электропривода

4.2. Вывод основных соотношений

Энергия W , Дж, – потребляемая, преобразуемая и расходуемая – определяется как интеграл от изменяющейся во времени мощности $P(t)$ за некоторое время T :

$$W = \int_0^T P(t) dt. \quad (4.4)$$

В частном случае, когда на отдельных интервалах t_i мощность постоянна и равна P_i (рис. 5.2), формула (5-4) приобретает вид

$$W = \sum_{i=1}^m P_i t_i,$$

где m – число интервалов.

Каждая ступень преобразования и передачи энергии, независимо от способа реализации, сопровождается потерями ΔP , величина которых существенно зависит от конкретного оборудования и режимов его работы.

Потери энергии в соответствии с формулой (5-4) определяются следующим образом:

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P(t) dt . \quad (4.5)$$

Потери в питающей линии $\Delta P_{\text{лин}}$ будут зависеть от сопротивления провода $R_{\text{лин}}$ и полного тока $I_{\text{лин}}$:

$$\Delta P_{\text{лин}} = 3I_{\text{лин}}^2(t)R_{\text{лин}} . \quad (4.6)$$

Полный ток $I_{\text{лин}}$, в свою очередь, определяется активный I_a и реактивный I_p составляющими (рис. 4.3): первая создает момент двигателя и, следовательно, активную мощность, вторая – магнитное поле двигателя.

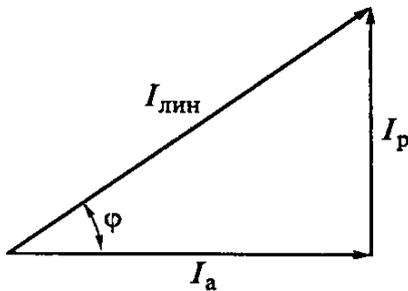


Рис. 4.3. Векторная диаграмма токов в асинхронном электродвигателе

Потери в линии и питающем трансформаторе будут существенно зависеть от $\cos \varphi$:

$$\frac{\Delta P_{\cos \varphi}}{\Delta P_{\cos \varphi=1}} = \frac{1}{\cos^2 \varphi} , \quad (4.7)$$

в связи, с чем обычно стремятся избежать низких $\cos \varphi$.

Потери в двигателе $\Delta P_{\text{дв}}$ определяются его коэффициентом полезного действия (КПД):

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{вых.дв}}}{P_{\text{вых.дв}} + \Delta P_{\text{дв}}} = \frac{P_{\text{вх.дв}} - \Delta P_{\text{дв}}}{P_{\text{вх.дв}}} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{дв}}}{P_{\text{вх.дв}}} \quad (4.8)$$

и обычно невелики, поскольку КПД в широком диапазоне нагрузок высок – 0,8...0,9. Неверно выбранный или работающий значительную долю времени с малой нагрузкой или вхолостую двигатель имеет низкий КПД и создает лишние потери.

Потери в насосе $\Delta P_{\text{нас}}$ также определяются его КПД:

$$\eta_{НАС} = \frac{\Delta P_{ВЫХ.НАС}}{\Delta P_{ВЫХ.НАС} + \Delta P_{НАС}}, \quad (4.9)$$

Причем его максимум (70...75%) располагается вблизи номинального режима и резко снижается при отходе от номинальной нагрузки. Здесь резервы экономии очень существенны.

И, наконец, потери в задвижке $\Delta P_{ЗАДВ}$, используемой в простейшем электроприводе для регулирования расхода, могут быть очень большими.

Похожие рассуждения, приводящие к энергетической модели электропривода, могут быть сделаны для любого потребителя – вентилятора, конвейера, воздуходувки и т.д.

Обобщая результаты рассмотрения энергетического процесса, осуществляемого электроприводом, можно обнаружить, что эффективность данного процесса определяется двумя факторами.

Первый – насколько соответствует подводимая к потребителю мощность требованиям оптимального технологического процесса. Например, насколько удачно выбрано давление на входе гидравлической системы, обслуживающей здание: его должно хватить для комфортного водопотребления в любой квартире, и оно не должно быть избыточным (лишняя потребляемая мощность, разрывы труб, лишние утечки воды и т.д.).

Второй – насколько велики потери, сопровождающие процесс (потери в насосе, бесполезно перемешивающем воду, и в задвижке могут быть большими).

Очевидны, пока в самом общем виде, и примеры энергосбережения: оборудование должно быть правильно выбрано, и должны использоваться рациональные средства управления мощностью, подводимой к потребителю.

В рассматриваемой энергетической модели простого электропривода могут использоваться любые электродвигатели, и она применима к множеству установок, работающих с переменной нагрузкой. Ее частный случай – постоянная нагрузка, например, постоянно работающий вентилятор. Здесь

решение одно – правильно выбрать оборудование.

Разновидность рассматриваемой модели относится к случаю пикового приложения нагрузки с последующим холостым ходом, например в штамповочной машине или прессе, или к часто включаемым и выключаемым установкам, например в технологических линиях и т.д. Здесь существенны динамические процессы изменения скорости и момента во времени, сопровождающиеся значительными потерями, поэтому примеры энергосбережения связаны с уменьшением именно этих потерь.

Полную и достоверную оценку фактической энергетической эффективности любой системы можно сделать только на основе КПД цикла $\eta_{ц}$, т.е. при сопоставлении необходимой полезной энергии за некоторый цикл $W_{пол.ц}$ с энергией, потребленной от источника за это же время $W_{потр.ц}$:

$$\eta_{ц} = \frac{W_{пол.ц}}{W_{потр.ц}} = \frac{W_{пол.ц}}{W_{пол.ц} + \Delta W_{ц}}, \quad (4.10)$$

где $\Delta W_{ц}$ - потери энергии за цикл.

В ряде случаев непросто оценить необходимую полезную энергию и приходится пользоваться лишь фактической оценкой, которую удастся получить по измерительным приборам и которая может отличаться от необходимой (например, неверно выбранное давление). Однако такая оценка лучше, чем часто практикуемая оценка по КПД в точке, вычисленному по отношению полезной и потребленной мощностей в каком-либо режиме (часто – в номинальном).

Следует подчеркнуть некорректность оценок по мощностям в точке (в одном режиме) для процессов, изменяющихся во времени (например, полезный расход воды может меняться в разное время суток в 10 и более раз).

Оценки энергетической эффективности усложняются при неоднонаправленных потоках энергии (подъем – спуск, разгон – торможение и т.д.), однако необходимость пользоваться понятиями энергии, а не мощности в точке, сохраняется и там.

5. СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

5.1. Общие сведения об асинхронных электродвигателях

Приведем краткие сведения об асинхронных электродвигателях, необходимые для понимания их основных свойств и характеристик.

Общий вид асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором показан на рис. 5.1.

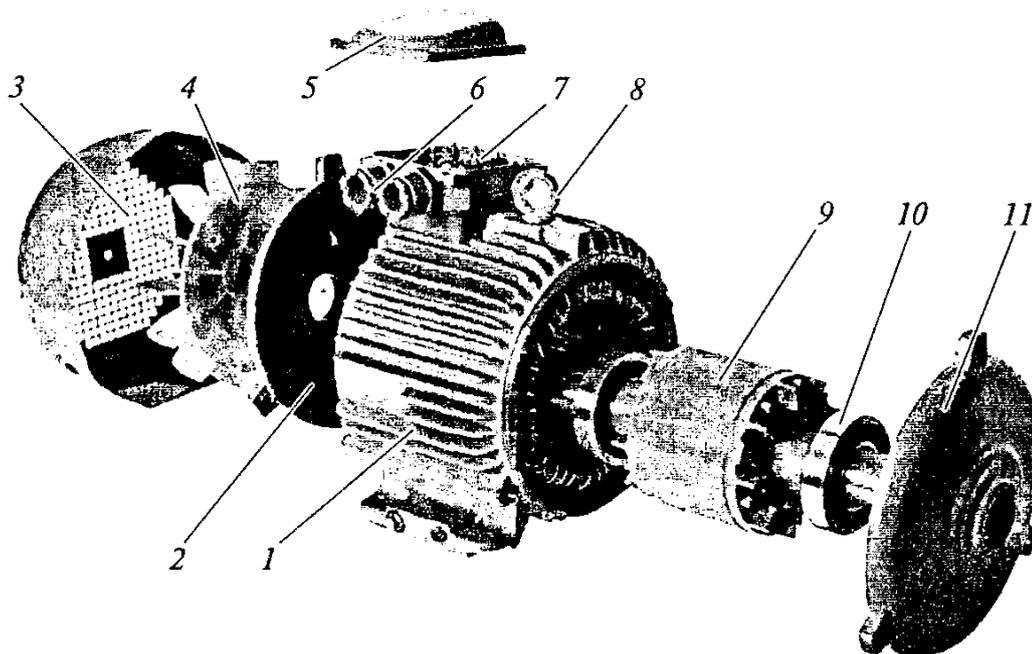


Рис. 5.1. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором:
1 – статор; 2 – подшипниковый щит; 3 – крышка вентилятора; 4 – вентилятор;
5 – крышка; 6- клеммная коробка; 7 – клеммная панель; 8 – рым-болт;
9 – ротор; 10 – подшипник; 11 – подшипниковый щит.

В пазах статора размещена обмотка, образующая фазные зоны, сдвинутые в пространстве на 120 эл. градусов. При подключении обмотки к трехфазной сети, напряжение фаз которой сдвинуты на 120° , возникает магнитное поле, вращающееся с угловой скоростью ω_0 , рад/с.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (5.1)$$

где f_1 – частота сети; p – число пар полюсов.

Для стандартной частоты $f_1 = 50$ Гц частота вращения поля n_0 об/мин, определяющееся по формуле

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p} \quad (5.2)$$

Зависит от конструкции машины и может составлять 3 000, 1 500, 1 000, 750, 600 и т.д.

В пазах короткозамкнутого ротора заложены стержни, соединенные по торцам и образующие «белчью клетку».

При вращении ротора со скоростью поля (идеальный холостой ход) $\omega = \omega_0$ в его стержнях не наводится ЭДС, не протекает ток, не создается момент. Приложенное напряжение U_1 уравнивается ЭДС самоиндукции E_1 :

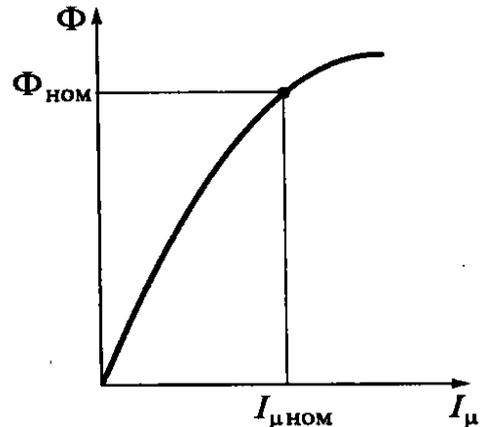


Рис. 5.2. Кривая намагничивания АД

$$E_1 = 4,44 \Phi f_1 w_1 k_{OB}, \quad (5.3)$$

где Φ – магнитный поток; w_1 – число витков фазы; k_{OB} – конструктивный обмоточный коэффициент.

Ток в обмотке статора – ток намагничивания I_μ – тратится на создание магнитного поля и определяется кривой намагничивания машины $\Phi = f(I_\mu)$ (рис. 5.2), обычно $I_{\mu,НОМ} = (0,35 \dots 0,4) I_{1,НОМ}$.

При приложении к валу АД момента M_C ротор отстает от поля, т.е. $\omega \neq \omega_0$, в его стержнях наводится ЭДС и протекает ток, который, взаимодействуя с магнитным полем, создает электромагнитный момент M , уравнивающий момент нагрузки M_C .

Различие скоростей ω_0 и ω характеризуют скольжением s :

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (5.4)$$

определяющим частоту тока в роторе f_2 :

$$f_2 = f_1 s. \quad (5.5)$$

Для анализа процессов в АД обычно используют схемы замещения, построенные для одной фазы. Самая простая схема замещения с контуром намагничивания X_μ , вынесенным на зажимы, показана на рис. 5.3.

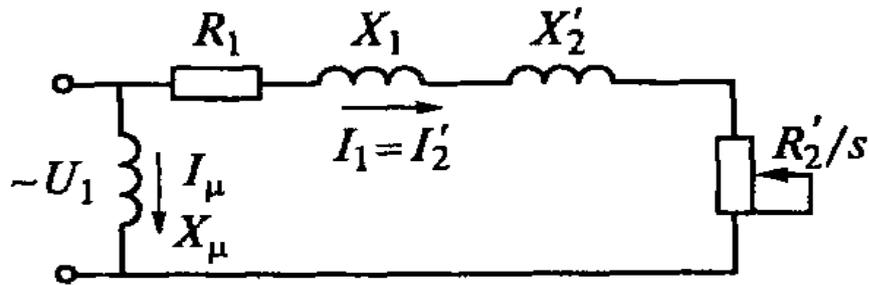


Рис. 5.3. Схема замещения АД

В этой схеме:

R_1 - активное сопротивление фазы статора;

X_1 - индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора $X_1 = 2\pi f_1 L_1$;

R_2' - приведенное активное сопротивление ротора;

X_2' - приведенное индуктивное сопротивление ротора $X_2' = 2\pi f_1 L_2'$;

X_μ - индуктивное сопротивление контура намагничивания;

I_1, I_2', I_μ - соответственно ток статора, приведенный ток ротора и ток намагничивания.

5.2. Вывод основных аналитических выражений АД

Схема замещения (рис. 5.3) позволяет на качественном уровне оценить вид основных характеристик АД, т.е. зависимостей Φ , I_2' , $\cos\psi_2$ и M от скольжения s (рис. 5.4).

Магнитный поток Φ в принятом приближении не зависит от скольжения, приведенный ток ротора

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (5.6)$$

Стремится с ростом скольжения к асимптоте

$$I_{2ac} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}, \quad (5.7)$$

где $X_K = X_1 + X_2'$.

Величина $\cos\psi_2$, характеризующая сдвиг тока I_2' по отношению к вызвавшей его ЭДС E_2' близка к ± 1 при малых s и стремится к 0 при $s \rightarrow \pm\infty$.

Электромагнитный момент M , развиваемый двигателем, определяется по формуле

$$M = \Phi k I_2' \cos\psi_2 \quad (5.8)$$

и имеет максимальные значения, называемые критическими $\pm M_K$ при критических скольжениях $\pm s_K$ (рис. 5.4).

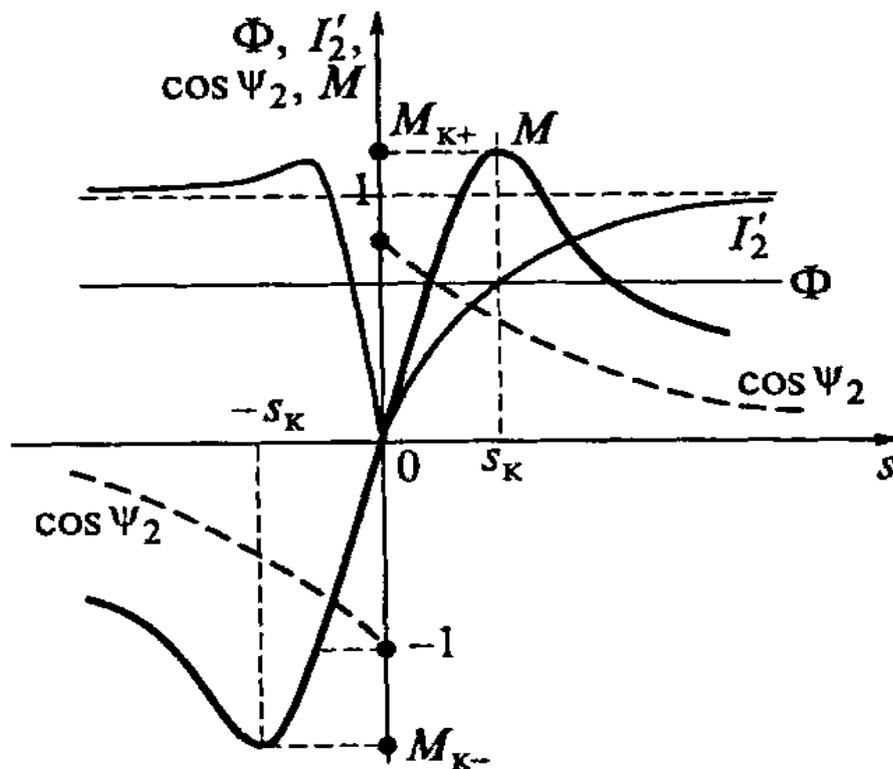


Рис. 5.4. Основные характеристики АД

Для количественных оценок можно воспользоваться следующими упрощенными соотношениями, полученными в предположении, что $R_1 \approx 0$, и обычно не приводящими к большим погрешностям при $P_{НОМ} > 5$ кВт:

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}; \quad (5.9)$$

$$M_K = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_K}; \quad (5.10)$$

$$s_K = \frac{R_2'}{X_K}. \quad (5.11)$$

Механическую $\omega(M)$ и электромеханическую $\omega(I_1)$ характеристики АД с короткозамкнутым ротором можно также построить по паспортным и каталожным данным двигателя.

Приведенные сведения относятся к установившимся режимам работы АД. Переходные процессы – пуск, торможение, изменение скорости, наброс и сброс нагрузки – подчиняются уравнению движения

$$M - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \quad (5.12)$$

где M - момент, развиваемый двигателем; M_c - момент сопротивления (нагрузки); J_Σ - суммарный момент инерции.

Суммарный момент инерции определяется по формуле

$$J_\Sigma = J_{ДВ} + j_{МЕХ} / i^2, \quad (5.13)$$

где $J_{ДВ}$ - момент инерции двигателя; $J_{МЕХ}$ - момент инерции механизма; i - передаточное число редуктора (если он используется), $i = \omega / \omega_{МЕХ}$.

Для оценок поведения АД в динамических режимах часто можно заменить его механическую характеристику, имеющую весьма сложную форму, средним моментом M_{CP} на участке динамического режима. При пуске можно принять

$$M_{CP} \approx \frac{M_{II} + M_K}{2}.$$

Тогда уравнение (5.12) имеет при $M_c = const$ элементарное общее решение

$$\omega = \omega_{нач} + \frac{M_{CP} - M_c}{J_\Sigma} t, \quad (5.14)$$

или для пуска при $0 < \omega < \omega_{уст}$

$$\omega = \frac{M_{CP} - M_c}{J_\Sigma} t.$$

Графики пуска показаны на рис. 5.5, где реальным характеристикам соответствуют штриховые линии, аппроксимированным – сплошные.

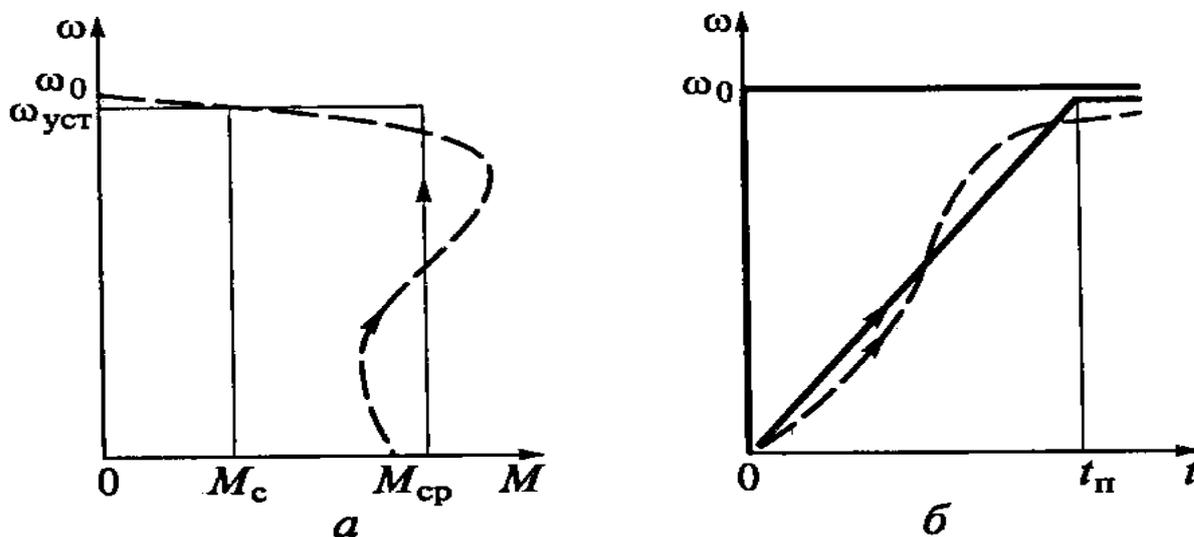


Рис. 5.5. Графики пуска АД в координатах $\omega - M$ (а) и $\omega - t$ (б)

6. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

6.1. Построение энергетических моделей двигателей

Электродвигатели служат обязательным элементом любого электропривода, и поэтому их энергетические модели особенно важны.

Построение энергетических моделей асинхронных двигателей основано на простейшей схеме замещения, каталожных (паспортных) данных двигателей и некоторых обобщенных характеристиках.

Мощность, потребляемая трехфазным асинхронным двигателем при соединении его обмоток в схему «треугольник», определяется по формуле

$$P_1 = 3U_{1л} \frac{I_{1л}}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{1л} I_{1л} \cos \varphi. \quad (6.1)$$

При соединении обмоток в схему «звезда»

$$P_1 = 3 \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}} I_{1л} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{1л} I_{1л} \cos \varphi. \quad (6.2)$$

Номинальная потребляемая мощность $P_{Xном}$ будет соответствовать подстановке в формулу (6.1) или (6.2) номинальных напряжения, тока и $\cos \varphi$.

Мощность на валу P определяется по формуле

$$P = M\omega, \quad (6.3)$$

номинальная мощность $P_{ном}$ соответствует номинальному моменту $M_{ном}$ и номинальной угловой скорости $\omega_{ном} = \pi n_{ном} / 30$.

Потери мощности ΔP в электродвигателе в установившемся режиме при питании от сети представляют обычно суммой двух составляющих: постоянных K и переменных V потерь:

$$\Delta P = K + V. \quad (6.4)$$

Под постоянными потерями K подразумеваются потери мощности, не зависящие от нагрузки двигателя. К ним относят потери в магнитопроводе

(стали), механические и добавочные потери, и др..

К переменным относят потери, выделяемые в обмотках двигателей при протекании по ним токов, определяемых нагрузкой электропривода. Переменные потери мощности в двигателе могут быть в общем случае определены через электрические или механические переменные и параметры.

Для трехфазных АД в соответствии со схемой замещения

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2'. \quad (6.5)$$

При использовании этой схемы замещения (см. рис. 5.3), в которой по резистору R_1 протекает ток I_2' , потери в статоре составляют

$$V_1 = 3I_2'^2 R_1 = 3I_2'^2 R_1 R_2' / R_2' = V_2 R_1 / R_2', \quad (6.6)$$

а полные переменные потери

$$V = 3I_2'^2 (R_1 + R_2') = V_2 (1 + R_1 / R_2'). \quad (6.7)$$

Для двигателя постоянного тока переменные потери мощности V определяются по формуле

$$V = I^2 R, \quad (6.8)$$

где I , R - соответственно ток и сопротивление цепи якоря двигателя.

Для трехфазных синхронных двигателей

$$V = 3I_1^2 R_1. \quad (6.9)$$

Переменные потери мощности, выделяющиеся в роторе АД или в якоре двигателя постоянного тока, могут быть также определены как разность электромагнитной мощности (ЭМ) $P_{ЭМ} = M\omega_0$ и мощности на валу:

$$V_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 \left(\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right) = M\omega_0 s, \quad (6.10)$$

где s - скольжение АД или относительная скорость двигателя постоянного тока, $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$.

Переменные потери в статоре АД в соответствии с формулой (6.6) составят

$$V_1 = V_2 R_1 / R_2' = M \omega_0 s R_1 / R_2, \quad (6.11)$$

а полные переменные потери в АД будут равны

$$V = V_1 + V_2 = M \omega_0 s (1 + R_1 / R_2'). \quad (6.12)$$

Потери мощности при работе двигателя в номинальном режиме определяются по паспортным данным двигателя с помощью номинального КПД $\eta_{НОМ}$ и номинальной мощности двигателя $P_{НОМ}$:

$$\Delta P_{НОМ} = P_{НОМ} (1 - \eta_{НОМ}) / \eta_{НОМ}, \quad (6.13)$$

или как разность между потребляемой электрической мощностью $P_{1НОМ}$ и номинальной мощностью двигателя $P_{НОМ}$:

$$\Delta P_{НОМ} = P_{1НОМ} - P_{НОМ}. \quad (6.14)$$

Постоянные потери мощности находятся по формуле

$$K = \Delta P_{НОМ} - V_{НОМ}, \quad (6.15)$$

где $V_{НОМ}$ - переменные потери в двигателе в номинальном режиме.

6.2. Потери энергии при работе электропривода без нагрузки и с нагрузкой

На рис. 6.1 представлено ориентировочное распределение потерь в АД с КПД 85% в зависимости от нагрузки.

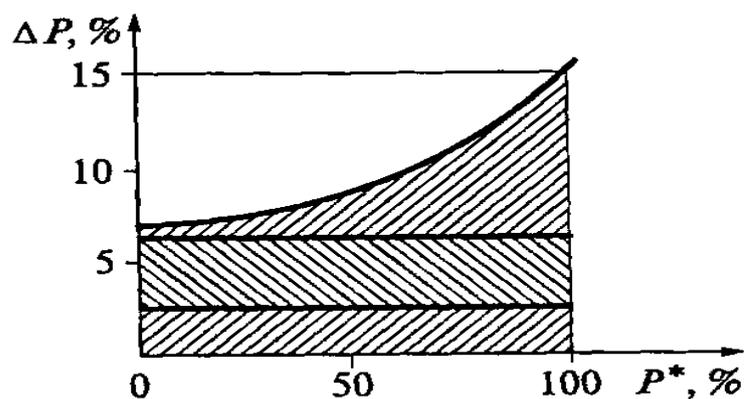


Рис. 6.1. Распределение потерь в АД с номинальным КПД 85%

Потери в меди составляют обычно большую часть общих потерь, и в дальнейшем на них будут обращено особое внимание.

За время $t_{ц}$ работы двигателя с переменной нагрузкой $\Delta P(t)$ полные потери энергии, обусловленные потерями мощности K и V , определяются соотношением (6.5); при работе двигателя с циклически изменяющейся нагрузкой полные потери энергии за весь цикл составят

$$\Delta W = \int_0^{t_{ц}} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i, \quad (6.16)$$

где $t_{ц}$ - время цикла, $t_{ц} = \sum_{i=1}^n t_i$, n - число участков цикла; ΔP_i , t_i - соответственно потери мощности и время работы на i -м участке цикла.

Потери энергии в переходных режимах при пуске, реверсе, торможении, изменениях скорости и нагрузки существенно превышают номинальный уровень и могут заметно влиять на энергетические показатели электропривода, а также вызывают дополнительный нагрев и тем самым влияют на срок службы двигателя.

Особенно большое значение определение потерь электроэнергии в переходных процессах имеет для электроприводов, у которых динамический режим является основным. К ним относятся, например, электроприводы подъемных кранов, строгальных станков, лифтов и т.д.

В общем случае потери энергии за время переходного процесса (ПП) $t_{пп}$ могут быть определены с помощью следующего выражения

$$\Delta W = \int_0^{t_{III}} \Delta P dt = \int_0^{t_{III}} K dt + \int_0^{t_{III}} V dt = \Delta W_K + \Delta W_V, \quad (6.17)$$

где ΔW_K , ΔW_V - потери энергии, обусловленные соответственно постоянными и переменными потерями мощности.

Потери энергии ΔW_K находятся как $\Delta W_K = K t_{III}$ и невелики по сравнению с ΔW_V .

Потери энергии ΔW_V для АД могут быть найдены через ток и сопротивление, однако в большинстве случаев это оказывается затруднительным из-за того, что необходимо иметь зависимость тока двигателя в переходном процессе от времени $i(t)$, а также располагать данными об активном сопротивлении цепей двигателя R .

Более удобные расчетные соотношения для определения потерь в переходных режимах получаются в том случае, когда переменные потери мощности выражаются механические величины.

Потери энергии при работе электропривода без нагрузки ($M_C = 0$).

Потери мощности в якоре двигателя постоянного тока и роторе АД определяются одной формулой (6.10), и поэтому потери энергии в этих частях двигателя в переходных режимах вхолостую ($M_C = 0$) с учетом формулы (6-12) определяются следующим выражением:

$$\Delta W_{20} = J_{\Sigma} \omega_0^2 (s_{НАЧ}^2 - s_{КОН}^2) / 2, \quad (6.18)$$

где J_{Σ} , ω_0 - соответственно момент инерции привода и скорость идеального холостого хода двигателя; $s_{НАЧ}$, $s_{КОН}$ - соответственно начальное и конечное скольжение двигателя.

Потери энергии в якоре двигателя постоянного тока и роторе АД при их пуске, реверсе и торможении вхолостую показано в таблице 6.2.

Полные потери энергии в АД при переходных процессах вхолостую в составят

$$\Delta W_0 = \Delta W_{20} (1 + R_1 / R_2'). \quad (6.19)$$

Таблица 6.1.

Режим	S _{нач}	S _{кон}	ΔW_{20}
Пуск	1	0	$\Delta W \omega_0^2 / 2$
Динамическое торможение	1	0	$\Delta W \omega_0^2 / 2$
Торможение противовключением	2	1	$3\Delta W \omega_0^2 / 2$
Реверс	2	0	$4\Delta W \omega_0^2 / 2$

Потери энергии при работе электропривода с нагрузкой ($M_C \neq 0$).

Для приближенного учета нагрузки двигателей принимают, что момент двигателя в переходных процессах не изменяется и равен некоторому среднему моменту M_{CP} , в результате чего имеем:

$$\Delta W = \Delta W_0 M_{CP} / (M_{CP} \pm M_C), \quad (6.20)$$

где ΔW , ΔW_0 - соответственно потери энергии под нагрузкой и без нагрузки двигателя; M_{CP} - средний, неизменный за время переходного процесса момент двигателя (знак « - » соответствует пуску, а знак « + » торможению двигателя).

Приведенные формулы для определения потерь могут быть использованы для расчета КПД двигателя.

На рис. 6.2, а показаны зависимости номинального КПД АД серии АИР и 5А от номинальной мощности $P_{НОМ}$. С ростом номинальной мощности номинальный КПД растет, что объясняется уменьшением потерь мощности относительно полезной мощности двигателя.

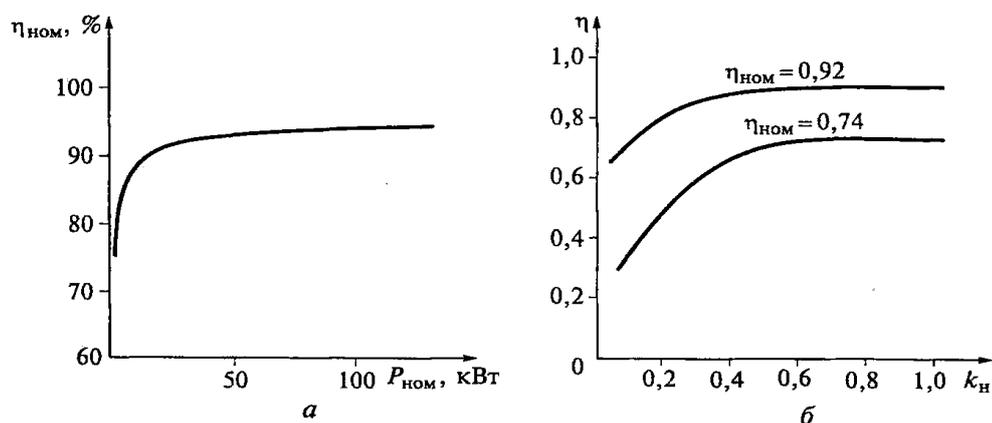


Рис. 6.2. Зависимость номинального КПД от номинальной мощности (а) и КПД от коэффициента нагрузки двигателя (б)

КПД работающего двигателя зависит от развиваемой им полезной механической мощности на валу. На рис. 6. 2, б показаны типовые зависимости КПД двигателей от коэффициента нагрузки $k_H = P_C / P_{НОМ}$ для двух значений номинального КПД, где P_C - механическая мощность на валу. При малых нагрузках КПД двигателя небольшой, по мере увеличения нагрузки он растет, достигая максимального значения η_{\max} при мощности, равной примерно 0,7...0,8 номинальной.

Другая энергетическая характеристика АД – коэффициент мощности $\cos \varphi$.

Если электропривод работает в некотором цикле при различных нагрузках или скоростях, то он как потребитель реактивной энергии характеризуется средневзвешенным или цикловым коэффициентом мощности, который определяется отношением потребленной активной энергии за цикл W_a к полной или кажущейся энергии W_{Π} в соответствии с формулой

$$\cos \varphi_{\Pi} = \frac{W_a}{W_{\Pi}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ai} t_i}{\sum_{i=1}^n S_i t_i}, \quad (6.21)$$

где S_i - полная, или кажущаяся, мощность, $S_i = \sqrt{P_{ai}^2 + Q_i^2}$.

При работе электропривода в установившемся режиме коэффициент мощности определяется по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{S} = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + Q^2}}. \quad (6.22)$$

Входящие в формулы (6.21) и (6.22) активная P_a и реактивная Q мощности применительно к трехфазному АД могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$P_a = P_{1a} = P_{MEK} + \Delta P = M\omega + K + V_1 + V_2; \quad (6.23)$$

$$Q = 3I_\mu^2 X_\mu + 3I_1^2 X_1 + 3I_2'^2 X_2', \quad (6.24)$$

где I_1 , I_2' , I_μ - соответственно токи статора, приведенный ток ротора и ток намагничивания; X_1 , X_2' , X_μ - соответственно индуктивное сопротивление статора, приведенное сопротивление ротора и контура намагничивания.

На рис. 6.3, а приведены зависимости номинального коэффициента мощности для АД различных номинальных мощностей $P_{НОМ}$ и различных частот вращения холостого хода n_0 . Характерным для них является более высокое значение $\cos \varphi_{НОМ}$ для двигателей больших номинальных мощностей и скоростей вращения.

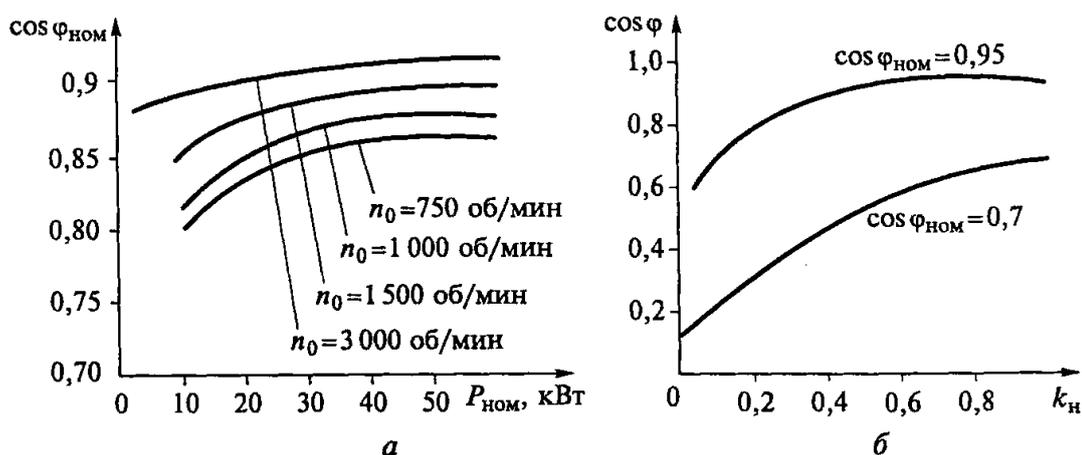


Рис. 6.3. Зависимости номинального коэффициента мощности от номинальной мощности (а) и коэффициента мощности от коэффициента нагрузки двигателя (б)

Для большинства асинхронных двигателей $\cos \varphi_{НОМ} \approx 0,8 \dots 0,9$. Для этих значений $Q \approx (0,5 \dots 0,7) P_1$, т.е. АД на каждый киловатт активной мощности

потребляет из сети 0,5...0,75 кВАр реактивной мощности. Чем ниже $\cos\varphi$, тем большую реактивную мощность потребляет АД из системы электроснабжения, загружая ее элементы дополнительным током и вызывая в ней соответствующие потери.

Коэффициент мощности АД существенно зависит от его нагрузки. При холостом ходе АД коэффициент мощности невелик, так как относительно велика доля реактивной мощности по сравнению с активной. По мере увеличения нагрузки двигателя возрастает и $\cos\varphi$, достигая своего максимального значения примерно в области номинальной нагрузки двигателя. Зависимость $\cos\varphi$ от коэффициента механической нагрузки $k_H = P_C / P_{НОМ}$ для АД серии 4А при различных уровнях номинальных $\cos\varphi_{НОМ}$ приведена на рис. 6.3, б.

Для расчета входящих в приведенные формулы тока намагничивания I_μ и приведенного номинального тока ротора I'_2 АД могут быть использованы следующие приближенные формулы:

$$I_\mu \approx I_{1НОМ} (\sin\varphi_{НОМ} - s_{НОМ} \cos\varphi_{НОМ} / s_K) \approx \\ \approx I_{1НОМ} (\sin\varphi_{НОМ} - \cos\varphi_{НОМ} / \lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}); \quad (6.25)$$

$$I'_{2НОМ} \approx I_{1НОМ} \cos\varphi_{НОМ} \sqrt{2\lambda_M / (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1})}, \quad (6.26)$$

где λ_M - кратность максимального момента АД, $\lambda_M = M_K / M_{НОМ}$.

При $\lambda_M > 1,7$ формула (6.26) может быть упрощена и примет следующий вид:

$$I'_{2НОМ} \approx I_{1НОМ} \cos\varphi_{НОМ}. \quad (6.27)$$

При этом погрешность получаемого результата по сравнению с выражением (6.26) будет менее 5%.

7. РЕЗЕРВЫ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ, РЕСУРСОВ И ПРИНЦИПЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Перечислим и рассмотрим более подробно основные принципы экономии энергии в электроприводе и средствами электропривода.

Разделим возможные ситуации на две большие группы:

- 1) регулирование скорости не используется;
- 2) нерегулируемый электропривод заменяется регулируемым.

В первой группе основная возможность влиять на энергетические процессы — правильный выбор основного оборудования, в первую очередь, электродвигателя и редуктора, если он используется, а также применение некоторых мероприятий, снижающих потери.

7.1. Правильный выбор электрооборудования установок и систем

Выбор электрооборудования. Важным и еще очень мало использованным резервом энергосбережения служит правильный выбор основного электрооборудования в простейшем, самом массовом и энергоемком нерегулируемом электроприводе.

Европейские эксперты считают, что средний коэффициент использования двигателей (отношение средней мощности за цикл к номинальной) составляет 0,6.

Как показывает опыт, в отечественных условиях этот коэффициент иногда существенно ниже. Ситуация дополнительно осложнилась в связи с частичным свертыванием в 1990-е годы ряда производств.

Обнаружилось, что нередко доля энергетических затрат на оставшуюся продукцию непомерно возрастает, что делает производство нерентабельным.

Существенный эффект в подобных случаях может дать простая замена оборудования (двигателей), однако корректное решение подобной задачи предполагает достаточно высокую квалификацию персонала.

Здесь весьма эффективны прикладные компьютерные программы, ориентированные на широкий круг специалистов, связанных с электроприводом, и поддерживающие принятие рациональных решений.

Опыт создания таких программ для европейской фирмы IMOFA показал несмотря на большие затраты труда эффективность такого подхода: в руках специалистов оказывается мощный, удобный, очень легко осваиваемый инструмент, позволяющий быстро решать весьма непростые задачи.

Был создан пакет программ, охватывающих массовый электропривод переменного тока и позволяющих решать задачи выбора и проверки асинхронных двигателей АИР (АИС) с высотами осей вращения до 160 мм, оценивать их характеристики при отклонении напряжения от нормы, определять срок службы подшипников в любых условиях их работы, оценивать потери в ременных передачах в различных режимах и т.д.

К сожалению, в период создания программ (1990 — 1994 гг.) отечественные предприятия не были в достаточной мере оснащены компьютерами, поэтому программы интенсивно эксплуатировались лишь в европейских фирмах. Сейчас положение изменилось, и этот вид поддержки инженерных решений в сфере электропривода может быть с успехом перенесен в отечественную практику.

7.2. Снижение потерь в приводных электродвигателях и питающих электросетях

Уменьшение потерь в двигателях. В мировой практике с середины 1990-х годов активно пропагандируется использование энергосберегающих двигателей (Energy Efficient Motors — EEM).

Идея очень проста: в асинхронный двигатель закладывается на 25... 30 % больше активных материалов (железа, меди, алюминия), за счет чего на 30 % снижаются потери и возрастает КПД — на 5 % в небольших двигателях (единицы кВт) и на 1 % в двигателях 70...100 кВт.

Цена двигателя обычно увеличивается на 20...30%, срок окупаемости по данным европейских экспертов составляет около двух лет.

Существует множество восторженных публикаций, относящихся к ЕЕМ.

В частности, считается, что если бы все двигатели в Европе были заменены на ЕЕМ, то экономия электроэнергии была бы эквивалентна закрытию шести электростанций по 500 МВт.

Особенно широкий размах кампания по продвижению ЕЕМ на рынок приобрела в 1990-е годы в США. Десятки фирм — производителей ЕЕМ — используют развитую прикладную компьютерную программу Motor Master, облегчающую пользователям выбор нужных энергосберегающих двигателей для замены установленных. Широко рекламируется достигаемый эффект — экономия около 5 % электроэнергии, в этом процессе участвует Министерство энергетики США, организован ряд специальных программ и т.д.

Однако это направление энергосбережения содержит ряд спорных и неочевидных обстоятельств.

Во-первых, речь идет о нерегулируемом электроприводе, т. е. сэкономив несколько процентов на потерях в двигателе, в самых массовых и энергоемких применениях (насосы, вентиляторы и т.д.) можно продолжать терять в десятки раз больше в агрегатах, обслуживаемых электроприводом.

Во-вторых, расчетная экономия будет достигаться лишь при мало меняющейся и близкой к номинальной нагрузке. При резко переменной нагрузке, например при значительной доле холостого хода в цикле, экономия будет существенно меньше расчетной.

В-третьих, экономия может быть заметной (рекламируемые 4...5%), если все элементы силового канала правильно выбраны и настроены. Так, потери в ременной передаче, часто используемой, например, в электроприводе вентиляторов, могут варьироваться от 5 до 10... 12 % только за счет нерационального выбора параметров передачи и могут резко возрастать при неверно выбранном натяжении ремней. Таким образом, существует ряд при-

чин, которые могут практически обесценить этот популярный в США и Европе способ энергосбережения в электроприводе.

Уменьшение потерь в питающих сетях. Проблема потерь мощности возникает за счет низкого, особенно при малых нагрузках, коэффициента мощности ($\cos\phi$), в силу чего ток $I_{\text{лин}}$, протекающий в питающих линиях, трансформаторах, выше тока I_a , связанного с активной мощностью, следовательно, выше и потери в линиях $3I_{\text{лин}}^2 R_{\text{л}}$.

Проблема компенсации реактивной мощности традиционно пользуется большим (иногда избыточным) вниманием в отечественной практике. Найдены и применяются различные технические решения (переключаемые конденсаторные батареи, синхронные компенсаторы, фильтрокомпенсирующие устройства и т.д.).

Однако большинство этих приемов ориентированы на нерегулируемый, а иногда и сильно недогруженный электропривод с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Достижимый эффект может оказаться несопоставимо меньше убытков от использования нерегулируемого электропривода.

К другим способам энергосбережения в нерегулируемом электроприводе можно отнести:

- снижение времени холостого хода;
- переключение обмоток по схемам Δ — Y на время холостого хода или малых нагрузок;
- изменение типа торможения в электроприводах с частыми пусками и торможениями.

Переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому. Этот переход является генеральным направлением энергосбережения, принятым во всем мире и дающим наибольший эффект как в части экономии электроэнергии, так и в других показателях технологического процесса.

Для этого в силовой канал включается дополнительный элемент — преобразователь электрической энергии, подающий к асинхронному двигателю напряжение с регулируемой амплитудой и частотой. В результате обеспечивается подача конечному потребителю необходимой (или оптимальной) мощности $P_{\text{вых}}$ и исключаются большие потери в задвижке.

Одна из величин — расход воды — изменяется неуправляемо, поскольку она определяется открытыми в данный момент кранами, а вторая задается насосом и, следовательно, может управляться.

В других технологических процессах свободны для управления образующие мощность величины. Так, при пилке бревен, обработке металлов резанием существуют оптимальные режимы, определяемые наилучшим в частных случаях сочетанием скорости и силы резания: $P_{2onm} = M_{onm} \omega_{onm}$.

Следует подчеркнуть, что в рассматриваемом случае наряду с главным эффектом — существенным снижением потерь в технологической машине, обслуживаемой электроприводом, и в других элементах силового канала достигается ряд дополнительных, часто не менее важных эффектов: рационализируется весь технологический процесс, экономятся другие ресурсы, увеличивается срок службы основного оборудования, снижается шум и т.д.

Здесь особенно существенен выбор рационального с технической и экономической точек зрения способа управления величиной, образующей потребляемую технологическими машинами мощность.

До середины 1980-х годов единственным доступным решением был электропривод постоянного тока.

Его общеизвестные недостатки — дорогая машина и необходимость в обслуживании — ограничивали использование случаями, когда без регулируемого электропривода обойтись было нельзя (станки, металлургические агрегаты, мощные экскаваторы и т.д.).

Электропривод постоянного тока практически не использовался в массовых агрегатах (насосы, вентиляторы и т.д.), там абсолютно

преобладал нерегулируемый электропривод с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором.

Сейчас ситуация радикально изменилась: на широком рынке появились совершенные и доступные электронные преобразователи частоты.

Они выпускаются десятками зарубежных и отечественных фирм, имеют практически одинаковую структуру (неуправляемый выпрямитель— фильтр — автономный широтно-амплитудный модулятор (ШИМ-инвертор)) и развитую систему микропроцессорного управления, обеспечивающую широкие функциональные возможности, надежную защиту привода и другие важные пользовательские функции. Именно эти устройства произвели переворот в современном электроприводе: резко (до 15 %) снизили долю электроприводов постоянного тока в общем парке регулируемых электроприводов, стали основным (и пока практически единственным) средством, реализующим высококачественный регулируемый асинхронный электропривод в массовых применениях.

Вместе с тем предпринимались попытки использовать для регулирования скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в продолжительном режиме (насосы и пр.) более простые тиристорные регуляторы напряжения.

Эти устройства, широко и успешно применяемые для плавного пуска и останова электропривода («мягкие» пускатели).

Они требуют, даже при самой благоприятной вентиляторной нагрузке, увеличения мощности двигателя в 2—3 раза, специального исполнения ротора (повышенное скольжение), интенсивного независимого охлаждения и при этом имеют низкую надежность и низкие энергетические показатели.

Столь же неэффективны и другие способы регулирования скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, основанные на изменении напряжения при неизменной частоте (специальные «хитрые» асинхронные двигатели, муфты скольжения и пр.).

Становятся малоэффективными и многоскоростные асинхронные двигатели.

Они тяжелы, дороги, требуют много контактной аппаратуры, стоимость привода соизмерима со стоимостью системы преобразователь частоты — серийный двигатель.

Выход на широкий рынок электронных преобразователей частоты ставит новую задачу — создание асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Здесь, по-видимому, удастся существенно сэкономить активные материалы, снизить себестоимость и т.д.

Итак, система электронный преобразователь частоты—асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором становится главным на ближайшие годы техническим решением массового регулируемого электропривода.

Она особенно привлекательна на стадии модернизации, так как сохраняется все существующее оборудование, но между сетью и двигателем включается новый элемент — преобразователь частоты, радикально меняющий весь технический и экономический облик системы.

Приведенный обзор способов энергосбережения в электроприводе иллюстрируется далее изложением конкретных технических решений, примерами их использования, а также описанием опыта применения на практике и полученными результатами.

8. РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД – ОСНОВНОЕ СРЕДСТВО ЭНЕРГО – И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

8.1. Виды и общая характеристика регулируемых электроприводов

Примеры энергосбережения, рассмотренные ранее, относились к снижению потерь в двигателе и питающей линии и не затрагивали технологическое оборудование, не были связаны с изменением его режима. Основная же доля потерь, связана именно с технологическим процессом, со способами управления технологическими координатами. Так, в насосе и задвижке, регулирующей расход, теряется основная часть мощности. Это же относится к вентилятору с перекрываемым в целях регулирования воздуховодом и т.д.

Радикальный способ энергосбережения в электроприводе — переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому, т.е. подача к рабочему органу технологической установки требующейся в каждый момент мощности при минимальных потерях во всех элементах силового канала.

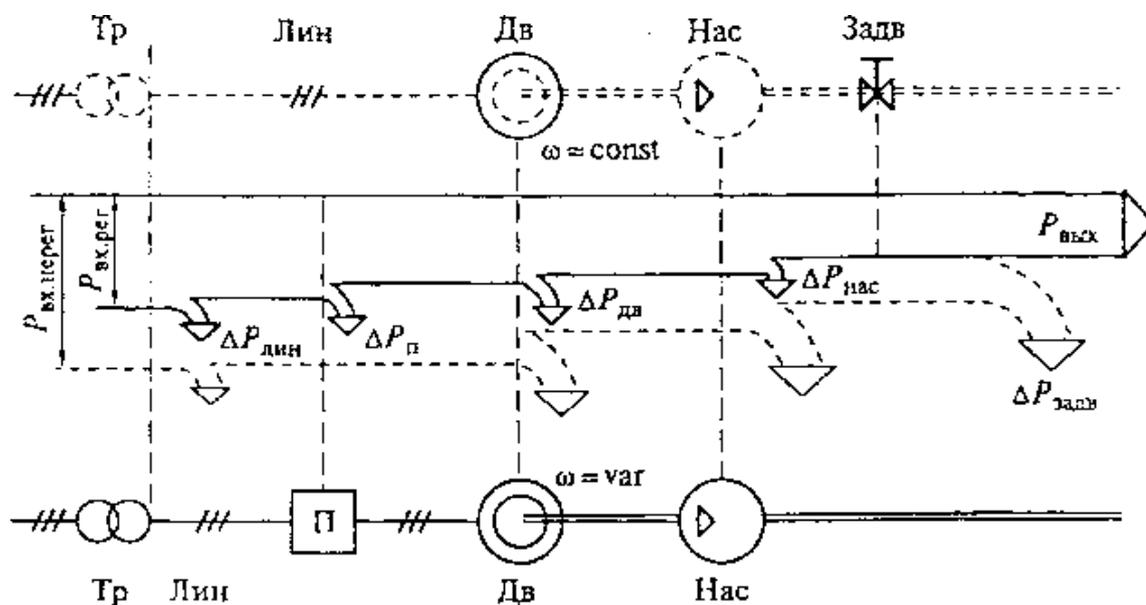


Рис. 8.1. Силовой канал электропривода с преобразователем электрической энергии

Технически это реализуется включением между сетью и двигателем управляемого электрического преобразователя П (рис. 8.1), воздействующего на скорость вращения двигателя.

Энергетический эффект можно проследить по диаграммам, представленным на рис. 8.1. Первая (штриховые линии) относится к нерегулируемому электроприводу, вторая — к регулируемому электроприводу (сплошные линии). При одинаковой выходной мощности и открытой задвижке во втором случае существенно уменьшаются потери в гидравлической части и потребляемая системой мощность $P_{вх}$.

Эффект, разумеется, будет существенно зависеть от конкретной реализации подсистемы преобразователь — двигатель, т.е. от того, как организован регулируемый электропривод.

До середины 1980-х годов единственным доступным решением регулируемого электропривода был электропривод постоянного тока. Его общеизвестные недостатки — дорогая машина и необходимость в обслуживании — ограничивали использование случаями, когда без регулируемого электропривода обойтись было нельзя (станки, металлургические агрегаты, мощные экскаваторы и т.д.). Электропривод постоянного тока практически не использовался в массовых агрегатах (насосы, вентиляторы и т.д.).

