Министерство образования и науки Республики Казахстан

Некоммерческое акционерное общество
«Алматинский университет энергетики и связи»

М.А. Мустафин
Н.К. Алмуратова
С.С. Табултаев

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Учебное пособие

АУЭС
2016

УДК 621.671(075.8)
ББК 31.37я73
М 91

Рецензенты:
Зав. кафедрой электропривода и автоматизации технологических комплексов КазНИТУ им. К.И.Сатпаева, канд.техн.наук
Е.Хидолда,
доцент кафедры электропривода и автоматизации технологических комплексов КазНИТУ им. К.И.Сатпаева, канд.техн.наук
Т.М.Мунсызбай,
профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок АУЭС, доктор технических наук
П.И.Сагитов
Рекомендовано к изданию Ученым советом Алматинского университета энергетики и связи (Протокол №2 от 11.10.2016г.) Печатается по дополнительному плану выпуска ведомственной литературы АУЭС на 2016 год, позиция

Мустафин М.А.
М91 Энергосберегающий электропривод центробежных насосов: Учебное пособие (для магистрантов специальности «Электроэнергетика») /М.А.Мустафин, Н.К.Алмуратова, С.С. Табултаев. –Алматы: АУЭС, 2016. - 90с.: ил. 33, библиогр. – 2 назв.

ISBN 978-601-7889-09-8

Учебное пособие посвящено актуальной теме разработке энергосберегающих систем регулируемого электропривода механизмов центробежного действия. В пособии получено аналитическое описание центробежного насоса как нагрузки регулируемого привода с учетом характеристик насоса и трубопровода. На этой основе проведен сопоставительный анализ способов регулирования частоты вращения электродвигателей насосных агрегатов. Для варианта частотного регулирования асинхронного двигателя приведен разработанный гармонический метод моделирования и полученный алгоритм управления по минимуму потерь в двигателе.

Учебное пособие предназначено для магистрантов, обучающихся по специальности «Электроэнергетика».

УДК 621.671(075.8)
ББК 31.37я73

ISBN 978-601-7889-09-8

© АУЭС, 2016
© Мустафин М.А.
Алмуратова Н.К.
Табултаев С.С. 2016

Содержание

Обозначения и сокращения……..……..5
Введение……...…..…….....6
1 Регулируемый электропривод насосных агрегатов……..8
1.1 Особенности режимов работы насосных агрегатов различного
назначения…….…...……12
1.2 Энергетические соотношения в силовом канале
электропривода центробежных насосов ……..…… 21
1.3 Способы регулирования режимов работы насосных агрегатов……...…….27
1.3.1 Регулирование режимов работы насосных станций включением
насосов на последовательную (параллельную) работу……...….28
1.3.2 Регулирование режимов работы насосных
агрегатов дросселированием……..…..……30
1.3.3 Регулирование режимов работы насосных агрегатов
изменением частоты вращения рабочего колеса…….……..…35
1.3.4 Центробежный насос как нагрузка регулируемого привода……...……40
1.4 Анализ способов регулирования частоты вращения
электродвигателей насосных агрегатов……..…….....42
1.4.1 Частотно - регулируемый электропривод
центробежных насосов……..…….….....43
1.4.2 Регулирование частоты вращения электродвигателей изменением
их скольжения..……..…..47
1.4.3 Каскадные схемы регулирования двигателей ЦН……...…….…....50
1.5 Выводы и результаты по разделу …….…….....54
2 Энергосберегающие системы и режимы работы
асинхронного электропривода центробежных насосов ……...……..56
2.1 Методы расчета и анализа электромагнитных и
электромеханических процессов ……...……56
2.1.1 Электромагнитные соотношения, характеризующие
работу регулируемого асинхронного электропривода…….....57
2.1.2 Электромеханические соотношения в регулируемом
электроприводе центробежных механизмов……..……63
2.2 Энергосберегающий электропривод центробежных насосов по
схеме «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»…….....66
2.2.1 Законы оптимального управления частотно –
регулируемым асинхронным приводом центробежных насосов…….....67
2.2.2 Минимизация потерь в двигателе частотно –
регулируемого электропривода центробежных насосов…….....71
2.2.3 Разработка математической модели системы электропривода
«преобразователь частоты – асинхронный двигатель»
центробежного насоса…….....78
2.3.1 Аналитические соотношения переменных магнитной