В некоторых агрегатах (краны, лифты и др.) использовались и используются многоскоростные асинхронные двигатели с обмотками статора на разное число полюсов и короткозамкнутым ротором, асинхронные двигатели с фазным ротором при реостатном регулировании, в мощных агрегатах с небольшим диапазоном регулирования применялись каскадные схемы электропривода, однако подавляющее большинство (до 95 %) электроприводов были нерегулируемыми, построенными на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Сейчас ситуация радикально изменилась: на широком рынке появились совершенные и доступные электронные преобразователи частоты. Именно эти устройства произвели переворот в современном электроприводе — резко (до 15%) снизили долю электроприводов

постоянного тока в общем парке регулируемых электроприводов, стали основным и пока практически единственным средством, реализующим высококачественный регулируемый асинхронный электропривод в массовых применениях.

Становятся малоэффективными многоскоростные асинхронные двигатели — они тяжелы, дороги, требуют много контактной аппаратуры, стоимость привода соизмерима, а иногда и больше стоимости системы преобразователь частоты — серийный двигатель.

Стало непривлекательным неэкономичное реостатное регулирование.

Оказались неудачными попытки энтузиастов приспособить для регулирования скорости асинхронного двигателя в продолжительном режиме тиристорные регуляторы напряжения – плавные пускатели.

Система электронный преобразователь частоты — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором становится главным на ближайшие годы техническим решением массового регулируемого электропривода. Она особенно привлекательна на стадии модернизации, так как сохраняется все существующее оборудование, но между сетью и двигателем включается новый элемент — преобразователь частоты, радикально меняющий технический и экономический облик системы.

Развивается новый тип регулируемого электропривода — вентильно-индукторный электропривод, имеющий очень простую, технологичную, дешевую и надежную машину, простой и надежный (в сравнении с преобразователем частоты) электронный коммутатор, что позволяет этому приводу превосходить по основным свойствам электроприводы других типов. Правда, до настоящего времени не удается полностью преодолеть проблемы, связанные с управлением двигателя в таком электроприводе.

В табл. 9.1 в краткой форме представлены достоинства и недостатки различных регулируемых электроприводов.

Основное техническое решение регулируемого электропривода в массовых применениях сегодня — система электронный преобразователь

частоты — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Эта система рассмотрена далее более подробно.

Таблица 8.1

Сопоставление свойств электроприводов различных типов

Виды ЭП	ЭП постоянного тока	Асинхронный ЭП	Вентильно-индукторный ЭП	ЭП с машинами на постоянных магнитах
Достоинства	Хорошие регулировочные возможности	Возможность работы непосредственно от сети переменного тока. Развитые схемотехника и программное обеспечение	Простота, технологичность, низкая стоимость машины. Высокая надежность. Большие моменты при низких скоростях	Хорошие энергетические и массогабаритные показатели
Недостатки	Трудоемкая и материалоемкая дорогая машина. Необходимость обслуживания	Относительно высокая стоимость регулируемого ЭП	Необходимость в специальном силовом преобразователе. Сложные алгоритмы управления. Недостаточно разработанное программное обеспечение	Дорогие постоянные магниты. Высокая стоимость машины
Предпочтительные применения	Многодвигательные ЭП технологических линий по системе источник тока—двигатели. Система генератор—двигатель в ответственных установках	Общепромышленный ЭП широкого применения	Бытовая техника. Низкоскоростные и высокоскоростные ЭП. Легкие транспортные средства. Автомобильные стартер-генераторы	Станки, роботы, бытовая техника, маломощные объекты

9. ЧАСТОТНО – РЕГУЛИРУЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

9.1. Аналитические выражения способа плавного регулирования скорости

Трехфазный асинхронный электродвигатель (АД) с короткозамкнутым ротором — самый массовый тип электрической машины, прекрасно отработанный технологически за более чем столетний период развития. Частота вращения поля n_0 в двигателе согласно формуле (9.1) определяется частотой напряжения питающей сети f_1 :

$$n = n_0 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (9.1)$$

где p — число пар полюсов.

Отличие частоты вращения ротора n от n_0 определяется скольжением s :

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0},$$

которое в нормальных двигателях не превышает 0,02...0,04, т.е.

$$n = n_0 - n_0 s = (0,96...0,98)n_0. \quad (9.2)$$

Из выражения (9.1) следует, что единственным рациональным способом плавно регулировать скорость такого двигателя является изменение частоты приложенного к его обмоткам напряжения (рис. 9.1). Другие способы — изменение числа пар полюсов или амплитуды напряжения — предполагают либо использования специального более тяжелого и дорогого двигателя, либо связаны с существенным ухудшением энергетических характеристик.

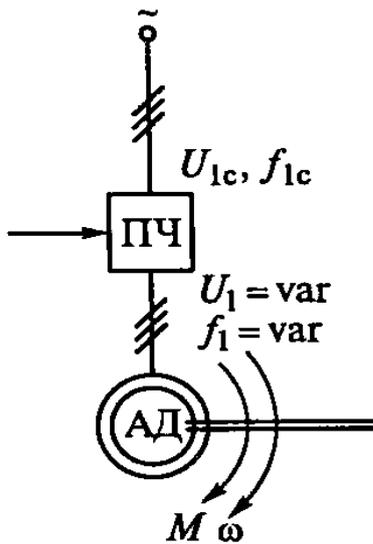


Рис. 9.1. Структура частотно - регулируемого электропривода

момента необходимо выполнить условие:

$$\Phi = \Phi_{НОМ} = \frac{U_{1НОМ}}{f_{1НОМ}} = \frac{U_1}{f_1} = const. \quad (9.3)$$

Несоблюдение этого условия, т.е. изменение частоты, в сторону уменьшения, при номинальном напряжении, недопустимо, так как вызовет рост магнитного потока и в соответствии с кривой намагничивания происходит резкий рост намагничивающего тока I_μ .

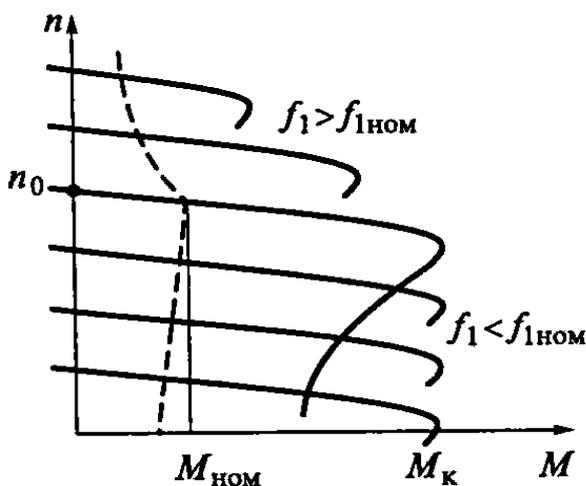


Рис. 9.3. Механические характеристики частотно - регулируемого электропривода

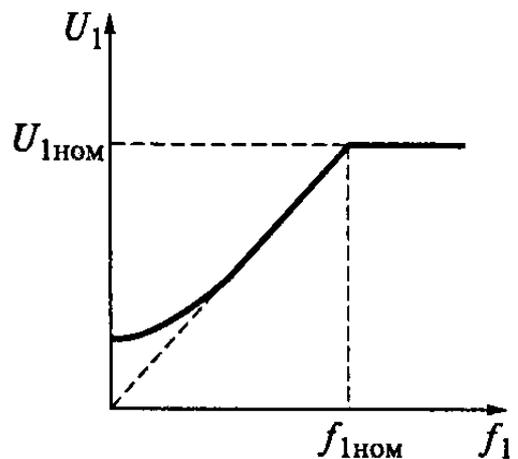


Рис. 9.4. Зависимость напряжения от частоты при частотном регулировании

При изменении частоты вниз от номинальной необходимо изменять и амплитуду напряжения. Поскольку ЭДС, наводимая в обмотках статора, примерно равна (если пренебречь падением напряжения на обмотках) приложенному напряжению:

$$E_1 = 4,44\Phi f_1 w_1 k_{об} \approx U_1,$$

то для сохранения при изменении частоты номинального магнитного потока и, следовательно, максимального (критического)

Изменение частоты вверх от номинальной при номинальном напряжении возможно, это будет приводить к снижению критического момента.

Механические характеристики АД при частотном регулировании имеют вид, показанный на рис. 9.3.

Для того чтобы компенсировать падение напряжения в обмотках статора и сохранить неизменный M_K при низких частотах, несколько увеличивают напряжение, как показано на рис. 9.4.

Длительно допустимый момент двигателя при частотном регулировании показан на рис. 9.3 штриховой линией. Допустимый момент несколько снижается при низких скоростях в связи с ухудшением вентиляции и уменьшается обратно пропорционально скорости при высоких скоростях из-за уменьшения магнитного потока.

9.2. Свойства частотно - регулируемого АД

Важное свойство частотного регулирования – практическое постоянство потерь при изменении скорости и одинаковой нагрузке. Покажем это, оценив потери при критическом скольжении. В соответствии с формулой (9.4)

$$\Delta P = V = M \omega_0 s_K \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right). \quad (9.4)$$

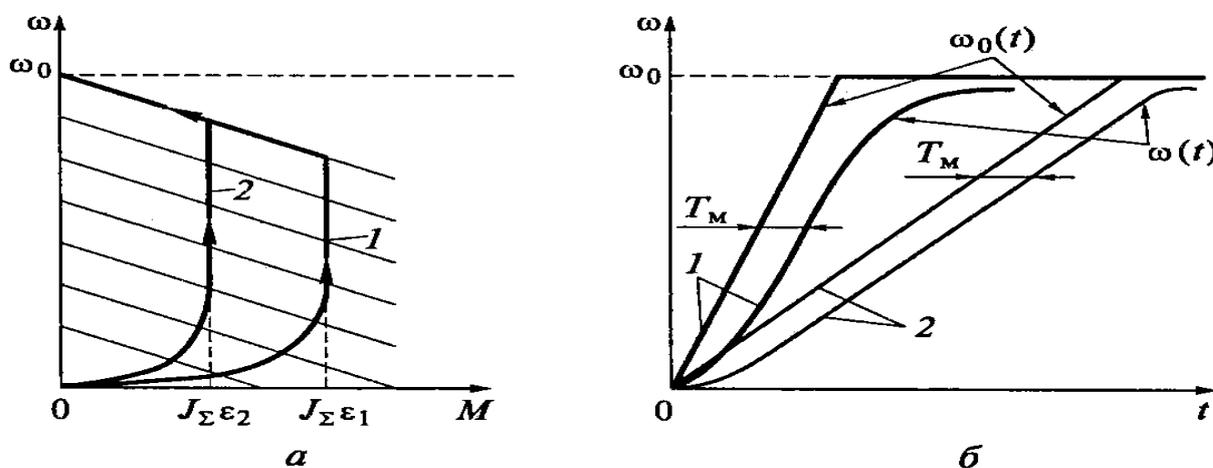


Рис. 9.5. Графики частотного пуска АД в координатах $\omega - M$ (а) и $\omega - t$ (б)
 Заменяя ω_0 и s_K их выражениями, соответственно будем иметь

$$\Delta P = M \frac{2\pi f_1}{p} \frac{R_2'}{2\pi f_1 (L_1 + L_2')} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = M \frac{R_2' + R_1}{p(L_1 + L_2')} \neq f(\omega). \quad (9.5)$$

Еще одно очень полезное свойство частотного регулирования – управление динамическими режимами с нужной мерой сокращения потерь энергии при пусках и торможениях.

При частотном регулировании можно задавать любой темп изменения скорости поля $\omega_0(t)$. На рис. 9.5 в качестве примера показаны два варианта пуска: ускоренный (1) и замедленный (2). Скорость ротора $\omega(t)$ отстает от скорости поля $\omega_0(t)$ на величину электромеханической постоянной времени T_M :

$$T_M = \frac{J_\Sigma \Delta \omega}{\Delta M}, \quad (9.6)$$

Определяемой по рабочему участку механической характеристики двигателя.

Момент, развиваемый двигателем на основном участке переходного процесса, пропорционален ускорению:

$$M_{дин} = J_\Sigma \varepsilon = J_\Sigma \frac{d\omega_0(t)}{dt}. \quad (9.7)$$

Как было показано ранее, потери энергии при прямом пуске и прямом торможении вхолостую определяются в соответствии с выражением (10-8):

$$\Delta W_0 = \frac{J_\Sigma \omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) (s_{нач}^2 - s_{кон}^2). \quad (9.8)$$

Здесь учитываются только переменные потери, значительно превышающие в динамических режимах постоянную составляющую.

Потери энергии при пуске – площадь фигуры, заключенной между кривыми электромагнитной мощности $P_{эм} = M\omega_0$ и мощности на валу $P_2 = M\omega$ (рис. 9.6). При прямом пуске (торможении) электромагнитная

мощность возникает практически мгновенно, а мощность на валу, пропорциональная скорости нарастает в неуправляемом темпе переходного процесса. Потери энергии определяются площадью треугольника на рис. 9.6, а.

Потери энергии при частотном пуске (торможении) – заштрихованная область на рис. 9.6, б – будут зависеть от управляемого времени переходного процесса $t_{пп}$:

$$\Delta W_{\text{частот}} = \Delta W_{\text{пр}} 2 \frac{T_M}{t_{\text{пп}}} \quad (9.9)$$

и могут быть сделаны сколь угодно малыми при увеличении $t_{\text{пп}}$.

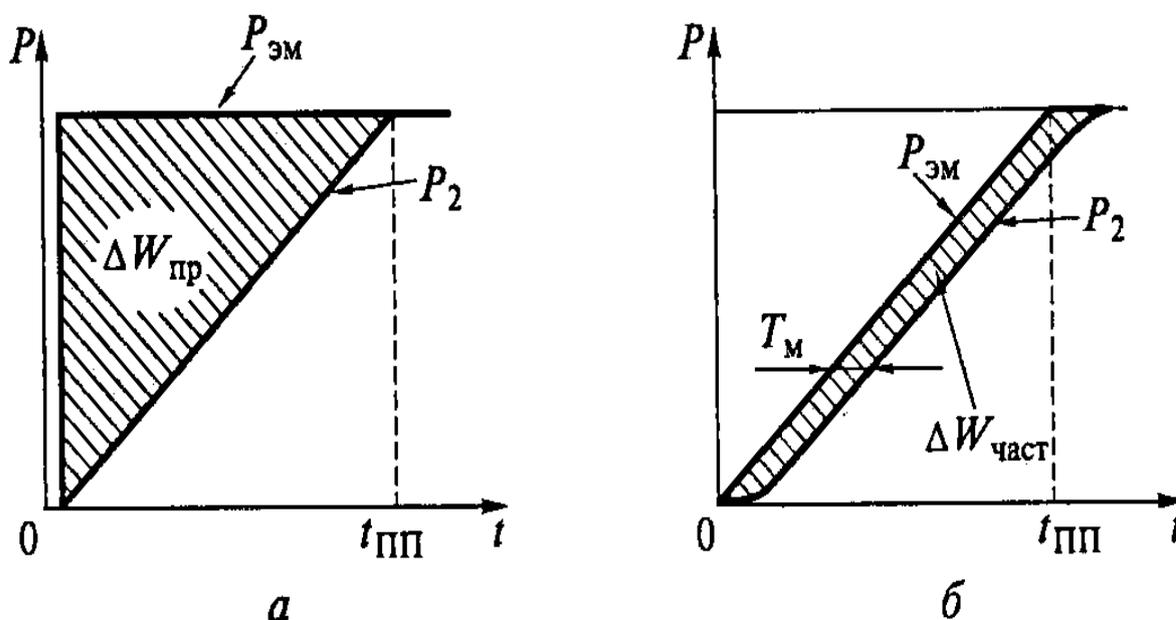


Рис. 9.6. Потери энергии при прямом (а) и частотном (б) пуске

Итак, частотно – регулируемый асинхронный электропривод позволяет регулировать скорость как вниз так и вверх от основной, соответствующей частоте 50 Гц, при минимально возможных потерях, управлять временем переходного процесса и снижать до желаемого уровня потери энергии, сопровождающие переходный процесс.

10. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

10.1. Однофазный тиристорный регулятор напряжения

Наряду с преобразователями частоты в регулируемом асинхронном электроприводе иногда используется тиристорный регулятор напряжения (ТРН) (рис. 10.1). Он изменяет амплитуду напряжения, подводимого к статору без изменения частоты, и используется главным образом для управления поттоком (мягкие пускатели) и осуществления ряда других полезных функций.

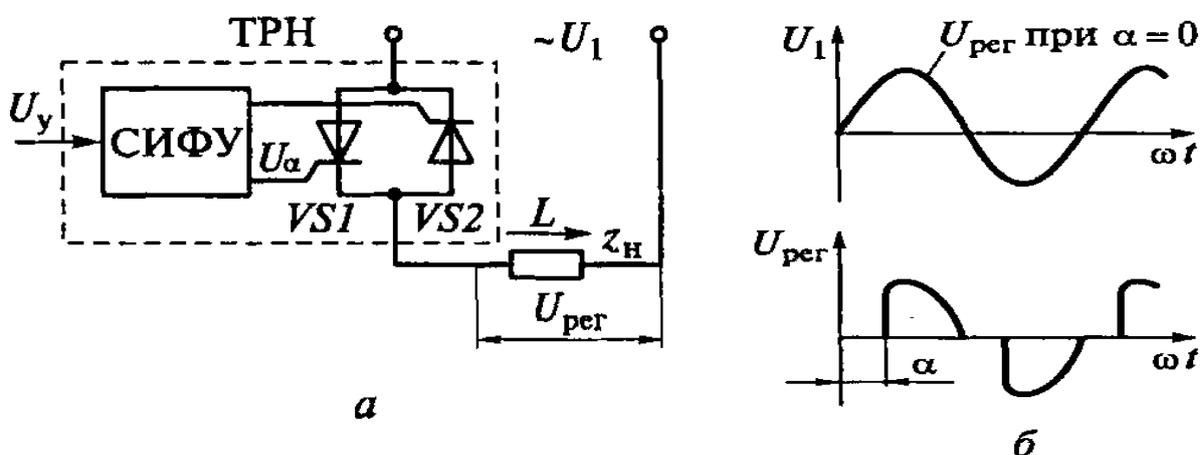


Рис. 10.1. Схема (а) и кривые напряжения (б) однофазного ТРН

Принцип действия ТРН рассмотрим на примере регулирования напряжения на однофазной нагрузке переменного тока z_H с помощью однофазного ТРН. Силовая часть ТРН (рис. 10.1, а) образована двумя тиристорами $VS1$ и $VS2$, включенными в цепь нагрузки по встречно-параллельной схеме, которая обеспечивает протекание тока в нагрузке в оба полупериода напряжения сети U_1 . Управление тиристорами осуществляется с помощью системы импульсно-фазового управления (СИФУ), которая подает на тиристоры импульсы управления U_α и обеспечивает их сдвиг на угол управления α в соответствии с величиной внешнего сигнала управления U_y .

Если на тиристоры $VS1$ и $VS2$ не подаются импульсы управления от СИФУ, то они закрыты и напряжение на нагрузке U_{per} равно нулю. При подаче на тиристоры импульсов управления в момент их естественного открывания

(угол управления $\alpha=0$) они полностью откроются (рис.10.1,б) и к нагрузке будет приложено всё напряжение сети $U_1 = U_{per}$ за вычетом небольшого (1...3 В) падения напряжения на тиристорах.

Если осуществлять подачу импульсов управления на тиристоры с некоторой задержкой относительно момента их естественного открытия (угол управления $\alpha \neq 0$), то к нагрузке будет прикладываться часть напряжения сети (рис. 10.1, б). Изменяя угол управления α от нуля до π , можно регулировать напряжение на нагрузке от полного напряжения сети до нуля при неизменной частоте этого напряжения.

При активной нагрузке ТРН кривая тока I в нагрузке будет повторять кривую напряжения на ней, а при активно-индуктивном характере нагрузки будет от нее отличаться. Форма напряжения на нагрузке является несинусоидальной. Несинусоидальное напряжение можно представить как совокупность нескольких синусоидальных напряжений (гармоник). Часть изменения первой из них (основной гармоники) равна частоте питающего напряжения, а частоты других гармоник больше, чем первой. Обычно 1-я гармоника имеет наибольшую амплитуду и по ней ведутся все основные расчеты.

Закрытие тиристоров в непроводящий полупериод происходит за счет напряжения сети (так называемая естественная коммутация тиристоров), что позволяет использовать в схемах ТРН наиболее простые, надежные и дешевые однооперационные тиристоры.

На основе однофазной схемы (см. рис. 10.1, *а*) построены ТРН для регулирования напряжения на трехфазной нагрузке (рис. 10.2, *а*).

Пример силовой части схемы для регулирования напряжения на статоре трехфазного АД, состоящей из шести тиристоров $VS1... VS6$, приведена на рис. 10.2, б. За счет добавления в эту схему двух пар тиристоров создаются реверсивные схемы электропривода, а с помощью соответствующего управления ТРН могут обеспечивать и динамическое торможение двигателей.

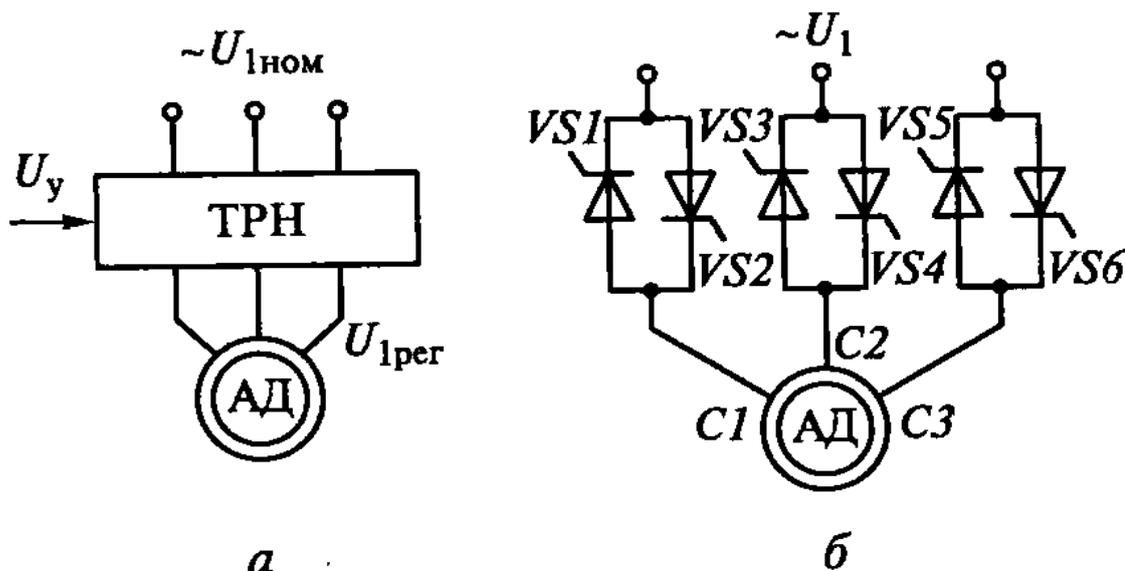


Рис. 10.2. Схемы включения ТРН на трехфазной нагрузке:
а – общая; *б* – силовая части

В схемах ТРН вместо одной пары встречно-параллельно включенных тиристоров может применяться полупроводниковый прибор – симистор, обеспечивающий протекание тока в нагрузке в оба полупериода питающего напряжения и имеющий такой же принцип действия, что и тиристор. Его применение сокращает число электронных приборов вдвое и упрощает схему СИФУ, хотя он и менее надежен в работе.

10.2. Электропривод с тиристорным экстремальным регулятором напряжения

Тиристорные регуляторы напряжения находят широкое применение в электроприводах переменного тока, где за счет регулирования напряжения на статоре АД обеспечиваются регулирование токов и моментов двигателей в переходных режимах, симметрирование токов в фазах, ряд защит двигателя и некоторые другие операции. Одна из них связана с повышением энергетических показателей работы асинхронных электроприводов при малых нагрузках. ТРН, выполняющие эту функцию, получили название регуляторов экономичности или экономайзеров.



Возможность энергосбережения этим способом иллюстрируют зависимости тока статора I_1 от прикладываемого к двигателю напряжения U_1 (рис. 10.3) при разных моментах нагрузки $M_{c1} < M_{c2} < M_{c3} < M_{c4}$. Эти зависимости иногда называют U - образными характеристиками двигателя. Как видно из графиков, при каждой нагрузке двигателя имеется такое напряжение,

при котором потребляемый ток минимален. Снижение тока происходит за счет уменьшения его реактивной составляющей. За счет этого обеспечиваются снижение потерь энергии в двигателе, повышение его КПД и коэффициента мощности $\cos\varphi$.

На рис.10.4 показаны построенные для двигателя 4А180М4 мощностью 30 кВт зависимости КПД η , $\cos\varphi$, относительных тока статора I_1^* и потерь мощности в двигателе ΔP^* от относительного напряжения U_1^* при моменте нагрузки M_c , равном 20% от номинального. Из кривых видно, что наилучших значений эти показатели достигают при напряжениях, равных 0,6...0,8 номинального значения.

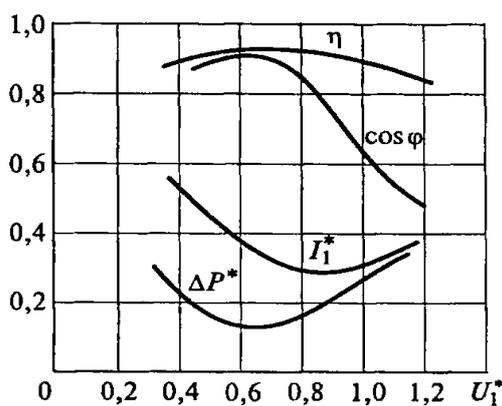


Рис. 10.4. Зависимость тока статора, потерь мощности, КПД и $\cos\varphi$ от напряжения

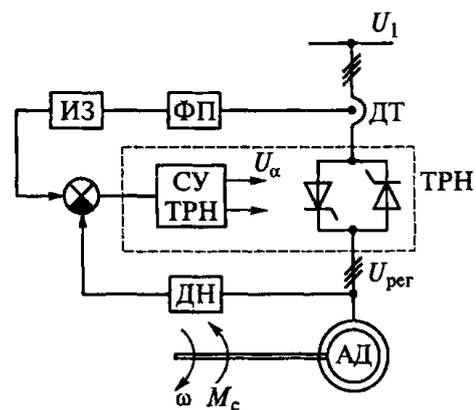


Рис. 10.5. Структурная схема электропривода с экстремальным регулятором

Достижение экспериментальных значений указанных переменных может быть обеспечено с помощью двух возможных схем включения АД.

На рис. 10.5 приведена одна из них – схема с так называемым экстремальным регулятором, позволяющим минимизировать потребляемый двигателем ток при различных нагрузках M_c . Схема содержит АД, ТРН со схемой управления СУ, датчики тока ДТ и напряжения ДН, функциональный преобразователь ФП и инерционное звено ИЗ. За счет выбора характеристики ФП обеспечивается минимизация потребления тока при различных нагрузках двигателя, а инерционное звено ИЗ совместно с отрицательной обратной связью по напряжению устраняет возможные автоколебания в системе.

Показано, что экстремальные значения переменных двигателя обеспечиваются при определенных (оптимальных) его скольжениях, которые должны поддерживаться постоянными при любых нагрузках. Эти скольжения $s_{опт}$ определяются по формулам:

- при минимизации тока статора - $s_{опт} = R'_2 / X_\mu$;

- при минимизации потерь мощности -

$$s_{опт} = (R'_2 \sqrt{(X_\mu / R_\mu + R_1) / (R'_2 + R_1)}) / X_{к.з}$$

- при минимизации активной потребляемой мощности –

$$s_{опт} = R'_2 \sqrt{1 + X_\mu^2 / (R_\mu R_1)} / X_\mu ;$$

- при максимизации коэффициента мощности –

$$s_{опт} = R'_2 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_\mu X_{к.з}}) / (X_\mu X_{к.з}),$$

где R_1 , R'_2 , R_μ - соответственно активные сопротивления статора, приведенное ротора и контура намагничивания;

X_μ , $X_{к.з}$ - соответственно индуктивные сопротивления контура намагничивания и короткого замыкания.

Значение тока статора при оптимальном скольжении может быть вычислено по следующей формуле:

$$I_{1min} = \sqrt{2M_c \omega_0 / 3X_\mu},$$

где M_c - момент нагрузки двигателя; ω_0 - скорость холостого хода.

Требуемый уровень оптимального скольжения реализован в замкнутой по скорости системе ТРН – АД, схема которой приведена на рис. 10.6.

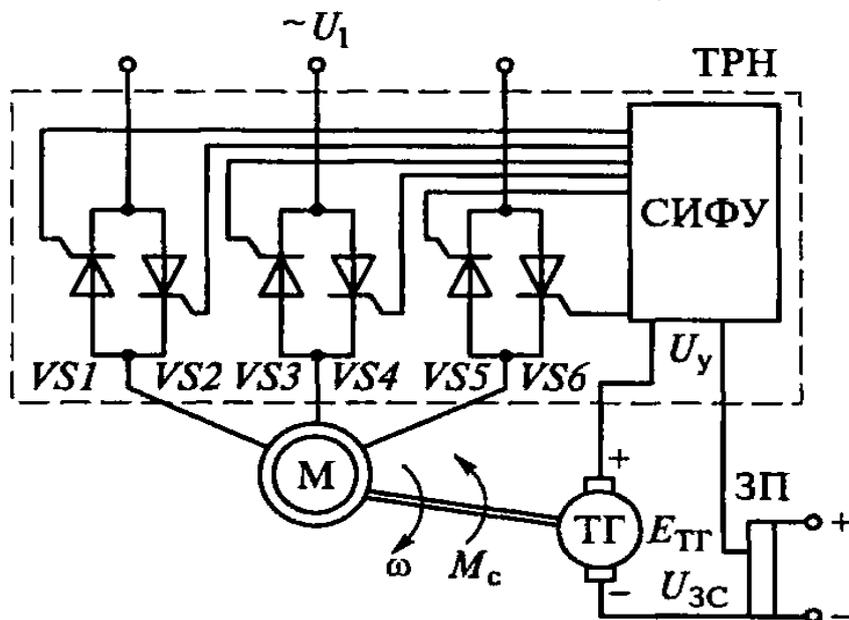


Рис. 10.6. Схема замкнутой системы ТРН-АД с обратной связью по скорости

На схеме обозначено: ТГ – тахогенератор, ЗП – потенциометр задания требуемой скорости (скольжения) двигателя. Схема обеспечивает поддержание скорости ω и тем самым скольжения с определенной точностью при изменениях момента нагрузки M_c .

В качестве примера приведены расчеты по этим формулам применительно к двигателю 4А200L6У3, имеющему следующие номинальные данные: $P_{НОМ} = 30$ кВт; скольжение $s_{НОМ} = 0,021$; ток статора $I_{1НОМ} = 55,8$ А; КПД $\eta_{НОМ} = 90,5\%$; $\cos\varphi_{НОМ} = 0,9$. Результаты расчетов при моменте нагрузки $29 Н \cdot м$, равном 10% номинального момента, приведены в таблице 10.1.

Результаты расчетов показывают, что за счет регулирования напряжения возможно примерно в 2,5 – 3 раза уменьшить потери мощности и повысить коэффициент мощности $\cos\varphi$.

До появления доступных преобразователей частоты предпринимались попытки использовать ТРН для регулирования скорости приводных АД насосов, работающих в продолжительном режиме.

Таблица 10.1.

Данные по оптимизации энергетических параметров

Способ оптимизации	$s_{\text{опт}}$	ΔP , кВт	I_1 , А	P_1 , кВт	$\cos\varphi$
Минимум потерь мощности ΔP	0,012	0,219	13,1	3,22	0,835
Минимум тока статора I_1	0,006	0,271	11,8	3,29	0,678
Минимум активной мощности P_1	0,014	0,223	13,9	3,21	0,858
Максимум $\cos\varphi$	0,024	0,278	17,2	3,24	0,881
Без оптимизации при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$	0,002	0,649	15,1	3,68	0,319

Теоретически такое регулирование, называется параметрическим, поскольку механические характеристики в разомкнутой системе имеют вид, показанный на рис. 10.7 сплошными линиями, а отрицательной обратной связи по скорости – штриховыми. Однако такое решение связано с техническим ограничением, делающим его не столь целесообразным.

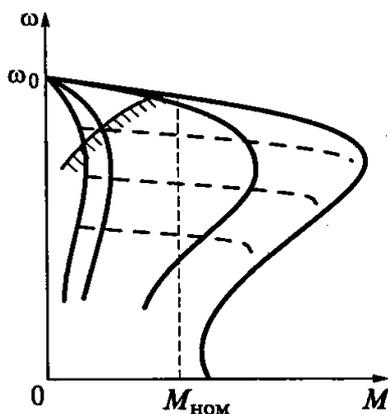


Рис. 10.7. Механические характеристики АД при регулировании напряжения на статоре

Потери в роторной цепи в номинальном режиме, который можно считать допустимым, составляют

$$\Delta P_{2\text{НОМ}} = M_{\text{НОМ}} \omega_0 s_{\text{НОМ}};$$

потери при регулировании скорости составляют

$$\Delta P_{\text{пер}} = M_{\text{ДОП}} \omega_0 s_{\text{пер}}.$$

Приравнявая $\Delta P_{2\text{пер}} = \Delta P_{2\text{НОМ}}$, получим:

$$M_{\text{ДОП}} = M_{\text{НОМ}} s_{\text{НОМ}} / s_{\text{пер}}.$$

Из данной формулы следует, что допустимая нагрузка резко падает с уменьшением скорости.

При $s_{\text{НОМ}} = 0,03$ снижение скорости всего на 15% ($s_{\text{пер}} \approx 0,15$) требует снижения момента в 5 раз (рис. 10.7, линия с засечками).

В связи с изложенным ограничением использования ТРН в продолжительном режиме даже при благоприятной «вентиляторной» характеристики нагрузки делает необходимым завышение мощности двигателя в 2,5-3 раза (увеличение $M_{\text{НОМ}}$), использование ротора с повышенным сопротивлением ($s'_{\text{НОМ}} > s_{\text{НОМ}}$), а это, в свою очередь, делает внешне привлекательный способ регулирования скорости турбомеханизмов неконкурентоспособным.

11. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПО СХЕМЕ АСИНХРОННО – ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

11.1. Асинхронный вентильный каскад

Эта система электропривода относится к классу регулируемых электроприводов, изменяющих скольжение асинхронного двигателя за счет включения противо – ЭДС в роторную цепь.

Применительно к общепромышленным механизмам, таким как насосы, вентиляторы, воздуходувки одним из наиболее экономичных и относительно простых систем электроприводов переменного тока является асинхронный вентильный каскад (рис. 11.1).

Электропривод этой системы содержит в роторной цепи асинхронного двигателя с фазным ротором неуправляемый выпрямитель на диодах, собранный по мостовой трехфазной схеме.

В выпрямленную роторную цепь постоянного тока включается ведомый сетью инвертор на тиристорах, собранный по мостовой трехфазной схеме. Инвертор, ведомый сетью, позволяет рекуперировать (возвращать) энергию скольжения в питающую сеть, в связи с чем регулируемый электропривод по схеме асинхронного вентильного каскада (АВК) считается наиболее экономичным.

Для согласования ЭДС инвертора с напряжением питающей сети используется согласующий трансформатор.

Суммарный КПД трансформатора и инвертора АВК составляет 0,96 ÷ 0,97, а постоянная времени инвертора около 0,01 секунды. Принципиальная электрическая схема электропривода системы АВК приведена на рис. 11.1.

Изменяя значение противо – ЭДС от нуля до номинального напряжения ротора, регулируется частота вращения двигателя в полном диапазоне от номинального значения до нуля. Для этого номинальные значения противо – ЭДС и ротора должны быть равны.

Таким образом, для получения полного диапазона регулирования, необходимо обеспечение мощности инвертора на номинальную мощность двигателя.

Для таких систем целесообразно регулирование частоты вращения в требуемом диапазоне осуществлять по схеме АВК, а разгон ротора до рабочего диапазона регулирования осуществлять с помощью пусковых резисторов.

После того, как ротор наберет требуемую частоту вращения и его напряжение станет меньше, чем номинальная противо – ЭДС инвертора, контакторы станции управления отключают пусковые резисторы и подключают инвертор к роторной цепи двигателя.

Затем регулирование осуществляется путем изменения противо – ЭДС, создаваемого инвертором, ведомым сетью.

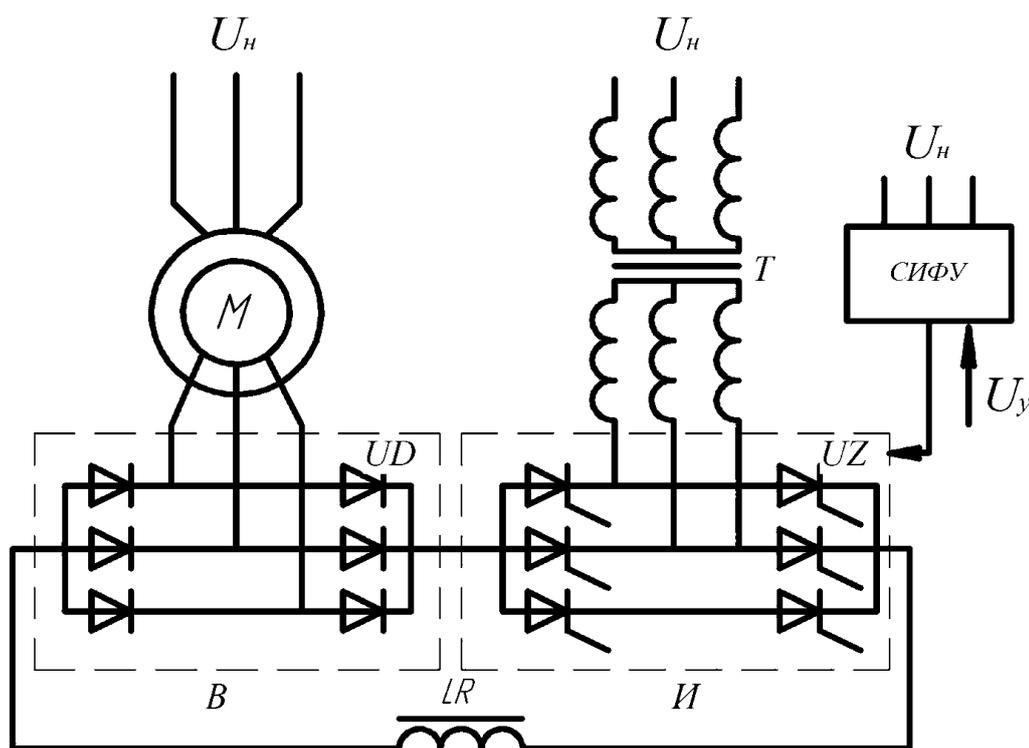


Рис. 11.1. Электропривод по схеме асинхронно – вентильного каскада.

Электропривод по схеме АВК имеет ряд особенностей, определяющих рентабельность его применения для насосов:

- в каскаде преобразуется не вся мощность, подводимая к насосу или вентилятору, а только рекуперированная мощность скольжения, которая для

данных установок не превышает 20 % номинальной мощности агрегатов;

➤ мощность преобразовательных устройств (выпрямитель и инвертор, ведомый сетью) АВК зависит от глубины регулирования частоты вращения. Ограниченный диапазон регулирования скорости насосов и вентиляторов позволяет использовать менее мощные преобразователи;

➤ зависимость вращающего момента в турбомашинах от частоты вращения позволяет осуществлять резисторный пуск по более простой схеме в одну или две ступени.

Существенным недостатком электропривода по схеме АВК является его не достаточно высокое значение коэффициента мощности.

11.2. Двухдвигательный асинхронный роторно-вентильный каскад

С практической точки зрения представляет интерес вариант схемного решения асинхронного роторно-вентильного каскада (АРВК) с общим инвертором, ведомым сетью (ИВС) в цепи выпрямленных токов роторов асинхронных двигателей (АД) с фазным ротором М1 и М2 (рис. 11.2).

Принцип работы двухдвигательного АРВК с общим ИВС заключается в введении добавочной электродвижущей силы (ЭДС) в цепи роторов асинхронных двигателей М1 и М2, посредством чего осуществляется регулирование момента и тем самым частоты вращения приводных электродвигателей НА. В качестве источника добавочной ЭДС используется вентильный преобразователь с согласующим трансформатором (Тр).

При работе М1 и М2 в двигательном режиме с частотой вращения ниже синхронной, выпрямленные напряжения роторов должны уравниваться противо ЭДС инвертора, падением напряжения в активных сопротивлениях роторных контуров и падением напряжения, обусловленным коммутацией вентиляей.

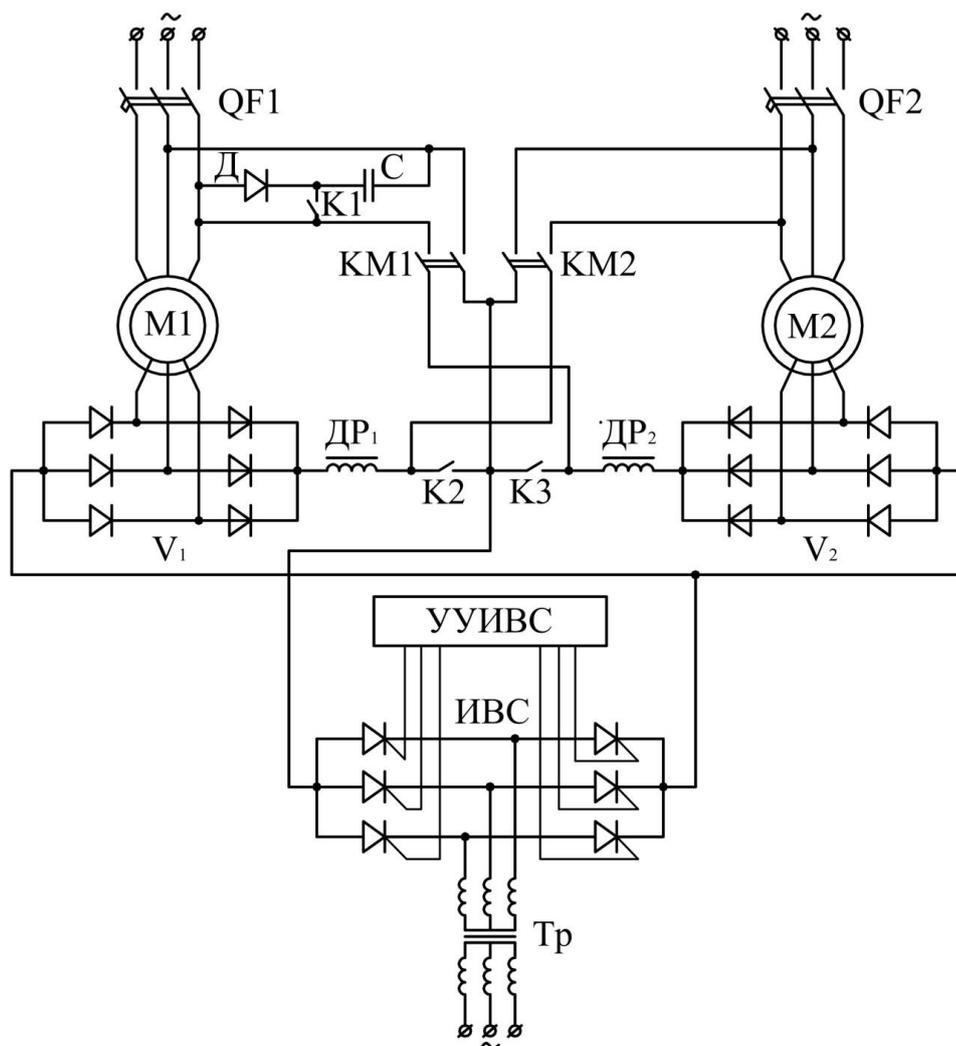


Рис. 11.2. Двухдвигательного АРВК с общим ИВС

Регулирование частоты вращения приводных электродвигателей М1 и М2 производится путем изменения добавочной ЭДС, которая приводит к изменению тока ротора и, следовательно, к изменению момента развиваемого электродвигателями. Изменение добавочной ЭДС осуществляется посредством управления (углом β) моментом открывания тиристоров от устройства управления инвертором, ведомым сетью (УУИВС).

К числу преимуществ данной системы регулируемого электропривода можно отнести:

- Обеспечение плавного регулирования частоты вращения приводных электродвигателей в достаточно широком диапазоне регулирования;
- Сравнительно хорошую жесткость механических характеристик;

- Наличие выравнивающей способности поддержания согласованного вращения приводных электродвигателей;
- Возможность управления частотой вращения асинхронных электродвигателей от без инерционного ИВС;
- Осуществление рекуперации энергии скольжения АД в питающую сеть за вычетом незначительных потерь в роторных их цепях;
- Малую мощность управления и подверженность системы автоматизации. Однако при этом, данной системе присущи следующие недостатки:
- Необходимость, в отдельных случаях, применение ИВС с согласующим трансформатором;
- Некоторая незначительная заниженность коэффициента мощности.

Согласованность частот вращения $M1$ и $M2$ в двигательном режиме работы системы АРВК с общим ИВС достигается за счет выравнивания выпрямленных напряжений параллельно включенных мостовых выпрямителей V_1 и V_2 в их роторных цепях. Тормозной же режим осуществляется перекрестным подключением мостовых выпрямителей к статорным обмоткам приводных электродвигателей $M1$ и $M2$, что позволяет автоматически выровнять их частоту вращения, исключить подзапирание выпрямителей и увеличить эффективность торможения. При этом в качестве источника постоянного тока, в режиме динамического торможения системы АРВК, используется цепочка, состоящая из последовательно соединенных диода D и конденсатора C (рис. 11.2).

Рассмотрим принцип выравнивания частот вращения приводных электродвигателей в двухдвигательном АРВК с общим ИВС.

Как известно, параллельная работа выпрямителей на общую нагрузку возможна лишь при равенстве их выходных напряжений [13]. В соответствии с этим, совместная работа приводных электродвигателей НА в системе АРВК может иметь место лишь при условии образования цепи тока в роторном

контуре обеих АД, т.е. при находящихся в работе мостовых выпрямителей V_1 и V_2 .

Равенство выпрямленных напряжений $U_{d1} = U_{d2}$ роторных цепей при использовании приводных электродвигателей НА с идентичными параметрами можно получить только при условии наиболее приближенного равенства значений скольжений каждого из АД, т.е. когда $s_1 \approx s_2$, что обеспечивает согласованность частот вращения М1 и М2 [9].

$$\text{При этом: } U_{d1} = K_1 * E_{p1} * s_1 = 1,35E_{p1} * s_1 = E_{B1}s_1; \quad (11.1)$$

$$U_{d2} = K_2 * E_{p2} * s_2 = 1,35E_{p2} * s_2 = E_{B2}s_2; \quad (11.2)$$

где E_{B1}, E_{B2} - среднее значение э.д.с. на выходе мостовых выпрямителей при разомкнутых цепях постоянного тока и скольжениях роторов АД равных единице ($s_1 = s_2 = 1$);

E_{p1}, E_{p2} - соответственно линейные ЭДС на кольцах неподвижного ротора асинхронных электродвигателей М1 и М2.

Поддержание согласованности вращения сохраняется и при различных значениях нагрузок на каждом из функционирующих АД. Допустим, что у приводных электродвигателей насосов, работающих с моментами сопротивления M_{C1} и M_{C2} , нагрузка на валу М1 увеличилась по сравнению с М2 ($M_{C1} > M_{C2}$). Возрастание нагрузки у М1 вызывает увеличение скольжения s_1 на некоторую величину Δs_1 . Новое значение текущего скольжения s'_1 приводит к нарушению равенства $U_{d1} \neq U_{d2}$, так как $E_{B1} * (s_1 + \Delta s_1) > E_{B2} * s_2$. Увеличение U_{d1} приводит к подзапиранию вентилей выпрямителя V_2 , что равносильно отключению М2 по роторной цепи. С отключением М2 частота его вращения начинает снижаться свободным выбегом до тех пор, пока скольжение s'_2 не сравняется с текущим скольжением $s'_1 = (s_1 + \Delta s_1)$ приводного электродвигателя М1. В момент выравнивания выпрямленных напряжений $U'_{d1} = U'_{d2}$, соответствующих

значениям скольжений s'_1 и $s'_2 = (s_2 + \Delta s_1)$, М2 вновь включается по роторной цепи. Так как электромагнитный момент асинхронного электродвигателя М2 при текущем значении скольжения, равно s'_2 не уравнивается его моментом сопротивления из-за $M_{\Sigma 2} > M_{C2}$, то частота вращения стремится к возрастанию, что в свою очередь, приводит к уменьшению U'_{d2} и, следовательно, к повторному отключению приводного электродвигателя М2 по роторной цепи.

Из рассмотрения принципа работы двухдвигательного АРВК видим, что данная система регулируемого электропривода стремится автоматически занять такое равновесное состояние, при котором выпрямленные напряжения роторных цепей принудительно принимают равные значения независимо от величин моментов сопротивлений на валах их проводных электродвигателей.

Следовательно, в предлагаемой системе двухдвигательного асинхронного роторно-вентильного каскада поддерживается согласованность частот вращения приводных электродвигателей насосных агрегатов, чем достигается одинаковый развиваемый напор в месте соединения подводящих напорных трубопроводов и обеспечивается требуемый технологический режим водоподдачи насосной установки.

Однако необходимо отметить, что при резко отличающихся друг от друга значениях нагрузок на каждом из АД и в пусковых режимах функционирования системы двухдвигательного АРВК возможны некоторые ощутимые рассогласования частот вращения приводных электродвигателей, вызванные, в основном пульсирующим характером выпрямленных напряжений.

Для определения предельных значений рассогласования в частотах вращения М1 и М2 во всем диапазоне их изменения выпрямленного напряжения считаем, что коммутация вентилях V_1 и V_2 происходит мгновенно и выпрямленная цепь не содержит сглаживающего дросселя. При этом имеют место два предельных режима, вытекающие из условия работы выпрямителей V_1 и V_2 роторных цепей АД, включенных параллельно. Одним из предельных режимов является случай, когда роторные выпрямленные напряжения М1 и М2 совпадают по фазе (рис.

11.3, а) т.е. $E_{B1}S_1 = E_{B2}S_2$, $\psi = 0$, где ψ – угол сдвига по фазе роторных напряжений U_{d1} и U_{d2} . При этом средние значения выпрямленного напряжения U_{dH} каждого мостового выпрямителя равны и составляют

$$U_{dH} = U_{d1} = U_{d2} = 1,35E_p s. \quad (11.3)$$

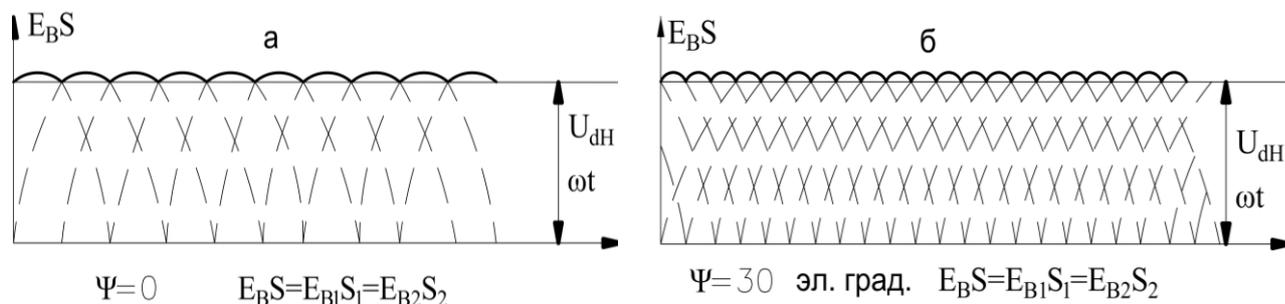


Рис. 11.3. Временные диаграммы выходного напряжения выпрямителей в функции угла рассогласования роторов М1 и М2

Другим предельным режимом является случай, когда амплитудные значения выпрямленных роторных напряжений равны и сдвинуты относительно друг друга на $\psi = 30^\circ$ (смотрите рис. 11.3, б). При этом средневыхрямленное напряжение $U_{dH} = 1,4E_p s$, составляющими которого будут средневыхрямленные напряжения каждого из АД $U_{d1} = U_{d2} = 0,7E_p s$, имеющие импульсный характер с частотой $f = 6f_c s$ и скважностью $\nu = 0,5$. Независимо от импульсного характера роторных напряжений при одинаковой нагрузке рассогласования в частотах вращения АД не будет, т. к. скважность для обоих напряжений одинакова.

Предположим, что один из приводных электродвигателей, например М1, заторможен внешней нагрузкой, тогда у оставшегося в работе М2 начнут возрастать обороты и по мере его ускорения будет уменьшаться выпрямленное роторное напряжение до $E_{B2}S_2 < 0,866E_{B1}$. При нарушении равенства выпрямленных значений напряжений роторных цепей приводных электродвигателей М2 отключается по роторной цепи с последующим снижением частоты его вращения. С выравниванием напряжения, когда $E_{B2}S_2 = 0,866E_{B1}$, являющимся необходимым условием образования цепи тока в роторном

Следовательно, для различно загруженных приводных электродвигателей может быть определена (рис. 11.4) величина рассогласования в частотах вращения АД системы АРВК с общим ИВС. Однако, при этом особо следует отметить, что режим работы водоподъемной насосной установки с резко отличающимися друг от друга моментами нагрузок на валах насосных агрегатов имеет место лишь в процессе запуска одного из НА при работающем другом и является непродолжительным.

11.3. Многодвигательный электропривод с электрической связью и общим инвертором, ведомым сетью

В практике электромашинного орошения на насосных станциях наиболее часто применяются варианты конструктивной компоновки группы насосных агрегатов, в составе насосной установки для совместной параллельной работы в общий напорный трубопровод (гидравлическую напорную сеть) с их оснащением однотипными электроприводами переменного тока. При этом снижение удельных затрат электрической энергии (ЭЭ) и рациональное использование водных ресурсов могут быть достигнуты с помощью регулируемого многодвигательного электропривода, за счет согласованного изменения скорости (частоты) вращения НА [22].

Наиболее перспективной системой регулируемого электропривода применительно к насосным установкам (НУ) систем машинного водоподъема (СМВ) можно считать многодвигательный электропривод с электрической связью (МЭЭС) по роторной цепи с общим инвертором, ведомым сетью (ИВС), в которой энергия скольжения роторной цепи передается в питающую сеть [23].

Система МЭЭС с общим ИВС, характеризуется высоким КПД, по сравнению с другими известными системами регулируемого электропривода, так как в ней преобразуется лишь энергия скольжения приводных электродвигателей.

Основное преимущество данного схемного решения заключается в следующем:

- вентильный преобразователь в роторных цепях асинхронных электродвигателей не должен обеспечивать циркуляцию реактивной мощности для создания их магнитных потоков, так как они создаются за счет реактивных мощностей, циркулирующих в статорных цепях асинхронных электродвигателей;
- вентильный преобразователь МЭЭС с общим ИВС рассчитывается лишь на мощность, пропорциональную диапазону регулирования приводных электродвигателей НА, в то время как преобразователи для питания асинхронного электродвигателя по иным схемам управления должен быть выполнен на полную мощность системы электропривода.

На рис. 11.5 приведена принципиальная схема МЭЭС с общим ИВС, являющаяся схемой с промежуточной цепью постоянного тока, в которой токи роторов каждого асинхронного электродвигателя выпрямляются с помощью соответствующих трехфазных мостовых выпрямителей и в цепь выпрямленного тока вводится добавочная ЭДС, получаемая посредством управляемого вентильного преобразователя – инвертора.

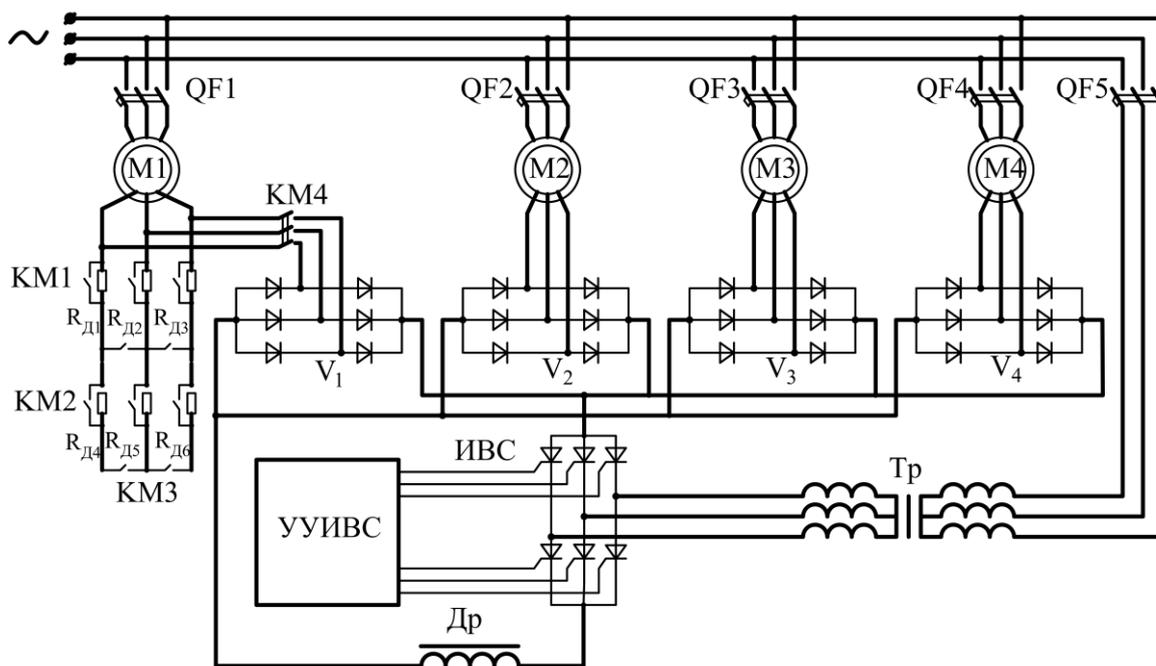


Рис. 11.5. Принципиальная схема МЭЭС с общим ИВС

Основными элементами данного привода переменного тока являются: группа асинхронных электродвигателей с фазным ротором М1 – М4; неуправляемые вентильные преобразователи V1 – V4, служащие для выпрямления роторных токов асинхронных электродвигателей; управляемый вентильный преобразователь, ведомый сетью – ИВС, предназначенный для инвертирования выпрямленного роторного тока; трансформатор Тр, согласующий напряжение роторной цепи с напряжением сети; дроссель Др, используемый для сглаживания пульсаций тока и напряжения в промежуточной цепи постоянного тока; УУИВС – устройство управления ИВС.

В цепь ротора приводного электродвигателя НУ первой последовательности М1 введены пусковые сопротивления $R_{д1} - R_{д6}$, которые для осуществления пуска асинхронного электродвигателя М1 включаются посредством контактора КМ3. По мере разгона М1, пусковые сопротивления поочередно шунтируются контактами контакторов КМ2 и КМ1. При достижении М1 частоты вращения, позволяющей обеспечить его работу по схеме МЭЭС с общим ИВС, подключается контактор КМ4 и размыкаются контакты контакторов КМ3, КМ2 и КМ1. При этом управление процессом пуска асинхронного электродвигателя М1 осуществляется от отдельного устройства (пульт) управления. Автоматические выключатели QF1 – QF4, предназначены для подключения асинхронных электродвигателей к питающей сети, а выключатель QF5 обеспечивает связь ИВС через согласующий трансформатор Тр с питающей сетью.

Принцип работы МЭЭС с общим ИВС, практически аналогичен двухдвигательному АРВК и может быть пояснен следующим образом. При работе асинхронных электродвигателей в двигательном режиме ниже синхронной частоты вращения, выпрямленные напряжения их роторов уравниваются добавочной ЭДС E_{du} , представляющей собой среднее выпрямленное напряжение ИВС (противо – ЭДС инвертора), падением напряжения на активных сопротивлениях роторных контуров, а также

падением напряжения, обусловленным коммутацией вентилях. Так как моменты, развиваемые асинхронными электродвигателями, пропорциональны выпрямленному току их роторов, то, изменяя величину противо – ЭДС инвертора, можно осуществлять регулирование моментов и частот вращения приводных электродвигателей НУ. Величина E_{du} инвертора регулируется посредством изменения угла управления β ИВС. В том случае, когда выпрямленные напряжения роторов асинхронных электродвигателей равны между собой и совпадают по величине с E_{du} инвертора, токи в цепи роторов электродвигателей не возникают, а следовательно их моменты – равны нулю. При уменьшении E_{du} токи в цепи роторов асинхронных электродвигателей возрастают, что приводит к увеличению развиваемых электродвигателями моментов и их частот вращения. В этом случае, выпрямленные же напряжения асинхронных электродвигателей уменьшаются до тех пор, пока развиваемые ими моменты не станут равными моментам сопротивления. При увеличении E_{du} токи роторов и моменты асинхронных электродвигателей уменьшаются, что вызывает снижение их частот вращения и как следствие способствует росту величины выпрямленных роторных напряжений электродвигателей. При этом токи роторов и моменты, развиваемые асинхронными электродвигателями, увеличиваются до тех пор, пока не достигается установившейся режим работы с такими значениями частоты вращения, которое соответствует равенству моментов, развиваемых приводными электродвигателями, приложенным моментам сопротивления НУ.

В ходе технологического процесса водоподдачи НУ СМВ подключение (пуск) на совместную работу одного из приводных электродвигателей НА при работающих других асинхронных электродвигателях с учетом постоянства воздействия (угол управления β ИВС неизменен) сопровождается процессом выравнивания их частот вращения. В начальный момент времени выпрямленное роторное напряжение вновь подключаемого в работу, например МЗ, больше выпрямленных напряжений роторов функционирующих приводных электродвигателей НА. Это приводит к подзапиранию вентилях

выпрямителей в их роторных цепях, что практически равносильно отключению этих приводных электродвигателей по цепи их роторов и в результате чего частота вращения функционирующих асинхронных электродвигателей начинает снижаться.

Частота же вращения подключенного в работу приводного электродвигателя НА возрастает. При достижении равенства выпрямленных роторных напряжений, а значит, и указанных частот вращения, ранее функционирующие асинхронные электродвигатели вновь подключаются по роторной цепи. В дальнейшем с учетом фактического равенства нагрузок на каждом из приводных электродвигателей НА, которое имеет место в НУ СМВ, их частоты вращения изменяются соразмерно до уравнивания развиваемых асинхронными электродвигателями моментов с моментами сопротивления (M_C) навалу насосных агрегатов.

Отключение одного из работающих приводных электродвигателей НА от питающей электросети не нарушает протекание хода технологического процесса водоподачи НУ СМВ и сохраняет согласованность частот вращения асинхронных электродвигателей в системе МЭЭС с общим ИВС.

Таким образом, рассмотрение принципа работы системы согласованного вращения электропривода переменного тока позволяет сделать вывод о том, что наиболее предпочтительным, отвечающим требованиям, предъявляемым к регулируемому электроприводу НУ СМВ, в которых группа НА работающих совместно в общую гидравлическую напорную сеть, является система электропривода, реализованная по схеме многодвигательного электропривода с электрической связью по роторной цепи с управлением от общего инвертора, ведомого сетью.

12. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ И ОБЩИМ ИНВЕРТОРОМ, ВЕДОМЫМ СЕТЬЮ

12.1. Построение энергетической модели МЭЭС с общим ИВС

Эквивалентная схема замещения МЭЭС с общим ИВС, приведенная к цепи выпрямленных токов роторов АД [20], изображена на рис. 12.1.

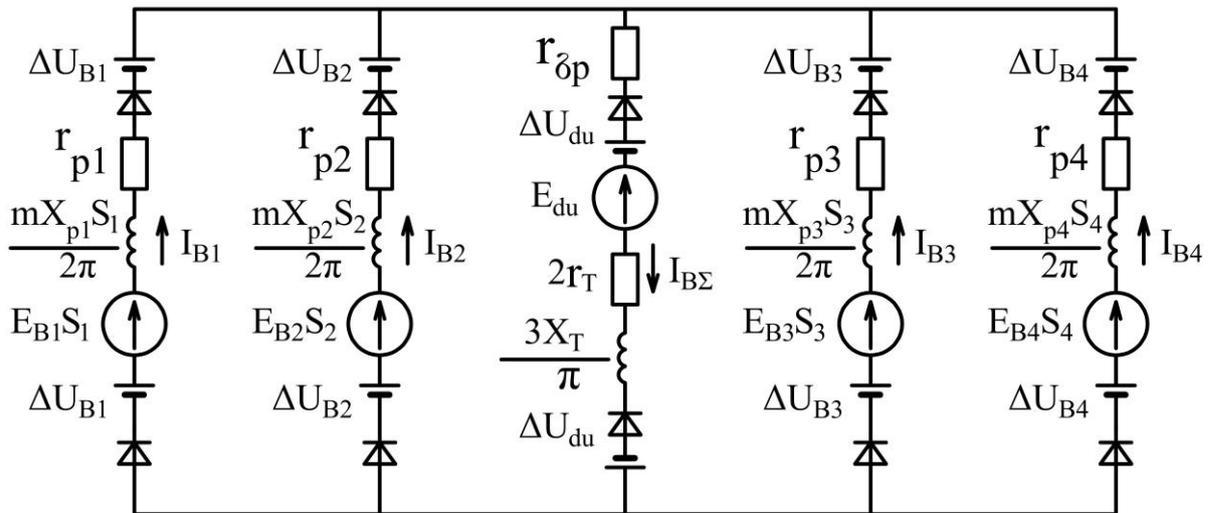


Рис. 12.1. Эквивалентная схема замещения МЭЭС с общим ИВС

В ней приняты следующие обозначения:

$E_{B,i}$ - среднее значение ЭДС на выходе выпрямительных мостов B_i при

$$s_i = 1, i = 1, \dots, 4,$$

$$E_{B,i} = \sqrt{2} * E_{P,i} * \frac{m}{\pi} * \sin \frac{\pi}{m} = 1,35 E_{P,i}, \quad (12.1)$$

где $E_{P,i}$ - ЭДС на кольцах неподвижного ротора i -го АД;

m - число фаз мостового выпрямителя;

s_i - скольжение ротора i -го АД;

$x_{P,i}$ - индуктивное сопротивление фазы i -го АД, приведенное к цепи ротора при $s_i = 1$:

$$x_{P,i} = x_{POT,i} + x_{C,i} * \frac{1}{K_{e,i}^2}, \quad (12.2)$$

$x_{C,i}$, $x_{POT,i}$ - индуктивные сопротивления фазы статора и ротора i -го АД;

$K_{e.i}$ - коэффициент трансформации напряжения от статора к ротору

i - го АД;

$$K_{e.i} = 0,95 * \frac{U_i}{E_{p.i}}, \quad (12.3)$$

U_i - линейное напряжение на зажимах статора i - го АД;

r_{op}, x_{op} - активное и индуктивное сопротивления сглаживающего дросселя;

$r_{p.i}$ - активное сопротивление фазы i - го АД, приведенное к цепи ротора:

$$r_{p.i} = 2 * r_i + 2 * r'_{c.i}, \quad (12.4)$$

r_i - активное сопротивление фазы ротора i - го АД;

$r'_{c.i}$ - активное сопротивление фазы статора i - го АД, приведенное к цепи ротора:

$$r'_{c.i} = r_{c.i} / K_{e.i}^2, \quad (12.5)$$

$r_{c.i}$ - активное сопротивление фазы статора i - го АД;

$\Delta U_{B.i}$ - суммарное падение напряжения на скользящем контакте и вентилях выпрямительного моста i - го АД при прохождении прямого тока;

$I_{B.i}$ - выпрямленный ток ротора i - го АД;

$R_{\Sigma.i}$ - эквивалентное сопротивление i - го АД;

E_{du} - противо – ЭДС инвертора на стороне выпрямленного тока;

E_{2T} - фазное напряжение вторичной обмотки согласующего трансформатора;

r_T, x_T - приведенные к вторичной обмотке активное и индуктивное сопротивления фазы трансформатора:

$$r_T = r_{T2} + r_{T1} * \frac{1}{K_{eT}^2}, \quad (12.6)$$

$$x_T = x_{T2} + x_{T1} * \frac{1}{K_{eT}^2}, \quad (12.7)$$

где r_{T1} , r_{T2} , x_{T1} , x_{T2} - соответственно активные и реактивные сопротивления первичной и вторичной обмоток согласующего трансформатора;
 K_{eT} - коэффициент трансформации напряжения от первичной обмотки к вторичной;
 R_{Σ} - эквивалентное сопротивление общей цепи роторных контуров МЭЭС с общим ИВС;
 U_{du} - падение напряжения на тиристоре ИВС при прохождении прямого тока;
 I_{Σ} - суммарный выпрямленный ток в общей цепи роторных контуров МЭЭС с общим ИВС.

На основании метода контурных токов и второго закона Кирхгофа, составим в соответствии с эквивалентной схемой замещения (рис. 12.1) систему уравнений электрического равновесия для совместно работающих приводных электродвигателей НА в МЭЭС с общим ИВС:

$$I_{B.i} * R_{\Sigma} + I_{\Sigma} * R_{\Sigma} = E_{B.i} * s_i - E_{du} - 2 * \Delta U_{B.i} - 2 * \Delta U_{du}, \quad i=1, \dots, 4 \quad (12.8)$$

$$\text{или } I_{B.i} * R_{\Sigma} + \sum_{i=1}^4 I_{B.i} * R_{\Sigma} = E_{B.i} * s_i - E_{du} - \Delta U_i, \quad i=1, \dots, 4, \quad (12.9)$$

$$\text{где } R_{\Sigma} = s_i * (3 * x_{p,i} / \pi + 2 * r'_{c,i}) + 2 * r_i, \quad (12.10)$$

$$R_{\Sigma} = 3 * x_T / \pi + 2 * r_T + r_{op}, \quad (12.11)$$

$$\Delta U_i = 2 * \Delta U_{B.i} + 2 * U_{du}. \quad (12.12)$$

Запишем (12.9) в виде, позволяющим рассчитать значения выпрямленных токов $I_{B.i}$ посредством использования определителей:

$$I_{B1} * (R_{\Sigma1} + R_{\Sigma}) + I_{B2} * R_{\Sigma} + I_{B3} * R_{\Sigma} + I_{B4} * R_{\Sigma} = E_{B1} * s_1 - E_{du} - \Delta U_1, \quad (12.13)$$

$$I_{B1} * R_{\Sigma} + I_{B2} * (R_{\Sigma2} + R_{\Sigma}) + I_{B3} * R_{\Sigma} + I_{B4} * R_{\Sigma} = E_{B2} * s_2 - E_{du} - \Delta U_2, \quad (12.14)$$

$$I_{B1} * R_{Эобщ} + I_{B2} * R_{Эобщ} + I_{B3} * (R_{Э3} + R_{Эобщ}) + I_{B4} * R_{Эобщ} = E_{B3} * s_3 - E_{du} - \Delta U_3, \quad (12.15)$$

$$I_{B1} * R_{Эобщ} + I_{B2} * R_{Эобщ} + I_{B3} * R_{Эобщ} + I_{B4} * (R_{Э4} + R_{Эобщ}) = E_{B4} * s_4 - E_{du} - \Delta U_4. \quad (12.16)$$

Используя известную методику вычисления определителя системы уравнений Δ и определителей Δ_{11} , Δ_{22} , Δ_{33} , Δ_{44} , получаемых из Δ путем замены коэффициентов при соответствующем неизвестном $I_{B.i}$ свободными членами, найдем искомые значения выпрямленных токов:

$$I_{B1} = \Delta_{11} / \Delta; \quad I_{B2} = \Delta_{22} / \Delta; \quad I_{B3} = \Delta_{33} / \Delta; \quad I_{B4} = \Delta_{44} / \Delta. \quad (12.17)$$

При идентичных параметрах приводных электродвигателей НА и элементов роторных цепей МЭЭС с общим ИВС имеем:

$$R_{Э1} = R_{Э2} = R_{Э3} = R_{Э4}; \quad E_{B1} = E_{B2} = E_{B3} = E_{B4}.$$

Тогда выпрямленный роторный ток каждого из совместно работающих АД может быть определен по выражению:

$$I_{B.i} = (E_{B.i} * s_i - E_{du} - \Delta U_i) / (R_{Э.i} + 4 * R_{Эобщ}), \quad i = 1, \dots, 4. \quad (12.18)$$

Аналогичным образом, составляя систему уравнений и решая ее для вариантов трех, двух и одного случаев работы приводных электродвигателей НА в системе МЭЭС с общим ИВС, на основе анализа и сопоставления получаемых при этом соотношений можно выявить обобщенное выражение для выпрямленных роторных токов N совместно функционирующих АД при идентичности их параметров и элементов роторных цепей:

$$I_{B.i} = (E_{B.i} * s_i - E_{du} - \Delta U_i) / (R_{Э.i} + N * R_{Эобщ}), \quad i = 1, \dots, N. \quad (12.19)$$

Тогда суммарный выпрямленный ток в общей цепи роторных контуров в системе МЭЭС с общим ИВС может быть определен как:

$$I_{B\Sigma} = [N * (E_B * s - E_{du} - \Delta U) / (R_{Э} + N * R_{Эобщ})]. \quad (12.20)$$

При условии непрерывности выпрямленных токов имеем:

$$E_{du} = K_2 * E_{2T} * \cos \beta , \quad (12.21)$$

где K_2 - коэффициент, зависящий от схемы соединения вентилях инвертора.

Далее, используя (12.10), (12.11) и (12.21) можно записать выражение (12.19) в виде:

$$I_{B.i} = \frac{(E_{B.i} * s_i - K_{2T} * E_{2T} * \cos \beta - \Delta U_i)}{[s_i * (3 * x_{p.i} / \pi + 2 * r'_{C.i}) + 2 * r_i + N * (3 * x_T / \pi + 2 * r_T + r_{op})]} , \quad i = 1, \dots, N . \quad (12.22)$$

Из уравнения (12.22) можно определить значение скольжения от величины выпрямленных роторных токов для каждого из совместно работающих АД:

$$s_i = \frac{\{K_2 * E_{2T} * \cos \beta + \Delta U_i + I_{B.i} * [2 * r_i + N * (3 * x_T / \pi + 2 * r_T + r_{op})]\}}{[E_{B.i} - I_{B.i} * (3 * x_{p.i} / \pi + 2 * r'_{C.i})]} . \quad (12.23)$$

На основании (12.23) при произвольно задаваемых, в определенном диапазоне, величинах $I_{B.i}$ для строго постоянных значений угла управления β можно рассчитать и построить электромеханические характеристики для каждого из АД в системе МЭЭС с общим ИВС. В виду того, что в рассматриваемой системе используются идентичные приводные электродвигатели НА, то электромеханические характеристики $s_i = f(I_{B.i})$ всех совместно функционирующих АД в установившихся режимах при каждом задаваемом значении угла управления ИВС будут совпадать.

За естественную характеристику МЭЭС с общим ИВС примем характеристики $s = f(I_B)$ и $s = f(M)$ при угле управления инвертором, равном $\beta = 90$ эл. град., а за искусственную – при угле управления, соответствующем $15 < \beta < 90$ эл. град.

Скольжение идеального холостого хода можно получить из (12.23) при условии $I_B = 0$:

$$s_{0i} = (K_2 * E_{2T} * \cos \beta + \Delta U_i) / E_{B.i} , \quad i = 1, \dots, N . \quad (12.24)$$

Оснащение НА однотипными приводными электродвигателями, а также

идентичность параметров элементов их роторных цепей способствует равенству значений скольжений s_0 совместно работающих АД в системе МЭЭС с общим ИВС. Кроме того, из (12.24) видно, что частоту вращения АД можно регулировать изменением величины угла управления β , а также при этом возможно включением дополнительных элементов в роторные цепи системы МЭЭС с общим ИВС добиваться путем увеличения ΔU_i некоторого изменения частоты вращения каждого из приводных электродвигателей НА с целью обеспечения их строгой согласованности вращения.

Далее после соответствующих преобразований из (12.22) можно получить выражение для выпрямленных токов АД в следующем виде:

$$I_{B,i} = \frac{\pi * E_{B,i} * (s_i - s_{0i})}{\{3 * x_{Pi} * [s_i * (1 + q_i) + \rho'_i + N * \sigma_{T,i}]\}}, \quad (12.25)$$

$$\text{где } q_i = 2 * \pi * r'_{c,i} / (3 * x_{Pi}); \quad (12.26)$$

$$\rho'_i = 2 * \pi * r_i / (3 * x_{Pi}); \quad (12.27)$$

$$\sigma_{T,i} = x_T / x_{Pi} + \pi * (2 * r_T + r_{op}) / (3 * x_{Pi}). \quad (12.28)$$

Электромагнитный момент АД может быть определен в соответствии с выражением:

$$M = (I_B * E_B - 3 * I_B^2 * x_p / \pi) / \omega_C, \quad (12.29)$$

где ω_C - угловая частота вращения электромагнитного поля статора АД.

Решая совместно (12.25) и (12.29), получим выражение механической характеристики каждого из совместно работающих АД в системе МЭЭС с общим ИВС:

$$M = \frac{\pi * E_{B,i}^2}{3 * x_{Pi} * \omega_{C,i}} * \left[\frac{s_i - s_{0i}}{s_i * (1 + q_i) + \rho'_i + N * \sigma_{T,i}} - \left(\frac{s_i - s_{0i}}{s_i * (1 + q_i) + \rho'_i + N * \sigma_{T,i}} \right)^2 \right]. \quad (12.30)$$

С целью определения величины критического скольжения АД в системе МЭЭС с общим ИВС, найдем производную от момента по скольжению в соответствии с (12.30) и приравняем ее нулю. В результате получим:

$$s_{K.i} = (2 * s_{0i} + \rho'_i + N * \sigma_{T.i}) / (1 - q_i), \quad i = 1, \dots, N. \quad (12.31)$$

Подставив (12.31) в уравнение механической характеристики (12.30) системы МЭЭС с общим ИВС, получим выражение для критического момента АД данной системы:

$$M_{K.i} = \pi * E_{B.i}^2 / (12 * x_{Pi} * \omega_{C.i}), \quad i = 1, \dots, N. \quad (12.32)$$

Таким образом, можно констатировать, что наиболее предпочтительным, отвечающим требованиям, предъявляемым к регулируемому электроприводу водоподъемных НУ, в которых группа НА параллельно работает в общую гидравлическую напорную сеть, является система электропривода, реализованная по схеме многодвигательного электропривода с электрической связью по роторной цепи с управлением от общего инвертора, ведомого сетью, где также данная система электропривода может найти применение в многодвигательных электроприводах общепромышленных механизмов, не требующих, абсолютно строгого согласования частот вращения их приводных АД с фазным ротором в зависимости от требований условий технологического режима.

12.2. Энергетические показатели системы «МЭЭС с общим ИВС – насосная установка»

На эффективности функционирования НУ СМВ, характеризующегося таким важным технико-экономическим показателем как удельный расход электроэнергии на подачу единицы объема воды при обеспечении требуемого графика водопотребления, существенное влияние оказывают конструктивные, технологические, эксплуатационные параметры НУ.

С помощью математической модели НУ нами рассчитаны зависимости показателей функционирования насосных агрегатов, укомплектованных центробежными насосами марки Д1600-90 с техническими характеристиками (таблица 12.1) и электродвигателями типа А12-41-4 мощностью $P=500$ кВт и частотой вращения $n=1450$ об/мин.

Рассчитанные на ПЭВМ зависимости удельного расхода электроэнергии, КПД и подачи центробежного насоса с паспортным диаметром рабочего колеса $D_\phi = 540$ мм, от изменения величины внешнего фактического его диаметра с учетом сохранения постоянства гидравлического сопротивления напорной трубопроводной сети на рис. 12.2.

Таблица 12.1.

Технические характеристики центробежного насоса

Марка насоса	Диаметр рабочего колеса, мм	Обозначение обточки	Подача, м ³ /ч	Напор, м	Частота вращения, С-1, об/мин	Допускаемый кавитационный запас, м	Мощность насоса, кВт	КПД насоса, %	Давление на входе в насос, МПа
Д1600-90	540	-	1600	90	24 (1450)	7	460	87	0,3 (3)
	515	а		75					

Анализ условия обточки рабочего колеса центробежного насоса по внешнему его диаметру показывает, что с уменьшением диаметра рабочего колеса подача Q насоса снижается (рис. 12.2). Это, в свою очередь, способствует уменьшению полезной мощности НА. При этом, однако, снижение механической мощности, подводимой к валу центробежного насоса, оказывается опережающим, что приводит к росту КПД и уменьшению удельного расхода электроэнергии. В результате этого, в некоторой точке темпы изменения полезной и механической мощностей выравниваются. При дальнейшем уменьшении D_ϕ уже полезная мощность НА будет снижаться с опережением по сравнению с механической мощностью центробежного насоса

и как следствие этого КПД будет начинать падать, а удельный расход электроэнергии будет увеличиваться.

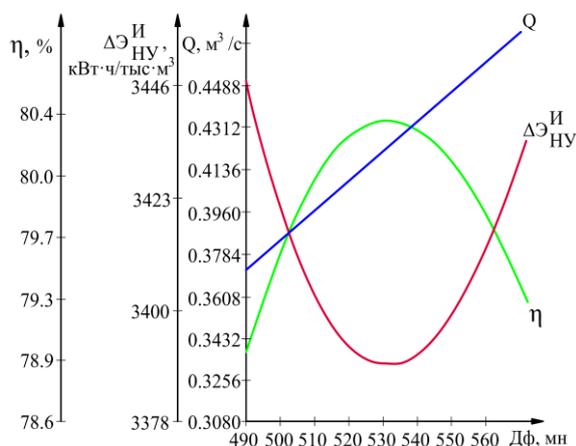


Рис. 12.2. Зависимость показателей от изменения внешнего диаметра рабочего колеса центробежного насоса

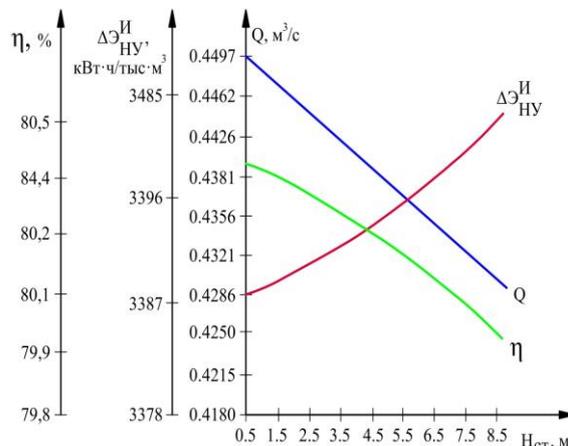


Рис. 12.3. Зависимость показателей от изменения статического напора

Согласно изложенному можно достаточно точно определить величину D_ϕ , которому соответствуют максимум КПД и минимум удельного расхода электроэнергии.

Таким образом, для рабочих колес центробежных насосов в допустимых пределах их обточки 11-15% можно определить рациональную величину D_ϕ , которому будут соответствовать минимум расхода электроэнергии и максимум КПД насосной установки.

Известно [19], что статический напор $H_{ст}$, определяющий вместе с гидравлическим сопротивлением напорной трубопроводной сети ее характеристику, как правило, не остается постоянным, а изменяется в зависимости от уровней нижнего бьефа $\nabla_{НБ}$ в подводящем (водозаборном сооружении) и верхнего $\nabla_{ВБ}$ отводящем (водовыпускном сооружении) НС СМВ.

На рис. 12.3 приведены показатели функционирования НУ СМВ от величины статического напора $H_{ст}$, рассчитанные на ПЭВМ. При этом считается, что потери напора в трубопроводной сети, как правило, остаются постоянными и ее характеристика практически не изменяется ($R = const$).

Колебания уровня воды в подводящем канале и следовательно в водозаборном сооружении НС приводит к несоответствию подачи НУ требуемому расходу воды на орошение сельскохозяйственных и садовых культур. При этом повышение уровня вызывает перерасход водных ресурсов, а понижение уровня воды ∇_{HB} способствует ее недоподаче. В данном случае обеспечение соответствующего графика водоподачи НУ требуемому графику водопотребления орошаемых сельскохозяйственных и садовых культур может быть достигнуто за счет изменения частоты вращения НА между ступенями поагрегатного регулирования.

Характер изменения кривых удельного расхода электроэнергии $\Delta \mathcal{E}_{НА}^H$, подачи Q и КПД η НА (рис. 12.3) полностью соответствует изложенному.

Таким образом, увеличение статического напора НУ СМВ при практически неизменном гидравлическом сопротивлении трубопроводной напорной сети приводит к снижению КПД и подачи НУ, а также к увеличению ее удельного расхода электроэнергии.

На рис. 12.4. показано влияние текущей частоты вращения НА на его показатели функционирования при практически постоянном гидравлическом сопротивлении напорной трубопроводной сети, в составе НУ.

Следует отметить, что для каждой заданной характеристики напорной трубопроводной сети можно определить конкретное значение частоты вращения НА в составе НУ, при которой обеспечивается максимум КПД и минимум удельного расхода электроэнергии НА. При значительном повышении частоты вращения НА величина механической мощности центробежного насоса существенно возрастает, что приводит к перегрузке приводного электродвигателя центробежного насоса.

На рис. 12.5 приведены зависимости показателей функционирования НА в составе НУ от величины подачи воды при постоянной частоте вращения приводного электродвигателя равного его номинальной частоте вращения.

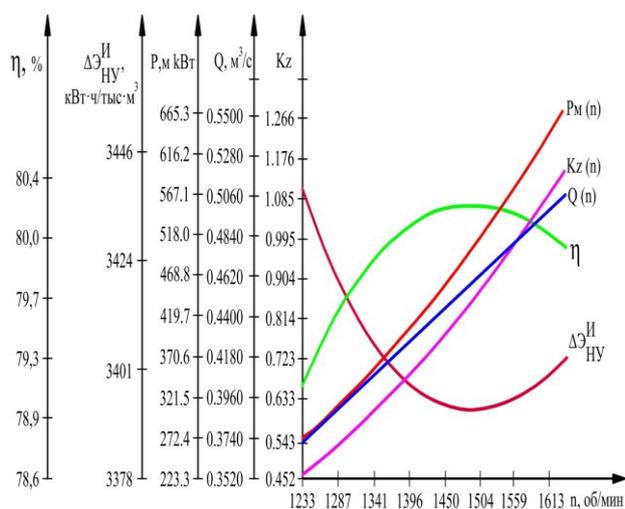


Рис. 12.4. Зависимость показателей от изменения частоты вращения центробежного насоса

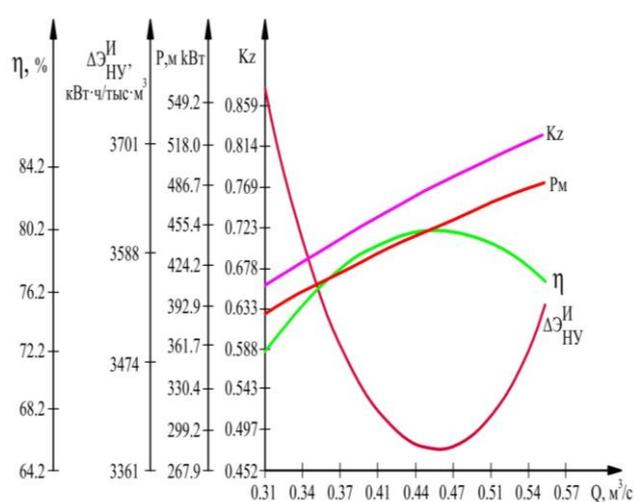


Рис. 12.5. Зависимость показателей от величины подачи центробежного насоса

Вначале возрастание подачи воды способствует увеличению КПД центробежного насоса и электродвигателя. В результате КПД НА повышается, а удельный расход электроэнергии уменьшается. При величине подач порядка $Q = 0,465 \text{ м}^3/\text{с}$ КПД НА достигает своего максимума, а его удельный расход электроэнергии – минимума, что свидетельствует о равенстве значения КПД насоса максимальной величине. Дальнейшее увеличение подачи воды вызывает снижение КПД НА и повышение его удельного расхода электроэнергии в основном за счет уменьшения КПД центробежного насоса. При чем механическая мощность продолжает возрастать, что может вызвать перегрузку приводного электродвигателя при увеличении ее свыше 500 кВт.

Таким образом, рассмотрение режимов работы НА в составе НУ в зависимости от величины подачи воды при использовании приводного электропривода с постоянной частотой вращения, проведенные на базе предложенной математической модели НУ, позволяют определить рациональный диапазон изменений производительности на каждой ступени поагрегатного регулирования. При этом для N насосных агрегатов с однотипными центробежными насосами (в данном случае марки Д 1600-90) могут быть получены аналогичные результаты при кратности подачи воды величине N .

На рис. 12.6 с целью выявления наиболее целесообразных режимных точек переключения числа НА при параллельной работе в составе НУ в зависимости от их подачи, приведены кривые $\Delta \mathcal{E}_{HV}^I$ и η_{HV} представляющие собой соответственно удельный расход электроэнергии и КПД НУ при одном работающем НА – $\Delta \mathcal{E}_{HV1}^I$ и η_{HV1} , $\Delta \mathcal{E}_{HV2}^I$ и η_{HV2} – при двух параллельно работающих НА в составе НУ, $\Delta \mathcal{E}_{HV3}^I$ и η_{HV3} – при трех параллельно работающих НА в составе НУ.

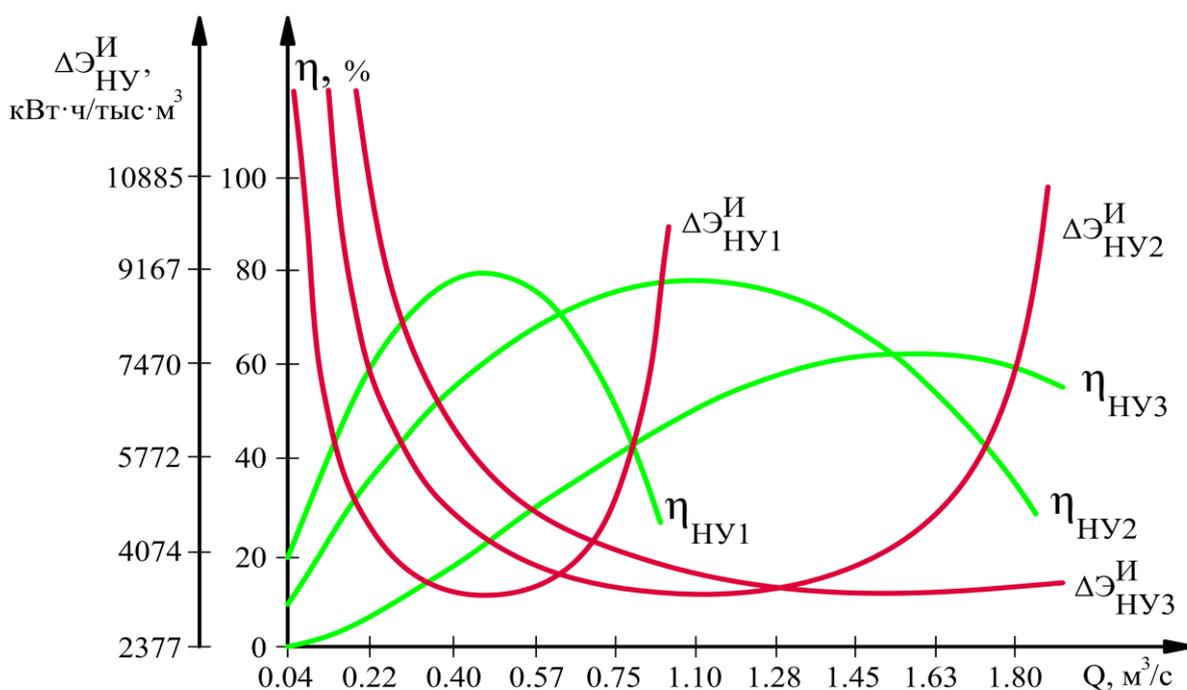


Рис. 12.6. Энергетические показатели НУ при различном числе совместно работающих НА в составе НУ

На основании произведенных расчетов и приведенного графика видно, что экономическая эффективность системы МЭЭС с общим ИВС достигается, при ее функционировании с большим значением КПД и меньшей величиной удельного расхода электроэнергии в процессе работы: одного НА в составе НУ в диапазоне изменения подач приблизительно от 0,2 до 0,598 м³/с; двух НА в составе НУ – от 0,598 м³/с до 1,276 м³/с; трех НА в составе НУ – свыше 1,276 м³/с приблизительно до 1,63 м³/с.

13. ЭНЕРГО - И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

13.1. Энергетические модели центробежных машин

Центробежные машины — насосы и вентиляторы, используемые в разных отраслях экономики, потребляют не менее 40% вырабатываемой электроэнергии и заключают в себе громадные резервы энергосбережения.

Многолетними усилиями разработчиков этих машин их конструкция доведена до совершенства, учтены все, даже мелкие детали, влияющие на процесс преобразования механической энергии вращения в энергию движущейся среды — жидкости или газа. Промышленность производит сегодня широкую гамму насосов и вентиляторов высокого качества. Однако главный резерв энергосбережения — управление режимом центробежной машины (давлением и расходом) посредством регулирования скорости — до настоящего времени практически не используется: более 95 % агрегатов общего применения во всем мире оборудованы простейшим нерегулируемым электроприводом с асинхронными двигателями, имеющими короткозамкнутый ротор.

К центробежным механизмам массового применения относятся агрегаты мощностью 2... 50 кВт. В эту категорию входят насосы холодного и горячего водоснабжения с подачей 12,5... 100 м³/ч и напором 20...80 м вод. ст., вентиляторы общего применения с расходом до 50 000 м³/ч и давлением до 1 500... 2 000 кПа (диаметры рабочего колеса от 200 до 1 000 мм). В промышленности и коммунальном хозяйстве работают сотни тысяч таких агрегатов, их доля в общем количестве центробежных механизмов не менее 80...85%.

13.2. Анализ и построение энергетических моделей центробежных машин

Для упрощенного анализа и построения энергетических моделей центробежных машин примем ряд допущений.

1. Будем считать, что давление p или связанный с ним напор $H = p/\rho g$ (ρ — плотность жидкости или газа; g — ускорение свободного падения), определяемый как разность напоров на выходе и входе насоса (вентилятора) при неизменной номинальной скорости, не будет зависеть от расхода Q в пределах изменения последнего от нуля до номинала, т. е. будем считать

$$H = H_{\text{НОМ}} = \text{const},$$

или в относительных величинах

$$H_* = 1; Q_* = 0 \dots 1; \text{ при } \omega_* = 1 \quad (13.1)$$

За базовые величины приняты номинальный напор, расход и скорость. Соответствующая характеристика 1 показана на рис. 13.1.

Обоснованность такого допущения выти-

кает из приведенных на рис. 13.1 обобщенных характеристик 2 насосов типа КМ, вентиляторов с лопастями, загнутыми назад — 3 и вперед — 4, полезной мощностью 10...15 кВт.

2. Механическая мощность $P_{\text{МЭХ}}$ при неизменной номинальной скорости будем считать линейно зависящей от расхода:

$$P_{\text{МЭХ}} = a + bQ,$$

или (в относительных единицах)

$$P_{\text{МЭХ}} = c + (1 - c)Q, \quad (13.2)$$

где a , b , c — постоянные, зависящие от типа центробежной машины.

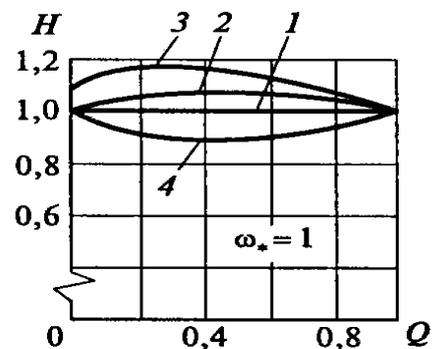


Рис. 13.1. Зависимости

$H_* = f(Q_*)$ при $\omega = \text{const}$ для центробежных машин

Здесь за базу мощности принята механическая мощность $P_{MEX.HOM}$ (мощность на валу), кВт, в номинальном режиме насоса (вентилятора), т.е. при $H = H_{HOM}$ м вод. ст., и $Q = Q_{HOM}$, м³/ч:

$$P_{MEX.HOM} = H_{HOM} Q_{HOM} / 367 \eta_{HOM}.$$

Номинальный КПД η_{HOM} современных центробежных машин рассматриваемого класса и мощности можно принять равным 70% (для упоминавшихся насосов – 70%, для вентиляторов с лопастями, загнутыми назад – 80%, вперед – 70%).

Как следует из рис. 13.2 указанное допущение хорошо выполняется для насосов ($c=0,4$), хуже для вентиляторов $c=0,2...0,6$. Для общего случая примем ($c=0,4$).

3. Будем рассматривать лишь статические (установившиеся) режимы агрегатов при их продолжительной работе.

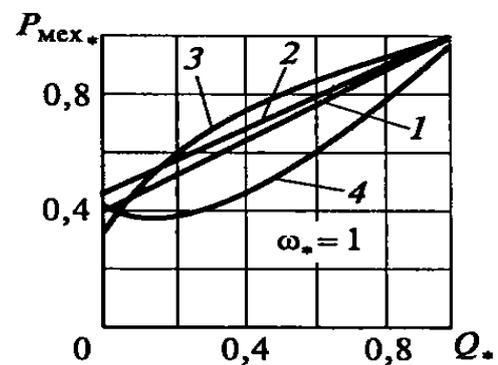


Рис. 13.2. Зависимости $P_{MEX*} = f(Q_*)$ при $\omega_* = const$ для центробежных машин

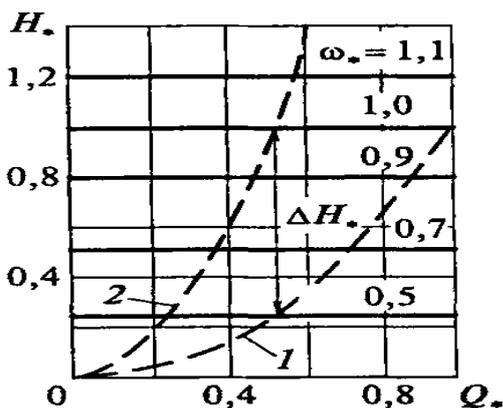


Рис. 13.3. Зависимость $H_* = f(Q_*)$ при регулировании скорости

Несмотря на различную физическую природу транспортируемой среды (жидкость, газ) и существенные различия в конструкции для всех центробежных машин справедливы соотношения подобия. Для конкретной машины (класса турбомеханизмов) работающей со скоростями ω_a и ω_b , они имеют вид:

$$Q_a = Q_b \frac{\omega_a}{\omega_b}; \quad (13.3)$$

$$H_a = H_b \frac{\omega_a^2}{\omega_b^2}; \quad (13.4)$$

$$P_{MEX.a} = P_{MEX.b} \frac{\omega_a^3}{\omega_b^3}; \quad (13.5)$$

$$M_a = M_b \frac{\omega_a^2}{\omega_b^2}, \quad (13.6)$$

где M – момент на валу машины, $M = P_{MEX} / \omega$.

Из соотношений подобия (13.3), (13.4) с учетом принятого допущения (13.1) получены характеристики насоса (вентилятора) напор – расход при регулировании скорости (горизонтальные линии на рис. 13.3).

4. Для построения характеристики магистрали, т.е. зависимости $H(Q)$, воспользуемся зависимостями (13.3) и (13.4), применив их к структурам магистрали на рис. 13.4.

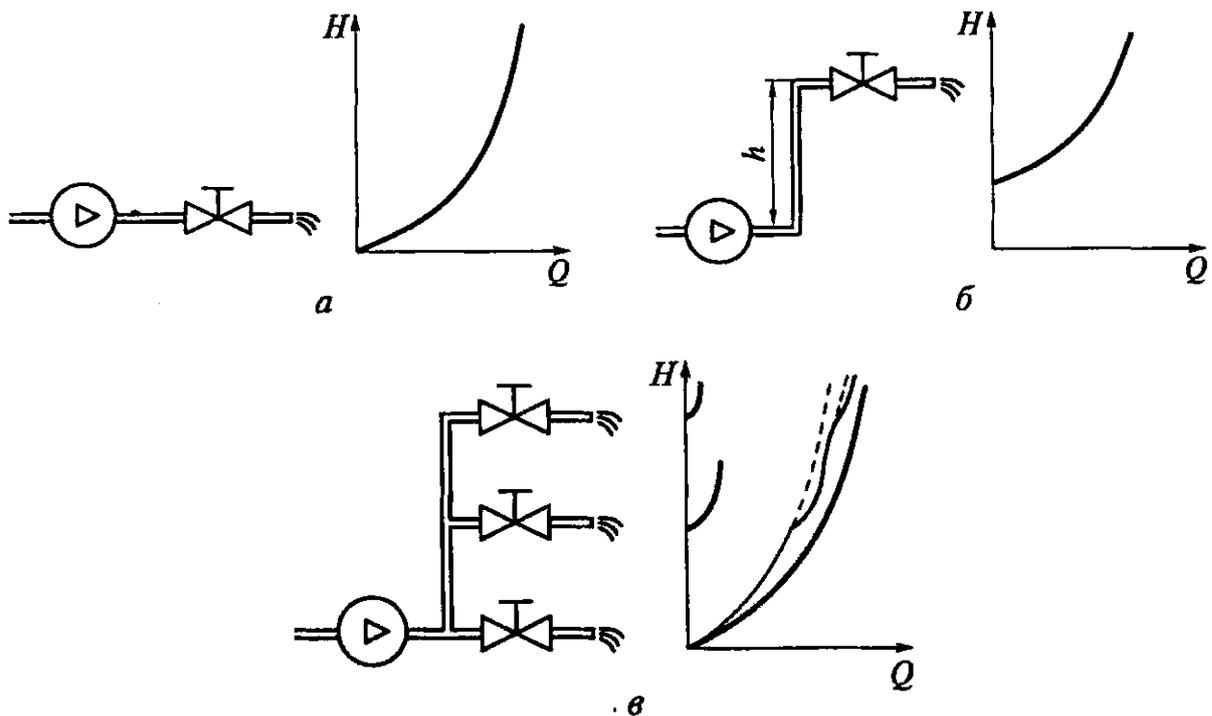


Рис. 13.4. Характеристики магистрали $H = f(Q)$:
 а – перекачка жидкости (газа) без подъема; б – перекачка жидкости с подъемом на высоту h ; в – перекачка жидкости с подъемом на два этажа

Далее будем пользоваться обобщенной зависимостью $H = aQ^2$.

На рис. 13.3 штриховыми линиями показаны две характеристики магистрали при ее постоянном сопротивлении, соответствующем номинальному 1 и

половинному 2 расходу.

Поскольку режим работы определяется точкой пересечения характеристик насоса и магистрали, регулирование скорости открывает широкие возможности управления режимами по любому целесообразному закону или алгоритму – любая точка в области $H - Q$ становится легко доступной при регулировании скорости. Если в случае нерегулируемого привода единственной возможностью перехода от номинального расхода к половинному было увеличение сопротивления магистрали, т.е. переход от характеристики 1 к характеристике 2 (дресселирование); при этом избыток напора составлял $\Delta H_* = 0,75$ (см. рис. 13.3), то при регулируемом приводе режим $Q_* = 0,5$ в соответствии с формулой (13.3) достигается заданием скорости $\omega_* = 0,5$ без какого-либо избытка напора.

Указанная гибкость управления технологическими координатами (напором и расходом) достигается при радикальном снижении энергетических затрат. Зависимость механической мощности от расхода при скоростях ω_* от 0,5 до 1,1 показана на рис. 13.5.

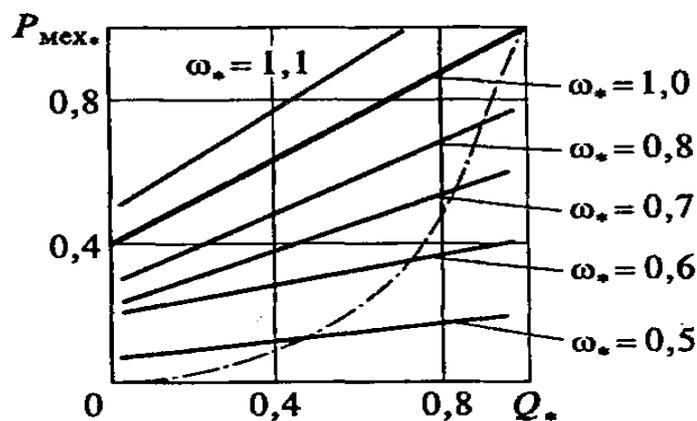


Рис. 13.5. Зависимость $P_{MECH.} = f(Q_*)$ при регулировании скорости

В соответствии с формулой (13.5) зависимость механической мощности от расхода при регулировании скорости представляет собой кубическую параболу (штрихпунктирная кривая на рис. 13.5). Заштрихованная область на рис. 13.5 отражает реализуемую экономию мощности в сравнении с нерегулируемым приводом ($\omega_* = 1$). В условиях предыдущего примера (см. рис. 13.3) переход от

$Q_1 = 1$ к $Q_2 = 0,5$ соответствовало бы уменьшение мощности от 1,0 до 0,7 при дросселировании согласно формуле (13.2) и от 1 до 0,125 при регулировании угловой скорости.