цепи асинхронного двигателя при гармоническом методе моделирования ……..…….…….....78
2.3.2 Численный гармонический метод моделирования магнитной цепи асинхронного двигателя ……..... 81
2.3.3 Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в системе частотно – регулируемого электропривода центробежных насосов ……..……85
2.4 Результаты численных исследований…….....88
2.5 Выводы и результаты по разделу ..…….....89
Список литературы……..…….…….....…..90

Введение

В условиях современных экономических отношений возникает необходимость повышения эффективности использования всех видов энергоресурсов с применением в широких масштабах энергосберегающих технологий. Одним из важных ресурсов в решении этой задачи является снижение энергопотребления на промышленных объектах средствами автоматизированного электропривода.

Механизмы центробежного действия (МЦД) являются наиболее массовыми и энергоемкими потребителями электрической энергии. В настоящее время в мировой практике существует устойчивая тенденция замены нерегулируемых электроприводов центробежных насосов (ЦН), компрессоров, вентиляторов на регулируемые системы. Это обусловлено значительными потерями мощности в применяемых до последнего времени схемах регулирования выходных параметров - напора и подачи МЦД. Так, при наиболее распространенном способе – дросселировании – величина потерь на элементах запорной аппаратуры может достигать при регулировании 50% потребляемой агрегатом мощности. Эти потери исключаются при регулировании ЦН частотой вращения рабочего колеса посредством автоматизированного электропривода.

Эффективный перевод центробежных механизмов на регулируемые системы привода должен сопровождаться разработкой новых экономичных систем электропривода, адаптированных к ЦН как объекту управления. Важный вклад в теорию, разработку и внедрение таких приводов внесли М.Г. Юньков [1,2], Н.Ф. Ильинский [3,4,5,6], Г.Б.Онищенко [1,7,8], Б.С. Лезнов, Ю.Г. Шакарян и другие ученые. В их трудах доказана необходимость применения регулируемого электропривода в механизмах центробежного действия, которые традиционно снабжались нерегулируемыми приводами, разработана теоретическая база такой замены, определены пути и методы реализации.

В качестве систем автоматизированного электропривода центробежных насосов наибольшее распространение получили регулируемые электроприводы на базе наиболее простого и надежного асинхронного двигателя (АД). Ведущими мировыми производителями выпускаются и постоянно совершенствуются приводы с управлением от вентильных преобразователей по схеме «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ – АД). Непрерывный переход на более современную элементную базу позволил значительно улучшить массогабаритные, энергетические и эксплуатационные показатели такого привода. Частотное управление является наиболее экономичным способом плавного регулирования частоты вращения АД, так как он во всем диапазоне регулирования работает с малой величиной скольжения ротора (малыми потерями скольжения), имеет высокий КПД и хорошую жесткость механических характеристик.

Вопросам разработки и исследования частотно – регулируемых электроприводов посвящены труды таких ученых, как М.П.Костенко, А.А.Булгаков, А.С.Сандлер, Ю.М. Гусяцкий, М.З. Хамудханов, А.Я.Бернштейн, Р.С.Сарбатов, Т.Такеути, И.И.Эпштейн.

Усилиями указанных выше ученых и их последователей разработаны основы теории частотного регулирования, общие уравнения и теория АД при питании от ПЧ, принципы построения и управления таких систем. Получены методы расчета и анализа электромагнитных и электромеханических процессов в приводе в установившихся и переходных режимах. Установлены оптимальные, по различным показателям, законы управления приводом. Достаточно полно разработана теория преобразователей частоты, определились рациональные силовые схемы и принципы управления ими. Таким образом, фундаментальные вопросы регулирования АД в схемах «ПЧ – АД», в основном, решены.

Наличие созданной теоретической базы, современное состояние развития силовой электроники, вычислительной техники и средств управления, накопленный опыт проектирования, разработки и внедрения автоматизированного электропривода на базе АД позволяют обобщить и развить методы и результаты, полученные на сегодняшний день, и решить актуальную технико – экономическую проблему – создание энергосберегающих систем автоматизированного электропривода для управления центробежными агрегатами.

1 Регулируемый электропривод насосных агрегатов

Центробежные насосы являются наиболее массовыми потребителями электрической энергии. Эти установки широко распространены во всех отраслях промышленности и выполняют как основные технологические, так и вспомогательные функции. В настоящее время регулирование режимов работы центробежных агрегатов осуществляется, в основном, с помощью регулирующей запорной арматуры – задвижек, заслонок и пр. (дросселированием) - при постоянной скорости приводного двигателя. Это приводит к значительным потерям мощности в регулирующих элементах, связанных с преодолением дополнительных гидравлических сопротивлений. Величина таких потерь зависит от глубины регулирования выходных параметров - напора и подачи - и могут достигать 50% потребляемой механизмом мощности. Современный уровень развития автоматизированного электропривода позволяет передать функции управления непосредственно электроприводу центробежного агрегата и исключить указанные потери. Поскольку на долю центробежных насосов, вентиляторов, воздуходувок и т.д. приходится, по разным источникам, 20…35% электроэнергии, потребляемой в промышленности, перевод центробежных механизмов на регулируемые системы привода является важным направлением политики энергосбережения в промышленности.

Кроме снижения уровня энергопотребления, при работе насосного агрегата в режиме регулирования производительности, применение регулируемого электропривода позволяет поддерживать оптимальной частоту вращения агрегата в соответствии с заданным напором и подачей. Это приводит к значительному снижению износа запорно-регулирующей аппаратуры и кинематической части привода и насоса, утечек транспортируемой жидкости, так как значительную часть времени агрегат будет работать на пониженной частоте вращения. Возможность изменять давление в переходных режимах плавно и с заданной интенсивностью уменьшает опасность аварий на трубопроводах вследствие гидравлических ударов. Упрощается задача включения автоматизированного электропривода насосов в системы автоматического управления технологическими процессами.

Постановке и решению перечисленных проблем посвящено значительное количество трудов, среди которых следует выделить и некоторые другие. В них доказана теоретически необходимость перевода центробежных механизмов на регулируемые системы электропривода, определены пути и методы, приводятся примеры эффективности практически проведенных мероприятий.

Однако имеется ряд нерешенных задач. Специалисты, занимающиеся вопросами автоматизированного электропривода, используют в исследованиях упрощенные представления о центробежных механизмах, как о

нагрузке двигателя. В большей части исследований ЦМ принимается как механизм с квадратичной зависимостью момента сопротивления от частоты вращения, и дальнейшие выводы выполняются в соответствии с законами гидравлического подобия. В реальных насосах эти зависимости имеют более сложный характер в связи с работой ЦН на сеть с противодавлением и значительно отличаются от идеализированных. В получены зависимости, учитывающие технические и технологические особенности насосов и трубопроводов, однако, в применении к потерям в агрегатах при регулировании, используются упрощенные или графо – аналитические выражения. Специалисты в области гидравлики, напротив, точно описывая процессы в насосах и трубопроводах, упрощенно подходят к оптимизации электроприводов ЦН.

Правильный выбор системы электропривода, разработка оптимальных законов управления двигателем и преобразователем должны опираться на точную идентификацию центробежного агрегата, как нагрузки привода. Область применения насосных агрегатов весьма широка. Требуется провести анализ режимов работы ЦН различного технологического назначения и определить требования к параметрам регулирования.

Необходимо получить функциональные взаимозависимости основных гидравлических, механических и электрических параметров режимов работы трубопровода, насоса, двигателя и преобразователя, как составляющих единой системы.

Одной из наиболее эффективных возможностей энергосбережения является создание объектно - ориентированных систем электропривода, максимально учитывающих параметры и специфику работы приводного механизма. На базе данных, указанных выше, а также обзора опыта внедрения регулируемых электроприводов ЦН, можно определить требования и провести сопоставительный анализ возможных систем автоматизированного электропривода центробежных насосов различного назначения.

1.1 Особенности режимов работы насосных агрегатов различного назначения

Центробежные механизмы (ЦМ) являются типичными представителями большого и важного класса промышленных установок, предназначенных для транспортировки жидкостей (насосы) и газов (вентиляторы). По назначению, особенностям режимов работы и требованиям к показателям регулирования, насосные агрегаты центробежного действия можно подразделить на четыре основные группы.