Приведенные идеализированные энергетические модели центробежных машин позволяют оценивать в любых конкретных условиях эффективность их регулирования. Если требуется более детальные оценки, то следует пользоваться характеристиками конкретных агрегатов. На рис. 13.6 показаны составляющие потерь в насосе $\Delta P_{\text{нас}}$, задвижке $\Delta P_{\text{завд}}$ и магистрали $\Delta P_{\text{маг}}$ при двух способах регулирования расхода.

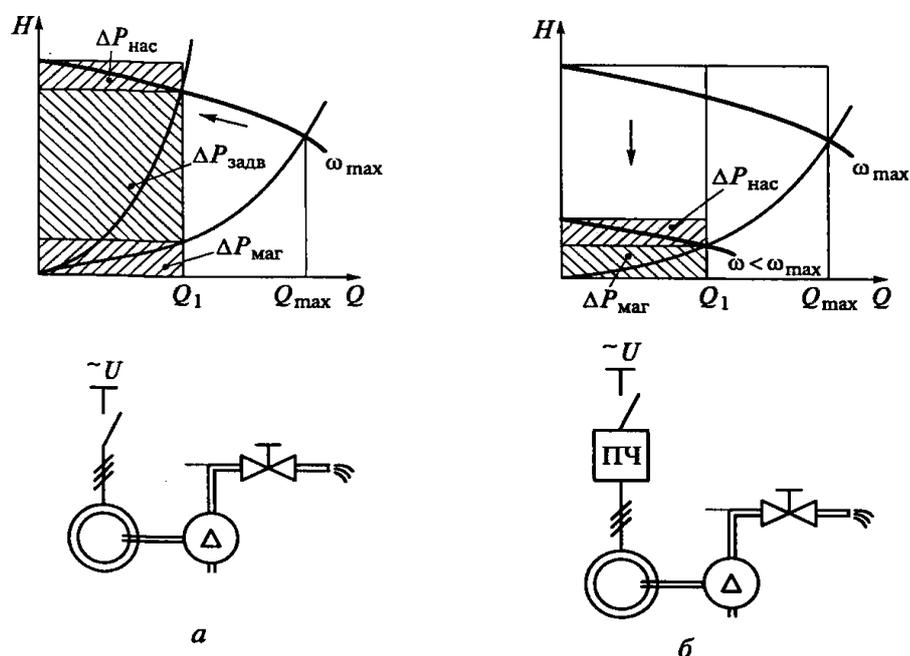


Рис. 13.6. Энергетические диаграммы центробежных машин для двух способов регулирования расхода:
 а – дросселирование; б – изменение скорости

Иногда при анализе работы центробежных машин удобно пользоваться электрическими аналогами гидравлической системы, представленными в таблице 13.1.

Таблица 13.1.

Гидравлические и электрические аналоги

Гидравлические величины	Электрические величины
Напор H	Напряжение U , ЭДС E
Расход Q	Ток I
Гидравлическое сопротивление R_r	Электрическое сопротивление R

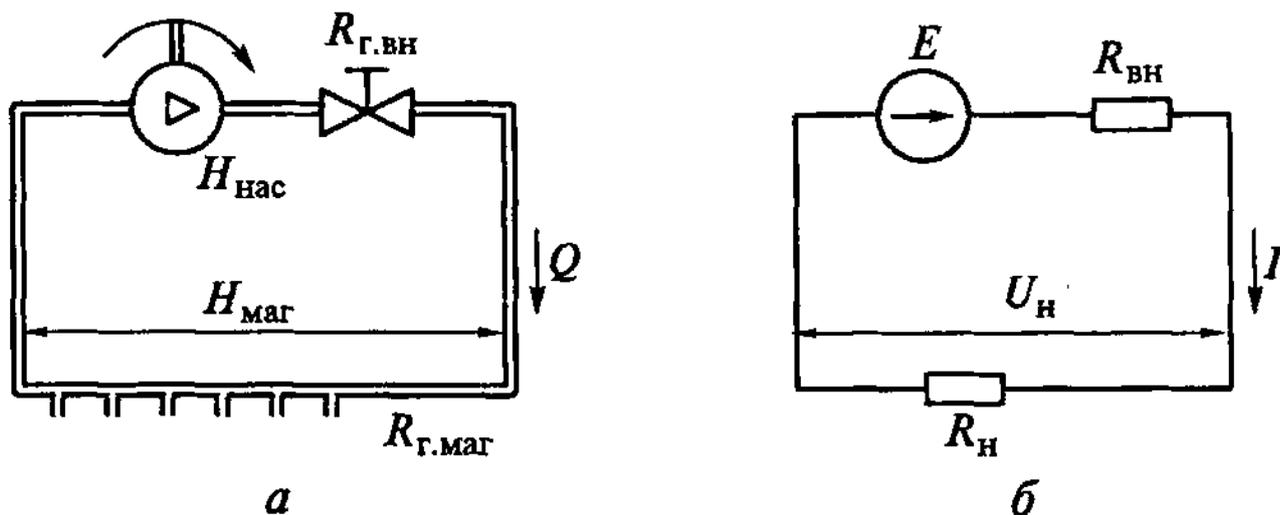


Рис. 13.7. Гидравлическая система (а) и эквивалентная электрическая схема (б)

Тогда гидравлической системе на рис. 13.7, а (в $R_{\text{г.вн}}$ входит сопротивление насоса и запорного устройства) будет соответствовать электрическая схема на рис. 13.7, б, для которой:

$$I = \frac{E}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}};$$

$$U_{\text{нагр}} = E \frac{R_{\text{нагр}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}}.$$

По аналогии для гидравлической системы будут справедливы соотношения:

$$Q = \frac{H_{\text{нас}}}{R_{\text{г.вн}} + R_{\text{г.маг}}} \quad \text{и} \quad H_{\text{маг}} = H_{\text{нас}} \frac{R_{\text{г.маг}}}{R_{\text{г.вн}} + R_{\text{г.маг}}}.$$

Таким образом, как показано ранее, переход от нерегулируемого электропривода насосов и вентиляторов к регулируемому радикально решает вопрос управления технологическими режимами установок при резком снижении энергетических затрат.

14. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СХЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

14.1. Основные характеристики и параметры насосных агрегатов, определяющие энерго – и ресурсосберегающие режимы ее функционирования

В насосных станциях основу гидромеханического оборудования составляют насосы, обеспечивающие подачу воды по напорным трубопроводам на орошаемые массивы сельскохозяйственных посевных культур.

Напорные трубопроводы (НТ) внутри здания НС предназначены для подачи воды от насосов к внешним НТ (водоводам), количество которых, для случая работы НА на свой отдельный (индивидуальный) НТ, равно общему числу НА установленных на НС. При совместной же работе НА в общую напорную сеть, внешние напорные водоводы, как правило, имеют несколько ниток (водоводов) НТ, тогда как число насосов, а следовательно, и непосредственно отводящих от них воду НТ различно: два, три и более.

В практике эксплуатации НС СМВ наиболее часто встречаются варианты компоновки НА по следующим схемам:

- каждый из НА работает на свой отдельный НТ (рис. 14.1);
- несколько НА объединены, на совместную работу, в общую напорную сеть, или общий НТ (рис. 14.2 а, б; рис. 14.3 а, б).

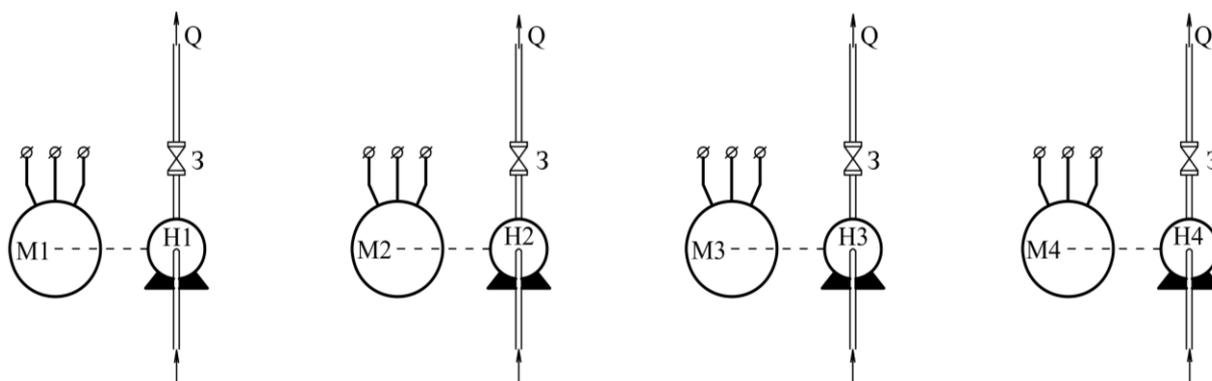
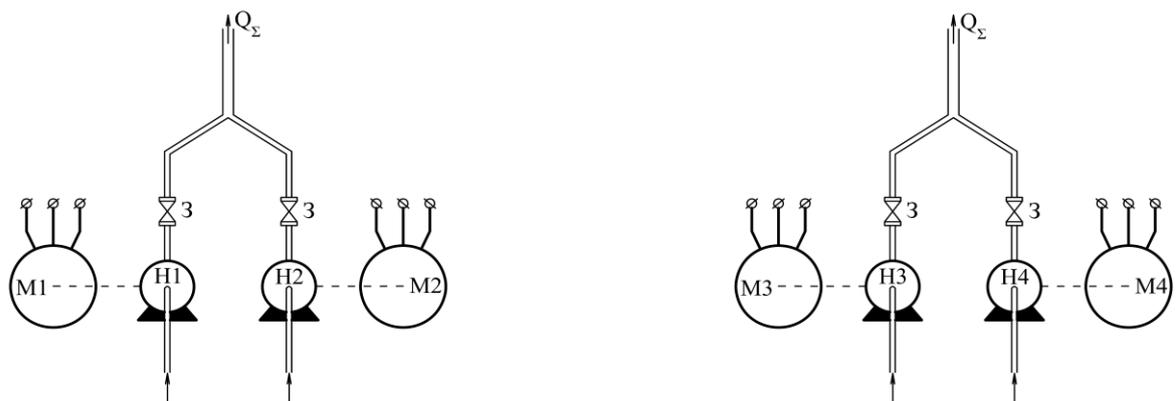
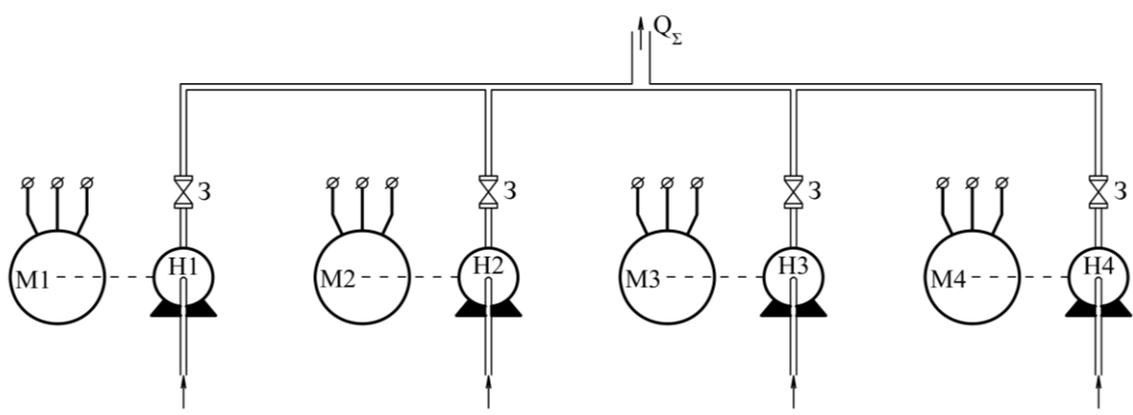


Рис. 14.1. Конструктивное исполнение насосной установки при индивидуальном варианте подсоединения насосных агрегатов

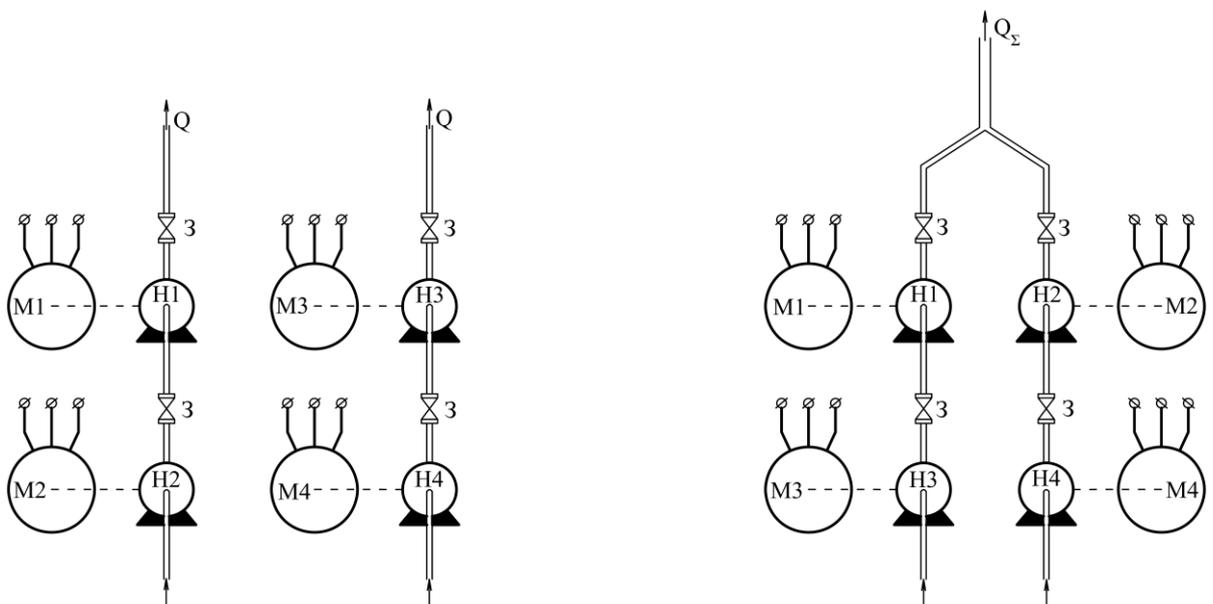


а)



б)

Рис. 14.2 а, б. Конструктивное исполнение насосной установки при вариантах параллельной работы насосных агрегатов



а)

б)

Рис. 14.3 а, б. Конструктивное исполнение насосной установки при вариантах совместной последовательной работы насосных агрегатов в напорную сеть

Основные параметры лопастных насосов, а именно подача Q , напор H , мощность P , коэффициент полезного действия η и частота вращения n , находятся в строго определенной зависимости. Значения напора, мощности и КПД, зависящие от величины подачи насоса, представляются в виде системы точек в координатах $Q-H$, $Q-P_m$ и $Q-\eta$. Получаемые при этом характеристики называются соответственно расходно - напорной, расходно - мощностной, расходно - КПД характеристиками насоса. Указанные характеристики, определяемые экспериментальным путем при $n=\text{const}$ в результате заводских стендовых испытаний данной марки насоса, представляют собой паспортные или каталожные характеристики.

В результате математической обработки экспериментально снятых характеристик насосов Е.А. Прегер предложил аналитическую зависимость расходно - напорной характеристики насоса в виде уравнения параболы :

$$H = A_H - B_H * Q^2, \quad (14.1)$$

где A_H и B_H - постоянные коэффициенты аппроксимации расходно- напорной характеристики насоса.

Мощность, подводимая к валу насоса определяется как:

$$P_M = A_P * Q - B_P * Q^2 + C_P, \quad (14.2)$$

где A_P , B_P , C_P - постоянные коэффициенты аппроксимации расходно - мощностной характеристики насоса.

Определим КПД насоса как отношение полезной мощности $P_{пол}$ к подводимой со стороны вала насоса P_M :

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_M} = \frac{\gamma * Q * H}{102 * P_M}, \quad (14.3)$$

где γ - плотность перекачиваемой воды.

С учетом (14.1) и (14.2) имеем

$$\eta = \frac{\gamma * Q}{102} * \frac{A_H - B_H * Q^2}{A_P * Q - B_P * Q^2 + C_P} . \quad (14.4)$$

Определить рабочий режим функционирования насоса возможно лишь при условии, если известна характеристика напорной сети в системе "электродвигатель – насос - напорная сеть". В простейшем случае указанная сеть представляет собой напорный трубопровод, соединяющий насос с водовыпускным сооружением мелиоративной НС машинного водоподъема (рис. 14.1). Значит реальные эксплуатационные характеристики насоса могут быть получены только при совместном анализе характеристик насоса и напорной сети, на которую он работает. Характеристика напорной сети (трубопровода) $H_{TP} = f(Q)$ показывает, какой напор должен быть развит насосом в начале напорной сети для перемещения в ней определенного количества воды. H_{TP} складывается из двух составляющих : из статического напора H_{CT} , затрачиваемого на подъем воды на заданную высоту (геодезический напор); из потерь напора на внутренне трение, трение потока о стенки рабочей сети, на преодоление местных сопротивлений, пропорциональных квадрату производительности насоса и так далее (динамический напор).

Следовательно, характеристика напорной сети с постоянными параметрами имеет вид:

$$H_{TP} = H_{CT} + R * Q^2 , \quad (14.5)$$

где R - коэффициент сопротивления сети, зависящий от длины напорного трубопровода, его внутреннего диаметра, наличия местных сопротивлений и шероховатости стенок трубопровода, а также вязкости перекачиваемой воды.

Решая совместно уравнения (14.1) и (14.5) , получим:

$$Q = \sqrt{(A_H - H_{CT}) / (B_H + R)} . \quad (14.6)$$

Выражение (14.6) позволяет определить установившийся режим работы насоса, определяя тем самым режимную рабочую точку в системе

"электродвигатель – насос - напорная сеть" при неизменных параметрах насосной установки, комплектованной по схеме согласно рис. 14.1. При этом следует отметить, что насосная установка в этом простейшем случае представляет собой НА с комплектом гидросилового оборудования, смонтированного по определенной схеме, обеспечивающей работу насоса в заданных условиях.

В более широком смысле насосной установкой (рис. 14.2 а, б и рис. 14.3 а, б) называется объединение нескольких НА параллельно или последовательно на совместную работу в общий напорный трубопровод с комплектом соответствующего гидросилового оборудования.

В качестве примера, на рис. 14.4 приведена работа насоса марки 450Д90 на напорную сеть с постоянными параметрами, где точка пересечения A расходно-напорной характеристики насоса с характеристикой напорного трубопровода $H_{\text{ТР}}$ определяет режим работы насосной установки со значениями Q_A , H_A , P_{MA} и η_A .

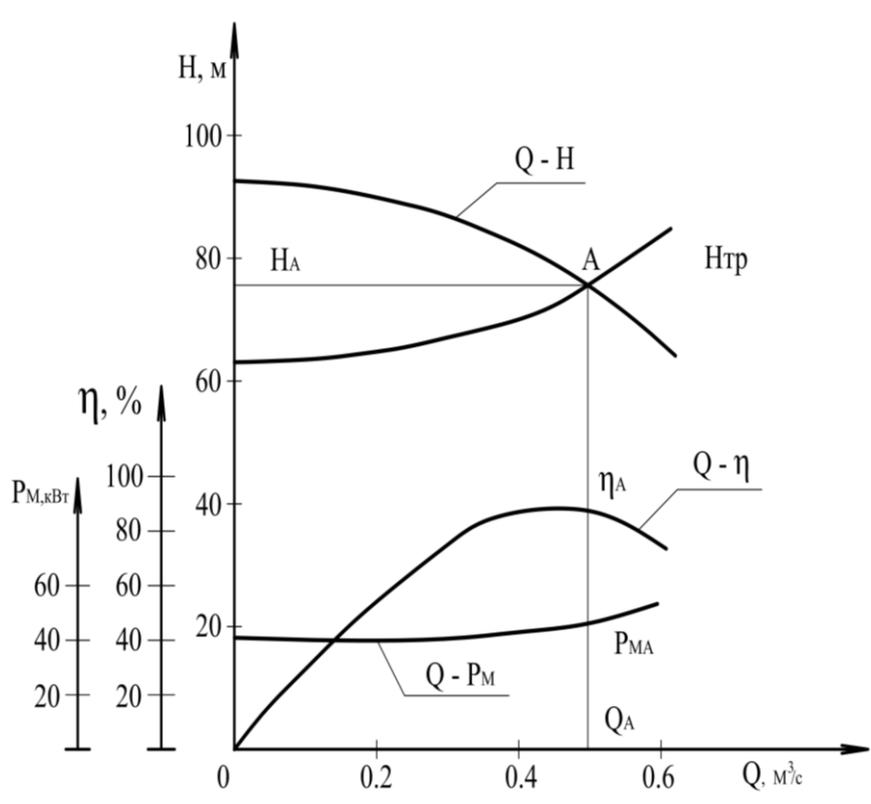


Рис. 14.4. Работа насоса марки 450Д90а на напорную сеть с постоянными параметрами

Обеспечение надлежащего энерго- ресурсосберегающего режима функционирования насосной установки в системе "электродвигатель – насос - напорная сеть", а следовательно, и в целом по мелиоративной насосной станции в определенных пределах достигается при воздействии на ее конструктивные, технологические и эксплуатационные параметры.

К конструктивным параметрам следует отнести номинальную подачу Q_H и номинальный напор H_H насоса, угол разворота лопастей β_L фактический диаметр и конфигурацию рабочего колеса насоса D_p , компоновку напорных трубопроводов (простой или сложный трубопровод), их диаметры и длины, геометрические размеры всасывающих и коммуникационных трубопроводов, номинальные мощности и число оборотов гидросилового оборудования и т.д.

К технологическим параметрам можно отнести уровни бьефов в подводящем (водозаборное сооружение) и отводящем (водовыпускное сооружение) каналах ∇_H , ∇_B или же статический напор $H_{ст}$, покрытие графика водопотребления, количество одновременно функционирующих НА в общую напорную сеть, текущие значения расхода Q и напора H насосной установки, коэффициент загрузки приводных электродвигателей насосов K_3 и т.д.

К эксплуатационным параметрам гидросилового оборудования можно отнести напряжения на зажимах двигателей U_C , их активные и реактивные мощности, энергетические показатели (η_d , $\cos\varphi$), наработку часов (t).

14.2. Вычислительная модель постоянных коэффициентов аппроксимации расходно – напорной и расходно – мощностной характеристик центробежного насоса

Для обеспечения энергосберегающих режимов работы водоподъемной насосной установки, необходимо формировать такое положение режимной точки насоса в рабочем поле расходно-напорной характеристики, которое соответствовало бы рациональному режиму функционирования насосного агрегата (НА) в составе насосной установки (НУ). Это условие можно реа-

лизовать лишь путем использования аналитических выражений для рабочих характеристик центробежного насоса, а именно, расходно-напорной ($Q-H$), расходно-мощностной ($Q-P$) и зависимости КПД насоса от его расхода $\eta(Q)$.

Предлагаемая ниже методика включает расчет постоянных коэффициентов аппроксимации по паспортным или каталожным характеристикам, приводимой в справочной литературе для соответствующих марок насосов при номинальном значении их частоты вращения и фактическом диаметре рабочего колеса.

Известно, что в общем виде расходно-напорная характеристика центробежного насоса описывается аналитическим уравнением вида:

$$H = A_H - B_H * Q^2, \text{ м} \quad (14.7)$$

где A_H, B_H - постоянные коэффициенты аппроксимации

Q - подача (расход) насоса, $\text{м}^3/\text{с}$.

Для определения коэффициентов аппроксимации воспользуемся приближение функций по методу наименьших квадратов, позволяющих получить с достаточной степенью точности выражение заменяющее паспортную кривую на расчетную и определяющее положение рабочей точки в любом задаваемом диапазоне изменений расхода Q . При этом, для задаваемых по паспортной кривой n пар значений Q_j и H_j , необходимо определить зависимости $H_j(Q_j)$, обеспечивая наименьшую среднеквадратичную погрешность:

$$U = \sum_{j=1}^n [H_j - H_j(Q_j)]^2 = \min \quad (14.8)$$

или

$$U = \sum_{j=1}^n [H_j - (A_H - B_H * Q_j)]^2 = \sum_{j=1}^n [H_j^2 - 2 * H_j * (A_H - B_H * Q_j) + (A_H - B_H * Q_j)^2] = \min \quad (14.9)$$

Определим частные производные от функции U по величинам представляющим собой коэффициенты зависимости :

$$\frac{\partial U}{\partial A_H} = -2 \sum_{j=1}^n (H_j + B_{H,n} * Q_j^2 - A_H); \quad (14.10)$$

$$\frac{\partial U}{\partial B_H} = 2 \sum_{j=1}^n (H_j * Q_j^2 - A_H * Q_j^2 + B_H * Q_j^4). \quad (14.11)$$

Приравнявая частные производные нулю, получим систему уравнений с двумя неизвестными A_H, B_H :

$$A_H - \frac{1}{n} * B_H * \sum_{j=1}^n Q_j^2 = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n H_j; \quad (14.12)$$

$$\frac{1}{n} * A_H * \sum_{j=1}^n Q_j^2 - \frac{1}{n} * B_H * \sum_{j=1}^n Q_j^4 = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n H_j * Q_j^2. \quad (14.13)$$

Введем обозначения:

$$a_{H11} = 1; \quad a_{H12} = -\frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n Q_j^2; \quad b_{H1} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n H_j; \quad (14.14)$$

$$a_{H21} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n Q_j^2; \quad a_{H22} = -\frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n Q_j^4; \quad b_{H2} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n H_j * Q_j^2. \quad (14.15)$$

Тогда система уравнений (14.12) – (14.13) примет вид:

$$a_{H11} * A_H + a_{H12} * B_H = b_{H1}; \quad (14.16)$$

$$a_{H21} * A_H + a_{H22} * B_H = b_{H2}; \quad (14.17)$$

С помощью определителей найдем выражения для искомых коэффициентов:

$$A_H = \Delta_{aH} / \Delta_H; \quad B_H = \Delta_{bH} / \Delta_H, \quad (14.18)$$

где

$$\Delta_H = a_{H11} * a_{H22} - a_{H12} * a_{H21} \quad (14.19)$$

$$\Delta_{aH} = b_{H1} * a_{H22} - a_{H12} * b_{H2} \quad (14.20)$$

$$\Delta_{bH} = a_{H11} * b_{H2} - a_{H21} * b_{H1} \quad (14.21)$$

Определим также коэффициенты аппроксимации расходно-мощностной ($Q - P_M$) характеристики центробежного насоса.

Известно, что мощность, подводимая к валу насоса, определяется выражением:

$$P_M = A_p * Q - B_p * Q^2 + C_p, \text{ Вт} \quad (14.22)$$

где A_p, B_p, C_p - постоянные коэффициенты аппроксимации;

P_M - механическая мощность на валу насоса.

Далее аналогичным образом, используя методику, базирующуюся на приближении функций по методу наименьших квадратов, могут быть определены коэффициенты аппроксимации расходно-мощностной ($Q - P_{M_n}$) характеристики водоподъемного насоса.

Для чего находим частные производные от функции

$$U = \sum_{i=1}^{N,n} [P_{M.n.j.i} - P_{M.n.j.i}(Q_{n,j.i})]^2. \quad (14.23)$$

По величинам, представляющими собой искомые коэффициенты зависимости $P_{M.j}(Q_j)$ приравняем их нулю. В результате получим систему уравнений с тремя неизвестными A_p, B_p, C_p :

$$a_{11} * A_p + a_{12} * B_p + a_{13} * C_p = b_1; \quad (14.24)$$

$$a_{21} * A_p + a_{22} * B_p + a_{23} * C_p = b_2; \quad (14.25)$$

$$a_{31} * A_p + a_{32} * B_p + a_{33} * C_p = b_3, \quad (14.26)$$

где

$$a_{11} = 1/n * \sum_{j=1}^n Q_j^2; \quad a_{12} = -1/n * \sum_{j=1}^n Q_j^3; \quad a_{13} = 1/n * \sum_{j=1}^n Q_j;$$

$$b_1 = 1/n * \sum_{j=1}^n P_{M.j} * Q_j; \quad (14.27)$$

$$a_{21} = -1/n * \sum_{j=1}^n Q_j^3; \quad a_{22} = 1/n * \sum_{j=1}^n Q_j^4; \quad a_{23} = -1/n * \sum_{j=1}^n Q_j^2;$$

$$b_2 = -1/n * \sum_{j=1}^n P_{M.j} * Q_j^2; \quad (14.28)$$

$$a_{31} = 1/n * \sum_{j=1}^n Q_j; \quad a_{32} = -1/n * \sum_{j=1}^n Q_j^2; \quad a_{33} = 1; \quad b_3 = 1/n * \sum_{j=1}^n P_{M.j}. \quad (14.29)$$

С помощью определителя найдем выражения для искоемых коэффициентов аппроксимации:

$$A_p = \Delta_a / \Delta; \quad B_p = \Delta_b / \Delta; \quad C_p = \Delta_c / \Delta, \quad (14.30)$$

$$\text{где } \Delta = a_{11} * a_{22} * a_{33} + a_{21} * a_{32} * a_{13} + a_{12} * a_{23} * a_{31} - a_{31} * a_{22} * a_{13} - a_{32} * a_{23} * a_{11} - a_{21} * a_{12} * a_{33}; \quad (14.31)$$

$$\Delta_a = b_1 * a_{22} * a_{33} + a_{12} * a_{23} * b_3 + b_2 * a_{32} * a_{13} -$$

$$-b_3 * a_{22} * a_{13} - a_{32} * a_{23} * b_1 - b_2 * a_{12} * a_{33}; \quad (14.32)$$

$$\Delta_b = a_{11} * b_2 * a_{33} + a_{21} * b_{H3} * a_{13} + b_1 * a_{23} * a_{31} - \\ - a_{31} * b_2 * a_{13} - a_{23} * b_3 * a_{11} - b_1 * a_{21} * a_{33}; \quad (14.33)$$

$$\Delta_c = a_{11} * a_{22} * b_3 + a_{21} * a_{32} * b_1 + a_{12} * b_2 * a_{31} - \\ - a_{31} * a_{22} * b_1 - a_{21} * a_{12} * b_3 - a_{32} * b_2 * a_{11}. \quad (14.34)$$

Требуемую точность аппроксимации паспортных рабочих $Q - H$ и $Q - P_M$ характеристик рассматриваемого насоса можно обеспечить, добиваясь того, чтобы сумма квадратов невязок была меньше или равна заранее заданной величине ε .

Как известно, развиваемая полезная мощность насоса может быть представлена в виде:

$$P_{пол} = \gamma * Q * H * 10^{-3}, \text{ кВт} \quad (14.35)$$

где γ - удельный вес перекачиваемой воды, Н/м.

Тогда коэффициент полезного действия насоса может быть определено как отношение полезной мощности к подводимой к валу насоса механической мощности P_M :

$$\eta = P_{пол} / P_M = \frac{\gamma * Q * H * 10^{-3}}{P_M}. \quad (14.36)$$

Используя выражения для напора H и механической мощности P_M в соответствии с (14.7) и (14.22), получим :

$$\eta = \frac{0,001 * \gamma * Q * (A_H - B_H * Q^2)}{A_p * Q - B_p * Q^2 + C_p}. \quad (14.37)$$

Таким образом, выражения (14.7) , (14.22) и (14.37) с рассчитанными по вышеприведенной методике коэффициентами аппроксимации позволяют аналитически описать рабочие характеристики центробежного насоса.

Блок-схема алгоритма расчета вышеуказанных коэффициентов аппроксимации рабочих характеристик насоса приведена на рис. 14.5.

14.3. Формирование алгоритма определения постоянных коэффициентов аппроксимации рабочих характеристик центробежного насоса

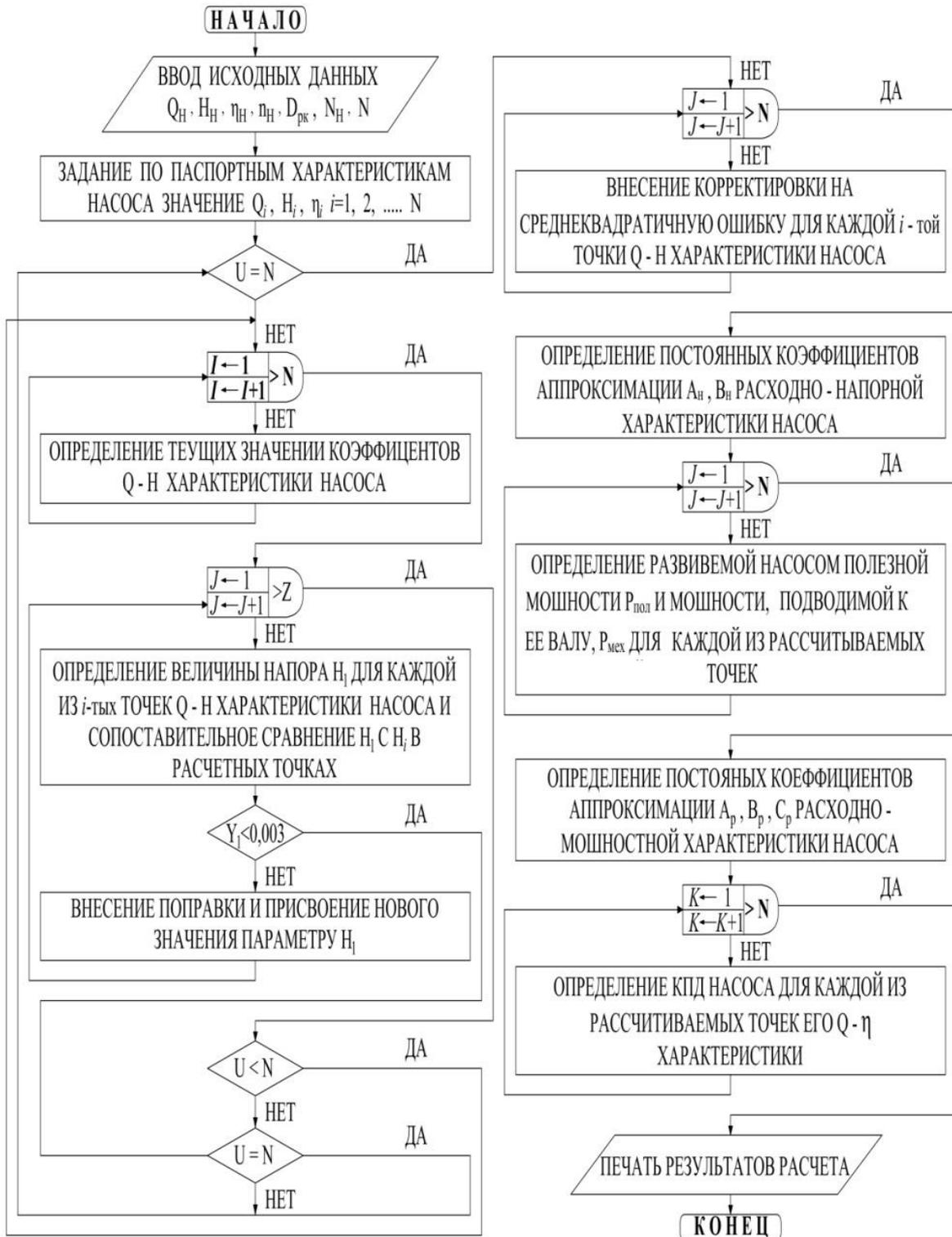


Рис. 14.5. Блок-схема алгоритма определения постоянных коэффициентов аппроксимации рабочих характеристик центробежного насоса

15. МОДЕЛИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ РАБОЧЕГО КОЛЕСА И ФИКСИРОВАННОМ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

15.1. Метод аналитического определения рабочих характеристик

Известно, что в практике эксплуатации гидромеханического оборудования НС в тех случаях, когда характеристика насоса не соответствует заданным условиям работы в относительно небольших пределах, а параметры системы практически постоянны, используют способ изменения характеристики насоса путем обточки его рабочего колеса по внешнему диаметру в соответствии с графоаналитическим методом.

В качестве примера на рис. 15.1 приведен график способа изменения подачи центробежного насоса путем обточки его рабочего колеса по внешнему диаметру при сохранении неизменности формы лопастей и других геометрических размеров.

Из приведенного графика видно, что перемещение любой режимной точки $Q - H$ характеристики центробежного насоса в координатной плоскости их расхода и напора при обточке диаметра рабочего колеса насоса происходит в сторону уменьшения по прямой линии, проходящей через начало координат (рис. 15.1), то есть режимная точка 1 с координатами Q_1 и H_1 при исходном диаметре рабочего колеса перемещается в новую режимную точку 2 с параметрами Q_2 и H_2 при его обточке. Наряду с этим режимные точки перемещаются в сторону уменьшения напора по квадратичной параболе с вершиной в начале координат, то есть точка 1 с параметрами Q_1 и H_1 перемещается в положение 3 с параметрами Q_3 и H_3 .

Рассматриваемый способ регулирования производительности насоса по сравнению с дросселированием дает значительную экономию по мощности, имеет сравнительно высокий КПД и наиболее эффективен при поагрегатном регулировании подачи ВНС.

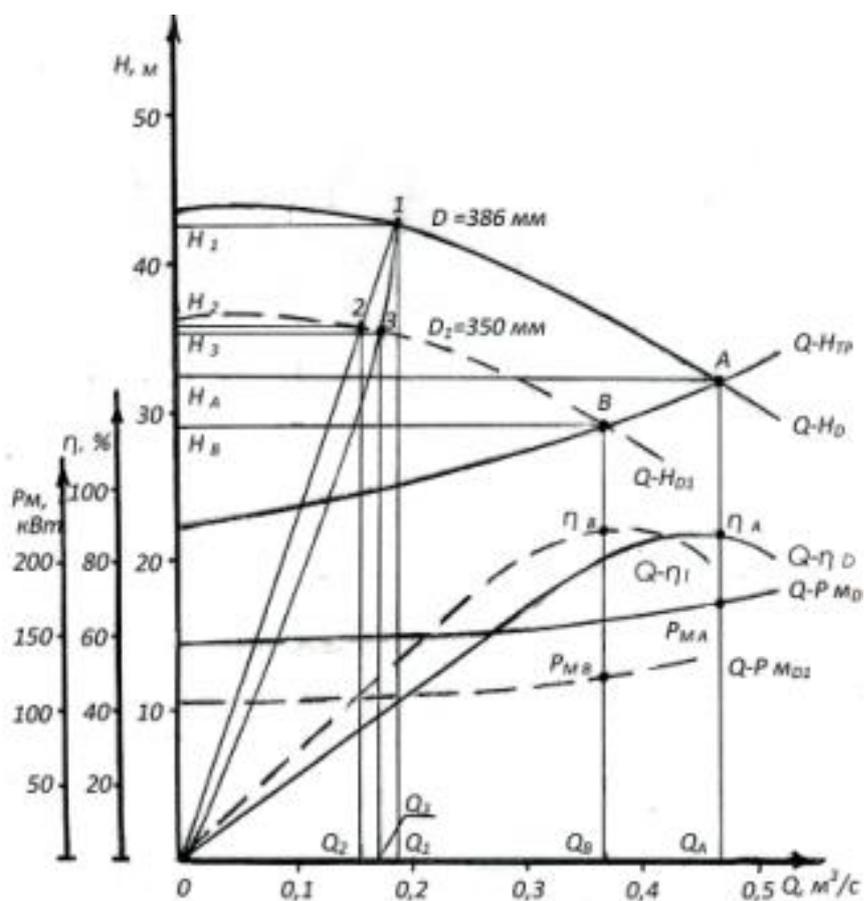


Рис. 15.1. Регулирование подачи насоса путем обточки его рабочего колеса по внешнему диаметру

Слабой же стороной регулирования производительности центробежного насоса путем обточки его рабочего колеса по внешнему диаметру является то, что этот прием относится к изменению подачи насоса на фиксированную постоянную величину и длительный промежуток времени его работы (до очередного межремонтного периода HA), а также ограниченный диапазон изменения расхода HA .

Нами предлагается модель аналитического метода определения расходно - напорной ($Q-H_d$), расходно - мощностной ($Q-P_d$) и расходно - КПД ($Q-\eta_d$) характеристик насоса при изменении геометрических размеров (диаметра) рабочего колеса, обеспечивающая достаточно высокий уровень точности их расчета. Для этого, в окрестности рабочего поля ($Q_{нач}$ и $Q_{кон}$) паспортной характеристики насоса задаемся N_d количеством значений подачи $Q_{d,j}$, которое определяется как:

$$Q_{d,j} = (Q_{КОН} - Q_{НАЧ}) / N_d, \quad (15.1)$$

где $Q_{НАЧ} = 1,5 * Q_H$; $Q_{КОН} = 0,3 * Q_H$.

При этом развиваемый напор $H_{d,j}$ и мощность на валу насоса $P_{d,j}$ определяется следующим образом:

$$H_{d,j} = A_H - B_H * Q_{d,j}^2; \quad (15.2)$$

$$P_{M.d,j} = A_P * Q_{d,j} - B_P * Q_{d,j}^2 + C_P. \quad (15.3)$$

На основании формул подобия (15.4), (15.5) и (15.6) определяем параметры подачи $Q_{ОБТ,j}$, напора $H_{ОБТ,j}$ и мощности на валу насоса $P_{ОБТ,j}$ соответствующие новому геометрическому размеру ($D_{ОБТ}$) обточенного по внешнему диаметру рабочего колеса:

$$Q_{ОБТ} / Q = (D_{ОБТ} / D)^2; \quad (15.4)$$

$$H_{ОБТ} / H = (D_{ОБТ} / D)^2; \quad (15.5)$$

$$P_{M.ОБТ} / P = (D_{ОБТ} / D)^3. \quad (15.6)$$

$$\text{при } n_s < 150 \quad Q_{ОБТ,j} = D_{ОБТ} / D * Q_{d,j}; \quad (15.7)$$

$$\text{при } n_s > 150 \quad Q_{ОБТ,j} = (D_{ОБТ} / D)^2 * Q_{d,j}. \quad (15.8)$$

Далее по аналогии с предложенной методикой базирующейся на приближении функций по методу наименьших квадратов определяются постоянные коэффициенты аппроксимации $A_{H,d}$ и $B_{H,d}$ расходно-напорной и $A_{P,d}$, $B_{P,d}$ и $C_{P,d}$ расходно - мощностной характеристик насоса для обточенного по внешнему диаметру рабочего колеса. При этом, КПД (η_d) насоса определяется в соответствии со следующим выражением:

$$\eta = \frac{\gamma * Q}{102} * \frac{A_H - B_H * Q^2}{A_P * Q - B_P * Q^2 + C_P}. \quad (15.9)$$

15.2. Формирование вычислительного алгоритма определения характеристик насоса при изменении геометрических размеров его рабочего колеса

На рис. 15.2 приведена блок-схема алгоритма определения характеристик насоса при изменении геометрических размеров ($D_{обт}$) рабочего колеса.

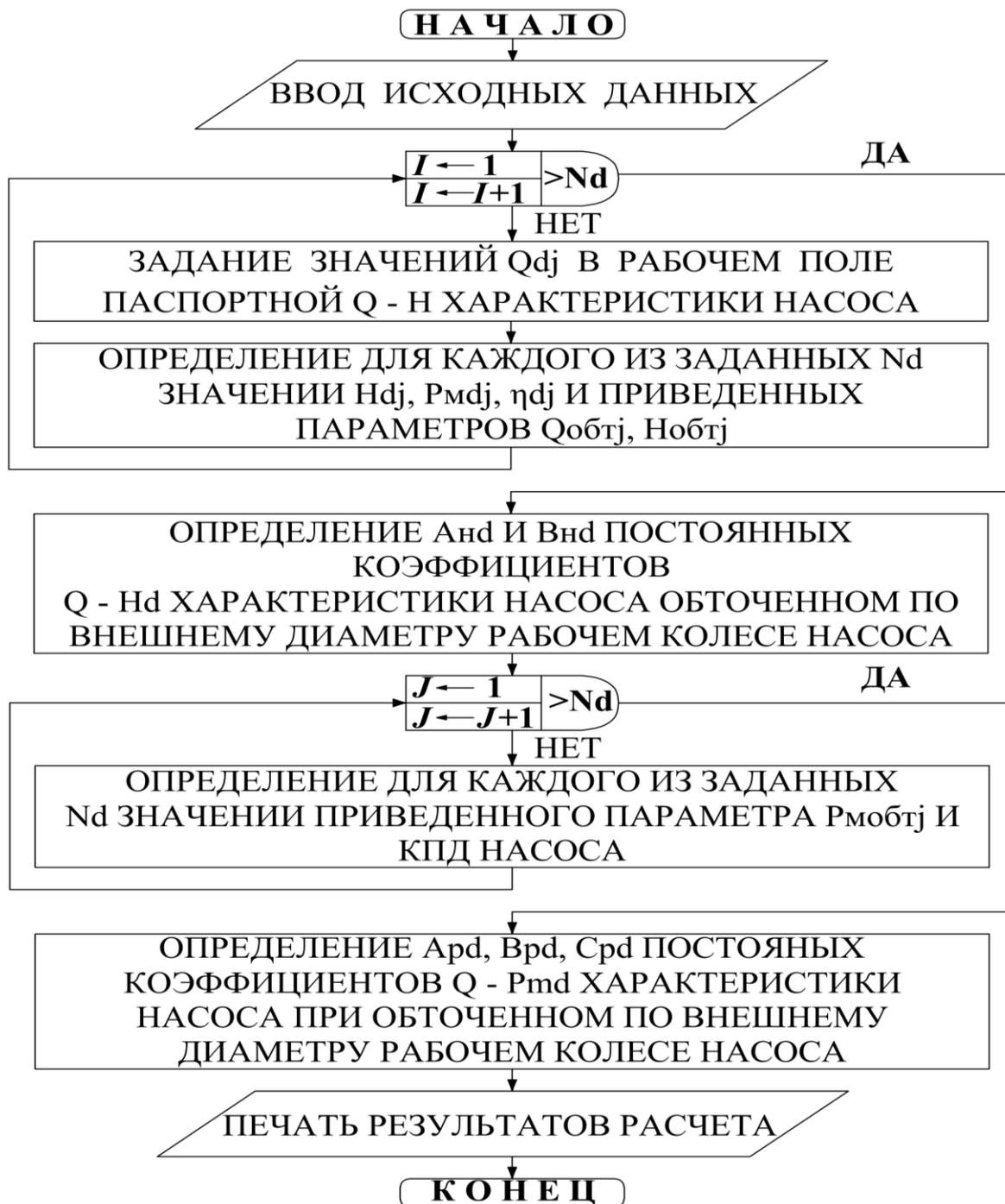


Рис. 15.2. Блок-схема алгоритма определения характеристик насоса при изменении геометрических размеров рабочего колеса

15.3. Модель и вычислительный алгоритм расчета рабочих характеристик насоса при фиксированном изменении частоты вращения рабочего колеса

В периоды эксплуатации гидросилового оборудования НС зачастую приходится укомплектовывать НА электродвигателями с частотой вращения ($n_1 = const$) несколько отличной от частоты вращения насоса. В связи с чем, возникает задача определения характеристик насоса при частоте вращения n_1 по паспортным (каталожным) характеристикам для частоты вращения n_H .

С этой целью используем графоаналитическую методику построения рабочих характеристик центробежного насоса при его работе с частотой вращения, отличной от номинальной [14].

Соотношения, позволяющие описать зависимости расхода (подачи), напора и мощности от скорости вращения насоса, называются законом пропорциональности (или законом динамического подобия).

Подача (производительность) центробежного насоса изменяется пропорционально скорости вращения его рабочего колеса:

$$Q/Q_{n1} = n/n_1. \quad (15.10)$$

Напор, развиваемый центробежным насосом, изменяется пропорционально квадрату скорости вращения его рабочего колеса:

$$H/H_{n1} = (n/n_1)^2. \quad (15.11)$$

Механическая мощность центробежного насоса, изменяется пропорционально кубу скорости вращения его рабочего колеса:

$$P/P_{M.n1} = (n/n_1)^3. \quad (15.12)$$

Применяя закон динамического подобия, осуществим построение рабочих характеристик центробежного насоса для фиксированной частоты вращения n_1 по заданным паспортным (каталожным) характеристикам $Q-H_H$, $Q-P_{MH}$, $Q-\eta_H$ при номинальной частоте вращения n_H (рис. 15.3).

На расходно-напорной характеристике $Q-H_H$, при $n_H = const$, возьмем произвольную точку 1, которой соответствует подача Q_1 и напор H_1 .

На расходно-напорной характеристике $Q-H_H$, при $n_H = const$, возьмем произвольную точку 1, которой соответствует подача Q_1 и напор H_1 .

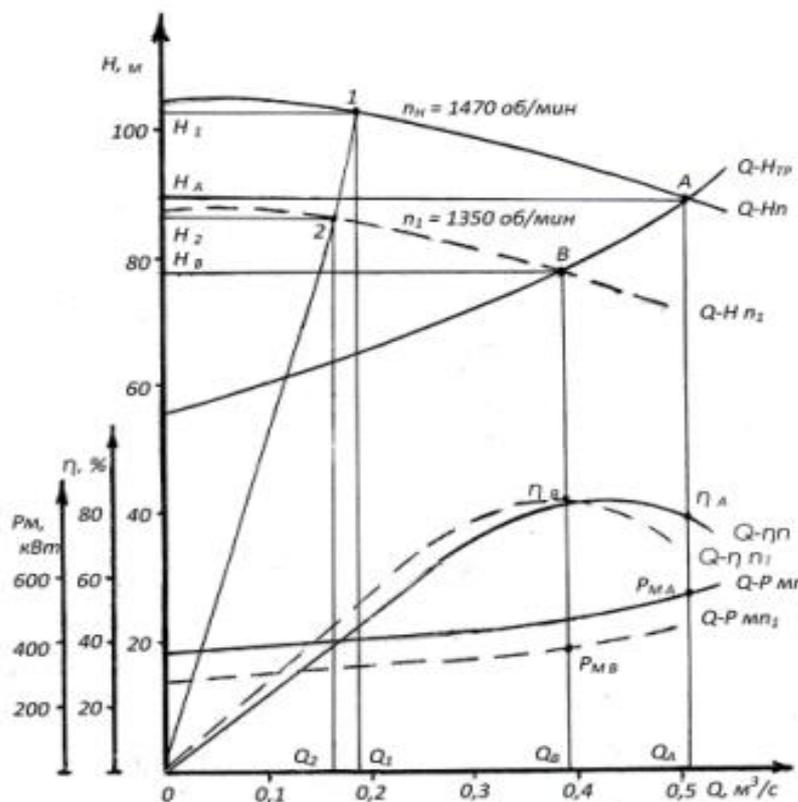


Рис. 15.3. Рабочие характеристики центробежного насоса при фиксированном изменении скорости его вращения

Согласно закону динамического подобия (15.10), (15.11) подача Q_2 и напор H_2 в режимной точке 2 при скорости вращения $n_1 < n_H$, определяются как: $Q_2 = Q_1 * i_n$; $H_2 = H_1 * i_n^2$, где $i_n = n_1 / n_H$. Откладывая значения Q_2 и H_2 в плоскости $Q-H$, можно найти новую режимную точку 2 принадлежащую другой характеристике $Q-H_{n_1}$ с частотой вращения рабочего колеса центробежного насоса n_1 .

В этом случае, подача и напор центробежного насоса будут изменяться по закону параболы:

$$Q/\sqrt{H} = Q_1/\sqrt{H_1} = const. \quad (15.13)$$

Полученная парабола при данных координатах точки 2 имеет $const = Q_2 / \sqrt{H_2}$ и представляет кривую 021, проходящую через начало координат. Следовательно, для всех точек $Q-H_n$ характеристики центробежного насоса со скоростью вращения n_H можно построить семейство парабол, характеризующихся различными значениями $Q / \sqrt{H} = const$ и на них найти точки, соответствующие другим скоростям вращения НА.

Вместе с тем, следует отметить, что кривая $Q-\eta_n$ центробежного насоса (рис. 15.3), по мере снижения скорости (частоты) вращения его рабочего колеса, несколько смещается от своего первоначального положения влево.

Аналогичным образом можно произвести построение расходно-мощностной характеристики $Q-P_{M.n1}$ центробежного насоса с частотой вращения n_1 по заданной паспортной (каталожной) характеристике $Q-P_{M.n}$ для частоты вращения n_H (рис. 15.3). При этом, точки P_{MB} и P_{MA} будут находиться на кубической параболе вида $Q / \sqrt[3]{P_M} = const$.