а) Насосные агрегаты систем водотеплоснабжения и канализации, используемые в системе жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) и на промышленных предприятиях, выбираются обычно по максимальным техническим параметрам (подача, напор). Анализ систем водоснабжения

показал, что в среднем фактический напор во внутридомовых системах превышает требуемый в 2.2 раза. Повышенное давление приводит к перерасходу не только электроэнергии, но и воды из – за непроизводительных утечек в сети и у потребителя, что вызывает необходимость регулирования выходных параметров ЦН. Насосы ЖКХ объединяются в насосные станции. В технологические задачи управления такими насосными станциями сведены в таблицу 1, приведенную ниже.

Таблица 1 - Технологические задачи насосных станций

Объект	Задачи станции управления
Насосная станция 1го подъема	поддержание заданного уровня воды в накопительном резервуаре (значение или диапазон)
Насосная станция 2го подъема	поддержание заданного давления или суточного и недельного графика давления воды в напорном трубопроводе, контроль уровня воды в резервуаре
Насосная станция 3го подъема	поддержание заданного давления или суточного и недельного графика давления воды в напорном трубопроводе
Канализационная насосная станция	поддержание заданного уровня воды в приемном резервуаре (значение или диапазон)
Насосная станция ЦТП (горячее водоснабжение)	поддержание заданного суточного и недельного графика давления воды в напорном трубопроводе
Насосная станция ЦТП (отопление)	поддержание заданного расхода или температуры оборотной воды в системе отопления

Особенностью данной группы, как потребителя электроэнергии, являются явно выраженные утренние и вечерние пики нагрузок, а также их сезонные колебания. Неравномерный характер потребления воды (теплоносителя) и ее канализации требует контроля над давлением в так называемых контрольных точках сети, обеспечения заданного расхода или уровня в накопительных и приемных резервуарах. Очевидно, что приведенные задачи могут быть решены только автоматизацией насосных агрегатов на базе современных средств регулирования. В настоящее время в управление такими процессами осуществляется путем дросселирования, то есть вентильным ограничением подачи на выходе ЦН. Однако реализация таких схем должна опираться на системы регулируемого электропривода ЦН.

Общее количество работающих насосных станций водотеплоснабжения и канализации крупных городов составляет 95, с суммарной установленной мощностью электродвигателей насосов более мегаватта. Тип установленных электродвигателей – асинхронные с короткозамкнутым ротором. Изучение режимов работы ряда насосных станций, работающих в нерегулируемом и автоматическом режимах и анализ их энергопотребления, показал следующее. Управление пуском и остановом электродвигателей осуществляется релейно-

контакторной схемой по принципу прямого пуска. Загрузка двигателей, по результатам измерений, составила от 56 до 84%, В течение суток наблюдается колебание давления в водоводе в зависимости от разбора воды. При резком снижении разбора воды в ночное время давление поднимается значительно выше установленного, что приводит не только к потерям энергии, но и к потерям воды в результате утечек в вентилях, задвижках, соединениях.

Рассчитанная средняя сэкономленная мощность может составлять на станциях, работающих в автоматическом режиме 10% (за счет установок «мягкого» пуска) и на станциях постоянного режима – 23% (за счет внедрения регулируемого привода) от установленной мощности электродвигателя.

Если принять ресурсосберегающий коэффициент равным 1.35, а стоимость преобразователя 150 $/кВт, расчетный срок окупаемости затрат не превысит 2.5 года.

Как отмечено, что на вновь вводимых насосных станциях агрегаты водотеплоснабжения и канализации выходят на проектную мощность в течение нескольких лет (например, насосная для нового микрорайона), и повышенное давление в системах приводит к перерасходу не только электроэнергии, но и воды (теплоносителя). Это означает, что значительный период эксплуатации ЦН работают в режимах ниже номинальных нагрузок.

В структуре энергобаланса современных производственных предприятий насосное оборудование может занимать до 20%. К задачам водо- и теплоснабжения добавляются комплекс оборотного водоснабжения с очистными сооружениями, станциями перекачки промышленных стоков, подача воды для охлаждения оборудования и т.д. Очевидно, что для решения перечисленных задач, все эти системы должны иметь современные эффективные схемы регулирования напора и подачи ЦН.

б) Насосные агрегаты магистральных трубопроводов– нефтеперекачивающих станций (НПС), водоводов и т.д. Такие трубопроводы отличаются от трубопроводов других назначений своей протяженностью (не менее 50 км) и пропускной способностью (диаметр трубы не менее 150 мм и до 1200 мм). Для Казахстана наиболее показательной является сеть нефтепроводов, на примере которой и рассмотрим особенности работы насосных агрегатов НПС.