Основываясь на графоаналитической методике, нами предлагается модель достаточно корректного и точного аналитического метода определения рабочих характеристик насоса при изменении его частоты вращения. По аналогии с изложенной выше методикой, в окрестности рабочего поля паспортной характеристике эксплуатируемой марки насоса задаемся N_n количеством значений подач Qn_j , которое может быть определено в соответствии с выражением (16-1), а также на основании формул (16-2) и (16-3), рассчитываем развиваемый насосом напор Hn_j и мощность на его валу $P_M n_j$.

В соответствии с формулами подобия определяем параметры подачи Qn_j , напора Hn_j и мощности $P_M n_j$, относящиеся к новым характеристикам насоса при частоте вращения n_1 отличной от n_H :

$$Qn_{i,j} = n_H / n_1 * Qn_j; \quad (15.14)$$

$$Hn_{i,j} = (n_H / n_1)^2 * Hn_j; \quad (15.15)$$

$$P_{M n_{ij}} = (n_H / n_1)^3 * P_{M n_j}; \quad (15.16)$$

Аналогично выше изложенному, используя приближение функции по методу наименьших квадратов определим постоянные коэффициенты рабочих характеристик насоса $A_{H.n}$, $B_{H.n}$, $A_{P.n}$, $B_{P.n}$, $C_{P.n}$ и значение КПД (η_n).

На рис 15.4. представлена блок - схема алгоритма определения рабочих характеристик центробежного насоса при фиксированном изменении его частоты вращения.

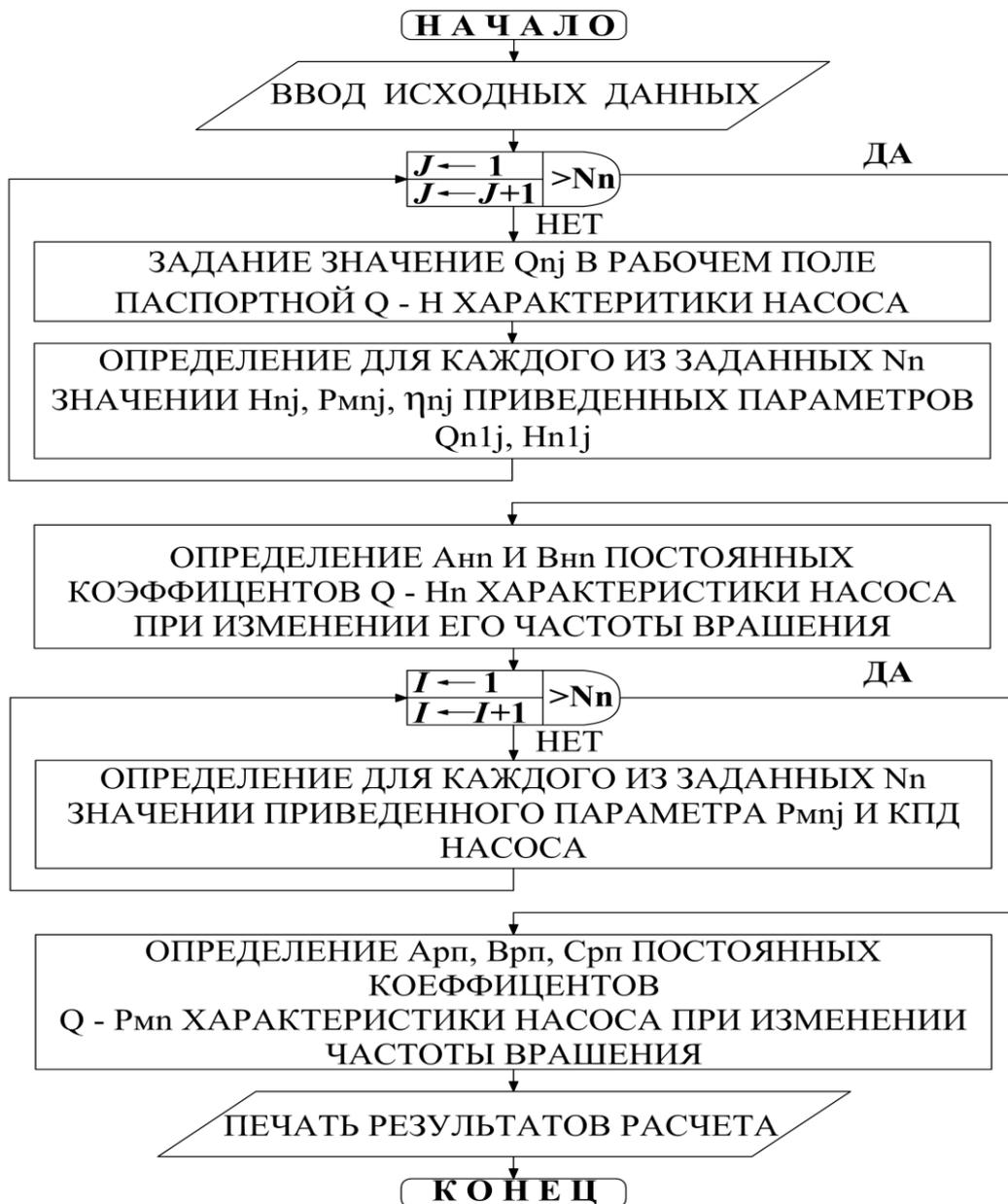


Рис. 15.4. Блок-схема алгоритма определения характеристик насоса при изменении его частоты вращения

16. МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ, ОПИСЫВАЮЩИЕ СОВМЕСТНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ В ОБЩУЮ НАПОРНУЮ СЕТЬ

В практике эксплуатации водоподъемных насосных станций наибольшее распространение получило конструктивное исполнение, когда группа насосных агрегатов в составе насосной установки объединена на совместную параллельную, последовательную и последовательно - параллельную работу в общую напорную сеть.

16.1. Разработка модели и алгоритма расчета параллельной работы центробежных насосов в общую напорную сеть

Как известно [14], на практике для анализа режимов работы насосов широко применяется графоаналитический метод расчета совместной работы системы «насосы – напорная сеть», так как приходится оперировать переменными величинами, которые находятся между собой в функциональной зависимости. Используя этот метод, рассмотрим общий случай совместной параллельной работы (например, двух) разнотипных центробежных насосов с неизменными скоростями вращения ($n_H = const$) в составе НУ. При этом следует отметить, что параллельной работой насосов называется одновременная подача перекачиваемой воды несколькими НА в общую напорную сеть НУ.

На график рис. 16.1 наносим паспортные $Q-H_I$ и $Q-H_{II}$ расходно - напорные характеристики параллельно работающих насосов I и II, марок 450 Д90 с диаметром рабочего колеса $D=540$ мм и 450 Д90а с диаметром рабочего колеса $D=510$ мм, а также соответственно их расходно - мощностные $Q-P_{M1}$, $Q-P_{M2}$ и расходно - КПД $Q-\eta_1$ и $Q-\eta_2$ характеристики.

С целью выявления установившейся режимной рабочей точки параллельно функционирующих центробежных насосов с учетом потерь во всасывающем их трубопроводе, определим соответствующие им $Q-H_I^{IP}$ и $Q-H_{II}^{IP}$ приведенные характеристики.

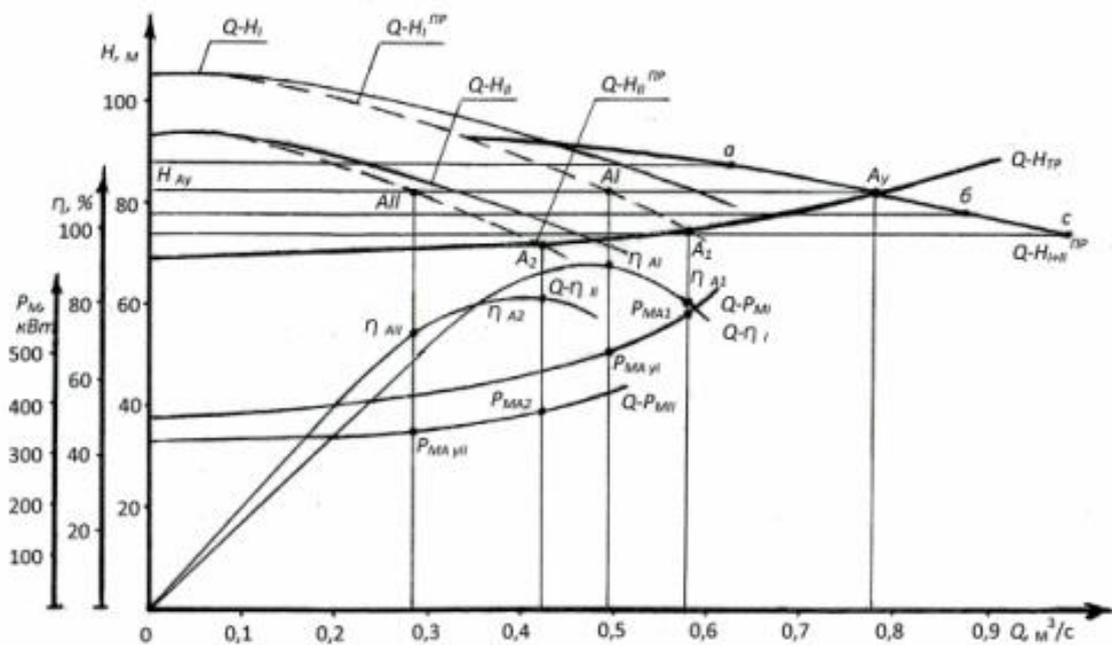


Рис. 16.1. Параллельная работа центробежных насосов марок 450Д90 и 450Д90а

Для построения результирующей приведенной характеристики совместной параллельной работы $Q-H_{I+II}$ необходимо провести ряд прямых, параллельных горизонтальной оси, и сложить при постоянных ординатах (напорах) абсциссы (подачи) точек их пересечения с характеристиками насосов $Q-H_I^{PP}$ и $Q-H_{II}^{PP}$, то есть сложить эти характеристики по горизонтали. В результате получаем ряд точек а, б, с, определяющих суммарную приведенную расходно-напорную характеристику $Q-H_{I+II}$ условия параллельной работы двух центробежных насосов. Как видно из графика, построенная кривая $Q-H_{TP}$ характеристика гидравлической напорной сети пересекает характеристику $Q-H_{I+II}$ в точке A_y , которой соответствует напор H_{Ay} и суммарная подача двух насосов Q_{Ay} . При развиваемом напоре H_{Ay} первый насос будет обеспечивать подачу $Q_{A.I}$, работая в режимной точке AI , а второй насос – $Q_{A.I.I}$, работая в режимной точке AII и, следовательно, $Q_{Ay} = Q_{A.I} + Q_{A.I.I}$.

В случае же работы, каждого из указанных, центробежных насосов на свой отдельный (индивидуальный) напорный трубопровод они имели бы

режимные рабочие точки (первый A_1 , второй A_2), по которым определялись бы производительности насосов Q_{A1} и Q_{A2} .

Наряду с этим, следует отметить, что суммарная подача ($Q_{A1} + Q_{A2}$) каждого из отдельно взятого центробежного насоса будет больше, чем обеспечиваемая ими производительность при их совместной параллельной работе в общую напорную сеть. Следовательно, некоторая «дефицитность в подаче» параллельно работающих центробежных насосов в составе НУ с КПД первого насоса η_{A1} и второго η_{A2} может быть найдена из:

$$\Delta Q = (Q_{A1} + Q_{A2}) - Q_{Ay} \quad (16.1)$$

Снижение суммарной подачи при параллельной работе насосов на величину ΔQ объяснимо тем, что при увеличении подачи НУ возрастает напор в трубопроводе H_{TP} ($H_{Ay} > H_{A1} > H_{A2}$), что способствует уменьшению подачи каждого центробежного насоса (Q_{A1} , Q_{A2}) при их совместной работе в составе НУ по сравнению с подачей (Q_{A1} и Q_{A2}) для случая одиночной работы насосов на данную напорную сеть.

Общий же КПД, состоящей из двух объединенных на параллельную работу в общую напорную сеть центробежных насосов определяется из соотношения [14]:

$$\eta_{I+II} = \frac{\gamma * Q_{Ay} * H_{Ay}}{\gamma * Q_{A1} * H_{Ay} / \eta_{A1} + \gamma * Q_{A2} * H_{Ay} / \eta_{A2}} = \frac{(Q_{A1} + Q_{A2}) * \eta_{A1} * \eta_{A2}}{Q_{A1} * \eta_{A2} + Q_{A2} * \eta_{A1}}, \quad (16.2)$$

где γ - удельный вес воды.

Одновременно следует отметить, что подобным же образом можно найти общее (суммарное) значение КПД $\eta_{\Sigma HAC}$ условия параллельной работы для группы центробежных насосов, имеющих как одинаковые (идентичные), так и отличающиеся между собой расходно-напорные характеристики:

$$\eta_{\Sigma HAC} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{V HAC.i}}{\sum_{i=1}^N \frac{Q_{V HAC.i}}{\eta_{V HAC.i}}}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (16.3)$$

где $Q_{у\text{НАС.}i}$ – подача i –го центробежного насоса;

$\eta_{у\text{НАС.}i}$ – КПД i –го центробежного насоса;

N – число параллельно функционирующих центробежных насосов.

Рассмотрим, взамен графоаналитического способа, определения основных рабочих характеристик и параметров центробежных насосов, изложенных выше, процесс формирования математической модели и алгоритма расчета для общего случая параллельной работы насосных агрегатов в составе насосной установки.

По паспортной или каталожной расходно-напорной характеристике, в окрестности рабочего поля $H_{\text{НАЧ}}$ и $H_{\text{КОН}}$, для любого из i -го параллельно функционирующего центробежного насоса задается N количеством значений развиваемых напоров $H_{i,j}$, которые определяются из выражения:

$$H_{i,j} = (H_{\text{НАЧ.}i} - H_{\text{КОН.}i}) / N, \quad (16.4)$$

где $H_{\text{НАЧ.}i} = 1,2 * H_{\text{Н.}i}$; $H_{\text{КОН.}i} = 0,7 * H_{\text{Н.}i}$.

При этом для каждого из параллельно работающего насосов подача $Q_{i,j}$, соответствующая развиваемому напору $H_j = H_{i,j}$ вычисляется по выражению:

$$Q_{i,j} = \sqrt{(A_{\text{Н.}i} - H_{i,j}) / B_{\text{Н.}i}}. \quad (16.5)$$

Далее в соответствии с графоаналитической методикой определения основных режимных параметров функционирования насосов при параллельной работе НА, находим суммарную подачу НУ для каждой из j –той точки расходно-напорных характеристик центробежных насосов:

$$Q_j = Q_{1,j} + Q_{2,j} + \dots + Q_{i,j}. \quad (16.6)$$

Затем, используя приближение функции по методу наименьших квадратов, определим суммарные значения постоянных коэффициентов аппроксимации $A_{\text{Н.}\Sigma}$ и $B_{\text{Н.}\Sigma}$ расходно-напорной характеристики НУ. Общий же КПД насосной установки может быть определен в соответствии с соотношением:

$$\eta = \frac{0,001 * \gamma * Q * (A_H - B_H * Q^2)}{A_p * Q - B_p * Q^2 + C_p} \quad (16.7)$$

На рис. 16.2 изображена блок – схема алгоритма определения режимных характеристик водоподъемной центробежной насосной установки при совместной параллельной работе насосных агрегатов в общую напорную сеть.

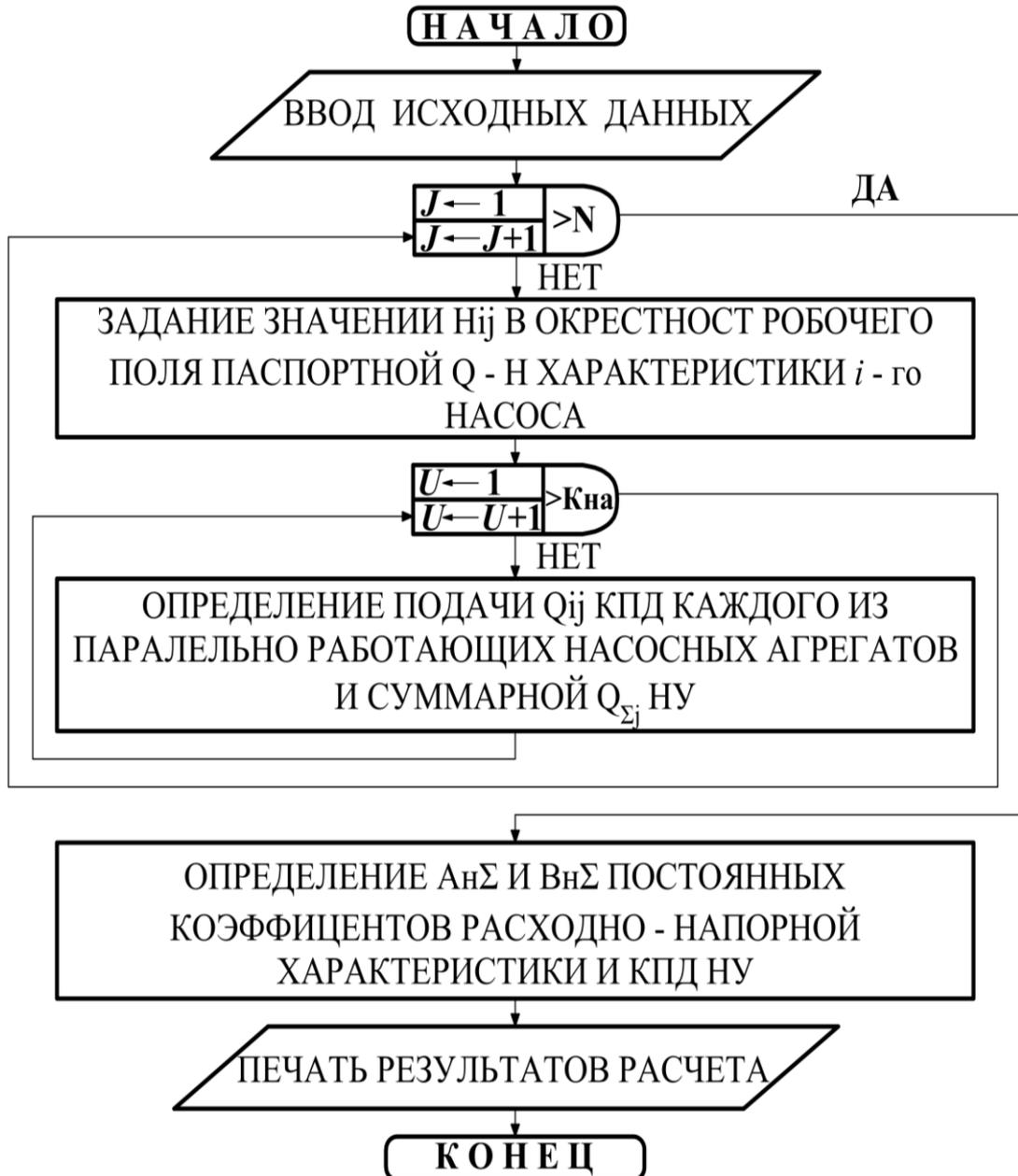


Рис. 16.2. Блок - сема алгоритма определения характеристик насосной установки при параллельной работе насосных агрегатов в общую напорную сеть

16.2. Разработка модели и алгоритма расчета последовательной работы центробежных насосов в напорную сеть

Известно [14], что последовательной называется совместная работа насосов, при которой один насос подает перекачиваемую воду во всасывающий орган другого насоса, а последний подает ее в напорную сеть НУ (рис. 14.3, а). В основном, в СМВ конструктивное исполнение последовательного объединения насосов на совместную работу применяется в тех случаях, когда при постоянстве обеспечения расхода необходимо увеличить напор НУ, который не может быть создан одним насосом.

Рассмотрим общий случай (рис. 14.3, а) последовательной работы двух разнотипных насосов (основной и подпорный) при $n = const$.

Для построения суммарной $Q-H_{\Sigma}$ характеристики двух последовательно работающих центробежных насосов необходимо сложить ординаты их расходно-напорных характеристик при одинаковой подаче, так как напор, развиваемый последовательно функционирующими насосами, равен сумме напоров, развиваемых каждым из этих центробежных насосов.

На рис. 16.3 приведены расходно-напорные характеристики каждого из последовательно работающих центробежных насосов $Q-H_1$ и $Q-H_2$, а также соответственно их расходно-мощностные $Q-P_{M1}$, $Q-P_{M2}$ и расходно-КПД $Q-\eta_1$ и $Q-\eta_2$ характеристики. В данном случае, установившееся режимная рабочая точка последовательно функционирующих центробежных насосов определяется точкой A_v , получаемой в результате пересечения суммарной $Q-H_{\Sigma}^{np}$ приведенной расходно-напорной характеристики с кривой гидравлической напорной сети $Q-H_{TP}$. При этом указанные суммарная приведенная расходно-напорная характеристика двух последовательно работающих центробежных насосов и характеристика $Q-H_{TP}$ получаются в результате следующих расчетов и построений:

- задаемся рядом произвольных подач Q_A , Q_B , Q_C , имея при этом в виду и подачу $Q_0 = 0$ при закрытых задвижках на напорной сети насосов;

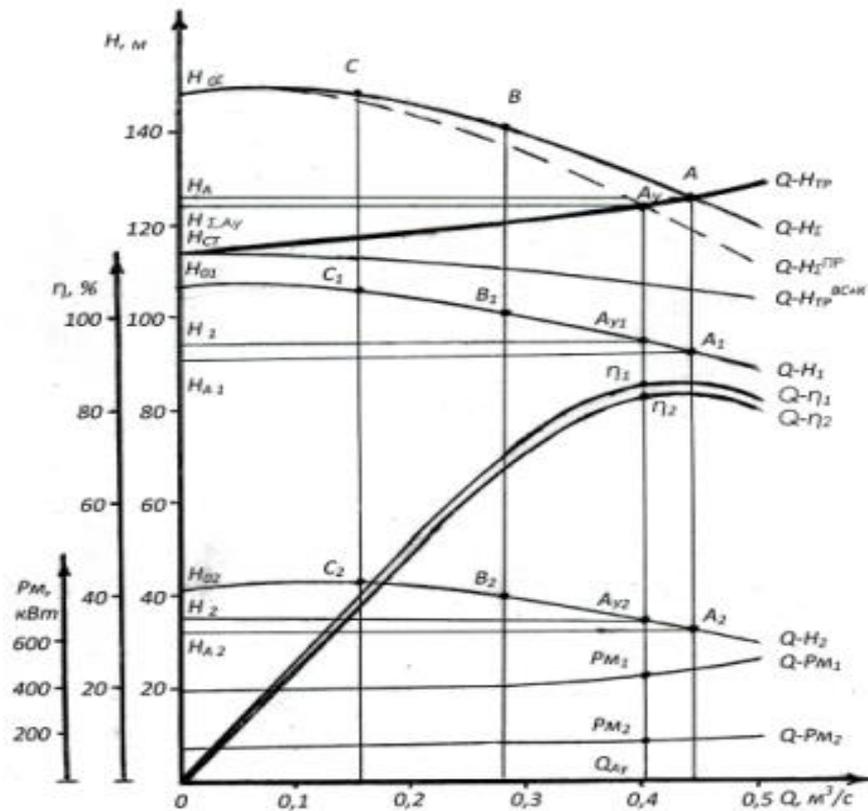


Рис. 17.3. Условия последовательной работы центробежных насосов

- осуществляем сложение напоров соответствующих выбранным подачам каждого из центробежных насосов $H_A = H_{A1} + H_{A2}$, аналогично $H_B = H_{B1} + H_{B2}$, и $H_{0\Sigma} = H_{01} + H_{02}$;
- соединяя выявленные точки A , B , C и $H_{0\Sigma}$ плавной кривой, получаем суммарную $Q - H_{\Sigma}$ характеристику последовательно объединенных на совместную работу центробежных насосов;
- рассчитываем потери напоров во всасывающем трубопроводе и соединительном участке от напорного патрубка центробежного насос 1 до места всасывающего органа насоса 2, далее строим кривую потерь напора и затем, вычитая ее ординаты из ординат $Q - H_{\Sigma}$ характеристики и соединяя полученные точки плавной кривой получаем приведенную суммарную расходно-напорную $Q - H_{\Sigma}^{PP}$ характеристику последовательно функционирующих двух центробежных насосов;
- рассчитывается и строится $Q - H_{TP}$ характеристика напорной сети;

- определяются в месте пересечения характеристики $Q - H_{\Sigma}^{PP}$ с кривой $Q - H_{TP}$ координаты режимной точки A_y последовательной работы двух центробежных насосов, которой соответствуют фактическая подача Q_{Ay} и фактический требуемый напор $H_{\Sigma Ay}$.

Общий КПД НУ, состоящий из двух последовательно работающих насосов, определяется в соответствии со следующим выражением:

$$\eta_{\Sigma} = H_{\Sigma y} * (H_1 / \eta_1 + H_2 / \eta_2), \quad (16.8)$$

где $H_{\Sigma y}$ - суммарный напор, развиваемый последовательно работающими насосами в установившейся режимной рабочей точке НУ;
 H_1, H_2, η_1, η_2 - соответственно развиваемые напоры и КПД первого и второго центробежных насосов в составе НУ при обеспечении ей подачи адекватной установившейся режимной рабочей точке.

Рассмотрим методологию формирования математической модели для случая последовательной работы НА в напорную сеть при изменении их частоты вращения.

Для определения суммарной расходно-напорной характеристики последовательно работающих центробежных насосов и кривой КПД насосной установки, зададимся N значениями подачи $Q_{i,j}$ в окрестности рабочего поля ($Q_{НАЧ.j}$ и $Q_{КОН.j}$) паспортной или же каталожной характеристики 1-го насоса, имеющего наибольшее значение развиваемого напора, где

$$Q_{i,j} = (Q_{КОН.j} - Q_{НАЧ.j}) / N, \quad (16.9)$$

где $Q_{НАЧ.j} = 1,2 * Q_H$; $Q_{КОН.j} = 0,3 * Q_H$.

При этом для каждого из заданных N значений напоров $H_{i,j}$ развиваемый отдельно взятым насосом напор определяется по выражению:

$$H_{i,j} = A_{H.i} - B_{H.i} * Q_{i,j}. \quad (16.10)$$

В соответствии с изложенной выше графоаналитической методикой построения характеристик последовательно включенных насосов определяем

суммарный развиваемый напор НУ для каждой из j -ой текущей точки расходно-напорных характеристик НА:

$$H_j = H_{1j} + H_{2j} + \dots + H_{i,j}. \quad (16.11)$$

Далее приближением функции по методу наименьших квадратов определяем постоянные коэффициенты аппроксимации A_H и B_H суммарной напорно-расходной характеристики последовательно работающих НА в составе НУ. Общий же КПД насосной установки определяется по выражению:

$$\eta = \frac{0,001 * \gamma * Q * (A_H - B_H * Q^2)}{A_p * Q - B_p * Q^2 + C_p}. \quad (16.12)$$

На рис. 16.4. представлена блок-схема алгоритма определения характеристик НУ при последовательной работе НА.

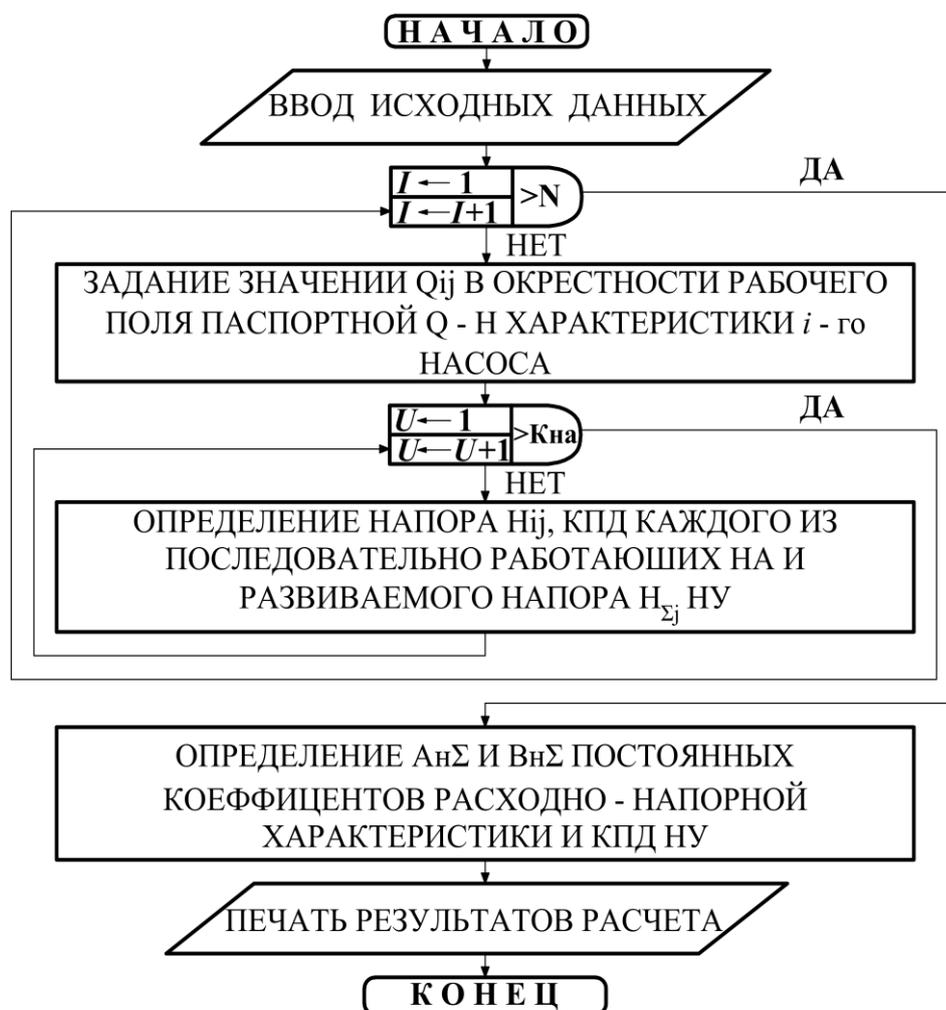


Рис. 16.4. Блок-схема алгоритма определения характеристик насосной установки при последовательной работе насосных агрегатов

16.3. Алгоритм расчета последовательно - параллельной работы центробежных насосов в напорную сеть

Как было отмечено ранее, в практике эксплуатации водоподъемных насосных установок имеют место случаи последовательно - параллельной работы НА в составе НУ. Вычислительная модель, определения результирующей суммарной характеристики НУ при последовательно-параллельной работе НА базируется на описанных выше математических моделях отдельного функционирования НА как для условия параллельной, так и последовательной работы насосов в общую напорную сеть.

На рис. 16.5 изображена блок-схема алгоритма определения характеристик НУ при последовательно-параллельной работе НА в напорную сеть.

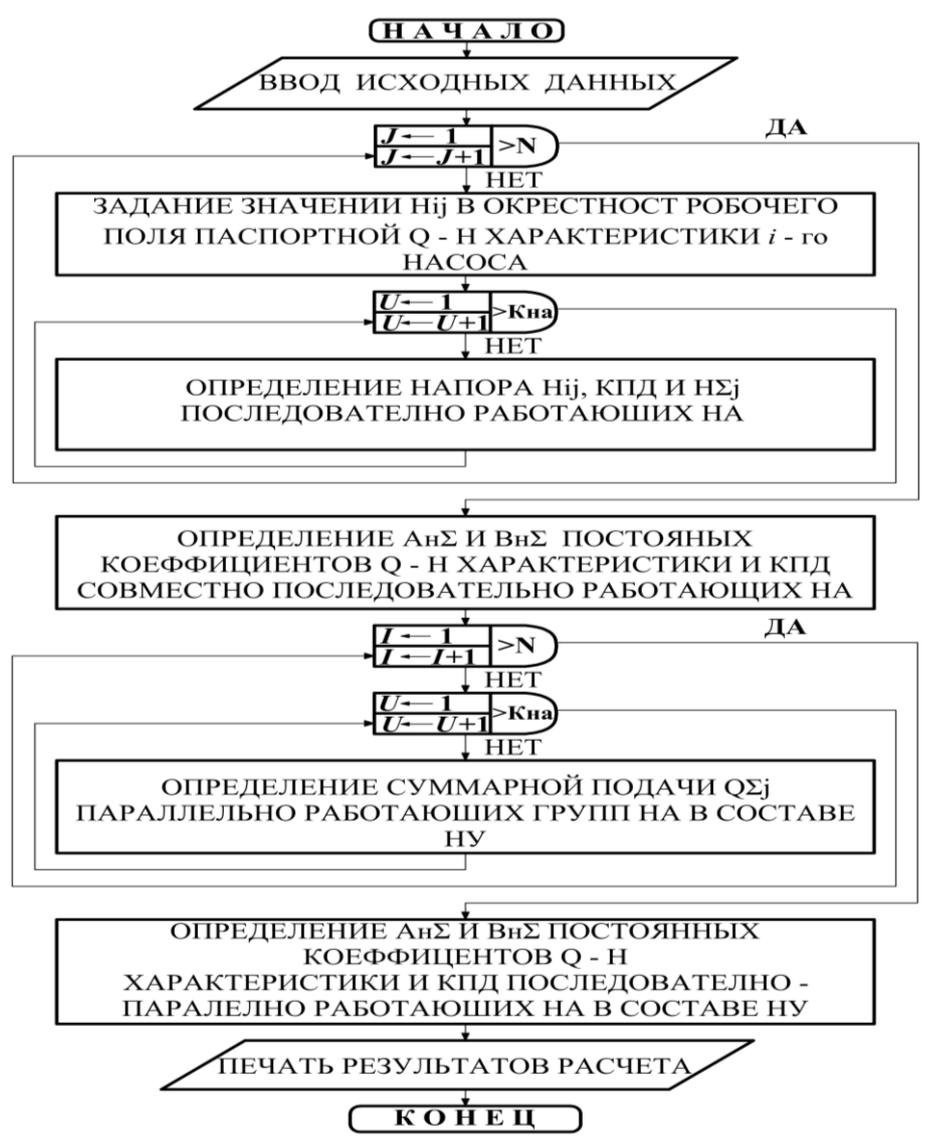


Рис. 16.5. Блок - схема алгоритма определения характеристик насосной установки при последовательно-параллельной работе

17. УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ

17.1. Характеристика удельного расхода электрической энергии как критерия эффективности управления и нормативного показателя

Основным показателем эффективности управления водоподъемной насосной станции зависимости от применяемых способов регулирования ее производительности (ступенчатое поагрегатное регулирование подачи НА или же изменением его скорости вращения), позволяющим оценить насколько четко используются внутренние резервы управления и в какой степени квалифицированно эксплуатируется гидросиловое оборудование НС и рационально расходуются гидроэнергетические ресурсы, является удельный расход электрической энергии на подачу единицы объема перекачиваемой воды.

Удельный расход электрической энергии в таких энергоемких объектах, какими являются водоподъемные НС, имея свою отраслевую специфику, представляет собой сложную функцию многих составляющих, присущих лишь данной отрасли и зависящих от целого ряда факторов: изменения режимов работы НУ, геометрических высот подъема воды, потерь энергии в водонапорных трактах, а также от КПД насосов, уменьшающихся с течением времени вследствие кавитационно-абразивного износа их рабочих органов при эксплуатации и др.

Расход электрической энергии, определенный с учетом рационального использования всех имеющихся резервов, утвержденный вышестоящей организацией принимается за удельную норму расхода электрической энергии и позволяет спрогнозировать энергопотребление как по насосной станции с учетом конструктивных, технологических и эксплуатационных особенностей функционирования водоподъемных насосных станций.

Оценка влияния ряда конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров на режимы работы НА и выбор их оптимального сочетания при совместной работе в составе НУ позволяет установить оптимальные режимы функционирования НС с минимизацией удельных норм

расхода электрической энергии при обеспечении требуемого покрывающего графика водопотребления и предельных значений КПД насосов в рабочих режимных точках.

Основными задачами нормирования расхода электрической энергии являются:

- обеспечение применения при планировании и в производстве технически и экономически обоснованных, прогрессивных норм расхода электрической энергии для осуществления режима экономии, рационального расхода и наиболее эффективного ее использования;

- оценка качества эксплуатации насосных станций и установок.

Нормированию подлежит весь расход электрической энергии, как на основные, так и на вспомогательные производственно-эксплуатационные нужды, а также потери электроэнергии в электрических сетях, находящихся на балансе водохозяйственных организаций и предназначенных для электроснабжения водоподъемной НС.

Вместе с тем разрабатываемые нормы удельного расхода электрической энергии должны отражать не фактический уровень энергопотребления, а быть технически прогрессивными, т.е. учитывать результаты внедрения в производство новой техники, передовой технологии, рациональной эксплуатации как энергетического, так и технологического оборудования, а также опыт передовых организаций.

Удельная норма расхода электрической энергии на перекачку воды классифицируются по следующим основным признакам:

- по степени агрегации - на индивидуальные и групповые;
- по составу расходов - на технологические и общепроизводственные;
- по периоду действия - на месячные, квартальные и годовые.

Индивидуальной нормой называется норма расхода электроэнергии, непосредственно затрачиваемой на перекачку единицы объема воды, которая устанавливается по типам используемых основных и разменных насосно-силовых агрегатов.

Групповой нормой называется норма расхода электроэнергии, которая устанавливается по насосной установке, насосной станции и объектам различных уровней водохозяйственных систем.

Технологической нормой называется норма расхода электроэнергии, которая учитывает ее расход на основные и вспомогательные технологические процессы перекачки воды.

Технологическая норма включает:

- расход электроэнергии, входящий в состав индивидуальной нормы;
- расход электроэнергии на вспомогательные технологические нужды.

Общепроизводственной нормой называется норма расхода электроэнергии, которая учитывает ее расходы на основные и вспомогательные технологические процессы, а также на вспомогательные нужды, процессы производства и потери энергии в электрических сетях и преобразователях.

Общепроизводственная норма включает:

- расход электроэнергии, входящий в состав технологической нормы;
- расход электроэнергии на вспомогательные нужды, процессы производства.

Общепроизводственные нормы расхода электроэнергии служат для определения потребности насосной станции в электроэнергии, а также для контроля ее экономного расходования.

В качестве единицы измерения норм расхода электрической энергии на перекачку 1 тыс.куб. метров воды на высоту 1 метра водяного столба насосными станциями принято кВт.*ч / 1 тыс.м³ * м.

17.2. Формализованная модель определения удельного расхода электрической энергии насосного агрегата

Удельный расхода электрической энергии может быть определен в соответствии с расчетно-аналитическими методами. Однако, наилучшие результаты дают математические модели, базирующиеся на совместном использовании расчетно-аналитического и расчетно-статистического методов.

Исходными данными для определения удельного расхода электрической

энергии как НА. так и в целом по НС являются: покрывающий график водопотребления, паспортные (каталожные) технические параметры и рабочие характеристики насосов и электродвигателей, конструктивное исполнение и компоновка напорных трубопроводов, их диаметр, длина, материал изготовления, геометрическая высота подъема воды с учетом изменения уровней бьефов, количество одновременно работающих НА в составе НУ на данной ступени регулирования, наработка часов с момента ввода гидросилового оборудования в эксплуатацию или по проведении последнего капитального ремонта, характеристика систем управления водоподъемной НС и др.

Удельный расход электрической энергии для подъема 1 тыс. куб. метров перекачиваемой воды на высоту 1 метр водяного столба каждым из отдельно взятых НА определяется по формуле:

$$\Delta \mathcal{E}_{НА.i} = \frac{2,724}{\eta_{Н.i} * \eta_{ДВ.i}} \frac{кВт * ч}{тыс.м^3 * м}, \quad (17.1)$$

где $\eta_{Н.i}$ - КПД центробежного насоса;
 $\eta_{ДВ.i}$ - КПД приводного электродвигателя;
 i - станционные номера насосных агрегатов.

Текущее значение КПД насоса с учетом кавитационно-абразивного износа его рабочих органов определяется из выражения:

$$\eta_{Н.i} = K_{ИЗН.} * \eta_{РАСЧ.i}, \quad (17.2)$$

где $K_{ИЗН.}$ - коэффициент износа, определяемое как:

$$K_{ИЗН.} = e^{-0,00000833 * T_{ПР}} \quad (17.3)$$

где $T_{ПР.}$ - наработка часов по проведении капитального ремонта, час.

Величина расчетного значения КПД с учетом влияния на режим работы насоса геометрических размеров и потерь напора во всасывающем и коммуникационном трубопроводах НА определяется по формуле:

$$\eta_{РАСЧ.i} = \frac{\gamma}{1000} * \frac{9,81 * Q_{Н.i} * H_{Н.i}}{P_{М.н.i}}, \quad (17.4)$$

где

$$P_{M.n.i} = A_{P.np.i} * Q_{H.i} - B_{P.np.i} * Q_{H.i}^2 - C_{P.np.i}; \quad (17.5)$$

γ - плотность перекачиваемой жидкой среды, кг/м³;

$Q_{H.i}$ - подача i -го насоса, м³/с;

$H_{H.i}$ - напор i -го насоса, м;

$P_{M.n.i}$ - мощность подаваемая к валу i -го насоса кВт;

$A_{P.np.i}$, $B_{P.np.i}$, $C_{P.np.i}$ - постоянные коэффициенты аппроксимации приведенной расходно - мощностной характеристики i -го насоса.

Подача насоса как при работе на свой отдельный напорный трубопровод, так и при совместной работе в составе НУ с учетом потерь во всасывающем и коммуникационном трубопроводах в интервале времени t_i вычисляется по формуле:

$$Q_{H.i} = \sqrt{\frac{A_{H.np.i} - H_{TP.\rho}}{B_{H.np.i}}}, \quad (17.6)$$

где $A_{H.np}$, $B_{H.np}$ - постоянные коэффициенты аппроксимации приведенной расходно-напорной характеристики i -го насоса;

$H_{TP.\rho}$ - развиваемый напор в ρ -ой нитке напорного трубопровода, м.

Требуемая величина напора развиваемого насосом в каждом из ρ -ом напорном трубопроводе НУ определяется по формуле :

$$H_{TP.\rho.i} = A_{H.\Sigma} * \left(1 - \frac{B_{H.\Sigma}}{B_{H.\Sigma} + R_\rho}\right) + H_\Gamma * \left(\frac{B_{H.\Sigma}}{B_{H.\Sigma} + R_\rho}\right), \quad (17.7)$$

где

$A_{H.\Sigma}$, $B_{H.\Sigma}$ - постоянные коэффициенты суммарной расходно-напорной характеристики совместно работающих насоса;

H_Γ - геометрическая высота подъема воды;

R_ρ - полное гидравлическое сопротивление подводящего и напорного трубопровода ρ -ой нитки.

Вместе с тем, напор, развиваемый насосом в интервале времени работы t_i вычисляется по выражению:

$$H_{H.i} = A_{H.np} - B_{H.np} * Q_{H.i}^2 \quad (17.8)$$

Совместная работа насосов в общий напорный трубопровод характеризуется точкой материального и энергетического равновесия системы, т.е. режимной точкой работы насосов. Для ее нахождения воспользуемся известным уравнением гидравлики, согласно которому требуемый напор в системе «насос - напорная сеть» равен:

$$H_{TP} = H_{\Gamma} + h_{BC} + h_{КОМ} + h_{ПОД} + h_{ОБЩ}, \quad (17.9)$$

$$\text{где } H_{\Gamma} = \nabla_{BB} - \nabla_{HB}; \quad (17.10)$$

h_{BC} - потери напора во всасывающем трубопроводе, м;

$h_{КОМ}$ - потери напора в напорных коммуникациях насосной станции, м;

$h_{ПОД}$ - потери напора в подводящем напорном трубопроводе, м;

$h_{ОБЩ}$ - потери напора в общем напорном трубопроводе, м;

∇_{BB} - уровень отметки верхнего бьефа насосной станции, м;

∇_{HB} - уровень отметки нижнего бьефа насосной станции, м.

Расходно-напорная ($Q_{ПР} - H_{ПР}$) характеристика каждого из совместно работающих насосов, рассчитанная с учетом потерь напора во всасывающем трубопроводе и напорных коммуникациях, называется приведенной характеристикой.

Ввиду того, что приведенная расходно-напорная ($Q_{ПР} - H_{ПР}$) характеристика позволяет определить величины напора как в точке выхода воды из насоса, так и из арматуры напорных коммуникационных трубопроводов насосной станции, то потери напора во всасывающем трубопроводе i -го насоса определяются согласно выражению:

$$h_{BC.i} = R_{BC.i} * Q_{P.i}^2, \quad (17.11)$$

$$\text{где } Q_{P.i} = K_{P.Ф} * K_n * K_C * Q_H, \quad (17.12)$$

$Q_{P,i}$ - расчетный расход (подача) воды i -го насосного агрегата;

$$K_D = D_{p,\Phi} / D_{P,K}; \quad K_n = n_{ДВ} / n_H; \quad (17.13)$$

Q_H - номинальная подача насоса, м³/с;

$D_{p,\Phi}$ - фактический диаметр рабочего колеса эксплуатируемого насоса, мм;

$D_{P,K}$ - диаметр рабочего колеса насоса по каталожным данным, мм;

$n_{ДВ}$ - номинальная частота вращения приводного электродвигателя насосного агрегата в составе НУ, об/мин;

n_H - номинальная частота вращения центробежного насоса НА в составе НУ, об/мин.

Сопротивление всасывающего трубопровода определяется по формуле:

$$R_{BC,i} = K_{1,ЛОП.} * A_{уд} * \ell_{BC,i}, \quad (17.14)$$

где $K_{1,ЛОП.} = 0,8144 * V^{-0,0844}$;

$$V = Q_{P,i} / (0,785 * d_{TP}^2);$$

$$A_{уд} = 0,001478 / d_{TP}^{5,226};$$

$R_{BC,i}$ - сопротивление всасывающего трубопровода i -го насосного агрегата;

$K_{1,ЛОП.}$ - поправочный коэффициент к значениям удельных сопротивлений;

$A_{уд}$ - удельное сопротивление стального напорного трубопровода;

d_{TP} - внутренний расчетный диаметр напорного трубопровода, мм;

$\ell_{BC,i}$ - длина всасывающего трубопровода i -го насосного агрегата, м;

V - скорость движения воды в полости трубопровода, м/с.

Потери же напора в напорных коммуникациях насосной станции определяются как:

$$h_{НК} = R_{K,TP,i} * Q_{P,i}, \quad (17.15)$$

где

$$R_{K.TP.i} = K_M * K_{2.ПОН.} * A_{уд} * \ell_{K.TP.i}; \quad (17.16)$$

$R_{K.TP.i}$ - приведенное сопротивление напорного коммуникационного трубопровода i -го насосного агрегата;

K_M - коэффициент, учитывающий потери напора в местных сопротивлениях;

$\ell_{K.TP.i}$ - длина напорного коммуникационного трубопровода i -го насосного агрегата.

Приведенные значения $A_{H.нр}$, $B_{H.нр}$, $A_{P.нр}$, $B_{P.нр}$ и $C_{P.нр}$, зависящие от потерь во всасывающем и арматуре напорного коммуникационного трубопровода насосной станции, определяются следующим образом.

Для эксплуатируемой марки насоса при номинальной подаче Q_H потери во всасывающем и арматуре напорного коммуникационного трубопроводов в соответствии с формулами (17.12), (17.15) можно выразить как функцию подачи:

$$h_{(BC-НК).i} = (R_{BC.i} + R_{K.TP.i}) * Q_H^2. \quad (17.17)$$

Задаваясь по паспортной или же каталожной расходно-напорной характеристике рядом значений $Q_{i.X}$, для каждого заданного из них получим:

$$h_{(BC-НК).i} = (R_{BC.i} + R_{K.TP.i}) * Q_{i.X}^2. \quad (17.18)$$

Почленно разделив левые и правые части равенств (17.17) и (17.18) получим:

$$h_{(BC-НК).iX} = h_{(BC-НК).i} * (Q_{iX} / Q_H)^2. \quad (17.19)$$

Следовательно для заданного $Q_{i.X}$ величина напора в месте выхода воды из напорного коммуникационного трубопровода насосной станции определяется выражением:

$$H_{iX} = (A_{H.нр} - B_{H.нр} * Q_{iX}^2) - h_{(BC-НК).iX}. \quad (17.20)$$

Параметры ($A_{H.нр}$, $B_{H.нр}$) определяются следующим образом:

$$A_{H,np} = \frac{\sum_{i=1}^Z H_{iX} * \sum_{i=1}^Z Q_{H,iX}^4 - \sum_{i=1}^Z H_{iX} * Q_{H,iX}^2 * \sum_{i=1}^Z Q_{H,iX}^2}{Z * \sum_{i=1}^Z Q_{H,iX} - \sum_{i=1}^Z Q_{H,iX} * \sum_{i=1}^Z Q_{H,iX}}; \quad (17.21)$$

$$B_{H,np} = \frac{\sum_{i=1}^Z H_{iX} - Z * A_{H,np}}{\sum_{i=1}^Z Q_{H,iX}}, \quad (17.22)$$

где

Z - число пар значений $Q_{H,iX}$ и H_{iX} .

Постоянные коэффициенты ($A_{H,\Sigma}$, $B_{H,\Sigma}$) суммарной расходно-напорной характеристики совместно работающих насосных агрегатов в составе НУ определяются на основании формул:

$$A_{H,\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{Z2} H_{\Sigma,i,X} * \sum_{i=1}^{Z2} (\sum_{i=1}^{K_{H,\rho}} Q_{i,X})^4 - \sum_{i=1}^{Z2} H_{\Sigma,i,X} * (\sum_{i=1}^{K_{H,\rho}} Q_{i,X})^2 * \sum_{i=1}^{Z2} (\sum_{i=1}^{K_{H,\rho}} Q_{i,X})^2}{Z2 * \sum_{i=1}^{Z2} (\sum_{i=1}^{K_{H,\rho}} Q_{i,X})^4 - \sum_{i=1}^{Z2} (\sum_{i=1}^{K_{H,\rho}} Q_{i,X})^2 * \sum_{i=1}^{Z2} (\sum_{i=1}^{K_{H,\rho}} Q_{i,X})^2}; \quad (17.23)$$

$$B_{H,\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{Z2} H_{\Sigma,i,X} - Z2 * A_{H,\Sigma}}{\sum_{i=1}^{Z2} (\sum_{i=1}^{K_{H,\rho}} Q_{i,X})^2}, \quad (17.24)$$

где

$H_{\Sigma,i,X}$ - величина развиваемого насосной установкой напора при

подаче $\sum_{i=1}^{K_{H,\rho}} Q_{i,X}$;

$Q_{i,X}$ - подача насоса в заданных режимных точках при совместной работе в общий напорный трубопровод;

$Z2$ - число пар значений $\sum_{i=1}^{K_{H,\rho}} Q_{i,X}$ и $H_{\Sigma,i,X}$;

$K_{H,\rho}$ - количество насосных агрегатов, работающих в ρ - ый напорный трубопровод в рассматриваемом интервале времени.

В этом случае, потери напора в системе «насос – напорная сеть» определяются как:

$$h_c = \sum_{i=1}^{K_{H\rho}} h_{\Pi,i} / K_H^2 + h_{\text{ОБ.ТР}}, \quad (17.25)$$

где $h_{\Pi,i} = R_{\Pi,i} * Q_{P,i}; \quad (17.26)$

$$R_{\Pi,i} = K_M * K2_{\text{ПОП}} * A_{\text{УД}} * \ell_{\Pi,i};$$

$R_{\Pi,i}$ - сопротивление подводящего напорного трубопровода i -го насосного агрегата;

$\ell_{\Pi,i}$ - длина подводящего напорного трубопровода i -го насосного агрегата;

$h_{\Pi,i}$ - потери напора в подводящем напорном трубопроводе i -го насосного агрегата;

$$h_{\text{ОБ.ТР}} = R_{\text{ОБ.ТР}} * Q_{\rho}^2; \quad (17.27)$$

где $R_{\text{ОБ.ТР}} = K_M * K2_{\text{ПОП}} * A_{\text{УД}} * \ell_{\text{ОБ.ТР},\rho}; \quad Q_{\rho} = \sum_{i=1}^{K_{H\rho}} Q_{H,i};$

$\ell_{\text{ОБ.ТР},\rho}$ - протяженность ρ -ой нитки общего напорного трубопровода;

Q_{ρ} - суммарная подача совместно работающих насосных агрегатов в ρ -ый общий напорный трубопровод;

$h_{\text{ОБ.ТР}}$ - потери напора в общем напорном трубопроводе.