На головной перекачивающей станции, находящейся в начальном пункте нефтепровода станции, осуществляется прием нефти от поставщиков, чаще всего с промыслов, и закачка ее в трубопровод. При движении нефти по трубопроводу она теряет сообщаемую ей насосами энергию на преодоление трения о стенки трубопровода. Восполнение потерь энергии в трубопроводе при движении нефти осуществляется последующими насосными. В зависимости от принятой технологической схемы, на некоторых НПС может предусматриваться емкость для приема, хранения нефти (такие НПС называют станции с емкостью), на других НПС эти емкости отсутствуют, и

они называются промежуточными НПС. На НПС с емкостью технологическими объектами являются: резервуарный парк, пункт учета нефти, подпорная насосная и магистральная насосная.

На магистральных нефтепроводах применяют следующие схемы перекачки:

- подстанционную (работа на «емкость»), когда головная или промежуточная насосная станция закачивает нефть в емкость последующей;
- через резервуар, устанавливаемый на каждой насосной станции; нефть в него заканчивается предыдущей насосной станцией, из него же и забирается на перекачку дальше;
- из насоса - в насос; перекачка нефти выполняется по всему трубопроводу транзитной;
- с подключенным резервуаром, перекачка нефти при этом выполняется транзитная, резервуар выполняет роль буфера.

Первые две схемы достаточно просты в технологии перекачки нефти, в управлении режимами работы магистрального трубопровода.

При работе по этим схемам давление и пропускная способность каждого участка трубопровода зависят только от характеристики насосов, трубопровода и перекачиваемой жидкости. Каждый участок по гидравлическим параметрам не связан друг с другом. Неравномерность пропускной способности отдельных участков трубопровода компенсируется за счет нефти, накапливаемой в резервуарах. Схема через емкость является очень простой при эксплуатации. Однако имеет целый ряд недостатков. Во-первых, на каждой насосной станции приходится строить резервуарный парк и подпорную насосную. Во-вторых, при выходе из строя одной станции практически прекращается перекачка по всему трубопроводу, так как запасы нефти в резервуарах незначительны по сравнению с пропускной способностью трубопровода. В-третьих, на каждой насосной станции нефть попадает в резервуары и происходит их заполнение, а потом опорожнение при откачке нефти. В результате большого числа операций по приему и откачке нефти в резервуары значительное количество нефти теряется при больших «дыханиях» резервуаров.

Повсеместное распространение получила третья схема перекачки «из насоса в насос». По этой схеме весь трубопровод разбивается на несколько эксплуатационных участков длиной по 400-600 км.

Четвертая схема является промежуточной между первой (второй) и третьей. Она так же, как и третья, является транзитной, но не позволяет обеспечить режима подпора давления на входе последующей станции за счет насосов предыдущей.

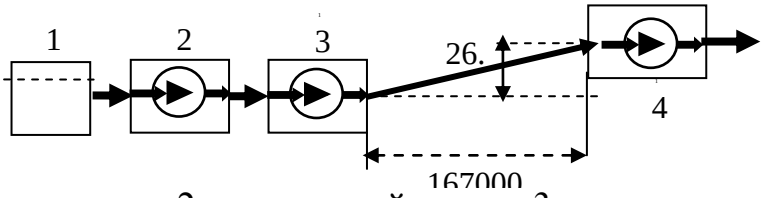
При перекачке «из насоса в насос» в начале головного участка строится станция с емкостью, на которой имеется резервуарный парк, подпорная насосная и магистральная насосная. Через определенные расстояния на трубопроводе строятся промежуточные насосные (от трех до шести). Нефть на

головной станции с емкостью попадает в трубопровод из резервуаров с помощью подпорной и магистральной насосных. Эта нефть под давлением непосредственно из трубопровода подается на прием насосных агрегатов следующей промежуточной насосной.