Следовательно, полное приведенное гидравлическое сопротивление подводящего и общего напорного трубопроводов ρ -ой нитки определяется из выражения:

$$R_{\rho} = \sum_{i=1}^{K_{H\rho}} R_{\Pi,i} / K_{H\rho}^2 + R_{\text{ОБ.ТР},\rho}. \quad (17.28)$$

Значение КПД приводного электродвигателя насоса с учетом его загрузки в зависимости от режима работы НА определяется как:

$$\eta_{ДВ.i} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\eta_{ДВ-Н.i}} - 1 \right) * \frac{(K_{Z.i} + a_{ПOT} / K_{Z.i})}{(1 + a_{ПOT})}}, \quad (17.29)$$

где $\eta_{ДВН}$ - номинальное значение КПД электродвигателя;

$a_{ПOT}$ - коэффициент потерь.

Коэффициент загрузки электродвигателя насосного агрегата в рассматриваемый интервал времени t_i вычисляется по формуле:

$$K_{Z.i} = \frac{1}{K_{ИЗН} * K_{t^0}} * \frac{P_{М.Н.i}}{P_{Н.i}}, \quad (17.30)$$

где $P_{Н.i}$ - номинальная мощность приводного электродвигателя i -го насосного агрегата;

K_{t^0} - коэффициент, учитывающий изменение номинальной мощности электродвигателя в зависимости от температуры окружающей среды:

$$K_{t^0} = 1,24 - 0,000196 * t^{0^2}, \quad (17.31)$$

где t^0 - температура окружающей среды электроприводов в помещении здания НС в градусах Цельсия.

Объем перекачиваемой воды насосным агрегатом за интервал времени работы t_i определяется из выражения:

$$W_{Н.i} = 3,6 * Q_{Н.i} * t_i, \text{ тыс. м}^3. \quad (17.32)$$

18. МОДЕЛЬ, АГОРИТМ И ГРАФО – АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МЕЛИОРАТИВНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

18.1. Модель группового определения удельного расхода электрической энергии

Для определения удельного расхода электрической энергии НС в соответствии с конструктивными особенностями схемных решений компоновки НА в составе НУ, необходимо, прежде всего, установить групповой удельный расход электроэнергии НУ.

Групповой удельный расход электрической энергии для водоподъема 1 тыс. куб. метров перекачиваемой воды на высоту водяного столба каждой из НУ, в которой группа насосных агрегатов объединена на совместную работу в ρ -ый общий напорный трубопровод, определяется из соотношения:

$$\Delta \mathcal{E}_{НУ.i}^{CP} = \frac{\sum_{i=1}^{K_H N.i} \Delta \mathcal{E}_{НА.i} * Q_{НА.i} * H_{НА.i} * t_i}{\sum_{i=1}^{K_H N.i} Q_{НА.i} * H_{НА.i} * t_i} . \quad (18.1)$$

Групповой удельный расход электрической энергии для подъема 1 тыс. куб. метров перекачиваемой воды на высоту 1 метр водяного столба мелиоративной насосной станцией определяется следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E}_{НС}^{GP} = \frac{\sum_{i=1}^{\rho} \Delta \mathcal{E}_{НУ.i}^{CP} * W_{НС.i} * H_{НС.i}^{CP}}{\sum_{i=1}^{\rho} W_{НС.i} * H_{НС.i}^{CP}} , \quad (18.2)$$

где $W_{НС.i}$ - объем перекачиваемой воды мелиоративной НС при каждом режиме , тыс. м³;

$H_{НС.i}^{CP}$ - среднее значение напора, развиваемого НС в целом за рассматриваемый промежуток времени ее работы t_i , м. вод. ст.;

ρ - число задействованных ниток напорных трубопроводов, по которым осуществляется подача воды функционирующими НУ в рассматриваемый промежуток времени t_i .

Подача мелиоративной насосной станции в любой рассматриваемый интервал времени определяется как сумма:

$$Q_{HC.i} = Q_{TP.1.i} + Q_{TP.2.i} + \dots + Q_{TP.\rho.i} , \quad (18.3)$$

$$\text{где } Q_{TP.\rho.i} = \sqrt{\frac{A_{H.\Sigma} - H_{\Gamma.i}}{B_{H.\Sigma} + R_{\rho}}} ; \quad (18.4)$$

$Q_{TP.\rho.i}$ - подача НА в составе НУ совместно работающих в ρ - ый общий напорный трубопровод в интервале времени t_i .

Объем перекачиваемой воды насосной станцией за промежуток времени определяется как:

$$W_{HC.i} = 3,6 * Q_{HC.i} * t_i . \quad (18.5)$$

Среднее значение напора, развиваемого функционирующими НУ насосной станции в целом за рассматриваемый интервал времени t_i , рассчитывается по соотношению:

$$H_{HC.i}^{CP} = \frac{Q_{TP.1.i} * H_{TP.1.i} * t_1 + Q_{TP.2.i} * H_{TP.2.i} * t_2 + \dots + Q_{TP.\rho.i} * H_{TP.\rho.i} * t_{\rho}}{Q_{TP.1.i} * t_1 + Q_{TP.2.i} * t_2 + \dots + Q_{TP.\rho.i} * t_{\rho}} . \quad (18.6)$$

Технологический удельный расход электрической энергии на 1 тыс.куб. метров перекаченной воды на высоту 1 метр водяного столба для мелиоративной НС определяется в соответствии с выражением:

$$\Delta \mathcal{E}_{HC}^{TEX} = 1,03 * \Delta \mathcal{E}_{HC}^{GP} . \quad (18.7)$$

Общепроизводственный удельный расход электрической энергии на 1 тыс.куб. метров перекаченной воды на высоту 1 метр водяного столба для мелиоративной НС определяется следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E}_{HC}^{OBSH} = \Delta \mathcal{E}_{HC}^{TEX} + \frac{\Delta \mathcal{E}_c}{W_{HC} * H_{HC}^{CP}} , \quad (18.8)$$

$\Delta \mathcal{E}_c$ - величина потерь электрической энергии в трансформаторах, кабельных линиях и электрических сетях, $кВт * ч$.

Алгоритмическое обеспечение расчета удельных норм расхода электрической энергии применительно к мелиоративным насосным станциям

представленное в виде блок-схемы, приведено на рис. 18.1.

18.2. Формирование вычислительного алгоритма расчета удельного расхода электрической энергии мелиоративной насосной станции

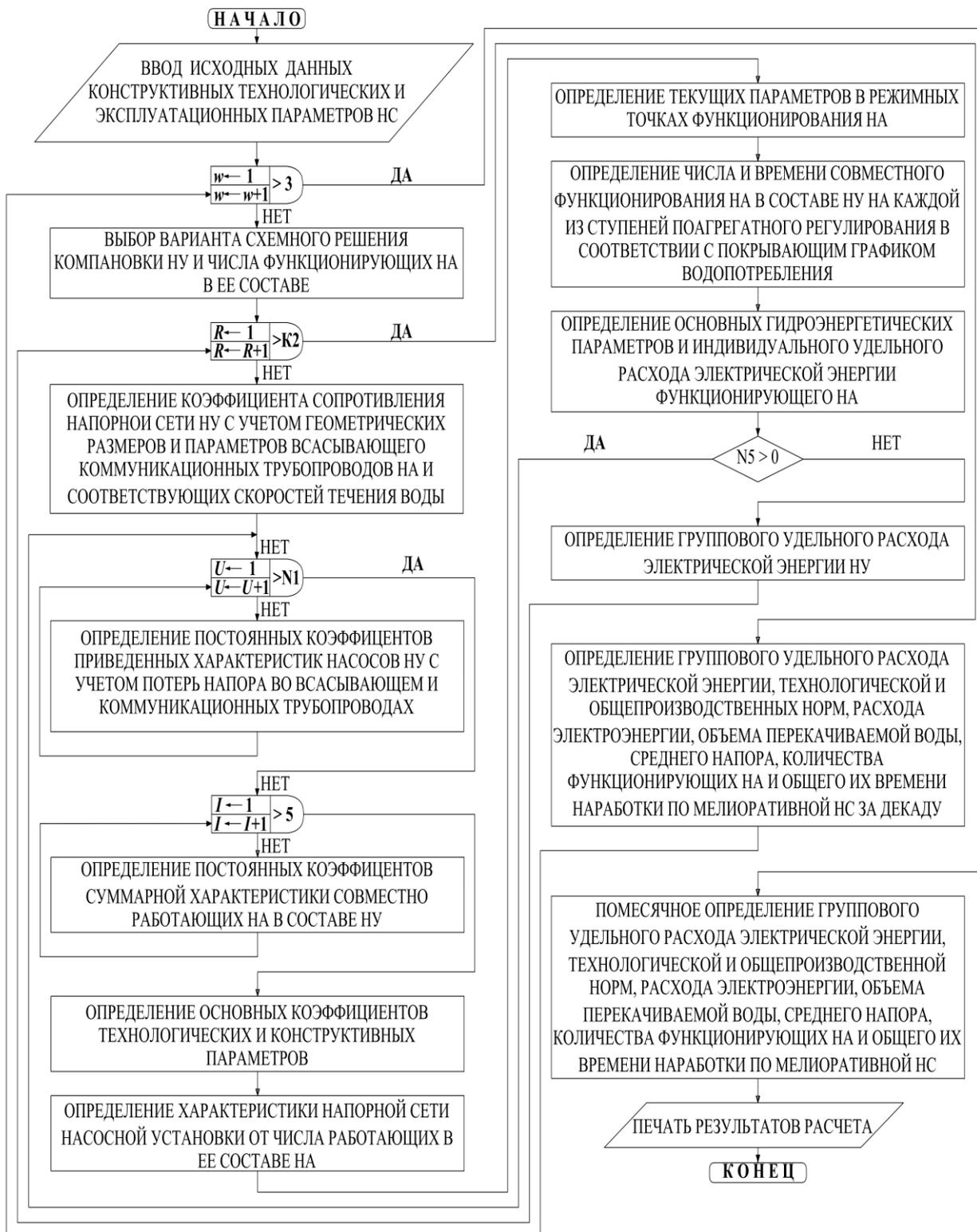


Рис. 18.1. Блок-схема алгоритма определения удельного расхода электроэнергии мелиоративной насосной станции

18.3. Метод графо - аналитического расчета удельного расхода электроэнергии водоподъемной насосной станции

Основным показателем эффективности работы водоподъемной перекачивающей насосной станции вне зависимости от существующей технологии процесса водоподъема и принятого способа регулирования ее производительности, позволяющим оценить насколько четко задействованы внутренние резервы управления и в какой степени квалифицировано эксплуатируются гидромеханическое и энергосиловое оборудование насосных станций, а также рационально расходуются гидроэнергетические ресурсы, является технически, экономически и научно – обоснованный удельный расход электрической энергии на подачу единицы объема перекачиваемой воды.

Удельный расход электрической энергии в таких энергоемких объектах, каковым являются насосные станции систем машинного водоподъема, имея свою отраслевую специфику, представляют собой сложную функцию многих составляющих, присущих лишь данному объекту и зависящих от целого ряда факторов: изменения режимов работы насосных установок, геодезических и геометрических высот подъема воды, в следствии колебаний уровней бьефов в водовыпускном и водозаборном сооружениях насосных станций, потерь энергии в водонапорных трубопроводах, а также от снижения коэффициента полезного действия насосов, уменьшающихся с течением времени вследствие кавитационно – абразивного износа их рабочих органов в процессе эксплуатации.

Расход электрической энергии, определенный с учетом рационального использования всех имеющихся резервов по насосной станции, обслуживающего ее энергохозяйства и отнесенный к объему перекаченной воды, принимается за удельную норму расхода электрической энергии, которая также позволяет спрогнозировать энергопотребление, как по насосной станции так и в целом по уровням планирования с учетом конструктивных, технологических и эксплуатационных особенностей функционирования водоподъемных перекачивающих НС.

18.3.1. Общие положения

Разрабатываются научно-обоснованные удельные нормы расхода электрической энергии для водоподъемных перекачивающих насосных станций, эксплуатируемых в различных отраслях экономики Республики Узбекистан.

В условиях все более растущего дефицита топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) возникает потребность в совершенствовании механизма потребления электроэнергии на действующих НС и водоподъемных насосных установках.

В качестве основного рычага воздействия на указанный механизм выступает нормативная величина энергопотребления за определенный период (квартал, год), которая базируется на нормативном удельном показателе расхода электрической энергии (РЭЭ) и объеме перекачки соответственно для каждого конкретного или типового объектов.

С помощью индивидуальных норм РЭЭ, графика водоподдачи и соответствующих дополнительных исходных данных (в зависимости от технологического типа исполнения НС) определяется целостная нормативная величина РЭЭ на заданный период эксплуатации НС. Сопоставление нормативных и фактических величин РЭЭ способствует объективной оценке технического уровня и качества эксплуатации, позволяет судить количественно об использованных резервах или о допущенных просчетах и технологических упущениях, т. е. является механизмом проверки РЭЭ и стимулирования экономии электроэнергии на НС и водоподъемных НУ.

Существует несколько способов исчисления удельных норм расхода электрической энергии на НС. Однако, наиболее перспективный способ, с точки зрения достоверности и практического удобства, состоит в определении отношения удельной полезной работы НС, т. е. произведения геометрической высоты подъема воды на единицу весового объема перекачиваемой жидкости к полному коэффициенту полезного действия НС для соответствующих режимов ее эксплуатации.

Удельные РЭЭ, полученные для соответствующих режимов эксплуатации и для соответствующего технического состояния гидромеханического, энергетического оборудования и сооружений НС, включая трубопроводные напорные сети, выступают как индивидуальные нормы энергетических затрат для конкретных водоподъемных объектов на определенный период времени их функционирования.

В зависимости от функциональных особенностей, конструктивных схем исполнения НС, величины их энергопотребления в течение ряда лет практически могут находиться на одном и том же уровне или несколько отличаться год от года. Так у перекачивающих НС, конструктивное решение которых предусматривает подъем воды каждым из НА по сугубо своему индивидуальному напорному трубопроводу с относительно малыми колебаниями уровней бьефов, их годовые графики водоподдачи практически получаются идентичными.

У водоподъемных перекачивающих НС, конструктивным решением которых предусмотрена совместная параллельная работа группы НА в общий напорный трубопровод, в случаях, даже при установленных для них равнозначных графиков водоподдачи, их годовое потребление электроэнергии может отличаться от среднего значения.

Методики и инструкции по нормированию расхода электрической энергии и направлениям их потребления разрабатываются в рамках требований действующего Положения о нормировании расхода топливно – энергетических ресурсов в отраслях экономики Республики Узбекистан и утверждаются руководителями отраслей, министерств, ведомств, хозяйствующих объединений и предприятий.

18.4. Задачи, организация и формы нормирования удельного расхода электроэнергии

18.4.1. Задачи нормирования

Основные задачи нормирования расхода электроэнергии:

- осуществление режима экономии электроэнергии;
- рациональное распределение и эффективное использование электроэнергии на насосных станциях;
- оценка качества эксплуатации насосных станций и установок по энергетической составляющей;
- планирование потребления электроэнергии;
- разработка мероприятий, направленных на соблюдение режима экономии энергетических ресурсов.

18.4.2. Организация нормирования

Норма расхода электроэнергии – это плановый показатель расхода электроэнергии на производство единицы продукции. Норма расхода электроэнергии является удельным показателем оценки энергоемкости насосной станции.

Расчет норма расхода электроэнергии осуществляется по техническим параметрам и режимам работы насосных станций.

Нормы удельного расхода электроэнергии должны быть пересмотрены, если за планируемый период произошло изменение технологических условий функционирования насосной станции, состава оборудования, а также внедрение технических мероприятий по рациональному использованию гидросилового и энергетического оборудования.

18.4.3. Классификация норм удельного расхода электроэнергии

Нормы расхода электроэнергии при электромашинном водоподъеме в напорную сеть подразделяются:

- по степени агрегации – на индивидуальные и групповые;
- по составу расходов электроэнергии – на технологические и общепроизводственные;
- по периоду действия – на годовые и квартальные.

Индивидуальная норма – норма расхода электрической энергии, непосредственно затрачиваемой на перекачку единицы объема воды, которая

устанавливается по типам используемых насосно-силовых агрегатов.

Групповая норма – норма расхода электрической энергии, которая устанавливается по НУ, насосной станции и объектам различных уровней планирования на перекачку единицы объема воды в условиях производства.

Технологическая норма – норма расхода электрической энергии, которая учитывает ее расход на основные и вспомогательные технологические процессы непосредственно связанными с перекачкой воды на НС.

Технологическая норма включает:

- расход электроэнергии, входящий в состав индивидуальной нормы;
- расход электроэнергии на вспомогательные технологические нужды (вакуум-насосы, электрофицированные задвижки, насосы систем охлаждения электродвигателей, поддержание технологических агрегатов в горячем резерве и др.);
- расход электроэнергии на собственные нужды насосной станции (освещение, вентиляция, дренаж, а также технически неизбежные потери энергии при работе оборудования).

Общепроизводственная норма – норма расхода электрической энергии, учитывающая технологическую норму, а также технически неизбежные потери на вспомогательные процессы производства и потери энергии в электрических сетях и преобразователях.

Общепроизводственная норма включает:

- расход электроэнергии, входящий в состав технологической нормы;
- расход электроэнергии на вспомогательные нужды, процессы производства:
 - маслonaсосы для смазки подшипников электродвигателей;
 - насосы промывки фильтров;
 - пожарные и дренажные насосы;
 - электроприводы решоткоочистных машин и грузоподъемных механизмов;
 - компрессоры;

- вентиляторы и кондиционеры;
- технологический электрообогрев;
- внутреннее и наружное освещение;
- потери энергии на трансформаторных подстанциях и кабельных линиях;
- потери энергии в электрических сетях и преобразователях.

Общепроизводственные нормы расхода электрической энергии, в основном, служат для определения потребности насосной станции в электроэнергии и осуществлением контрольных функций за ее экономным расходом.

18.4.4. Размерность норм расхода электроэнергии

При электромашинном водоподъеме устанавливаются следующие размерности норм расхода электроэнергии:

- индивидуальная норма – кВт*ч электроэнергии на 1000 м³ перекаченной воды (кВт*ч/1тыс. м³);

18.4.5. При расчетах используются следующие единицы измерения основных величин:

Подача (расход)	Q , м ³ /с
Напор	H , м. вод. ст.
Мощность:	
Насоса	N_n , кВт
Электродвигателя	$P_{эд}$, кВт
Геометрическая высота подъема воды	H_G , м
Частота вращения:	
Насоса	n_n , об/мин
Электродвигателя	$n_{эд}$, об/мин
Коэффициент полезного действия:	
Насоса	η_n , от. ед.

Напорного трубопровода	η_{TP} , от. ед.
Электродвигателя	$\eta_{ЭД}$, от. ед.
Объем перекаченной воды	W , тыс. м ³
Время	T , час
Длина	ℓ , м
Диаметр	d , мм
Удельная норма расхода электроэнергии по насосной станции	$\Delta \mathcal{E}_{НУ}^И, \Delta \mathcal{E}_{НС}^{ГР}, \Delta \mathcal{E}_{НС}^T, \Delta \mathcal{E}_{НС}^{ОБЩ}, \frac{кВт * ч}{тыс.м^3}$

18.4.6. Период действия норм расхода электроэнергии

По периоду действия нормы расхода электроэнергии делятся на годовые и квартальные.

Нормы расхода электроэнергии подлежат ежегодному пересмотру. Их следует пересматривать с учетом старения и износа эксплуатируемого гидросилового и энергетического оборудования насосных станций.

Снижение индивидуальных норм расхода электроэнергии без проведения соответствующих технических мероприятий *недопустимо*.

Индивидуальные нормы, предназначенные для решения задач по осуществлению режима экономии, рационального распределения и эффективного использования электроэнергии, которые рассчитываются в начале планируемого периода на основе устанавливаемых графиков водоподачи.

Групповые нормы, предназначенные для планирования (прогнозного определения) потребления электроэнергии, рассчитываемые в начале планируемого периода по графику водоподачи.

Индивидуальные и групповые нормы расхода электроэнергии, в основном, предназначены для оценки качества эксплуатации насосных станций и установок, а также для целей проверки выполнения мероприятий, направленных на соблюдение режима экономии ТЭР и водных ресурсов.

18.5. Методы разработки удельных норм расхода электроэнергии

Для разработки удельных норм расхода электрической энергии могут быть рекомендованы к использованию теоретический, расчетно-аналитический и экспериментальный методы.

18.5.1. Теоретический метод дает возможность установить величину нормы на основе статистических данных с составлением энергетических и водных балансов с учетом особенностей технологических процессов водоподъема НС, схем подключения НА в напорную сеть, режимов энергопотребления и водоподачи. Исходными данными для расчета являются техническая и технологическая документация, регламенты и т. п.

18.5.2. Расчетно - аналитический метод предусматривает определение норм энергопотребления в соответствии с установленным их составом по нормообразующим элементам. Установлению норм предшествует не только всесторонний тщательный анализ условий потребления электрической энергии и подачи воды НА, но и изучению факторов, определяющих их расход, степени влияния каждого из них на величину нормы, анализ причин наличия потерь энергетических и водных ресурсов.

18.5.3. Экспериментальный метод. В случае если не представляется возможным установить составные элементы нормы теоретическим или расчетно - аналитическим методами, то в практике нормирования может применяться в отдельных случаях экспериментальный метод. Экспериментальный метод заключается в определении норм потребляемой электрической энергии и перекачиваемой воды на основе инструментальных замеров в условиях, близких к действующим технологическим процессам водоподъема НУ, или непосредственно в производственных условиях их функционирования.

18.5.4. Основным методом разработки норм расхода электроэнергии при электромашинном водоподъеме принят расчетно – аналитический, так как по перекачивающим НС может устанавливаться состав норм лишь по нормообразующим элементам.

Индивидуальные нормы определяются на базе графо – аналитических расчетов, а групповые нормы – расчетно – аналитическим способом, как средневзвешенные величины индивидуальных норм.

18.6. Модель расчетно-аналитического метода определения удельного расхода электроэнергии насосной станции

Исходными базовыми данными для нормирования электроэнергии являются: состав гидромеханического и электросилового оборудования, марки и рабочие характеристики насосов, плановый графики водоподдачи, типы и технические характеристики электродвигателей, трансформаторных подстанций и линий электропередач, характеристики напорных трубопроводов (диаметр, длина, материал), геодезические и геометрические высоты подъема воды, количество одновременно работающих насосных агрегатов в общую напорную сеть, физико-химический состав перекачиваемой воды, сведения о сроках эксплуатации гидромеханического и энергосилового оборудования.

18.6.1. Расчет индивидуальной удельного расхода электроэнергии НУ

Известно, что удельной нормой расхода электрической энергии является расход электроэнергии, кВт*ч, на подачу 1000 м³ перекачиваемой жидкости на высоту 1 м при установившемся режиме работы насоса и его электродвигателя на напорную сеть. В связи с этим индивидуальная норма расхода электроэнергии НУ водоподъемной перекачивающей НС определяется как:

$$\Delta \mathcal{E}_{HV,i}^I = \frac{2,724 * H_{Г,i}}{\eta_{H,i}^{CP} * \eta_{ЭД,i}^{CP} * \eta_{ТР,i}} ; \text{кВт*ч/1тыс. * м}^3, \quad (18.9)$$

где $H_{Г,i}$ - геометрическая высота подъема напорного трубопровода

i -той НУ;

$\eta_{H,i}^{CP}$ - средневзвешенное значение КПД насосов i - той НУ;

$\eta_{ЭД,i}^{CP}$ - средневзвешенное значение КПД электродвигателей

i - той НУ;

$\eta_{TP,i}$ - коэффициент полезного действия напорного трубопровода i -той НУ;

i - порядковый номер НА находящихся в работе.

n - общее число задействованных НА в составе НУ.

Величины $\eta_{H,i}$ и $\eta_{ЭД,i}$ рассчитываются следующим образом:

$$\eta_{H,i}^{CP} = \frac{\sum_{n=1}^i \eta_{H,n,i} * Q_{n,i} * H_{n,i} * T_{n,i}}{\sum_{n=1}^i Q_{n,i} * H_{n,i} * T_{n,i}},$$

ИЛИ

$$\eta_{H,i}^{CP} = \frac{\eta_{H1,i} * Q_{1,i} * H_{1,i} * T_{1,i} + \eta_{H2,i} * Q_{2,i} * H_{2,i} * T_{2,i} + \dots + \eta_{Hn,i} * Q_{n,i} * H_{n,i} * T_{n,i}}{Q_{1,i} * H_{1,i} * T_{1,i} + Q_{2,i} * H_{2,i} * T_{2,i} + \dots + Q_{n,i} * H_{n,i} * T_{n,i}}; \quad (18.10)$$

$$\eta_{ЭД,i}^{CP} = \frac{\sum_{n=1}^i \eta_{ЭД,n,i} * \frac{Q_{n,i} * H_{n,i} * T_{n,i}}{\eta_{H,n,i}}}{\sum_{n=1}^i \frac{Q_{n,i} * H_{n,i} * T_{n,i}}{\eta_{H,n,i}}},$$

ИЛИ

$$\eta_{ЭД,i}^{CP} = \frac{\eta_{ЭД1,i} * \frac{Q_{1,i} * H_{1,i} * T_{1,i}}{\eta_{H1,i}} + \eta_{ЭД2,i} * \frac{Q_{2,i} * H_{2,i} * T_{2,i}}{\eta_{H2,i}} + \dots + \eta_{ЭДn,i} * \frac{Q_{n,i} * H_{n,i} * T_{n,i}}{\eta_{Hn,i}}}{\frac{Q_{1,i} * H_{1,i} * T_{1,i}}{\eta_{H1,i}} + \frac{Q_{2,i} * H_{2,i} * T_{2,i}}{\eta_{H2,i}} + \dots + \frac{Q_{n,i} * H_{n,i} * T_{n,i}}{\eta_{Hn,i}}}, \quad (18.11)$$

где

$\eta_{H1,i}, \eta_{H2,i}, \dots, \eta_{Hn,i}$ - КПД насоса в соответствующем режиме работы НА в составе i -той НУ за период времени $T_{n,i}$;

$\eta_{ЭД1,i}, \eta_{ЭД2,i}, \dots, \eta_{ЭДn,i}$ - КПД электродвигателя НА функционирующего в составе i -той НУ;

$Q_{1,i}, Q_{2,i}, \dots, Q_{n,i}$ - подача насосного агрегата за планируемый период работы в составе i -той НУ, м³/с;

$H_{1,i}, H_{2,i}, \dots, H_{n,i}$ - развиваемый напор насосом в установившемся режиме работы НА в составе i -той НУ, м;

$T_{1,i}, T_{2,i}, \dots, T_{n,i}$ - время работы насосных агрегатов в

планируемом периоде, в составе i -той НУ, ч;
 n_i - количество одновременно функционирующих
насосных агрегатов в период времени $T_{n,i}$ в
составе i -той НУ.

Следует отметить, что значения величин $Q_{n,i}$, $H_{n,i}$, $\eta_{H,n,i}$ приведенных в выражениях (18.10) и (18.11) находят графо – аналитическим путем определения рабочих режимных точек на совместно построенных паспортных (каталожных) характеристиках насоса и трубопроводной напорной сети в соответствии с плановым графиком водоподачи на планируемый период $T_{n,i}$ работы i -той насосной установки. В отдельных случаях, когда фактический диаметр рабочего колеса или же частота вращения вала насоса несколько отличны от заводских паспортных (каталожных) характеристик необходимо производить перерасчет параметров данной марки насоса по известным уравнениям закона подобия. Одновременно, на основании публикации О.В. Яременко в книге «Испытание насосов» рекомендуемые для проведения расчетов отклонения КПД насосов от паспортных (каталожных) значений, вследствие изменения характеристик насоса в процессе их эксплуатации могут корректироваться в сторону уменьшения с учетом материала и технологии изготовления проточной части насоса в соответствии с таблицей 18.1.

Объем воды перекачиваемый n - ным насосным агрегатом в составе i -той НУ за интервал времени работы $T_{n,i}$ определяется как:

$$W_{n,i} = 3,6 * Q_{n,i} * T_{n,i}. \quad (18.12)$$

При этом подача насосной установки $Q_{HY,i}$ в любой рассматриваемый интервал времени T_i может быть найдена путем графически построенных по паспортным (каталожным) характеристикам насосов и характеристики напорной сети для режимной установившейся точки их совместной параллельной работы в общий напорный трубопровод или же как сумма подач каждого из функционирующих НА в составе НУ в ее установившейся режимной рабочей точке при развиваемых напорах $H_{1,i} = H_{2,i} = \dots = H_{n,i} = H_{HY,i}$:

$$Q_{HV.i} = Q_{1.i} + Q_{2.i} + \dots + Q_{n.i}. \quad (18.13)$$

Таблица 18.1.

№ п/п	Материал деталей проточной части	Технология изготовления	Отклонение КПД насоса, %
1.	Чугун	Рабочее колесо и корпус литьё в землю литьё в кокиль	7,5 4,5
2.	Чугун	Рабочее колесо – литьё в кокиль, Корпус – литьё в землю	6,0
3.	Нержавеющая сталь	Литьё в землю Литьё по выплавляющим моделям	5,0 2,5
4.	Цветные металлы	Корпус – литьё в землю, рабочее колесо – литьё в кокиль	5,0

Объем воды перекаченный i - той НУ за промежуток времени $T_{HV.i} = T_i$ может быть вычислен следующим образом:

$$W_{HV.i} = 3,6 * Q_{HV.i} * T_{HV.i}. \quad (18.14)$$

Коэффициент полезного действия напорного трубопровода i - той НУ, учитывающий потери энергии на преодоление сил трения в напорной сети и на местные сопротивления (задвижка, обратный клапан, дисковый затвор, места плавного поворота, постепенного расширения или сужения и др.), который может быть определен по зависимости:

$$\eta_{TPi} = \frac{H_{\Gamma.i}}{H_{\Gamma.i} + h_{E.i}^{CP}}, \quad (18.15)$$

где $H_{\Gamma.i}$ - геометрическая высота подъема воды i - той НУ;

$$h_{E.i}^{CP} = \frac{\sum_{n=1}^i h_{E.n.i} * Q_{n.i} * T_{n.i}}{\sum_{n=1}^i Q_{n.i} * T_{n.i}},$$

или

$$h_{E.i}^{CP} = \frac{h_{E1.i} * Q_{1.i} * T_{1.i} + h_{E2.i} * Q_{2.i} * T_{2.i} + \dots + h_{E.n.i} * Q_{n.i} * T_{n.i}}{Q_{1.i} * T_{1.i} + Q_{2.i} * T_{2.i} + \dots + Q_{n.i} * T_{n.i}}; \quad (18.16)$$

$h_{E.n.i}$ - величина потерь энергии в напорном трубопроводе i - той

НУ, которая состоит из потерь на трение и местные сопротивления и определяется как:

$$h_{E.n.i} = K_i * h_{E.L.i} + h_{E.M.i}; \text{ м} \quad (18.17)$$

где K_i - коэффициент, учитывающий увеличение потерь на трение от изменения абсолютной шероховатости в процессе эксплуатации напорного трубопровода i -той НУ;

$h_{E.L.i}$ - величина потерь энергии на трение в напорном трубопроводе i -той НУ в первом году его эксплуатации, которая определяется по выражению:

$$h_{E.L.i} = \lambda_i * \frac{\ell_i}{d_i} * \frac{g_i^2}{2g}; \quad (18.18)$$

где λ_i - коэффициент гидравлического трения напорного трубопровода i -той НУ с учетом продолжительности его эксплуатации;

ℓ_i и d_i - длина и диаметр напорного трубопровода i -той НУ, м;

g_i - скорость движения воды в напорном трубопроводе i -той НУ.

Изменение коэффициент гидравлического трения по длине напорного трубопровода в зависимости от срока его эксплуатации может быть уточнено по таблице 18.2 (Приложение 1.).

Значение величины K_i в зависимости от физико – химических свойств, наличия взвесей и мутности перекачиваемой воды, а также с учетом диаметра напорного трубопровода с достаточной степенью точности можно определить по таблице 18.3. (Приложение 1.).

$h_{E.M.i}$ - потери энергии в местных сопротивлениях напорного трубопровода i -той НУ.

Методика расчета потерь энергии в местных сопротивлениях, а именно: в задвижках, обратных клапанах, дисковых затворах, местах плавного поворота, постепенного расширения или сужения и др. подробно описана в

литературных источниках. В случае сложности и трудоемкости вычислений или же отсутствия необходимых исходных данных о местных сопротивлениях, допускается ориентировочно принять их в размере 10% - 12% от потерь по длине для коротких трубопроводов (порядка до 100 м) и в размере 5% - 7% для длинных напорных трубопроводов.

В случае, когда каждый НА работает на свой индивидуальный напорный трубопровод, что также является наипростейшим конструктивным исполнением НУ, величину $h_{E,i}^{CP}$ можно считать на планируемый период времени постоянной величиной.

Величины КПД приводных электродвигателей НА ($\eta_{ЭД1,i}, \eta_{ЭД2,i}, \dots, \eta_{ЭДn,i}$) в составе i -той НУ, согласно выражению (18.11) определяются в зависимости от их загрузки по следующему соотношению [6]:

$$\eta_{ЭДn,i} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\eta_{ЭДn,i,ном}} - 1 \right) * \frac{(K_{ЗАГ.n,i} + \frac{a_{ПОГ}}{K_{ЗАГ.n,i}})}{(1 + a_{ПОГ})}}, \quad (18.19)$$

где $\eta_{ЭДn,i,ном}$ - номинальные значения КПД приводных электродвигателей НА, определяемые по паспортным или каталожным данным;

$K_{ЗАГ.n,i}$ - коэффициент загрузки приводных электродвигателей НА, равный отношению мощности на валу насоса, принимаемого по паспортной (каталожной) кривой, из соответствующим образом графическим методом, полученной ее режимной рабочей точке, к номинальной мощности приводного электродвигателя,

$$K_{ЗАГ.n,i} = \frac{N_{M.n,i}}{P_{ЭДn,i,ном}}, \quad (18.20)$$

где $N_{M.n,i}$ - мощность, подводимая к валу насоса n -го НА, в установившейся режимной рабочей точке i -той НУ;

$P_{ЭДn,i,ном}$ - номинальная мощность приводного электродвигателя n -го НА i -той НУ;

$a_{пот}$ - коэффициент потерь электродвигателя n -го НА i -той НУ.

Значения коэффициент потерь электродвигателей переменного тока сведены в таблицу 18.4.

Таблица 18.4.

№ п/п	Тип электродвигателя	Коэффициент потерь ($a_{пот}$)	
		Тихоходные электродвигатели ($n \leq 1000 об/мин$)	Быстроходные электродвигатели ($n \geq 1000 об/мин$)
1.	Асинхронный короткозам-кнутый общего назначения	0,5	0,7
2.	Синхронный	1,0	2,0

18.6.2. Расчет группового удельного расхода электроэнергии по НС

Групповая норма расхода электрической энергии для водоподъема 1 тысячи м³ перекачиваемой воды на высоту $H_{г,i}$ водяного столба для каждой отдельно взятой насосной станции определяется из соотношения:

$$\Delta \mathcal{E}_{НС}^{ГР} = \frac{\sum_1^{\gamma} \Delta \mathcal{E}_{НУ,\gamma}^И * W_{НУ,\gamma} * H_{НУ,\gamma}^{СР}}{\sum_1^{\gamma} W_{НУ,\gamma} * H_{НУ,\gamma}^{СР}},$$

или

$$\Delta \mathcal{E}_{НС}^{ГР} = \frac{\Delta \mathcal{E}_{НУ1}^И * W_{НУ1} * H_{НУ1}^{СР} + \Delta \mathcal{E}_{НУ2}^И * W_{НУ2} * H_{НУ2}^{СР} + \dots + \Delta \mathcal{E}_{НУ,\gamma}^И * W_{НУ,\gamma} * H_{НУ,\gamma}^{СР}}{W_{НУ1} * H_{НУ1}^{СР} + W_{НУ2} * H_{НУ2}^{СР} + \dots + W_{НУ,\gamma} * H_{НУ,\gamma}^{СР}}, \quad (18.21)$$

$$H_{НУ,\gamma}^{СР} = \frac{\sum_{n=1}^{\gamma} Q_{НУ,\gamma,n} * H_{НУ,\gamma,n}}{\sum_{n=1}^{\gamma} Q_{НУ,\gamma,n}},$$

или

$$\text{где } H_{НУ,\gamma}^{СР} = \frac{Q_{НУ,\gamma,1} * H_{НУ,\gamma,1} + Q_{НУ,\gamma,2} * H_{НУ,\gamma,2} + \dots + Q_{НУ,\gamma,n} * H_{НУ,\gamma,n}}{Q_{НУ,\gamma,1} + Q_{НУ,\gamma,2} + \dots + Q_{НУ,\gamma,n}}; \quad (18.22)$$

$$H_{НУ,\gamma,n} = H_{n,i}; \quad (18.23)$$

$H_{HV,\gamma}^{CP}$ - среднее значение напора развиваемого функционирующими НУ за рассматриваемый промежуток времени их работы по НС;
 γ - общее количество функционирующих НУ, посредством которых осуществляется подача воды НС.

Подача $Q_{НС}$ перекачиваемой воды НС в любом рассматриваемом интервале времени $T_{НС}$ определяется как сумма:

$$Q_{НС} = Q_{HV,\gamma1} + Q_{HV,\gamma2} + \dots + Q_{HV,\gamma,n}, \quad (18.24)$$

где $T_{НС} = T_{HV,\gamma1} + T_{HV,\gamma2} + \dots + T_{HV,\gamma,n}.$ (18.25)

Объем воды $W_{НС}$ перекачиваемой НС за промежуток времени $T_{НС}$ может быть вычислен по выражению:

$$W_{НС} = 3,6 * Q_{НС} * T_{НС}. \quad (18.26)$$

18.6.3. Технологический расход электроэнергии

Технологическая норма расхода электроэнергии на 1 тыс. м³ перекаченной воды на высоту $H_{Г}$ водяного столба определяется по выражению:

$$\Delta \mathcal{E}_{НС}^T = 1,03 * \Delta \mathcal{E}_{НС}^{ГР}. \quad (18.27)$$

18.6.4. Общепроизводственный расход электроэнергии

Общепроизводственная индивидуальная норма расхода электрической энергии для водоподъемной насосной станции рассчитывается по выражению:

$$\Delta \mathcal{E}_{НС}^{ОБЩ} = \Delta \mathcal{E}_{НС}^T + \frac{\Delta \mathcal{E}_C}{W_{HV1} * H_{HV1}^{CP} + W_{HV2} * H_{HV2}^{CP} + \dots + W_{HV,\gamma} * H_{HV,\gamma}^{CP}}, \quad (18.28)$$

где $\Delta \mathcal{E}_C$ - величина потерь электроэнергии в электрических сетях, кабельных линиях, трансформаторных подстанциях и преобразователях насосной станции перекачки, находящихся на балансе предприятия, организации.

Общие потери электроэнергии по предприятию за расчетный период (кВт·ч) определяется как сумма потерь в основных элементах системы электроснабжения, т.е.

$$\Delta \mathcal{E}_C = \sum_1^n \Delta \mathcal{E}_l + \sum_1^n \Delta \mathcal{E}_{mp} + \sum_1^n \Delta \mathcal{E}_{ky}, \quad (18.29)$$

где

$\sum_1^n \Delta \mathcal{E}_l, \sum_1^n \Delta \mathcal{E}_{mp}, \sum_1^n \Delta \mathcal{E}_{ky}$ - суммарные потери электроэнергии соответственно

в воздушных (кабельных) линиях, трансформаторах и компенсирующих устройствах, кВт·ч.

а) Потери энергии в воздушных и кабельных линиях определяются по выражения:

$$\Delta \mathcal{E}_l = \Delta P_l \cdot T_p, \quad (18.30)$$

где T_p – продолжительность работы линии за расчетный период, ч;

ΔP_l – потери мощности в линиях (кВт), определяемые как

$$\Delta P_l = 1,1 \cdot n \cdot I^2 \cdot R \cdot 10^{-3},$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий сопротивление переходных контактов, скрутку жил и способ прокладки линий;

n – число фаз линии;

I – расчетный ток линии, А;

$R = \rho \frac{L}{S}$ – активное сопротивление провода или жилы кабеля, Ом;

ρ – удельное сопротивление материала провода при 20°C (для алюминия–0,26-0,29; меди–0,0175-0,018, для стали – 0,10-0,14 Ом мм²/м);

L – длина линии, м;

S – сечение проводника, мм²;

Значение R может быть определено также как $R = r_0 L$,

где r_0 – активное сопротивление 1 км линии (таблица 18.5. Приложение 2.);

L – длина в км.

При выполнении ориентировочных расчетов потери активной мощности в трехжильных кабелях с медным и алюминиевыми жилами напряжением 0,38-6-10-35 кВ принимаются по данным таблицы 18.6. Приложение 2.

Величина ΔP трехфазных воздушных и кабельных линий может быть определена из выражения:

$$\Delta P_{л} = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} R,$$

где P , Q – соответственно активная и реактивная мощность линии, определяемые расчетным путем, либо по результатам измерений, кВт, квар;

V – линейное напряжение, кВ.

При известных значениях потерь электроэнергии в отдельных линиях $\Delta \mathcal{E}_{л1}$, $\Delta \mathcal{E}_{л2}, \dots$, $\Delta \mathcal{E}_{лn}$, определяемые выражением (18.30), суммарные потери рассчитываются следующим образом:

$$\sum_1^n \Delta \mathcal{E}_{л} = \Delta \mathcal{E}_{л1} + \Delta \mathcal{E}_{л2} + \dots + \Delta \mathcal{E}_{лn}. \quad (18.31)$$

б) Потери энергии в двухобмоточном трансформаторе определяются из выражения:

$$\Delta \mathcal{E}_{mp} = \Delta P'_x \cdot T_n + \beta^2 \cdot \Delta P'_k \cdot T_p, \quad (18.32)$$

$\Delta P'_x = \Delta P_x + K_3 \cdot \Delta Q_x$ - приведенные потери мощности холостого хода, кВт;

$\Delta P'_k = \Delta P_k + K_3 \cdot \Delta Q_k$ - приведенные потери мощности короткого замыкания, кВт;

ΔP_x – потери холостого хода при номинальном напряжении, кВт;

ΔP_k – потери короткого замыкания при номинальной нагрузке, кВт;

$\beta = \frac{S_\phi}{S_{ном}}$ – коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению

фактической нагрузки трансформатора к номинальной мощности;

$\Delta Q_x = s_{ном} \frac{I_x}{100}$ - реактивные потери холостого хода трансформатора, квар;

I_x - ток холостого хода трансформатора, %;

$\Delta Q_x = s_{ном} \frac{U_x}{100}$ - реактивные потери короткого замыкания трансформатора,

квар;

U_k - напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

K_ε - коэффициент изменения потерь (кВт/квар);

T_n - полное число часов трансформатора, которое принимается в январе, марте, июле, августе, октябре, декабре равным 744 ч; в апреле, июне, сентябре, ноябре – 720 ч;

T_p - число часов работы трансформатора с номинальной нагрузкой, которое принимается равным для предприятий, работающих в одну смену – 200 ч, в две смены – 450 ч, в три смены – 700 ч и в месяц.

Значения коэффициента потерь в трансформаторе приведены в таблице 18.7, Приложение 2.

Значения ΔP_x , ΔP_k , I_x , U_k для различных типов трансформаторов общего назначения приведены в таблице 18.8, Приложение 2.

Действительная нагрузка трансформатора S_ϕ (кВА), определяется с использованием выражений:

$$S_\phi = \frac{\mathcal{E}_a}{T_n \cos \varphi_{cp}}; \quad \cos \varphi_{cp} = \frac{\mathcal{E}_a}{\sqrt{\mathcal{E}_a^2 + \mathcal{E}_p^2}},$$

где $\cos \varphi_{cp}$ – средневзвешенный коэффициент мощности трансформатора за время T_n ;

$\mathcal{E}_a, \mathcal{E}_p$ – электрическая энергия, учтенная установленными на вводном Устройстве трансформатора счетчиками активной (кВт·ч) и реактивной (квар·ч) энергии за время T_n .

В случае выполнения ориентировочных расчетов, потери энергии в двухобмоточном трансформаторе можно определять из выражения:

$$\Delta \mathcal{E}_{mp.op} = \Delta P_x \cdot T_n + \beta^2 \cdot \Delta P_k \cdot T_p, \quad (18.33)$$

При известных значениях потерь электроэнергии в отдельных трансформаторах $\Delta \mathcal{E}_{тр1}, \Delta \mathcal{E}_{тр2}, \dots, \Delta \mathcal{E}_{трn}$, суммарные потери определяются как

$$\sum_1^n \Delta \mathcal{E}_{mpi} = \Delta \mathcal{E}_{mp1} + \Delta \mathcal{E}_{mp2} + \dots + \Delta \mathcal{E}_{mpn}. \quad (18.34)$$

в) Потери энергии в компенсирующих установках (кВт·ч) определяются по формуле:

$$\Delta \mathcal{E}_{ку} = \Delta P_{ку} * \mathcal{E}_p, \quad (18.35)$$

где $P_{ку}$ – удельный расход активной мощности в компенсирующих установках (кВт/квар), который для статистических конденсаторов при напряжении до 1000 В может приниматься 0,003 кВт/квар, свыше 1000 В – 0,004 кВт/квар, а для синхронных двигателей – согласно данным таблицы 18.9,

Приложение 2.;

\mathcal{E}_p – количество вырабатываемой реактивной энергии компенсирующими установками за расчетный период, квар (определяется с использованием показаний установленных на предприятии счетчиков реактивной энергии).

19. ПРИМЕР РАСЧЕТА УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ГОЛОВНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

19.1. Исходные данные головной насосной станции

1. Насосная станция оборудована одним насосным агрегатом марки Д6300-27 с диаметром рабочего колеса $D_p = 740$ мм и четырьмя – Д12500-24 с $D_p = 985$ мм.

Схема головной насосной станции представлена на рис. 20.3.

Насосы укомплектованы следующими электродвигателями: насос Д6300-27 агрегирован с СД2-85-57-8 $P=630$ кВт, $n=750$ об/мин $\eta=94\%$, $\cos\varphi=0,9$, $U_1=6000$ В, $I_1=71$ А.

Насосы марки Д12500-24 комплектованы электродвигателями типа СДН-15-39-12 мощностью $P=800$ кВт, $n=500$ об/мин $\eta=94\%$, $\cos\varphi=0,9$, $U_1=6000$ В, $I_1=90,5$ А.

2. Напорный трубопровод состоит из трех отдельных ниток водоводов (Л1, Л2, Л3), диаметром каждого по 1400 мм и длиной Л1=883 м, Л2=869,5 м и Л3=727 м.
3. Насосная станция перекачивает воду со следующими физико-химическими свойствами: слабо минерализованные коррозионные воды.
4. Проведенные наблюдения показали, что горизонт воды в аванкамере НС колеблется в диапазоне ~ 30 см, а в водовыпускном бассейне ~ 15 см, средняя многолетняя геодезическая высота подъема составляет 11,8 м.
5. Трансформаторная подстанция и линии электропередач находятся на балансе водохозяйственной организации.
6. На основании каталожных данных выявляем $Q-H$, $Q-N$ и $Q-\eta$ характеристики насосов.

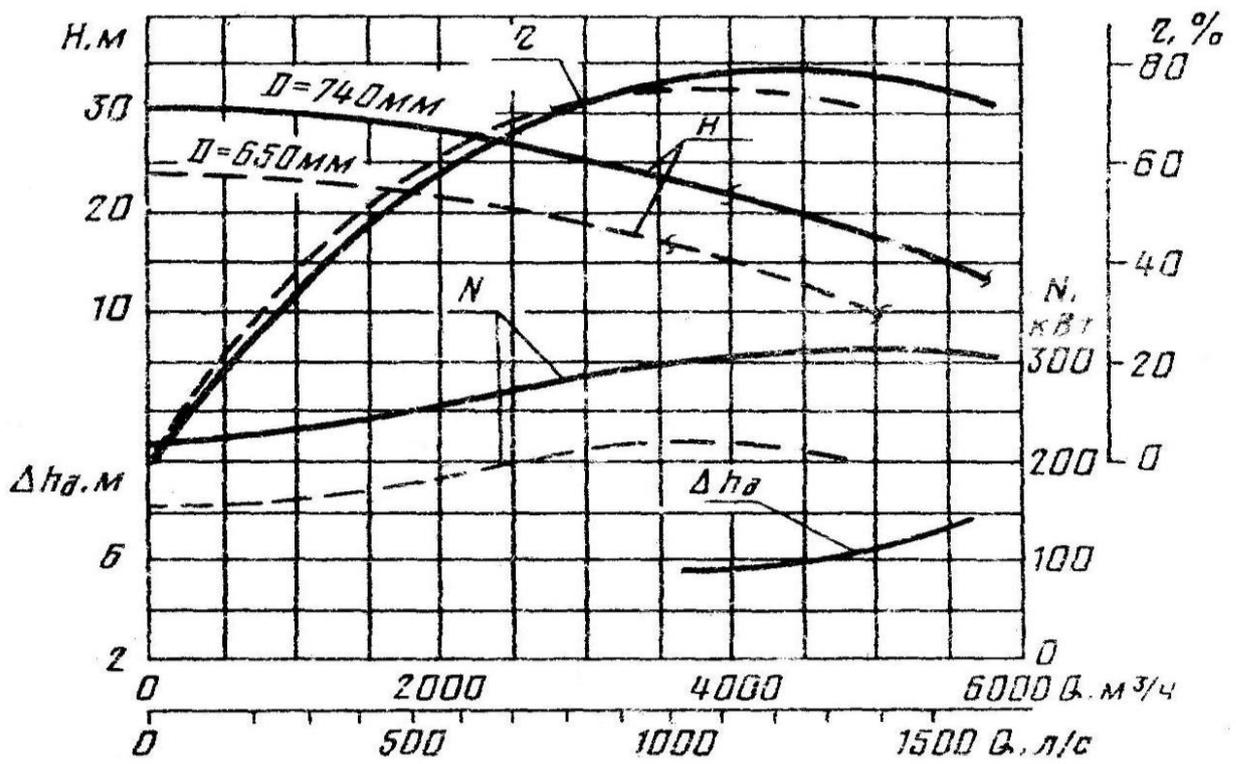


Рис. 20.1. Характеристика насоса Д6300-27; $n=730$ об/мин

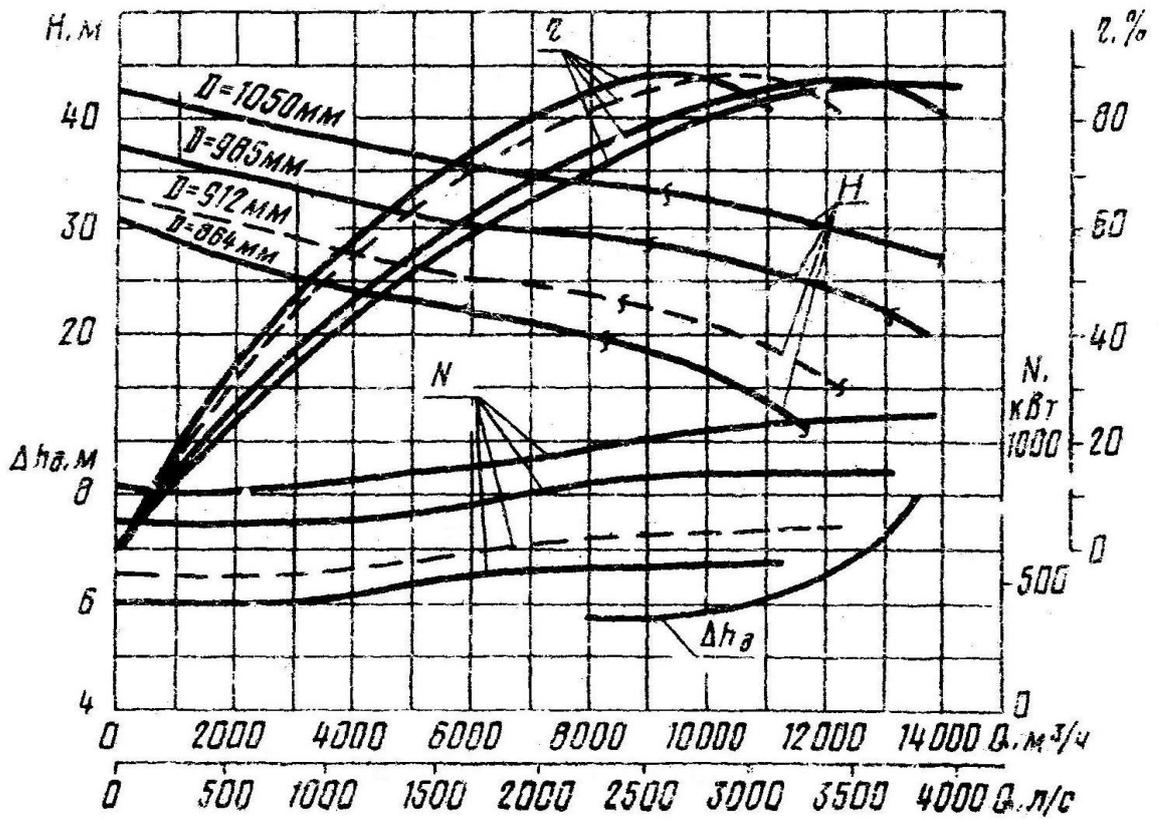


Рис. 20.2. Характеристика насоса Д12500-24; $n=485$ об/мин

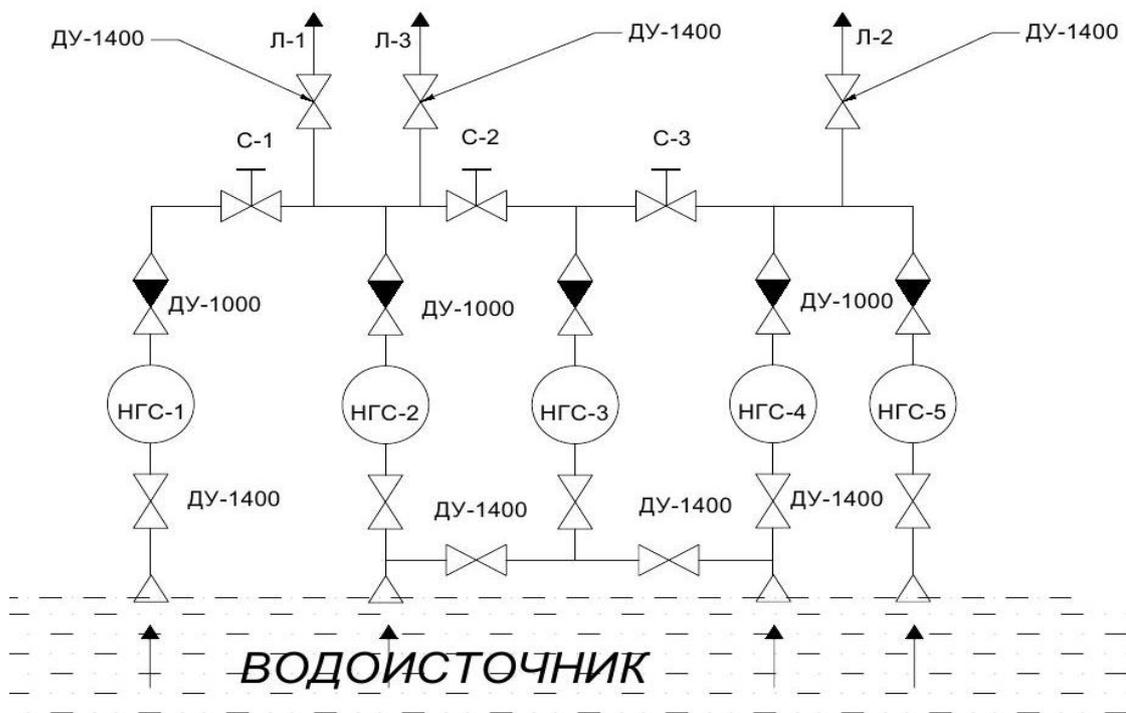


Рис. 20.3. Схема головной насосной станции

19.2. Определение рабочих параметров насосных агрегатов графо – аналитическим методом с учетом времени их эксплуатации

Пересчет рабочих характеристик насоса при установленной его частоте вращения n для перехода на другую частоту вращения рабочего колеса n_1 соответствующую частоте вращения приводного электродвигателя насосного агрегата при постоянстве диаметра (D) рабочего колеса насоса осуществляется в соответствии с законом подобия центробежных насосов:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1}; \quad \frac{H}{H_1} = \left(\frac{n}{n_1} \right)^2.$$

Так для насоса марки Д12500-24 с частотой вращения $n=485$ об/мин и с диаметром рабочего колеса $D=985$ мм и приводного синхронного электродвигателя типа СДН-15-39-12 с частотой вращения $n_1=500$ об/мин произведем пересчет рабочих характеристик насоса с частоты вращения n на частоту вращения n_1 . Расчеты сведены в нижеследующие таблицы 19.1 и 19.2.