Расстояние от станции с емкостью до ближайшей промежуточной насосной определяется с таким расчетом, чтобы давление нефти, поступающей на промежуточную насосную, было выше кавитационного запаса магистральных насосных агрегатов. К этому давлению добавляется напор, создаваемый данной промежуточной насосной, и нефть по трубопроводу движется к следующей промежуточной насосной, где также поступает прямо на прием насосных агрегатов. Здесь снова поднимается давление нефти в трубопроводе и т. д. В конце участка нефть направляется в емкость. При работе по этой схеме все насосные участки оказываются связанными между собой единым потоком жидкости. При этом запасы энергии, сохранившиеся на участке между двумя промежуточными станциями, передаются на следующий участок и должны учитываться при рассмотрении характеристик насосной станции и трубопровода на этом участке. Поэтому условия работы каждой станции оказывают влияние на работу других станций, и все станции объединяются общим режимом работы.

Если при работе нефтепровода по схеме «из насоса в насос» одна из промежуточных станций выйдет из строя, то это не приведет к остановке всего нефтепровода. В этом случае участок нефтепровода для станции, расположенной перед остановившейся, увеличится вдвое, и будет равен расстоянию до следующей работающей станции. Ясно, что в этом случае сопротивление нового участка станет больше и для сокращения потерь придется работать с меньшей подачей. Конечно, изменение подачи должно произойти на всех работающих станциях нефтепровода от емкости до емкости. Такой режим работы называется работой через станцию. Бывают, особенно в первые периоды эксплуатации нефтепровода, режимы работы через две станции или еще большее число станций.

Эта схема наиболее прогрессивна, но она и более сложная в управлении технологическим процессом перекачки: требует синхронности подачи нефти по всей трассе трубопровода, обеспечение необходимых взаимозависимых напоров на всех насосных станциях. К примеру, к последней - четвертой схеме - относится и нефтепровод Атырау - Саратов. Атырау - головная нефтеперекачивающая станция. Ближайшая промежуточная станция Индер расположена от НПС Атырау на расстоянии 167 км (рисунок 1.1). Разность уровней расположения станций h = 26,1 м. Диаметр трубы - 1020 мм.



1 - резервуары; 2 - подпорный насос; 3 - головная станция Атырау;
4 - промежуточная станция Индер.

Рисунок 1.1 - Схема участка нефтепровода Атырау – Индер

Головная нефтеперекачивающая станция Атырау производит перекачку нефти из резервуаров через подпорный насос. На станции расположены четыре насоса по схеме последовательного соединения, один из них - резервный. Остальные могут работать по одному или совместно - последовательно. Тип насосов НМ - 2500-230 и НМ-3600-230, производительностью Q = 2500 м^3/час и Q = 3600 м^3/час. Двигатели синхронные соответственно СТД-2000-2 и СТД-2500 - 2 мощностью P = 2000 кВт и P = 2500 кВт с частотой вращения n = 3000 об/мин.

В магистральной насосной устанавливается несколько однотипных насосных агрегатов, объединяемых для последовательной работы. Число насосных агрегатов в насосной, как правило, превышает число агрегатов, требующихся для обеспечения режима, и некоторые из них являются резервными. Они включаются в работу при неисправности или выводе в ремонт одного из рабочих агрегатов. Обычно на магистральной насосной предусматривается по 4 агрегата из условия: 3 рабочих и 1 резервный.

Необходимый для предотвращения кавитации магистральных насосов запас энергии создается на *НПС* с емкостью *подпорными насосами*. В отличие от магистральных насосов, подпорные насосы создают небольшой дифференциальный напор, они более тихоходные и имеют небольшой кавитационный запас. Для обеспечения необходимого кавитационного запаса, подпорные насосы необходимо устанавливать ниже минимального уровня нефти в резервуарах.

в) Насосные агрегаты, используемые в электроэнергетике, следует выделить в отдельную группу. На ТЭЦ центробежные насосы являются наиболее энергоемкими потребителями (установленная мощность питательных насосов, например, может достигать 25 мВт) и в значительной мере определяют затраты на производство тепловой и электрической энергии. Поскольку такие энергетические объекты строились по унифицированным блочным схемам, анализ можно провести по типовому мощному насосному оборудованию различного назначения.

Электропривод питательных насосов. Питательные насосы в схеме водоснабжения ТЭЦ являются самыми мощными механизмами собственных нужд и по своему значению приравниваются к основному тепломеханическому оборудованию.

Таблица 2 - Характеристика двигателей питательных насосов, на ТЭЦ

№ п/п	Тип, марка электродвигателя	Мощность $P_н$, *кВт*	Напряж. $U_н$, *В*	Обороты *Об/мин*	Кол-во, *шт.*
1	2АЗМ-4000/6000У4	4000	6000	3000	8

Подача питательной воды в барабан котла является важнейшей составляющей всего технологического процесса. Регулирование уровня в барабане осуществляется регуляторами уровня и расхода через регулирующий клапан. Уровень в барабане котла определяется тепловой нагрузкой котла, давлением пара в барабане котла, расходом пара из барабана котла и расходом питательной воды в барабан. Давление в общем коллекторе, создаваемое питательными насосами, изменяется как в связи с указанными причинами, так и при оперативных переключениях. В настоящее время подача на общий коллектор на ТЭЦ регулируется ступенчато, параллельным подключением питательных насосов, а при необходимости снижения – отводом части подачи ЦН на его вход («перепуск»). Таким образом, потери мощности в нерегулируемом приводе питательных насосов складываются из потерь в дросселирующих устройствах питания котлов и в устройствах «перепуска».

В настоящее время для питания пяти действующих котлов используется 4 ПН. При обычном для ТЭЦ ночном сбросе нагрузки, потребление питательной воды снижается на 10%. При работе их днем в номинальном режиме, каждый из насосов недогружен в ночное время на приблизительно на 10%. Следовательно, потери мощности в дросселирующих устройствах котлов можно определить, как

$$\Delta N = \Delta N_{OTH} \cdot N_H \cdot n \ ,$$

где ΔN_{OTH} -относительное снижение мощности двигателей насосов;

N_H - номинальная мощность двигателя ПН, *кВт;*

n - количество насосов.

Потери электроэнергии за год определяются, как

$$\Delta W_{ПН} = \Delta N \cdot T_{РАСЧ}$$

где $T_{РАСЧ} = 8760 \cdot 0{,}33$- годовая длительность ночного сброса мощности ТЭЦ.

В связи с необходимостью поддержания давления в общем коллекторе, при сбросе нагрузки срабатывает схема «перепуска», при которой часть воды с выхода ПН поступает на его вход.

Потери электроэнергии при этом можно оценить, как

$$\Delta W^{"} = \Delta N_{OTH} \cdot N_H \cdot n \cdot T_{РАСЧ}$$

Электроприводы багерных насосов и насосов осветленной воды. Эти насосы служат для перекачки гидрошлаковой смеси на золоотвал и возврата осветленной воды для повторного использования.

Таблица 3 - Характеристика двигателей багерных насосов ТЭЦ

Тип, марка электродвигателя	Мощность $P_н$, *кВт*	Напряж. $U_н$, *В*	Скорость вр.*об/мин*	Кол-во, *шт.*
А4-450-6	630	6000	1000	1
ДАЗО4 450У6У1	630	6000	1000	2

Таблица 4 - Характеристика двигателей насосов гидрозолоудаления ТЭЦ

Тип, марка электродвигателя	Мощность $P_н$, *кВт*	Напряж. $U_н$, *В*	Скорость вр.*об/мин*	Кол-во, *шт.*
А114-4	320	6000	1500	1
ДАЗО4-400ХК-АТ2	315	6000	1500	4

Таблица 5 - Характеристика двигателей насосов осветленной воды ТЭЦ

Тип, марка электродвигателя	Мощность $P_н$, *кВт*	Напряж. $U_н$, *В*	Скорость вр.*об/мин*	Кол-во, *шт.*
А355L-4	250	6000	1500	7
А4-400Х-8У3	250	6000	750	2
ДАЗО4-400ХК-АТ2	315	6000	1500	4

Производительность багерного насоса необходимо регулировать для поддержания необходимого уровня в накопительной емкости. Методы дросселирования в этом случае являются неприемлемыми, так как связаны с постоянным износом и выходом из строя запорно – регулирующей аппаратуры из – за состава удаляемой пульпы. На ТЭЦ используется регулирование «перепуском», то есть сбросом части пульпы с выхода насоса на его вход. В данном случае установка регулируемого электропривода насоса является *оптимальным* решением, позволяющим:

- сэкономить значительную долю электроэнергии, потребляемой двигателем насоса;
- уменьшить износ насосного агрегата за счет снижения частоты вращения лопастей в режиме пониженной производительности (Основной недостаток багерных насосов – это быстрый износ рабочих колес, срок службы которых не превышает 700 ч.).