Таблица 19.1.

№	Наименован.	Подача	Подача	Подача	Подача	Подача
	Д12500-24	1	2	3	4	5
1	Q , м ³ /ч	4000	6000	8000	10000	12000
2	Q_1 , м ³ /ч	4124	6185	8247	10309	12371

Таблица 19.2.

№	Наименован.	Напор	Напор	Напор	Напор	Напор	Напор
	Д12500-24	1	2	3	4	5	6
1	H , м	32,2	30,2	29,1	27,6	24,7	18,4
2	H_1 , м	34,2	32,1	30,9	29,3	26,2	19,5

Аналогичным образом, для насоса марки Д6300-27 с частотой вращения $n=730$ об/мин и с диаметром рабочего колеса $D=740$ мм и приводного синхронного электродвигателя типа СД2-85-57-8 с частотой вращения $n_1=750$ об/мин произведем пересчет рабочих характеристик насоса с частоты вращения n на частоту вращения n_1 . Расчеты сведены в нижеследующие таблицы 19.3 и 19.4.

Таблица 19.3.

№	Наименован.	Подача	Подача	Подача	Подача	Подача
	Д6300-27	1	2	3	4	5
1	Q , м ³ /ч	2000	3000	4000	5000	6000
2	Q_1 , м ³ /ч	2055	3083	4111	5138	6166

Таблица 19.4.

№	Наименован.	Напор	Напор	Напор	Напор	Напор	Напор
	Д6300-27	1	2	3	4	5	6
1	H , м	41,4	38,4	35,8	32,8	28,1	23,2
2	H_1 , м	43,7	40,5	37,8	34,6	29,7	24,5

В соответствии с данными приведенными в таблице 19.1, определяем величину отклонения КПД насоса в зависимости от периода его эксплуатации для материала – чугун при литье рабочего колеса в кокиль, где величина отклонения составляет ~ 6%. Затем, учитывая величину отклонения, строим

Q - η характеристики насосов (пунктирная кривая).

По выражению (18.18) определяем величину потерь энергии в напорном трубопроводе:

$$h_{E.L.i} = \lambda_i * \frac{\ell_i}{d_i} * \frac{g_i^2}{2g} = \lambda_i * \frac{\ell_i}{d_i} * \frac{Q^2}{S^2 * 2g}.$$

При этом коэффициент гидравлического трения λ_i для первого года эксплуатации напорного трубопровода установленного внутреннего диаметра может быть определен из таблицы 18.2 (Приложение 1), где $d_i = 1,2$ м, $\lambda_i = 0,0108$.

Площадь поперечного сечения напорного трубопровода вычисляется следующим образом:

$$S = \frac{\pi d_i^2}{4} = \frac{3,14 * 1,2^2}{4} = 1,1304 \text{ м}^2.$$

Тогда потери на трение будут:

$$h_{E.L.i} = \lambda_i * \frac{\ell_i}{d_i} * \frac{Q^2}{S^2 * 2g} = 0,0108 * \frac{883}{1,2} * \frac{Q^2}{1,1304^2 * 2 * 9,81} = 0,31699 * Q^2, \text{ м.}$$

Потери в местных сопротивлениях принимаем в размере 5% потерь по длине

$$h_{E.M.i} = 0,05 * h_{E.L.i} = 0,05 * 0,31699 * Q^2 = 0,01585 * Q^2, \text{ м.}$$

Следовательно, общие потери энергии в напорном трубопроводе для первого года эксплуатации ГНС составят:

$$h_{E.n.i} = h_{E.L.i} + h_{E.M.i} = 0,3328 * Q^2, \text{ м}$$

Потери энергии на трение в напорном трубопроводе в зависимости от его протяженности (длины), внутреннего диаметра и периода времени с момента ввода НС в эксплуатацию до настоящего рассматриваемого года, определяем по таблице 18.2 (Приложение 1). Соответствующий, коэффициент гидравлического трения, с учетом физико-химический состав перекачиваемой воды, определяется по таблице 18.3 (Приложение 1).

Коэффициент увеличения потерь на трение K_i от срока эксплуатации Головной насосной станции будет равен 2,11.

В этом случае общие потери энергии в напорном трубопроводе на рассматриваемый год его эксплуатации могут быть рассчитаны по выражению:

$$h_{E.n.i} = K_i * h_{E.L.i} + h_{E.M.i} = 2,11 * 0,31699 * Q^2 + 0,01585 * Q^2 = 0,6847 * Q^2, \text{ м}$$

Осуществляем построение характеристик напорной сети для вариантов первого и рассматриваемого годов эксплуатации напорного трубопровода. Задаваясь величинами подачи воды насосами по их напорному трубопроводу с учетом каталожных пересчитанных на увеличенные частоты вращения характеристиками функционирующих насосов, рассчитаем потери на трение и в местных сопротивлениях напорной сети с учетом геодезической высоты подъема (H_{CT}) воды НС. Расчет сведен в таблицу 19.5.

Таблица 19.5.

	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	0	1,11	1,66	2,22	2,77	3,33
1.	$h_E = 0,3328 * Q^2, \text{ м}$	0	0,41	0,92	1,64	2,55	3,69
2.	$H_{CT} + h_E, \text{ м}$	11,8	12,21	12,72	13,44	14,35	15,49
3.	$h_{E.n} = 0,6847 * Q^2, \text{ м}$	0	0,84	1,89	3,37	5,25	7,59
4.	$H_{CT} + h_{E.n}, \text{ м}$	11,8	12,64	13,69	15,17	17,05	19,39

Выявляем рабочие режимные точки функционирования насосов путем построения характеристики напорной сети с учетом ее периода эксплуатации на данный рассматриваемый момент времени (~30 лет) и находим точки пересечения последней с характеристиками насосов при их совместной работе, которые приведены на рис. 19.4.

Величины подач насосов, развиваемых ими напоры и КПД, заносим в соответствующую таблицу 19.6 работы НА.

Таблица 19.6.

Кол-во одновремен. работающ. насосов марки Д12500-24	Кол-во одновремен. работающ. насосов марки Д6300-27	Насос марки Д12500-24			Насос марки Д6300-27			ΣQ , м ³ /с
		Q , м ³ /с	H , м	η_H	Q , м ³ /с	H , м	η_H	
1	-	3,69	21,5	0,78	-	-	-	3,69
-	1	-	-	-	2,26	15,5	0,61	2,26
2	-	2,43	27,75	0,74	-	-	-	4,86
1	1	2,72	26,1	0,77	1,75	26,1	0,76	4,47

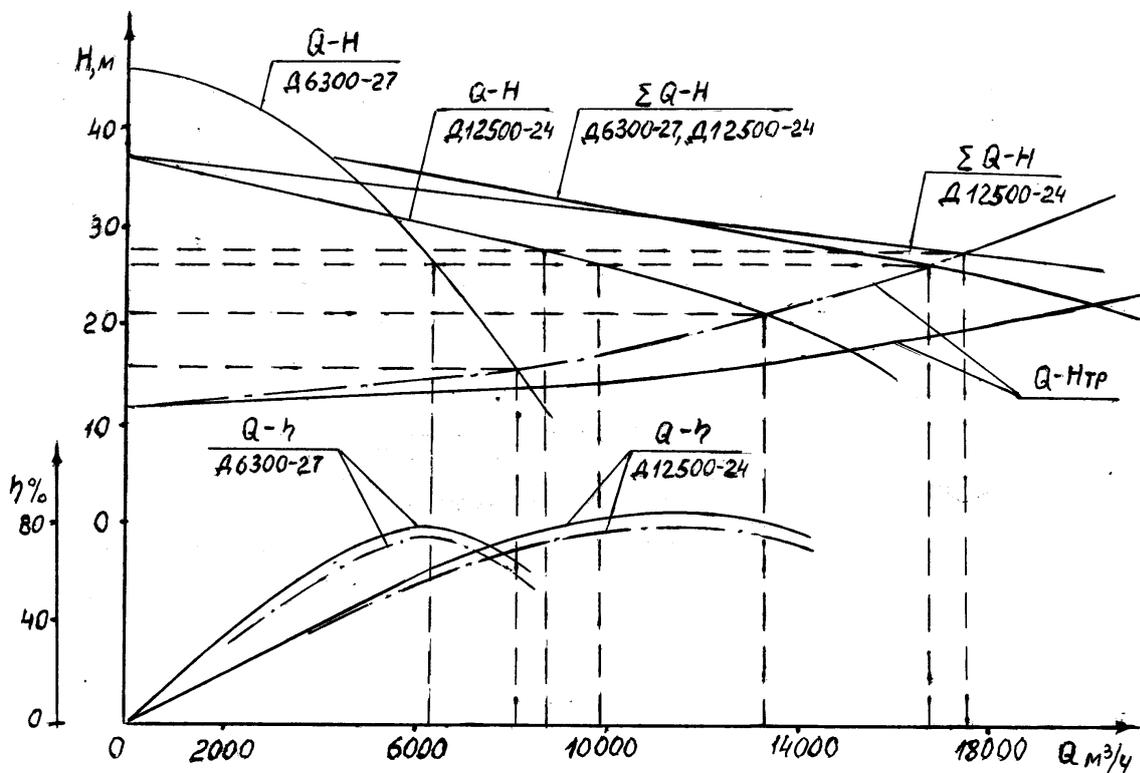


Рис. 19.4. Графо – аналитический расчет рабочих параметров насосов и напорной сети головной насосной станции

19.3. Расчет средневзвешенных величин КПД насосов и их приводных электродвигателей

С целью определения средневзвешенных величин КПД насосов и их приводных электродвигателей необходимо рассмотреть все режимы работы НА, которые имеют место на планируемый период функционирования НС в соответствии с ее графиком водоподачи.

1. Работа одного НА марки Д12500-24 с приводным электродвигателем типа СДН-15-39-12 в напорную сеть ($Q = 3,69 \text{ м}^3/\text{с}$, $H = 21,5 \text{ м}$, $\eta_H = 0,78$, $T = 3636 \text{ ч}$).

2. Два однотипных НА марки Д12500-24 работают в общую напорную сеть ($Q = 2,43 \text{ м}^3/\text{с}$, $H = 27,75 \text{ м}$, $\eta_H = 0,74$, $T = 48 \text{ ч}$).

3. Два разнотипных НА работают в общую напорную сеть ($Q_1 = 2,72 \text{ м}^3/\text{с}$, $H_1 = 26,1 \text{ м}$, $\eta_{H1} = 0,77$, $T_1 = 36 \text{ ч}$; $Q_2 = 1,75 \text{ м}^3/\text{с}$, $H_2 = 26,1 \text{ м}$, $\eta_{H2} = 0,76$, $T_2 = 36 \text{ ч}$).

4. Работа одного НА марки Д6300-27 с приводным электродвигателем типа СД2-85-57-8 в напорную сеть ($Q = 2,26 \text{ м}^3/\text{с}$, $H = 15,5 \text{ м}$, $\eta_H = 0,61$, $T = 5064 \text{ ч}$).

Значения величин КПД приводных электродвигателей в данных рассматриваемых режимах определяются в соответствии с соотношением (18.19) как:

$$\eta_{ЭД.n.i} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\eta_{ЭД.n.i.ном}} - 1 \right) * \frac{(K_{ЗАГ.n.i} + \frac{a_{ПОГ}}{K_{ЗАГ.n.i}})}{(1 + a_{ПОГ})}}$$

Результаты расчетов приводятся в таблице 19.7 показателей работы насосов и их приводных электродвигателей на планируемый период в составе НУ.

Таблица 19.7.

№ п/п	Подача Q , $\text{м}^3/\text{с}$	Напор H , м	КПД $\eta_{H.n.i}$	КПД $\eta_{ЭД.n.i}$	Время работы НА T , час	Объем воды W , тыс. м^3	Схема работы НА
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Насос марки Д12500-24							
1	3,69	21,5	0,78	0,94	3636	13416,84	1
2	2,43	27,75	0,74	0,936	48	2*419,904	2
3	2,72	26,1	0,77	0,937	36	352,512	2
1	2	3	4	5	6	7	8
2. Насос марки Д6300-27							
1	1,75	26,1	0,76	0,938	36	226,8	2
2	2,26	15,5	0,61	0,94	5064	41200,704	1

Средневзвешенные величины КПД насосов $\eta_{H,i}^{CP}$, работающих в свою напорную сеть, рассчитываются по выражению (18.10) следующим образом:

$$\eta_{H1}^{CP} = \frac{\eta_{H1.1} * Q_{1.1} * H_{1.1} * T_{1.1} + \eta_{H2.1} * Q_{2.1} * H_{2.1} * T_{2.1}}{Q_{1.1} * H_{1.1} * T_{1.1} + Q_{2.1} * H_{2.1} * T_{2.1}} =$$

$$= \frac{0,78 * 3,69 * 21,5 * 3636 + 0,74 * 2,43 * 27,75 * 48}{3,69 * 21,5 * 3636 + 2,43 * 27,75 * 48} = \frac{2273956092}{29169882} = 0,78$$

$$\eta_{H2}^{CP} = \frac{\eta_{H1.2} * Q_{1.2} * H_{1.2} * T_{1.2} + \eta_{H2.2} * Q_{2.2} * H_{2.2} * T_{2.2} + \eta_{H3.2} * Q_{3.2} * H_{3.2} * T_{3.2}}{Q_{1.2} * H_{1.2} * T_{1.2} + Q_{2.2} * H_{2.2} * T_{2.2} + Q_{3.2} * H_{3.2} * T_{3.2}} =$$

$$= \frac{0,77 * 2,72 * 26,1 * 36 + 0,76 * 1,75 * 26,1 * 36 + 0,61 * 2,26 * 15,5 * 5064}{2,72 * 26,1 * 36 + 1,75 * 26,1 * 36 + 2,26 * 15,5 * 5064} =$$

$$= \frac{111426,6374}{181591,932} = 0,614$$

Средневзвешенные величины КПД приводных электродвигателей $\eta_{ЭД,i}^{CP}$ насосных агрегатов, работающих в общую напорную сеть, определяется по соотношению (18.11) следующим образом:

$$\eta_{ЭД.1}^{CP} = \frac{\eta_{ЭД.1.1} * \frac{Q_{1.1} * H_{1.1} * T_{1.1}}{\eta_{H1.1}} + \eta_{ЭД.2.1} * \frac{Q_{2.1} * H_{2.1} * T_{2.1}}{\eta_{H2.1}}}{\frac{Q_{1.1} * H_{1.1} * T_{1.1}}{\eta_{H1.1}} + \frac{Q_{2.1} * H_{2.1} * T_{2.1}}{\eta_{H2.1}}} =$$

$$= \frac{0,94 * \frac{3,69 * 21,5 * 3636}{0,78} + 0,936 * \frac{2,43 * 27,75 * 48}{0,74}}{\frac{3,69 * 21,5 * 3636}{0,78} + \frac{2,43 * 27,75 * 48}{0,74}} = 0,94$$

$$\eta_{ЭД.2}^{CP} = \frac{\eta_{ЭД.1.2} * \frac{Q_{1.2} * H_{1.2} * T_{1.2}}{\eta_{H1.2}} + \eta_{ЭД.2.2} * \frac{Q_{2.2} * H_{2.2} * T_{2.2}}{\eta_{H2.2}} + \eta_{ЭД.3.2} * \frac{Q_{3.2} * H_{3.2} * T_{3.2}}{\eta_{H3.2}}}{\frac{Q_{1.2} * H_{1.2} * T_{1.2}}{\eta_{H1.2}} + \frac{Q_{2.2} * H_{2.2} * T_{2.2}}{\eta_{H2.2}} + \frac{Q_{3.2} * H_{3.2} * T_{3.2}}{\eta_{H3.2}}} =$$

$$= \frac{0,937 * \frac{2,72 * 26,1 * 36}{0,77} + 0,938 * \frac{1,75 * 26,1 * 36}{0,76} + 0,94 * \frac{2,26 * 15,5 * 5064}{0,61}}{\frac{2,72 * 26,1 * 36}{0,77} + \frac{1,75 * 26,1 * 36}{0,76} + \frac{2,26 * 15,5 * 5064}{0,61}} = 0,94$$

19.4. Расчет средневзвешенных величин КПД напорных трубопроводов

Средневзвешенные величины потерь напора в каждой из трубо-проводной сети рассчитываются в рабочих точках установившихся режимов функционирования НУ в соответствии с графиком эксплуатации НС, которые определяется как разность развиваемых величин напоров в рабочих режимных точках насосов и геометрической высоты подъема НС.

Средневзвешенные величины потерь напора $h_{E,i}^{CP}$, для каждого из эксплуатируемых напорных трубопроводов, определяются в соответствии с соотношением (18.16) как:

$$h_{E,1}^{CP} = \frac{h_{E,1.1} * Q_{1.1} * T_{1.1} + h_{E,2.1} * Q_{2.1} * T_{2.1}}{Q_{1.1} * T_{1.1} + Q_{2.1} * T_{2.1}} = \frac{9,7 * 3,69 * 3636 + 15,95 * 2,43 * 48}{3,69 * 3636 + 2,43 * 48} =$$

$$= \frac{132003,756}{13533,48} = 9,754 \text{ м}$$

$$h_{E,2}^{CP} = \frac{h_{E,2.1} * Q_{2.1} * T_{2.1} + h_{E,2.2} * Q_{2.2} * T_{2.2} + h_{E,2.3} * Q_{2.3} * T_{2.3}}{Q_{2.1} * T_{2.1} + Q_{2.2} * T_{2.2} + Q_{2.3} * T_{2.3}} =$$

$$= \frac{14,3 * 2,72 * 36 + 14,3 * 1,75 * 36 + 3,7 * 2,26 * 5064}{2,72 * 36 + 1,75 * 36 + 2,26 * 5064} = \frac{44646,324}{11605,56} = 3,847 \text{ м}$$

Тогда КПД каждого напорного трубопровода $\eta_{TP,i}$ рассчитывается в соответствии с выражения (18.15) следующим образом:

$$\eta_{TP,1} = \frac{H_{Г,1}}{H_{Г,1} + h_{E,1}^{CP}} = \frac{11,8}{11,8 + 9,754} = \frac{11,8}{21,554} = 0,55$$

$$\eta_{TP.2} = \frac{H_{\Gamma.2}}{H_{\Gamma.2} + h_{E.2}^{CP}} = \frac{11,8}{11,8 + 3,847} = \frac{11,8}{15,647} = 0,754$$

19.5. Определение нормы потребления электроэнергии головной насосной станцией

Индивидуальная норма расхода электроэнергии НУ $\Delta \mathcal{E}_{HV,i}^H$, с учетом того, что по данной НС $H_{\Gamma} = H_{\Gamma.1} = H_{\Gamma.2} = 16,8$ м, рассчитывается по выражению (18.9) следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E}_{HV.1}^H = \frac{2,724 * H_{\Gamma.1}}{\eta_{H.1}^{CP} * \eta_{ЭД.1}^{CP} * \eta_{TP.1}} = \frac{2,724 * 16,8}{0,78 * 0,94 * 0,55} = \frac{45,7632}{0,403} = 113,56 \text{ кВт} * \text{ч} / \text{тыс. м}^3$$

$$\Delta \mathcal{E}_{HV.2}^H = \frac{2,724 * H_{\Gamma.2}}{\eta_{H.2}^{CP} * \eta_{ЭД.2}^{CP} * \eta_{TP.2}} = \frac{2,724 * 16,8}{0,614 * 0,94 * 0,754} = \frac{32,1432}{0,4352} = 105,15 \text{ кВт} * \text{ч} / \text{тыс. м}^3$$

Из таблицы 19.6 и по выражению (18.26) определяем:

$$Q_{HV1.1} = 3,69 \text{ м}^3/\text{с}; \quad H_{HV1.1} = 21,5 \text{ м}; \quad W_{HV1.1} = 48300,624 \text{ тыс. м}^3$$

$$Q_{HV1.2} = 4,86 \text{ м}^3/\text{с}; \quad H_{HV1.2} = 27,75 \text{ м}; \quad W_{HV1.2} = 839,808 \text{ тыс. м}^3$$

$$Q_{HV2.1} = 2,26 \text{ м}^3/\text{с}; \quad H_{HV2.1} = 15,5 \text{ м}; \quad W_{HV2.1} = 41200,704 \text{ тыс. м}^3$$

$$Q_{HV2.2} = 4,47 \text{ м}^3/\text{с}; \quad H_{HV2.2} = 26,1 \text{ м}; \quad W_{HV2.2} = 579,312 \text{ тыс. м}^3$$

Средние значения напоров $H_{HV,\gamma}^{CP}$ развиваемых каждым из НУ в периоды работы НС рассчитывается в соответствии с формулой (18.22) как:

$$H_{HV.1}^{CP} = \frac{Q_{HV1.1} * H_{HV1.1} + Q_{HV1.2} * H_{HV1.2}}{Q_{HV1.1} + Q_{HV1.2}} = \frac{3,69 * 21,5 + 4,86 * 27,75}{3,69 + 4,86} =$$

$$= \frac{214,2}{8,55} = 25,05 \text{ м}$$

$$W_{HV.1} = W_{HV1.1} + W_{HV1.2} = 48300,624 + 839,808 = 49140,432 \text{ тыс. м}^3$$

$$H_{HV.2}^{CP} = \frac{Q_{HV2.1} * H_{HV2.1} + Q_{HV2.2} * H_{HV2.2}}{Q_{HV2.1} + Q_{HV2.2}} = \frac{2,26 * 15,5 + 4,47 * 26,1}{2,26 + 4,47} =$$

$$= \frac{151,697}{6,73} = 22,54 \text{ м}$$

$$W_{HV.2} = W_{HV2.1} + W_{HV2.2} = 579,312 + 41200,704 = 41780,016 \text{ тыс. м}^3$$

Объем перекачиваемой воды НС W_{HC} в интервале времени, T_{HC} могут быть определены следующим образом:

$$T_{HC} = T_{HV1.1} + T_{HV1.2} + T_{HV2.1} + T_{HV2.2} = 3636 + 24 + 5064 + 36 = 8760 \text{ час}$$

$$W_{HC} = W_{HV1} + W_{HV2} = 49140,432 + 41780,016 = 90920,447 \text{ тыс. м}^3$$

Групповая норма расхода электрической энергии для насосной станции определяется из соотношения (18.21) как:

$$\Delta \mathcal{E}_{HC}^{GP} = \frac{\Delta \mathcal{E}_{HV1}^H * W_{HV1} * H_{HV1}^{CP} + \Delta \mathcal{E}_{HV2}^H * W_{HV2} * H_{HV2}^{CP}}{W_{HV1} * H_{HV1}^{CP} + W_{HV2} * H_{HV2}^{CP}} =$$

$$= \frac{113,56 * 49140,432 * 25,05 + 105,15 * 41780,016 * 22,54}{49140,432 * 25,05 + 41780,016 * 22,54} = \frac{1115740697,92}{2172689,382} =$$

$$= 109,914 \text{ кВт*ч/тыс. м}^3$$

Индивидуальная технологическая норма расхода электроэнергии НС определяется по выражению (18.27) следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E}_{HC}^T = 1,03 * \Delta \mathcal{E}_{HC}^{GP} = 1,03 * 109,914 = 113,21 \text{ кВт*ч/тыс. м}^3$$

Индивидуальная общепроизводственная норма расхода электрической энергии для отдельно взятой водоподъемной насосной станции рассчитывается по выражению (18.28) как:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_{HC}^{ОБЩ} &= \Delta \mathcal{E}_{HC}^T + \frac{\Delta \mathcal{E}_C}{W_{HV1} * H_{HV1}^{CP} + W_{HV2} * H_{HV2}^{CP} + \dots + W_{HV,\gamma} * H_{HV,\gamma}^{CP}} = \\ &= 113,21 + \frac{81425,56}{49140,432 * 25,05 + 41780,016 * 22,54} = 113,21 + \frac{81425,56}{2172689,382} = \\ &= 113,25 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{тыс. м}^3 \end{aligned}$$

Общие потери электроэнергии по предприятию за расчетный период (кВт·ч) определяется как сумма потерь в основных элементах системы электроснабжения, т.е.

$$\Delta \mathcal{E}_C = \sum_1^n \Delta \mathcal{E}_л + \Delta \mathcal{E}_{mp} = 70028,39 + 11397,17 = 81425,56 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

где

$$\sum_1^n \Delta \mathcal{E}_л, \sum_1^n \Delta \mathcal{E}_{mp} - \text{суммарные потери электроэнергии соответственно в}$$

воздушных (кабельных) линиях, трансформаторах,
кВт·ч.

а) Потери энергии в воздушных и кабельных линиях определяются по выражения:

$$\Delta \mathcal{E}_л = \Delta P_л * T_p = 94,12 * 744 = 70028,39 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где T_p – продолжительность работы линии за расчетный период, ч;

$\Delta P_л$ – потери мощности в линиях (кВт), определяемые как:

$$\Delta P_л = 1,1 \cdot n \cdot I^2 \cdot R \cdot 10^{-3} = 1,1 * 3 * 110^2 * 7,42 * 10^{-3} = 94,12,$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий сопротивление переходных контактов, скрутку жил и способ прокладки линий;

n – число фаз линии;

I – расчетный ток линии, А;

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0,26 \frac{1000}{35} = 7,42$$

R – активное сопротивление провода или жилы кабеля, Ом;

ρ – удельное сопротивление материала провода при 20°C (для алюминия – 0,26-0,29; для меди – 0,0175-0,018, для стали – 0,10-0,14 Ом мм²/м);

L – длина линии, м;

S – сечение проводника, мм²;

При известных значениях потерь электроэнергии в отдельных линиях $\Delta \mathcal{E}_{л1}, \Delta \mathcal{E}_{л2}, \dots, \Delta \mathcal{E}_{лn}$, суммарные потери определяются как:

$$\sum_1^n \Delta \mathcal{E}_{л} = \Delta \mathcal{E}_{л1} + \Delta \mathcal{E}_{л2} + \dots + \Delta \mathcal{E}_{лn}.$$

б) Потери энергии в двухобмоточном трансформаторе определяются из выражения:

$$\Delta \mathcal{E}_{mp} = \Delta P'_x \cdot T_n + \beta^2 \cdot \Delta P'_\kappa \cdot T_p,$$

$$\Delta P'_x = \Delta P_x + K_\vartheta \cdot \Delta Q_x = 2,45 + 0,15 * 28 = 6,65$$

$$\Delta P'_\kappa = \Delta P_\kappa + K_\vartheta \cdot \Delta Q_\kappa = 12,2 + 0,15 * 55 = 20,52$$

$\Delta P'_x$ – приведенные потери мощности холостого хода, кВт;

$\Delta P'_\kappa$ – приведенные потери мощности короткого замыкания, кВт;

ΔP_x – потери холостого хода при номинальном напряжении (по паспорту) – 2,45 кВт;

ΔP_κ – потери короткого замыкания при номинальной нагрузке (по паспорту) – 12,2 кВт;

$$\beta = \frac{S_{\phi}}{S_{ном}} = \frac{1,73 * I_{\phi} * U}{1000} = \frac{1,73 * 65 * 6}{1000} = 0,67$$

β - коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению фактической нагрузки трансформатора к его номинальной мощности;

$$\Delta Q_x = s_{ном} \frac{I_x}{100} - \text{реактивные потери холостого хода трансформатора, квар;}$$

I_x - ток холостого хода трансформатора, % ;

$$\Delta Q_x = s_{ном} \frac{U_x}{100} - \text{реактивные потери короткого замыкания}$$

трансформатора, квар;

U_k - напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

K_3 - коэффициент изменения потерь (кВт/квар);

T_n - полное число часов трансформатора, которое принимается в январе, марте, июле, августе, октябре, декабре равным 744 ч; в апреле, июне, сентябре, ноябре – 720 ч; в феврале – 672 ч (для високосного года 696 ч);

T_p - число часов работы трансформатора с номинальной нагрузкой, принимающейся равной для предприятий, работающих в одну смену – 200 ч, в две смены – 450 ч, в три смены – 700 ч и в месяц.

20. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОДОПОДАЧИ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ НАСОСНОГО АГРЕГАТА

20.1. Формирование энергосберегающей режимной карты функционирования насосной станции

В работе рассматривается задача формирования рациональной энергосберегающей режимной карты функционирования НС СМВ. Эта задача рассмотрена на примере эксплуатации головной НС «Хамза-1» Аму-Бухарского машинного канала.

Насосная станция «Хамза-1» оборудована девятью центробежными насосами типа 56В-17 вертикального исполнения со следующими техническими характеристиками приведенными в таблице 20.1.

Таблица 20.1.

Технические характеристики центробежного насоса

Тип насоса	Подача <i>м³/с</i>	Напор <i>м</i>	Частота вращения <i>об/мин</i>	КПД %	Диаметр рабочего колеса, <i>мм</i>
56В-17	8,6	56,5	375	85	1920

Насосные агрегаты насосной станции «Хамза-1» подают воду в два напорных водовода (НВ) протяженностью 752 м, диаметром 3,6 м и высотой подъема 48 м. При этом, на каждый из НВ работает по четыре НА, конструктивно объединенных в насосную установку. При чем, конструктивное схемное решение напорных трубопроводов НС позволяет одному из НА подключаться на совместную параллельную работу как в первый, так и во второй НВ. Приводом насоса 56В-17 является вертикальный синхронный двигатель (СД) типа ВДС 325/44-18 с следующими техническими характеристиками, приведенными в таблице 20.2.

Таблица 20.2.

Технические характеристики электродвигателя

Тип	Мощность <i>кВт</i>	Напряжение <i>В</i>	Ток <i>А</i>	Частота вращения <i>об/мин</i>	КПД <i>%</i>	Ротор		$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{max}}{M}$
						Ток <i>А</i>	Напряжение <i>В</i>			
ВДС 325/ 44-18	5000	6000	566	333	95,3	367	142	4,4	0,32	1,8

С целью эффективного использования энергетических ресурсов рассмотрим условие формирования, технически обоснованной и достаточно приближенной к оптимальному варианту, режимной карты насосной станции «Хамза-1» на основе выше разработанной модели НУ [27].

Возможное число комбинаций функционирования НА по НС при работе в составе двух НУ, в каждую из которых конструктивно объединено на совместную параллельную работу по несколько насосов, укомплектованных рабочими колесами установленных геометрических размеров и частотой вращения равной номинальным оборотам приводного электродвигателя НА, может быть определено по следующему выражению:

$$K_{НФ} = K_{НФ1} + K_{НФ2} + \dots + K_{НФ\rho} , \quad (20.1)$$

где

$$K_{НФ1} = \frac{\left(K_{НА} - \sum_{i=2}^{\rho} K_{НВ.i} \right)}{\left(K_P - \sum_{i=2}^{\rho} K_{P.i} \right) ! * \left[\left(K_{НА} - \sum_{i=2}^{\rho} K_{НВ.i} \right) - \left(K_P - \sum_{i=2}^{\rho} K_{P.i} \right) \right] !} ; \quad (20.2)$$

$$K_{НФ2} = \frac{\left(K_{НА} - K_{НВ1} - \sum_{i=3}^{\rho} K_{НВ.i} \right)}{\left(K_P - K_{P1} - \sum_{i=3}^{\rho} K_{P.i} \right) ! * \left[\left(K_{НА} - K_{НВ1} - \sum_{i=3}^{\rho} K_{НВ.i} \right) - \left(K_P - K_{P1} - \sum_{i=3}^{\rho} K_{P.i} \right) \right] !} ; \quad (20.3)$$

$$K_{H\Phi,3} = \frac{\left(K_{HA} - K_{HB,1} - K_{HB,2} - \sum_{i=4}^{\rho} K_{HB,i} \right)!}{\left(K_P - K_{P1} - K_{P2} - \sum_{i=4}^{\rho} K_{P,i} \right)! * \left[\left(K_{HA} - K_{HB,1} - K_{HB,2} - \sum_{i=4}^{\rho} K_{HB,i} \right) - \left(K_P - K_{P1} - K_{P2} - \sum_{i=4}^{\rho} K_{P,i} \right) \right]!}; \quad (20.4)$$

$$K_{H\Phi\rho} = \frac{\left(K_{HA} - \sum_{i=(\rho-1)}^{\rho} K_{HB,i} \right)!}{\left(K_P - \sum_{i=(\rho-1)}^{\rho} K_{P,i} \right)! * \left[\left(K_{HA} - \sum_{i=(\rho-1)}^{\rho} K_{HB,i} \right) - \left(K_P - \sum_{i=(\rho-1)}^{\rho} K_{P,i} \right) \right]!}; \quad (20.5)$$

K_{HA} - общее количество НА, эксплуатируемых на насосной станции;

ρ - общее количество напорных водоводов (НВ); $i = 1, 2, \dots, \rho$; i

K_{HB1} - количество НА конструктивно объединенных в первый напорный водовод (НВ1);

K_{HB2} - количество НА конструктивно, объединенных во второй напорный водовод (НВ2);

$K_{HB,i}$ - количество НА конструктивно, объединенных в i -тый напорный водовод (НВ i);

K_P - общее количество НА эксплуатируемых на НС;

K_{P1} - количество НА подключенных на совместную работу в НВ1;

K_{P2} - количество НА подключенных на совместную работу в НВ2;

$K_{P,i}$ - количество НА подключенных на совместную работу в НВ i .

Для каждого из выявленного числа комбинаций функционирования НУ, с учетом поддержания уровня нижнего бьефа в зоне приближенной к оптимальному значению, времени наработки НА порядка 800 часов, температуры окружающей среды в здании НС не превышающей допустимые пределы и плотности перекачиваемой воды $\gamma = 9806,65 \text{ кг/м}^3$, рассчитаны, в соответствии с методикой [17] и основные вычисленные показатели приведены в таблице 20.3.

Таблица 20.3.

Результаты расчета основных показателей насосной станции «Хамза-1»

№ п/п	Количество функционирующих НА (K_P)	Число комбинаций НА объединенных в НУ		Подача насосной станции Q (m^3/c)	Суммарная потребляемая мощность P (кВт)	Удельный расход электроэнергии $\Delta \mathcal{E}$ (кВт*час/ млн. m^3 * м)
		НВ1 (K_{P1})	НВ2 (K_{P2})			
1.	1	1	0	7,829	4444,8	3390,76
2.	1	0	1	7,829	4444,8	3390,76
3.	2	2	0	15,48	8855,2	3391,34
4.	2	0	2	15,48	8855,2	3391,34
5.	2	1	1	15,658	8889,6	3390,76
6.	3	3	0	22,863	13212,3	3393,31
7.	3	0	3	22,863	13212,3	3393,31
8.	3	2	1	23,309	13300,0	3391,03
9.	3	1	2	23,309	13300,0	3391,03
10.	4	4	0	29,9	17501,2	3397,57
11.	4	0	4	29,9	17501,2	3397,57
12.	4	3	1	30,692	17657,1	3392,23
13.	4	1	3	30,692	17657,1	3392,23
14.	4	2	2	30,96	17710,4	3391,34
15.	5	5	0	36,545	21709,5	3404,93
16.	5	0	5	36,545	21709,5	3404,93
17.	5	4	1	37,729	21946,0	3395,14
18.	5	1	4	37,729	21946,0	3395,14
19.	5	3	2	38,343	22067,5	3392,14
20.	5	2	3	38,343	22067,5	3392,14
21.	6	5	1	44,374	26154,3	3400,55
22.	6	1	5	44,374	26154,3	3400,55
23.	6	4	2	45,38	26356,4	3394,30
24.	6	2	4	45,38	26356,4	3394,30
25.	6	3	3	45,726	26424,6	3393,31
26.	7	5	2	52,025	30564,7	3398,52
27.	7	2	5	52,025	30564,7	3398,52
28.	7	4	3	52,763	30713,5	3394,92
29.	7	3	4	52,763	30713,5	3394,92
30.	8	5	3	59,408	34921,8	3398,30
31.	8	3	5	59,408	34921,8	3398,30
32.	8	4	4	59,8	35002,4	3397,57
33.	9	5	4	66,445	39210,7	3400,24
34.	9	4	5	66,445	39210,7	3400,24

На рис. 20.1 и рис. 20.2 приведены зависимости поагрегатного регулирования производительности (подачи) НС: изменения подач (Q), потребляемых мощностей (P) приводными СД и удельных расходов электроэнергии ($\Delta \text{Э}$) от числа и сочетания состава комбинаций, функционирующих НА в составе НУ, объединенных на совместную параллельную работу в НВ.

Из графика рис. 20.1 видно, что, на каждой из ступени поагрегатного регулирования производительности НС, ее подача (Q) в зависимости от числа и комбинации состава функционирующих K_{P1} и K_{P2} увеличивается в интервале от 0,2% до 5%, тогда как потребляемая, при этом, приводными СД мощность (P) растет в пределах 0,2% - 1,5%, т.е. она возрастает незначительно.

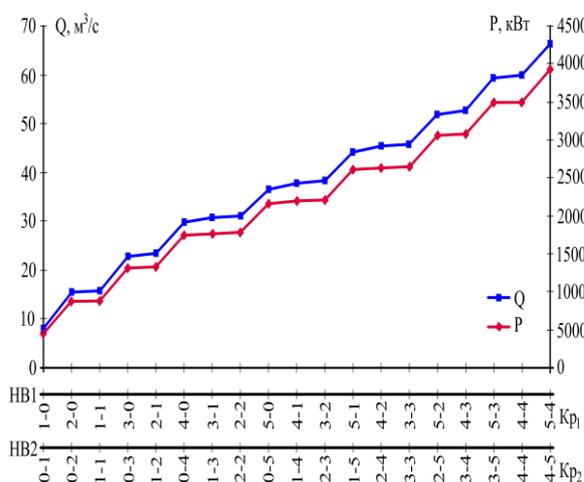


Рис. 20.1. Изменение подачи и потребляемой мощности насосными агрегатами при поагрегатном регулировании производительности насосной станции «Хамза-1»

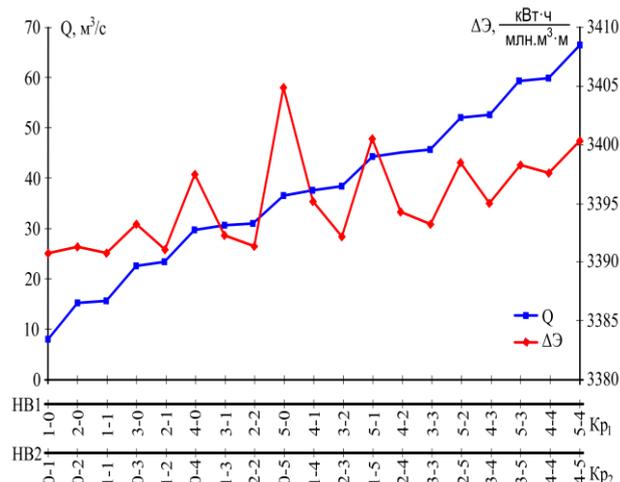


Рис. 20.2. Изменение подачи и удельного расхода электроэнергии насосных агрегатов при поагрегатном регулировании производительности насосной станции «Хамза-1»

Касательно графика рис. 20.2 следует отметить, что на каждой из ступени по агрегатного регулирования производительности НС, при условии обеспечения максимальной подачи на данной ступени регулирования в зависимости от распределения НА по НВ, можно достигнуть обеспечения наименьшего значения удельного расхода электроэнергии НС путем корректного выбора числа и состава комбинаций последовательного подключе-

ния на совместную параллельную работу НА по каждому из НВ.

Следовательно, для каждой конкретной НС СМВ, с целью обеспечения оптимального функционирования НА, объединенных на совместную параллельную работу в несколько НВ, необходимо определять наиболее рациональную последовательность числа и комбинаций состава НА подключаемых на работу, т.е. формировать энергосберегающую режимную карту функционирования НС.

В результате формирования энергосберегающей режимной карты водоподачи НС СМВ, нами установлено, что, при заданном количестве функционирующих НА K_{P1} и K_{P2} , целесообразно осуществлять поагрегатное регулирование производительности НС посредством пропорционально – равного распределения общей подачи НС по двум напорным водоводам, чем обеспечивается максимальная подача и минимальный удельный расход электроэнергии на данной ступени регулирования. При этом, в соответствии с рекомендациями [25], для определения рациональной последовательности подключения НА конструктивно объединенных на совместную параллельную работу, следует учитывать, что наиболее экономичными, с точки зрения снижения потерь напора в месте соединения индивидуальных (подводящих) напорных трубопроводов в общий НВ и затрат мощности на их преодоление, являются такие режимы, когда на каждый из НВ изначально работают средние (центральные) 2-3 или же 5-6 НА.

На основании проведенного сопоставительного анализа и результатов обработки расчетных показателей поагрегатного регулирования производительности НС «Хамза-1» сформирована энергосберегающая режимная карта водоподачи (рис. 20.3), в которой в зависимости от общего количества функционирующих НА, комбинаций состава и их сочетаний на каждой из ступени поагрегатного регулирования Q определены максимально приближенные к оптимальным значениям подачи НА и их экономический показатель – удельный расход электроэнергии [7].

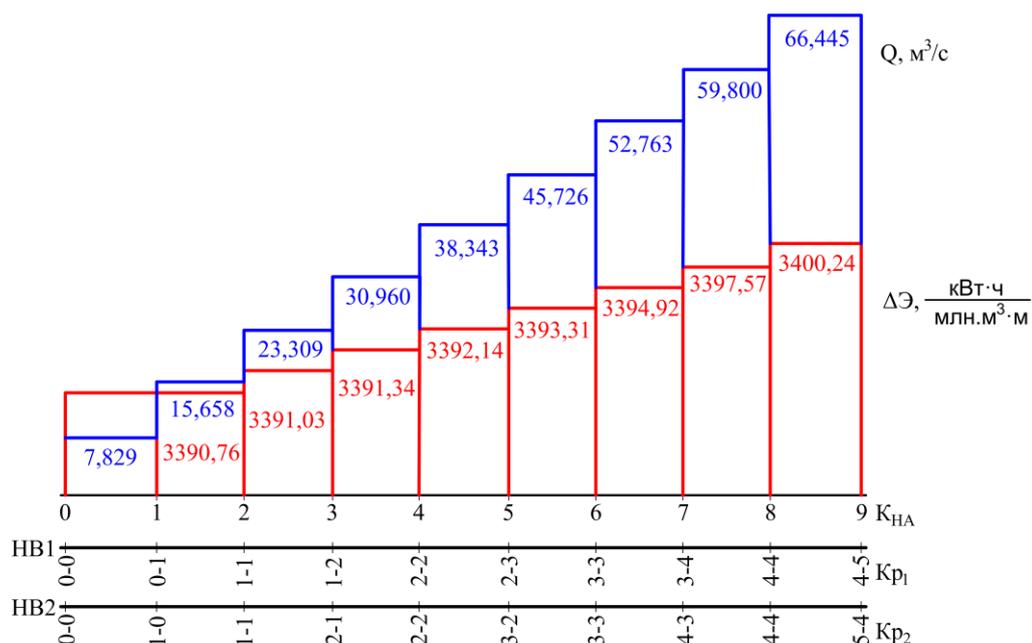


Рис. 20.3. Энергосберегающая режимная карта водоподачи НС «Хамза-1»

Из графика (рис. 20.3), при сформированном варианте энергосберегающей режимной карты водоподачи, можно установить, что с ростом производительности НС «Хамза-1» с $7,829 \text{ м}^3/\text{с}$ до $66,445 \text{ м}^3/\text{с}$ (т. е. 8,5 раза) и потребляемых мощностей приводными СД центробежных насосов с $4444,8 \text{ кВт}$ до $39210,7 \text{ кВт}$ (т. е. 8,8 раза) удельный расход ее электроэнергии возрос на 2,8%, тогда как в рабочей зоне, без учета резервного – 9 НА, при необходимости, подключаемого на совместную параллельную работу в первый или во второй НВ, удельный расход электроэнергии по НС увеличивается всего лишь на 2%.

Таким образом, на насосных станциях систем машинного водоподъема, оснащенных несколькими НА конструктивно объединенными на совместную параллельную работу в общие НВ, по агрегатное регулирование производительности НС в соответствии с заданным ее графиком водоподачи, целесообразно осуществлять посредством пропорционально - равного распределения общей подачи НС, на данной ступени регулирования, по разным напорным водоводам, чем обеспечивается максимальная подача и минимальный удельный расход электроэнергии в целом по НС. Наряду с этим, при определении рациональной последовательности подключения в работу НА,

следует в каждом из НВ, с точки зрения обеспечения экономичного режима, равномерности загрузки и износа НА в процессе их эксплуатации, изначально задействовать средний (центральный) НА, когда $K_{НВ}$ - нечетно, и боковые НА, когда $K_{НВ}$ - четно.

20.2. Влияние колебаний уровней горизонта воды на энерго – ресурсосберегающие режимы работы насосных агрегатов

Насосные станции (НС) систем машинного водоподъема (СМВ) относятся к одним из наиболее энергоемких объектов отраслей экономики Республики Узбекистан. В связи с чем, обеспечение энерго – ресурсосберегающих режимов их функционирования является важной задачей, решение которой позволит экономить при реализации технологического процесса водоподдачи насосных агрегатов (НА) значительное количество как водных ресурсов, так и электрической энергии, которое в масштабе республики может составить порядка 15 – 18% от потребляемой НС СМВ.

На оросительных НС СМВ за сезонный период их эксплуатации наблюдается периодическое изменение одного из определяющих технологических параметров – уровней бьефов воды ($\nabla_{НВ}$ – нижний уровень, $\nabla_{ВВ}$ – верхний уровень) в водозаборном и водовыпускном сооружениях НС. Последние в значительной степени зависят от гидрогеологических режимов функционирования водоисточника, подводящих и отводящих каналов СМВ, а также режимов водопотребления орошаемых массивов сельскохозяйственных посевных культур.

К основным гидравлическим режимам [9] при их эксплуатации можно отнести: равномерный, поддержание уровней воды нижнего и верхнего бьефов с перетекающими объемами, которые не должны допускать заиляемость каналов, перелив воды через гидротехнические сооружения при

внезапных вынужденных остановках НА, обеспечивать безкавитационную работу и установленный режим функционирования НА.

Рассмотрим режим работы НА в условиях изменения уровней горизонтов воды в нижнем и верхнем бьефах НС СМВ, основываясь на известный [14] графоаналитический метод построения рабочих характеристик центробежного насоса и напорной трубопроводной сети.

На рис. 20. 4 приведены расходно-напорная ($Q - H$), расходно-мощностная ($Q - P_M$) и расходно-КПД ($Q - \eta$) характеристики центробежного насоса (марки 450 Д90), а также кривая напорного трубопровода H_{TP} при статическом напоре H_{CT} . Точка A пересечения $Q - H$ характеристики центробежного насоса с кривой H_{TP} соответствуют режиму работы системы «насос - напорная сеть» с координатами, удовлетворяющими требуемой подаче Q_A , развиваемому напору H_A , мощности P_{MA} и КПД η_A .

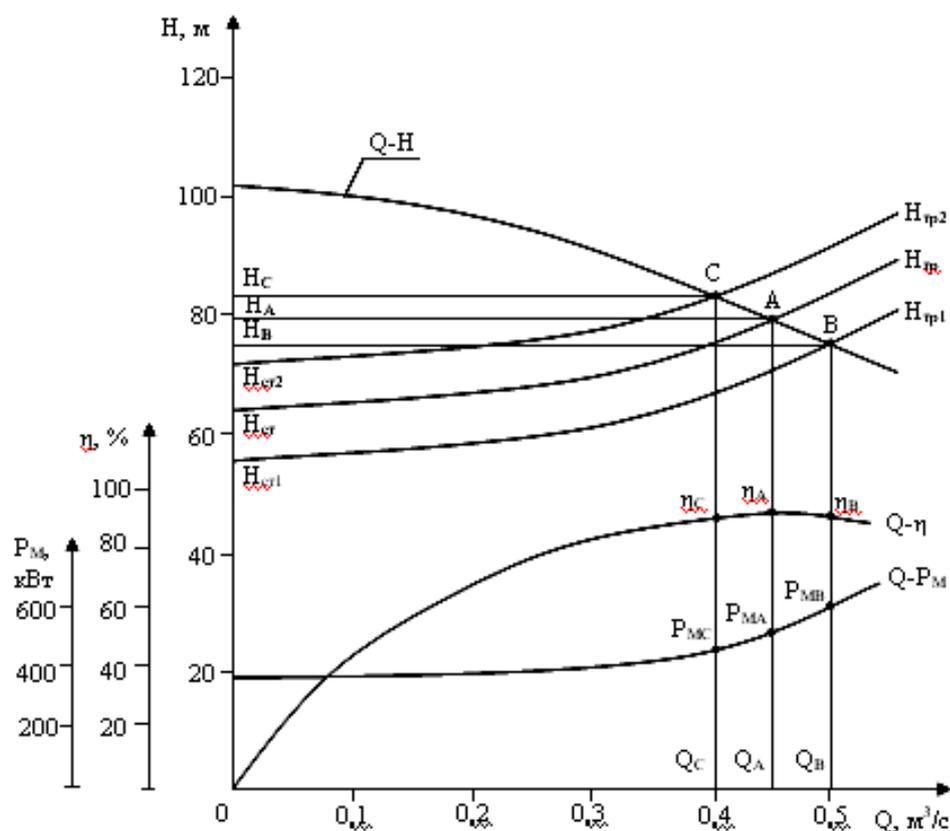


Рис. 20.4. Влияние изменения уровней горизонтов воды в бьефах насосной станции на режимы работы системы «насос – напорная сеть»

Периодические изменения уровня воды в подводящем канале, а следовательно и в водозаборном сооружении НС СМВ, как и изменения ее в водовыпуске, оказывают влияние на режим работы НА. Очевидно, что потери напора в трубопроводе (напорной сети) НА при обеспечении ею соответствующей подачи практически остаются постоянными. Анализ уравнения характеристики напорной сети [7] показывает, что H_{CT} есть координата вершины квадратичной параболы при подаче $Q = 0$. Значит, при уменьшении величины H_{CT} также уменьшается координата вершины характеристики напорной сети на величину роста уровня воды в нижнем бьефе или же - ее снижения в верхнем бьефе НС.

Следовательно, с ростом уровня воды $\nabla_{НБ}$ в водозаборном сооружении НС (или ее снижения $\nabla_{ВБ}$ в водовыпуске) статический напор H_{CT} , равный разности их отметок уровней свободных поверхностей воды ($H_{CT} = \nabla_{ВБ} - \nabla_{НБ}$), будет уменьшаться $H_{CT1} < H_{CT}$. При этом режим работы системы «насос - напорная сеть» будет характеризоваться новой режимной точкой B с координатами Q_B, H_B, P_{MB}, η_B , в которой развиваемый центробежным насосом напор уменьшается, подача и мощность на валу НА увеличиваются, а КПД – снижается. Увеличение подачи НА с ростом горизонта воды в $\nabla_{НБ}$ вызывает в целом возрастание производительности по НС, что обуславливает возникновения несоответствия в графиках водопотребления и ее покрытия, приводя к перерасходу водных ресурсов со всеми вытекающими отсюда негативными последствиями. Другими нежелательными факторами являются снижение КПД НА, возрастание потребляемой им мощности, приводящее как к перегрузке приводного электродвигателя и в ряде случаев его нагреву выше допустимой температуры, так и снижению энергоэффективности НС и как следствие к увеличению удельных затрат электроэнергии.

При снижении же уровня воды $\nabla_{НБ}$ в водозаборном сооружении (или с ее ростом $\nabla_{ВБ}$ в водовыпускном устройстве) НС статический напор будет

увеличиваться на величину понижения уровня воды, то есть $H_{CT2} > H_{CT}$. В этом случае режим работы системы «насос – напорная сеть» характеризуется другой режимной точкой C , имеющей координаты Q_C, H_C, P_{MC}, η_C . Следовательно, со снижением горизонта воды в ∇_{HB} (или ее возрастанием ∇_{BB}) напор, развиваемый центробежным насосом, увеличивается, подача и потребляемая им мощность уменьшаются при практически сохраняющемся значении его КПД. Уменьшение подачи НА приводит в целом, к отклонению покрывающего графика водоподачи НС в сторону ее занижения. Работа НС на данной ступени графика с прежним числом НА может способствовать дальнейшему возрастанию разности отметок уровней свободных поверхностей воды в водозаборном сооружении и водовыпуска НС, что в последующем вызовет вынужденный переход НА на работу в другую режимную точку с уменьшенной подачей, ухудшенным значением КПД и допустимой высотой всасывания центробежного насоса.

С целью анализа влияния изменения уровней горизонтов воды в водозаборном и водовыпускном сооружениях НС СМВ на энерго – ресурсосберегающие режимы работы НА, нами на конкретном примере головной НС Аму-Бухарского машинного канала «Хамза-1» с учетом реальных технических характеристик гидромеханического и электросилового оборудования: центробежного насоса марки 56В-17; приводного синхронного электродвигателя типа ВДС 325/44-18; геометрических размеров по всей длине напорной сети, включая всасывающий, коммуникационный, подводящий и общий напорные трубопроводы, а также величин потерь напора в местных сопротивлениях (напорных задвижках, обратных клапанах, мест плавного поворота, постепенного расширения или сужения и др.), в соответствии с разработанной математической моделью и методикой [5] рассчитаны основные рабочие параметры НА насосной станции «Хамза-1», которые приведены в таблице 20.4.

Таблица 20.4.

Результаты расчета параметров насосного агрегата при изменении уровней бьефов у насосной станции «Хамза-1»

№ п/п	Разность уровней бьефов $H_{ст}$, м	Подача НА Q , $м^3/с$	Напор НА H , м	КПД НА η	Мощность НА P , кВт	Удельный расход электроэнергии НА $\Delta \mathcal{E}$, кВт*ч/млн.м ³ *м
1.	47,0	8,413	47,26	0,844	4321,75	3403,55
2.	48,0	8,188	48,24	0,847	4281,42	3394,01
3.	49,0	7,957	49,23	0,848	4239,19	3389,40
4.	49,5	7,839	49,72	0,848	4217,30	3389,05
5.	50,0	7,719	50,22	0,848	4194,85	3390,06
6.	51,0	7,473	51,20	0,847	4148,15	3396,45
7.	52,0	7,219	52,19	0,844	4098,79	3409,17

На рис. 20.5 приведены зависимости изменения подачи, напора, КПД, потребляемой мощности НА и удельного расхода его электроэнергии от снижения горизонта поверхности воды в водозаборном сооружении НС

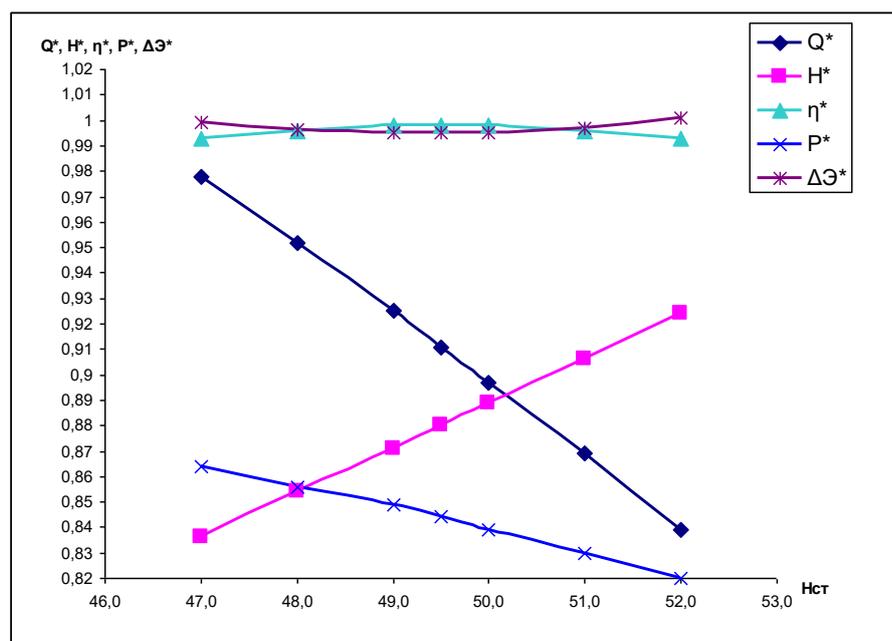


Рис. 20.5. Влияние изменений уровней бьефов насосной станции «Хамза-1» на основные параметры его насосного агрегата

СМВ, т. е. возрастания H_{CT} , выраженных в относительных единицах ($Q^* = Q/Q_H$, $H^* = H/H_H$, $\eta^* = \eta/\eta_{HAC_H} * \eta_{ДВ_H}$, $P^* = P/P_H$, $\Delta\mathcal{E}^* = \Delta\mathcal{E}/\Delta\mathcal{E}_T$), где $\Delta\mathcal{E}_T$ – теоретический удельный расход электроэнергии подаваемой воды НА на высоту один метр водяного столба [6], позволяющих определить наиболее рациональный диапазон поддержания уровня нижнего бьефа НС.

Из графика рис. 20.5 видно, что для НС «Хамза-1» наиболее предпочтительной является разность в уровнях бьефов $H_{CT} = 49,5$ м, при которой обеспечивается работа НА с наименьшим удельным расходом электроэнергии. Наряду с этим, можно считать, что в указанной окрестности $H_{CT} \pm 0,35$ м также будет соответствовать допустимому диапазону поддержания уровней бьефов НС СМВ.

Очевидно, исходя из реальных эксплуатационных и технических характеристик гидромеханического и электросилового оборудования, для каждой НС СМВ следует определять оптимальный и минимально-допустимый диапазоны уровней колебания бьефов с целью обеспечения энерго – ресурсосберегающих режимов функционирования НА.

На основании изложенного следует считать неоспоримым, что обеспечение эффективной работы НА и достижение желаемых значений параметров их гидросилового оборудования можно получить за счет управления H_{CT} посредством поддержания уровней бьефов $\nabla_{НБ}$ и $\nabla_{ВБ}$ в заданных пределах, а также путем надлежащего регулирования подачи НА, следовательно, и производительности НС с целью максимального обеспечения совмещения графиков водопотребления и их покрытий. Последние может быть обеспечено сочетанием числа работающих центробежных насосов (поагрегатное регулирование) в комбинации с плавным управлением подачи одного или группы НА, способных удовлетворить наиболее потребный режим производительности НС СМВ и улучшить ее энергетические показатели.

20.3. Степень влияния ряда факторов на энергоэффективность работы насосной установки

Исследование степени влияния на энерго – и ресурсосберегающие режимы работы НА в ходе технологического процесса водоподачи НС при изменении конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров НУ, осуществлено с учетом реальных фактических характеристик гидромеханического и электромеханического оборудования, геометрических размеров и потерь напора в местных сопротивлениях, по всей длине напорной сети, включая всасывающий, коммуникационный, подводящий и общий напорные трубопроводы, в соответствии с разработанной нами методологией, математическими моделями и алгоритмами расчетов [8, 16]. В связи с чем, приводятся расчеты, графики основных рабочих режимных параметров НА головной НС «Хамза-1» Аму-Бухарского машинного канала при изменениях, в ходе процесса водоподачи, конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров НУ, анализ этих факторов и оценка степени их влияния на энергоэффективность функционирования НА.

Соответствующие результаты расчетов, сведены в таблицы 20.5 - 20.9. На графиках изображены кривые подачи, напора, КПД, потребляемой мощности НА и его удельного расхода электроэнергии, в зависимости от изменения отдельных конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров НУ. Основные параметры НА приводятся в относительных единицах ($Q^* = Q/Q_H$, $H^* = H/H_H$, $\eta_{НАС}^* = \eta_{НАС} / \eta_{НАС_H}$, $\eta_{ДВ}^* = \eta_{ДВ} / \eta_{ДВ_H}$, $P^* = P/P_H$, $\Delta \mathcal{E}^* = \Delta \mathcal{E} / \Delta \mathcal{E}_T$), где $\Delta \mathcal{E}_T$ – теоретический удельный расход ЭЭ подаваемой воды НА [6].

Из графика (рис. 20.6) следует, что с подключением на совместную параллельную работу последующего НА, в составе НУ, происходит незначительное увеличение их удельных расходов ЭЭ. При этом неизменно сохраняются величины КПД приводных электродвигателей, несколько снижаются величины КПД у каждого из функционирующих насосов с

увеличением развиваемого ими напора при уменьшении подачи и потребляемой мощности НА.

Таблица 20.5.

Результаты расчета параметров НА с ростом их числа подключения на совместную параллельную работу в составе НУ

№ п/п	Число параллельно работающих НА, N , нас.	Подача Q , $\text{м}^3/\text{с}$	Напор H , м	КПД $\eta_{\text{нас.}}$	КПД $\eta_{\text{дв.}}$	Мощность $P_{\text{пол}}$, кВт	Удельный расход ЭЭ $\Delta \text{Э}$, кВт * ч/1 млн. * м^3 * м
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	1	7,829	49,72	0,847	0,948	4444,8	3390,8
2.	2	7,740	50,08	0,847	0,948	4427,6	3391,3
3.	3	7,621	50,57	0,846	0,948	4404,1	3393,3
4.	4	7,475	51,15	0,845	0,948	4375,3	3397,6
5.	5	7,309	51,80	0,844	0,948	4341,9	3404,9

Таким образом, с ростом числа одновременно функционирующих насосов в составе НУ сопровождается увеличением удельного расхода ЭЭ до 0,5% каждого из НА.

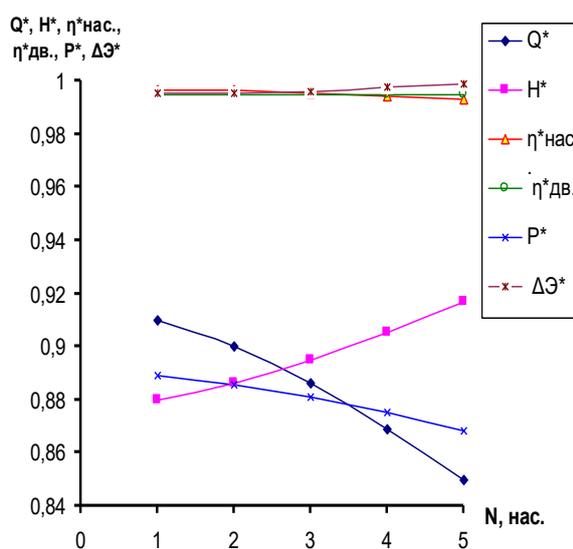


Рис. 20.6. Влияние на основные параметры насосного агрегата увеличения числа функционирующих насосов в составе насосной установки

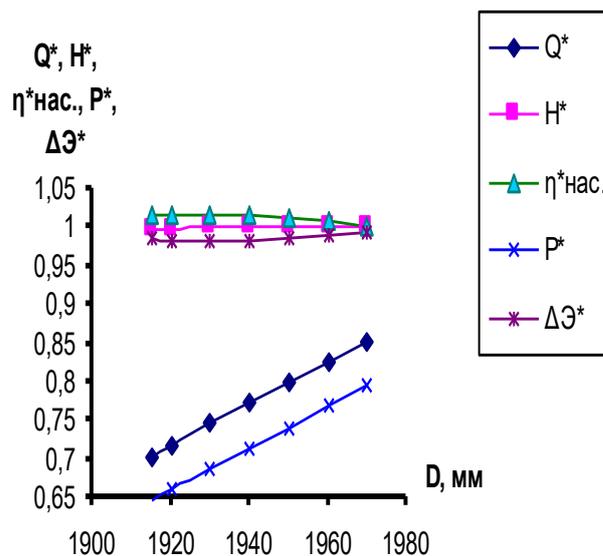


Рис. 20.7. Влияние на основные параметры насосного агрегата изменения геометрических размеров рабочего колеса центробежного насоса

Из графика (рис. 20.7) видно, что в интервале, изменения геометрических размеров рабочего колеса центробежного насоса типа 56В-17 его КПД и развиваемый им напор практически сохраняются почти неизменными.

При этом, обеспечивается наименьшая величина удельного расхода ЭЭ при сопровождающемся росте подачи и потребляемой мощности НА.

Таблица 20.6.

Результаты расчета параметров НА при фиксированном изменении геометрии рабочего колеса насоса по внешнему его диаметру

№ п/п	Диаметр рабочего колеса D_f , мм	Подача Q , м ³ /с	Напор H , м	КПД $\eta_{НАС.}$	Мощность $P_{пол.}$, кВт	Удельный расход ЭЭ $\Delta Э$, кВт*ч/1 млн. * м ³ *м
1	2	3	4	5	6	7
1.	1915	5,077	56,46	0,863	3230,83	3357,18
2.	1920	5,189	56,47	0,864	3298,01	3350,64
3.	1930	5,403	56,48	0,865	3432,54	3344,41
4.	1940	5,606	56,49	0,863	3567,66	3346,00
5.	1950	5,799	56,49	0,860	3703,71	3354,19
6.	1960	5,983	56,50	0,856	3840,97	3368,05
7.	1970	6,159	56,51	0,851	3979,69	3386,85

Значит, наиболее предпочтительным для центробежного насоса 56В-17 при существующих размерах и протяженности НТ и $H_{СТ}$ НС «Хамза-1» является диапазон изменения геометрических размеров его рабочего колеса в интервале 1920 – 1960 мм.

Таблица 20.7

Результаты расчета параметров НА с изменением плотности перекачиваемой воды центробежным насосом

№ п/п	Удельный вес воды γ , кгс/м ³	Подача Q , м ³ /с	Напор H , м	КПД $\eta_{НАС.}$	Мощность $P_{пол.}$, кВт	Удельный расход ЭЭ $\Delta Э$, кВт*ч/1 млн. * м ³ *м
1	2	3	4	5	6	7
1.	1000	5,983	56,5	0,856	3840,97	3368,05
2.	1005	5,983	56,5	0,852	3860,18	3384,50
3.	1010	5,983	56,5	0,848	3879,38	3400,96

4.	1015	5,983	56,5	0,843	3898,59	3417,42
5.	1020	5,983	56,5	0,839	3917,79	3433,88
6.	1025	5,983	56,5	0,835	3937,00	3450,35
7.	1030	5,983	56,5	0,831	3956,20	3466,82

Из графика (рис. 20.8) видно, что с ростом удельного веса перекачиваемой воды наблюдается возрастание удельного расхода ЭЭ НА при практически сохраняющихся значениях его подачи и развиваемого напора, снижается КПД насоса и увеличивается потребляемая мощность НА.

Это обстоятельство вызвано тем, что в отдельные сезонные периоды года, в основном, в весну и осень, происходит увеличение мутности речных вод, сопровождающиеся естественным ростом удельного веса оросительной воды, из-за повышения в ней содержания взвеси и абразивных частиц. Так среднегодовая мутность речных вод Средней Азии колеблется в широких пределах от 50 г/м^3 (река Чирчик) до 5000 г/м^3 (река Амударья).

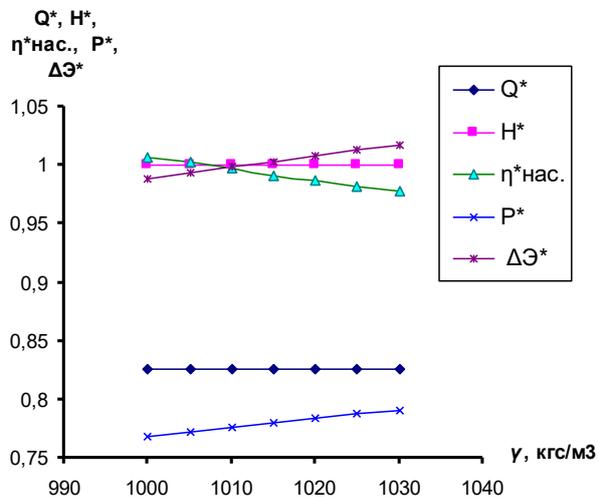


Рис. 20.8. Влияние на основные параметры насосного агрегата роста удельного веса оросительной воды

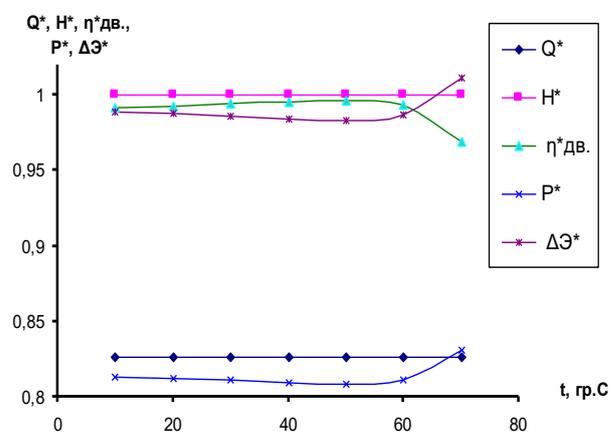


Рис. 20.9. Влияние на основные параметры насосного агрегата роста температуры окружающей среды в машинном зале НС

Из графика (рис. 20.9) видно, что с ростом температуры окружающей среды в помещении машинного зала НС наблюдается существенное увеличение удельного расхода ЭЭ и потребляемой мощности НА со снижением вели-

ины КПД приводного электродвигателя при практически сохраняющихся значениях подачи насоса и развиваемого им напора.

Таблица 20.8.

Результаты расчета параметров НА с возрастанием температуры окружающей среды в машинном зале здания НС

№ п/п	Температура в машинном зале t^0 , С	Подача Q , м ³ /с	Напор H , м	КПД $\eta_{ДВ.}$	Мощность $P_{пол}$, кВт	Удельный расход ЭЭ $\Delta \text{Э}$, кВт*ч/1 млн. * м ³ *м
1	2	3	4	5	6	7
1.	10	5,983	56,5	0,945	4064,38	3367,59
2.	20	5,983	56,5	0,946	4059,95	3363,92
3.	30	5,983	56,5	0,948	4053,38	3359,47
4.	40	5,983	56,5	0,949	4046,37	3352,67
5.	50	5,983	56,5	0,950	4043,23	3350,07
6.	60	5,983	56,5	0,947	4057,22	3361,66
7.	70	5,983	56,5	0,924	4157,49	3444,74

Следовательно, температура окружающей среды в помещении машинного зала НС не должна превышать порядка 50⁰ С, так как в противном случае будет иметь место резкое возрастание удельного расхода ЭЭ каждого из находящегося в работе НА.

Таблица 20.9

Результаты расчета параметров НА с увеличением времени наработки часов центробежным насосом

№ п/п	Время наработки насоса T , час	Подача Q , м ³ /с	Напор H , м	КПД $\eta_{НАС.}$	Мощность $P_{пол}$, кВт	Удельный расход ЭЭ $\Delta \text{Э}$, кВт*ч/1 млн. * м ³ *м
1	2	3	4	5	6	7
1.	1000	5,983	56,5	0,856	3840,97	3367,04
2.	2000	5,983	56,5	0,849	3840,97	3394,56
3.	4000	5,983	56,5	0,835	3840,97	3450,31
4.	6000	5,983	56,5	0,821	3840,97	3507,04

5.	8000	5,983	56,5	0,808	3840,97	3564,75
6.	10000	5,983	56,5	0,794	3840,97	362,46

Из графика (рис. 20.10) следует, что с увеличением времени наработки часов имеет место равномерное нарастание удельного расхода ЭЭ с соответствующим снижением КПД центробежного насоса при практически неизменных значениях подачи, развиваемого напора и потребляемой мощности НА.

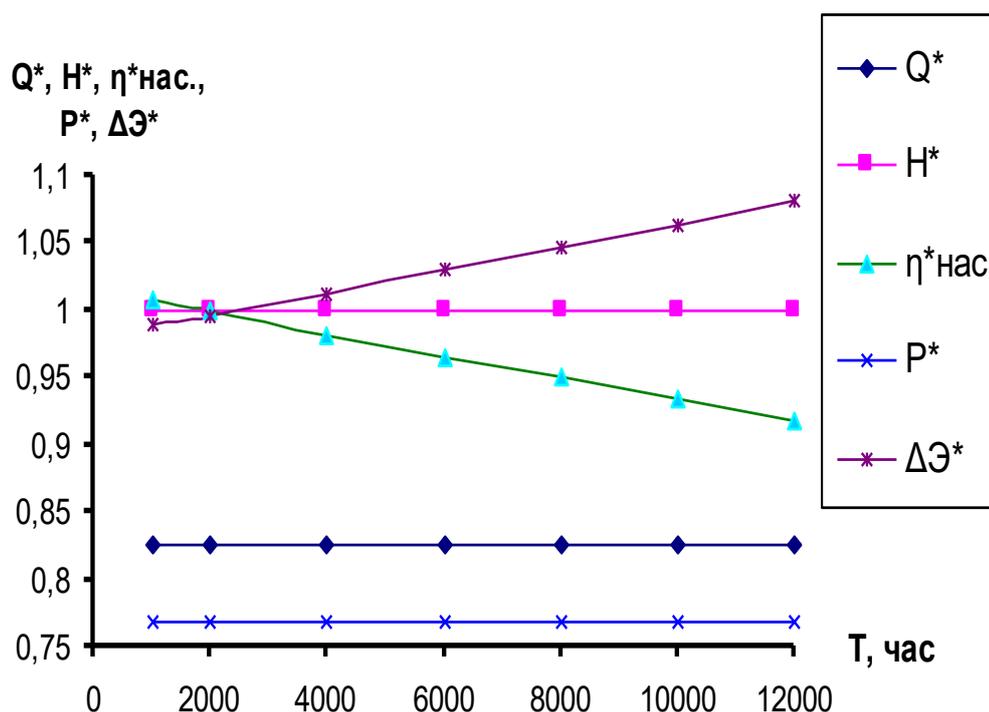


Рис. 20.10. Влияние на основные параметры насосного агрегата увеличения времени наработки часов насоса

Из графика (рис. 21.10) следует, что с увеличением времени наработки часов имеет место равномерное нарастание удельного расхода ЭЭ с соответствующим снижением КПД центробежного насоса при практически неизменных значениях подачи, развиваемого напора и потребляемой мощности НА.

Таким образом, можно констатировать, что для мелиоративных НС увеличение наработки часов (моторесурса) насоса ориентировочно не должно

превышать порядка 5000 час., так как ее дальнейшее возрастание способствует существенному росту удельного расхода ЭЭ НА.

20.4. Вывод - рекомендации:

- С целью снижения удельного расхода ЭЭ и рационального использования водных ресурсов, на НС СМВ оснащенных группой НА, конструктивно объединенных на совместную параллельную работу, необходимо выявлять наиболее приемлемые диапазоны изменения их режимных параметров [26].
- Для обеспечения требуемого технологического процесса водоподачи НС, а также улучшения эксплуатационных показателей НА, в составе НУ, вполне допустим режим параллельной работы насосов, оснащенных рабочими колесами уменьшенных геометрических размеров.
- Ввиду того, что потребляемая мощность каждым из совместно работающих в общую напорную сеть НА несколько снижается с ростом их числа в составе НУ, то оснащение отдельных насосов рабочими колесами увеличенных геометрических размеров позволит, в пределах допустимого, обеспечить более полную загрузку их приводных электродвигателей с одновременным увеличением подачи НА.
- Следует работу НС СМВ строить по заранее спланированному ступенчатому (поагрегатному) графику водоподачи, адекватно отражающему требуемый график водопотребления посевных сельскохозяйственных культур, увязанному с сформированной ее энергосберегающей режимной картой, что позволит путем пропорционально-равного распределения общей подачи НС, на данной ступени регулирования, по разным напорным сетям (водоводам) обеспечить установленную подачу и принятую последовательность работы НА, с учетом наработки часов насосов, минимумом их включений и отключений, а также изменений уровней бьефов в подводящем и водовыпускном каналах.
- Необходимо, исходя из реальных эксплуатационных и технических характеристик комплекса гидросооружений, гидромеханического и

электросилового оборудования, для каждой НС СМВ определять оптимальный и минимально-допустимый диапазоны уровней колебания бьёфов с целью обеспечения энерго- ресурсосберегающих режимов функционирования НА.

- При существенном снижении уровня бьёфа в подводящем канале НС, а также в периоды маловодья следует распределять работу НА таким образом, чтобы в составе одной из НУ совместно функционировало минимальное число параллельно включенных НА, а в других задействованы все.
- Целесообразно, при очередном подключении, в составе НУ, на совместную параллельную работу последующего НА, строго учитывать часы его наработки, осуществляя реализацию сформированной энергосберегающей режимной карты с включением НА, имеющего наименьшую наработку.

Литература

1. Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».
2. Аракелов В.Е., Кремер А.И. Методические вопросы экономии энергоресурсов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 192 с.
3. Аллаев К.Р. Электроэнергетика Узбекистана и мира. -Т.: «Fan va texnologiya», 2009, 464 с.
4. Закиров Г.Ш., Аюпов Р.Х. Алгоритмизация построения математических моделей непрерывных технологических процессов. –Ташкент: Фан, 1986. 105 с.
5. Кадиров А.А., Хамудханов М.М. Методы исследования и расчета энергоресурсосберегающих режимов работы водоподъемных насосных станций. -Т: «Янги аср авлоди», 2013. -120 с.
6. Кадиров А.А., Хамудханов М.М. Метод расчета базисной нормы расхода электроэнергии насосной станцией систем машинного водоподъема. // Узбекский журнал «Вестник ТащГТУ». – Ташкент, 2015. –№ 3. – С. 114–119.
7. Камалов Т.С., Хамудханов М.М. Система электропривода насосных установок машинного орошения. Ташкент: «Фан», 1985, 96 с.
8. Камалов Т.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных станций систем машинного орошения. Т.: Фан, 2014, 354 с.
9. Камалов Т.С., Хамудханов М.М. Автоматическое регулирование производительности параллельно включенных оросительных насосных агрегатов по схеме асинхронного роторно-вентильного каскада // Сборник трудов ИЭиА. «Оптимизация режимов электрических систем». – Ташкент. Издательство «Фан». – 1985. – С. 70 – 86.
10. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
11. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных

- и воздухоудувных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006, 460 с.
12. Лезнов Б.С. Частотно – регулируемый электропривод насосных установок. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
 13. Полупроводниковые выпрямители / Е.И. Беркович, В.Н. Ковалев и др./ Под ред. Ф.И. Ковалева и Г.П. Мостковой – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.
 14. Турк В.И., Минаев А.В., Карелин В.Я. Насосы и насосные станции. Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1977. – 296 с.
 15. Хашимов А.А. Внедрение энергосберегающих автоматизированных асинхронных электроприводов на промышленных установках металлургического производства // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. - Ташкент, 2012, № 1-2, С. 31-35.
 16. Хамудханов М.М. Математическое моделирование насосной установки систем электромашинного орошения // Узбекский журнал «Вестник ТащГТУ». – Ташкент, 2011. – № 1-2. – С. 53 – 58.
 17. Хамудханов М.М. Формирование энергосберегающей режимной карты, функционирования насосной станции систем машинного водоподъема // Узбекский журнал «Проблемы энерго – и ресурсосбережения». – Ташкент, 2012. – № 1-2. – С. 136 – 143. 77
 18. Хамудханов М.М. Насосная станция систем машинного водоподъема как объект управления энерго- и ресурсосбережением // Узбекский журнал «Вестник ТащГТУ». – Ташкент, 2013. – № 2. – С. 67 – 73. 78
 19. Хамудханов М.М., Ильясов Ш.Т., Куприянова А.С. Моделирование рабочих характеристик водоподъемного насоса при фиксированном изменении частоты вращения // Узбекский журнал «Проблемы энерго – и ресурсосбережения». – Ташкент, 2013. – № 3-4. – С. 188 – 193.
 20. Хамудханов М.М. Электромеханические соотношения системы многодвигательного регулируемого электропривода водоподъемных насосных установок // Узбекский журнал «Вестник ТащГТУ». – Ташкент, 2018. – № 1. – С. 57 – 62.

21. Хамудханов М.М. Принцип построения системы автоматического управления многодвигательным регулируемым электроприводом водоподъемной насосной установки // Узбекский журнал «Вестник ТащГТУ». – Ташкент, 2018. – № 4.
22. Хамудханов М.М. Двукратно – интегрирующая система подчиненного управления скоростью регулируемого многодвигательного электропривода водоподъемной насосной установки // Международный научно-технический журнал Химическая технология. Контроль и управление – 2018, № 6. С. 50-54.
23. Хамудханов М.М., Абдуллабеков И.А. Система частотно – управляемого электропривода водоподъемных насосных станций как основа обеспечения их энерго – ресурсосберегающих режимов функционирования // Вестник Туринского политехнического университета в городе Ташкенте. Выпуск 4/2018. С. 24-27.
24. Хамудханов М.М., Абдуллабеков И.А., Хамудханова Н.Б., Дусматов Р.К. Устройство управления насосной станцией. Заявка на изобретение IAP 2019 0101 (Республика Узбекистан) // Официальный бюллетень. – Ташкент, 2019. – № 7. – С. 27-28.
25. Хохлов В.А. Экономия электроэнергии на насосных станциях с параллельно работающими насосными агрегатами // Проблемы информатики и энергетики. 2005, № 3. – С. 59-62.
26. M.M. Khamudkhanov. Formal model of water elevating pump installation and research on influence of a number of factors on power efficiency of its functioning // WCIS - 2012. Tashkent, Uzbekistan. – P. 115 – 121. 98
27. M.M. Khamudkhanov, A.U. Mirisaev. The energy and resource-saving model of pump installation in systems of machine water lifting // WCIS - 2014. Tashkent, Uzbekistan. – P. 352 – 356. 99
28. M.M. Khamudkhanov. Resource-Saving Model for Formation of Water Consumption Schedule For Seed Culture of Irrigated Agrolandscapes // MITA-2015. Tashkent, Uzbekistan. – P. 433 – 437. 100

29. M.M. Khamudkhanov. Pumping unit multimotor electric drive with electric coupling by rotor circuit under conformal rotation mode // WCIS - 2016. Tashkent, Uzbekistan. – P. 81 – 88.
30. M.M. Khamudkhanov, Sh.B. Umarov. Equations and transfer functions of the main elements of a multi-motorized automated electric drive pumping unit // International scientific and technical journal. «Chemical Technology. Control and Management». № 4-5, 2018. – P. 168 – 172.
31. M.M. Khamudkhanov, I.A. Abdullabekov. Optimization of pump unit operation modes with respect to minimum of specific energy consumption // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. Vol.6, Issue 6, June 2019. P. 9928-9935.
32. M.M. Khamudkhanov, I.A. Abdullabekov. Automatic control of technological process of water supply by pumping station of water lifting systems // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. Vol.6, Issue 8, August 2019. P. 10614-10619.
33. M.M. Khamudkhanov, I.A. Abdullabekov, R.K. Dusmatov, N.B. Khamudkhanov, B.KH. Fayzullayev. Controls of the modes of operation of the pumping station with application of frequency-controlled electric drive // Web of Conferences , II International scientific conference. MIP: Engineering-2020: modernization, innovations, progress: advanced technologies in material science, mechanical and automation engineering.
34. M.M. Khamudkhanov, KH.B. Sapaev, SH.B. Umarov. Multi-motor drive with common inverter for pumping units // Web of Conferences , II International scientific conference. MIP: Engineering-2020: modernization, innovations, progress: advanced technologies in material science, mechanical and automation engineering.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Приложение 1.

Коэффициенты гидравлического трения напорной сети в зависимости от
состава и свойства воды

Таблица 18.2.

№ п/п	Срок эксплуата- ции, лет	Характеристи- ка перекачи-ваемой воды	Абсолютная Шероховатость, мм	Коэффициент гидравлического трения λ при диаметре трубопровода					
				0,3 м	0,5 м	0,8 м	1,2 м	1,6 м	2,0 м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	0		0,07	0,0241	0,0128	0,0117	0,0108	0,0103	0,099
2.	5	А – Слабо минерали- зованные некоррози- онные воды	0,195	0,0178	0,0159	0,0144	0,0132	0,0125	0,0120
		В – Слабо минерали- зованные коррозион- ные воды	0,42	0,0213	0,0188	0,0169	0,0154	0,0145	0,0139
		С – Весьма коррозионные воды	1,07	0,0275	0,0238	0,0211	0,0191	0,0178	0,0170
		Д – Корро- зионные воды с большим содержанием хлоридов, сульфатов	2,62	0,0362	0,0308	0,0268	0,0240	0,0222	0,0210
		Е – Сильно минерали- зованные и коррозионные воды	4,07	0,0421	0,0354	0,0305	0,0271	0,0250	0,0235

Продолжение таблицы 18.2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3.	10	A	0,32	0,0199	0,0177	0,0159	0,0146	0,0137	0,0131
		B	0,77	0,0251	0,0219	0,0195	0,0177	0,0166	0,0158
		C	2,07	0,0336	0,0287	0,0251	0,0225	0,0209	0,0198
		D	5,17	0,0460	0,0383	0,0329	0,0290	0,0267	0,0251
		E	8,07	0,0647	0,0449	0,0380	0,0333	0,0304	0,0285
4.	15	A	0,45	0,0217	0,0191	0,0171	0,0157	0,0147	0,0141
		B	1,12	0,0279	0,0241	0,0213	0,0193	0,0180	0,0171
		C	3,07	0,0382	0,0323	0,0281	0,0250	0,0232	0,0219
		D	7,72	0,0537	0,0442	0,0375	0,0328	0,0300	0,0281
		E	12,07	0,0648	0,0523	0,0438	0,0380	0,0345	0,0322
5.	20	A	0,57	0,0231	0,0203	0,0181	0,0165	0,0155	0,0148
		B	1,47	0,0302	0,0260	0,0229	0,0206	0,0192	0,0182
		C	4,07	0,0421	0,0354	0,0305	0,0271	0,0250	0,0235
		D	10,27	0,0604	0,0491	0,0413	0,0360	0,0328	0,0306
		E	16,07	0,0738	0,0588	0,0487	0,0418	0,0380	0,0352
6.	25	A	0,70	0,0244	0,0213	0,0190	0,0173	0,0162	0,0154
		B	1,82	0,0322	0,0276	0,0242	0,0218	0,0203	0,0192
		C	5,07	0,0456	0,0381	0,0327	0,0289	0,0266	0,0250
		D	12,82	0,0566	0,0536	0,0448	0,0388	0,0352	0,0327
		E	20,07	0,0823	0,0648	0,0532	0,0455	0,0410	0,0379
7.	30	A	0,82	0,0255	0,0222	0,0198	0,0179	0,0168	0,0160
		B	2,17	0,0341	0,0291	0,0254	0,0228	0,0212	0,0200
		C	6,07	0,0489	0,0405	0,0346	0,0305	0,0280	0,0263
		D	15,37	0,0724	0,0578	0,0479	0,0413	0,0374	0,0347
		E	24,07	0,0903	0,0703	0,0572	0,0487	0,0437	0,0404

Коэффициент гидравлического трения напорной сети в зависимости
от срока эксплуатации НС

Таблица 18.3.

№ п/п	Срок эксплуатации агации, лет	Характеристика перекачиваемой воды	Увеличение потерь по сравнению с новым трубопроводом, в <i>K</i> раз					
			0,3 м	0,5 м	0,8 м	1,2 м	1,6 м	2,0 м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	0		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2.	5	А - Слабо минерализованные некоррозионные воды	1,26	1,24	1,23	1,22	1,21	1,21
		В - Слабо минерализованные коррозионные воды	1,51	1,47	1,44	1,43	1,41	1,40
		С - Весьма коррозионные воды	1,95	1,86	1,80	1,77	1,73	1,72
		Д - Коррозионные воды с большим содержанием хлоридов, сульфатов	2,57	2,41	2,29	2,22	2,18	2,12
		Е - Сильно минерализованные и коррозионные воды	2,99	2,77	2,61	2,51	2,43	2,37

Продолжение таблицы 18.3.

1	2	3	5	6	7	8	9	10
3.	10	A	1,41	1,38	1,36	1,35	1,33	1,32
		B	1,78	1,71	1,67	1,64	1,60	1,61
		C	2,38	2,24	2,15	2,08	2,08	2,00
		D	3,26	2,99	2,81	2,69	2,59	2,54
		E	3,88	3,51	3,25	3,08	2,95	2,88
4.	15	A	1,54	1,49	1,46	1,45	1,43	1,42
		B	1,98	1,86	1,82	1,79	1,75	1,73
		C	2,71	2,52	2,40	2,31	2,25	2,21
		D	3,81	3,45	3,21	3,04	2,91	2,84
		E	4,60	4,09	3,74	3,52	3,35	3,25
5.	20	A	1,64	1,59	1,55	1,53	1,50	1,49
		B	2,14	2,03	1,96	1,91	1,96	1,84
		C	2,99	2,77	2,61	2,51	2,43	2,37
		D	4,28	3,64	3,53	3,33	3,16	3,09
		E	5,24	4,59	4,16	3,88	3,69	3,56
6.	25	A	1,73	1,66	1,62	1,60	1,57	1,56
		B	2,28	2,15	2,07	2,02	1,97	1,94
		C	3,23	2,98	2,79	2,68	2,58	2,53
		D	4,72	4,19	3,83	3,59	3,42	3,31
		E	5,84	5,06	4,56	4,21	3,98	3,83
7.	30	A	1,81	1,73	1,69	1,66	1,63	1,62
		B	2,42	2,27	2,17	2,11	2,06	2,02
		C	3,47	3,16	2,96	2,82	2,72	2,66
		D	5,14	4,52	4,09	3,82	3,63	3,51
		E	6,40	5,49	4,89	4,51	4,24	4,08

Приложение 2.

Таблица 18.5.

Активное сопротивление 1 км линии для различного материала проводов

Сечение провода или жилы кабеля, мм	Активное сопротивление проводов при 20 ⁰ С, Ом/км		
	Алюминиевых А	Сталеалюминие- вых АС	Медных М
1	2	3	4
10	-	2,695	1,79
16	1,80	1,772	1,13
25	1,14	1,146	0,72
35	0,83	0,773	0,516
50	0,576	0,592	0,361
70	0,412	0,420	0,267
95	0,308	0,314	0,191
120	0,246	0,249	0,154
150	0,194	0,196	0,122
185	0,157	0,159	0,099
240	0,120	0,122	0,077
300	0,100	0,100	0,063
400	0,074	0,074	0,046

^{х)} При отклонении температуры среды от 20⁰С вносится поправка: для алюминиевых проводов – 0,00403, для медных – 0,0393 на каждый градус (в сторону увеличения температуры прибавляется, в сторону снижения отнимается).

Таблица 18.6.

Потери активной мощности в трехжильных кабелях напряжением 0,38-35 кВ

Напряжение кВ	Сечение жилы, мм ²	Потери в одном кабеле, кВт/км	
		С медными жилами	С алюминиевыми жилами
1	2	3	4
0,38	2,5	44	46
	4	52	53
	6	56	60
	10	62	65
	16	65	70
	25	71	72
	35	72	75
	50	80	77
	70	85	83
	95	86	85
	120	87	88
	150	90	90
6	10	41	40
	16	46	45
	25	47	50
	35	49	51
	50	52	54
	70	59	59
	95	61	61
	120	64	64
	150	66	67
10	10	32	34
	16	37	36
	25	38	39
	35	42	42
	50	44	44
	70	45	46
	95	49	50
	120	53	54
	150	54	56
35	50	34	31
	70	36	35
	95	37	36
	120	39	37
	150	40	37

Таблица 18.7.
Коэффициент потерь в трансформаторе (K_9), кВт/квар

Характеристика трансформатора и системы электроснабжения	В часы максимума энергосистемы	В часы минимума энергосистемы
1	2	3
Трансформаторы питаются непосредственно от шин электростанции	0,02	0,02
Сетевые трансформаторы, питаются от электростанции на генераторном напряжении	0,07	0,04
Понижающие трансформаторы 10-6/0,4 кВ, питающиеся от районных сетей	0,15	0,1
Понижающие трансформаторы 110/35/10 кВ, питающиеся от районных сетей	0,1	0,06

Таблица 18.8.

Значения ΔP_x , ΔP_k , I_k , U_k для различных типов трансформаторов общего назначения

Номинальная мощность трансформатора, кВА	Номинальное напряжение обмоток, кВ		Потери, кВт		I_k , %	U_k , %
	ВН	НН	Холостого хода (ΔP_x)	Короткого замыкания (ΔP_k)		
1	2	3	4	5	6	7
100	6-10	0,4	0,365	1,97	2,6	4,5
	35	0,4	0,465	1,97	4,16	6,5
160	6-10	0,4	0,540	2,65	2,4	4,5
	35	0,4	0,660	2,65	2,4	6,5
250	6-10	0,4	0,780	3,70	2,3	4,5
	35	0,4	0,960	3,70	2,3	6,5
400	6-10	0,4	1,08	5,50	2,1	4,5
	35	0,4	1,35	5,50	2,1	6,5
630	6-10	0,4	1,68	7,60	3,0	5,5
	35	0,4	2,00	7,60	2,0	6,5
1000	6-10	0,4	2,45	12,2	2,8	5,5
	35	0,4	2,00	7,60	2,0	6,5
1600	6-10	0,4	3,30	18,0	2,6	5,5
	35	0,4-10,5	3,65	18,0	1,4	6,5
2500	35	6,3-10,5	5,10	23,5	1,1	6,5
4000	35	6,3-10,5	6,70	34,7	1,3	7,5
6300	35	6,3-10,5	9,40	47,5	1,17	7,5
10000	35	6,3-10,5	14,5	65,0	0,8	7,5
	38,5	6,3-10,5	27,0	74,0	0,9	10,5
15000	110	6,3-10,5	40,0	130,0	-	10,5
16000	38,5	6,3-10,5	21,0	90,0	0,75	8,0
25000	36,75	6,3-10,5	29,0	145,0	0,7	9,5

Таблица 18.9.

Удельный расход активной мощности в синхронных
двигателях при работе с $\cos\varphi=0,9$ (опер.)

Номинальная мощность двигателя, кВт	Р _{кв} (кВт/квар) при загрузке двигателя, %		
	100	75	50
1	2	3	4
1000	0,017	0,018	0,019
1250	0,012	0,013	0,014
1600	0,011	0,012	0,014
800	0,020	0,022	0,023
1000	0,021	0,024	0,026
1250	0,017	0,018	0,021
1600	0,015	0,017	0,018
630	0,022	0,024	0,026
800	0,020	0,022	0,024
1000	0,020	0,022	0,024
1250	0,019	0,020	0,022
1600	0,016	0,017	0,019
2000	0,016	0,017	0,018
400	0,028	0,030	0,033
500	0,026	0,029	0,031
650	0,026	0,028	0,030
800	0,024	0,026	0,028
1000	0,021	0,022	0,025
1200	0,021	0,022	0,024
1600	0,019	0,020	0,022
2000	0,016	0,017	0,018
400	0,036	0,039	0,042
500	0,029	0,033	0,036
630	0,026	0,030	0,032
800	0,023	0,026	0,028

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	9
1.1. Математическое и физическое моделирование	9
1.2. Способы построения моделей	13
1.3. Особенности структурных моделей систем управления	18
1.4. Этапы построения математической модели	19
2. АЛГОРИТМ И АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ЗАДАЧ, ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕГО АЛГОРИТМА	22
2.1. Алгоритм и алгоритмизация задач	22
2.2. Построение моделирующего алгоритма	26
3. ПРИНЦИПЫ ЭНЕРГО - И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ	27
3.1. Электропривод и технологические процессы	27
3.2. Структура и области применения электропривода	28
4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО КАНАЛА ЭЛЕКТРОПРИВОДА	29
4.1. Процесс преобразования в технологических установках электрической энергии в механическую	29
4.2. Вывод основных соотношений	31
5. СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	35
5.1. Общие сведения об асинхронных электродвигателях	35
5.2. Вывод основных аналитических выражений АД	37
6. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	41
6.1. Построение энергетических моделей двигателей	41
6.2. Потери энергии при работе электропривода без нагрузки и с нагрузкой	43
7. РЕЗЕРВЫ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ, РЕСУРСОВ И ПРИНЦИПЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ	50
7.1. Правильный выбор электрооборудования установок и систем	50
7.2. Снижение потерь в приводных электродвигателях и питающих электросетях	51
8. РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД – ОСНОВНОЕ СРЕДСТВО ЭНЕРГО – И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ	56
8.1. Виды и общая характеристика регулируемых электроприводов	56

9.	ЧАСТОТНО – РЕГУЛИРУЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД	60
9.1	Аналитические выражения способа плавного регулирования скорости АД	60
9.2.	Свойства частотно - регулируемого АД	62
10.	ЭЛЕКТРОПРИВОД С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ	66
10.1	Однофазный тиристорный регулятор напряжения	66
10.2.	Электропривод с тиристорным экстремальным регулятором напряжения	68
11.	ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПО СХЕМЕ АСИНХРОННО – ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА	73
11.1.	Асинхронный вентиляльный каскад	73
11.2.	Двухдвигательный асинхронный роторно-вентильный каскад .	75
11.3.	Многодвигательный электропривод с электрической связью и общим инвертором, ведомым сетью	82
12.	ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ И ОБЩИМ ИНВЕРТОРОМ, ВЕДОМЫМ СЕТЬЮ	87
12.1.	Построение энергетической модели МЭЭС с общим ИВС	87
12.2.	Энергетические показатели системы «МЭЭС с общим ИВС – насосная установка»	93
13.	ЭНЕРГО - И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ	99
13.1	Энергетические модели центробежных машин	99
13.2	Анализ и построение энергетических моделей центробежных машин	100
14.	ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СХЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА	106
14.1.	Основные характеристики и параметры насосных агрегатов, определяющие энерго – и ресурсосберегающие режимы ее функционирования	106
14.2	Вычислительная модель постоянных коэффициентов аппроксимации расходно – напорной и расходно – мощностной характеристик центробежного насоса	111
14.3.	Формирование алгоритма определения постоянных коэффициентов аппроксимации рабочих характеристик центробежного насоса	116

15.	МОДЕЛИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ РАБОЧЕГО КОЛЕСА И ФИКСИРОВАННОМ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ.	117
15.1.	Метод аналитического определения рабочих характеристик	117
15.2.	Формирование вычислительного алгоритма определения характеристик насоса при изменении геометрических размеров его рабочего колеса	120
15.3.	Модель и вычислительный алгоритм расчета рабочих характеристик насоса при фиксированном изменении частоты вращения рабочего колеса	121
16.	МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ, ОПИСЫВАЮЩИЕ СОВМЕСТНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ В ОБЩУЮ НАПОРНУЮ СЕТЬ	125
16.1.	Разработка модели и алгоритма расчета параллельной работы центробежных насосов в общую напорную сеть	125
16.2.	Разработка модели и алгоритма расчета последовательной работы центробежных насосов в напорную сеть	130
16.3.	Алгоритм расчета последовательно - параллельной работы центробежных насосов в напорную сеть	134
17.	УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ	135
17.1.	Характеристика удельного расхода электрической энергии как критерия эффективности управления и нормативного показателя	135
17.2.	Формализованная модель определения удельного расхода электрической энергии насосного агрегата	137
18.	МОДЕЛЬ, АГОРИТМ И ГРАФО – АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МЕЛИОРАТИВНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ	146
18.1.	Модель группового определения удельного расхода электрической энергии.	146
18.2.	Формирование вычислительного алгоритма расчета удельного расхода электрической энергии мелиоративной насосной станции	148
18.3	Метод графо - аналитического расчета удельного расхода электроэнергии водоподъемной насосной станции	149
18.4	Задачи, организация и формы нормирования удельного расхода электроэнергии	151

18.5.	Методы разработки удельных норм расхода электроэнергии . . .	156
18.6.	Модель расчетно-аналитического метода определения удельного расхода электроэнергии насосной станции	157
19.	ПРИМЕР РАСЧЕТА УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРО- ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГОЛОВНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ . . .	169
19.1	Исходные данные головной насосной станции	169
19.2.	Определение рабочих параметров насосных агрегатов графо – аналитическим методом с учетом времени их эксплуатации	171
19.3.	Расчет средневзвешенных величин КПД насосов и их приводных электродвигателей	175
19.4	Расчет средневзвешенных величин КПД насосов и их приводных электродвигателей	178
19.5	Определение нормы потребления электроэнергии головной насосной станцией	179
20.	НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОДОПОДАЧИ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВ- НОСТЬ РАБОТЫ НАСОСНОГО АГРЕГАТА	184
20.1.	Формирование энергосберегающей режимной карты функционирования насосной станции	184
20.2.	Влияние колебаний уровней горизонта воды на энерго – ресурсосберегающие режимы работы насосных агрегатов	191
20.3.	Степень влияния ряда факторов на энергоэффективность работы насосной установки	197
20.4.	Вывод – рекомендации	203
	Литература	205
	Приложение	209
	Содержание	219