Потери мощности в электроприводе багерного насоса в первом приближении можно определить, как мощность на прокачку возвратной золошлаковой пульпы по формуле

$$\Delta W_{\sum} = kN_H T,$$

где K – относительное количество возвратной пульпы, принимаем K = 0,2;

$N_{\text{н}}$ - номинальная мощность двигателя багерного насоса, *кВт;*

T - время работы насоса, *час*.

Кроме экономии электроэнергии, при внедрении регулируемого электропривода багерного насоса появляется эффект от снижения износа насосного агрегата который сложно рассчитать, но он очевиден. Насос осветленной воды подает воду из отстойника на насосы гидрозоло-удаления и насосы орошающей воды, завершая замкнутый цикл удаления шлака и золы.

Электропривод циркуляционных и конденсатных насосов. Охлаждение нагретой в конденсаторе воды происходит в градирнях, поэтому режимы работы циркуляционных насосов в схемах оборотного водоснабжения связаны как с процессами, происходящими в градирнях, так и с режимами работы конденсаторов. Производительность циркуляционных насосов необходимо регулировать в неравномерной части графика нагрузок, а также при переходе с зимнего на летний сезон в зависимости от количества теплоты, которое необходимо отвести.

Расход охлаждающей воды в конденсаторе и ее температура определяют оптимальное давление пара в конденсаторе и могут быть связаны с режимом работы градирни, однако непрерывное управление этим процессом достаточно сложно и в сложившихся режимах работы ТЭЦ не представляют значительного интереса с точки зрения энергосбережения.

Таблица 6 - Характеристика двигателей циркуляционных насосов

Тип, марка электродвигателя	Мощность $P_н$, *кВт*	Напряж. $U_н$, *В*	Скорость вр.об/мин	Кол-во, *шт.*
А13-62-8У4	630	6000	750	6
А4-450У-8У3	630	6000	750	4

Электропривод сетевых насосов и насосов подпитки теплосетей. Учитывая большую установленную мощность сетевых насосов (их единичная мощность может достигать нескольких мегаватт, а количество – более десяти), используемых на ТЭЦ, их можно отнести к наиболее крупным внутренним потребителям электроэнергии. Очевидно, что производительность сетевых насосов должна изменяться соответственно режиму теплопотребления. Последнее осуществляется ступенчато, изменением числа параллельно работающих агрегатов и (или) дросселированием. Оба варианта регулирования обладают значительными недостатками, что будет показано ниже. Здесь же следует только отметить, что внедрение регулируемого электропривода, кроме ликвидации указанных недостатков, определяет возможности комплексной автоматизации системы горячего водоснабжения. Указанное относится и к группе насосов подпитки теплосетей.

Таблица 7 - Характеристика двигателей сетевых насосов ТЭЦ

Тип, марка электродвигателя	Мощность $P_н$, *кВт*	Напряж. $U_н$, *В*	Скорость вр.*об/мин*	Кол-во, *шт.*
4АЗМ-1600/6000УХЛ-4	1600	6000	3000	4
А4-400У-4У3	630	6000	1500	2
А4-450-4	800	6000	1500	1
ДАЗО12-55-4МУ1	500	6000	1500	1
ДАЗО4-400У-4У1	630	6000	1500	1

Таблица 8 - Характеристика двигателей насосов подпитки теплосетей ТЭЦ

Тип, марка электродвигателя	Мощность $P_н$, *кВт*	Напряж. $U_н$, *В*	Скорость вр.*об/мин*	Кол-во, *шт.*
А-114-4	320	6000	1500	11
А355Х-4	315	6000	1500	3
ДАЗО4-400ХК-АТ2	315	6000	1500	4

г) Режимы работы насосов, исполняющих функции транспорта жидких продуктов в различных технологических схемах металлургии, химической и других отраслей промышленности, требуют отдельного глубокого анализа. Регулирование выхода ЦН в них может производиться по напору, подаче, уровню в принимающей емкости. Однако во всех этих случаях требования энергосбережения и включения ЦН в общую схему автоматизации технологических процессов обуславливают применение регулируемого электропривода.

Проведенный анализ режимов работы насосных агрегатов различного назначения позволяет отметить следующее:

- подавляющее большинство насосных агрегатов требует регулирования выходных параметров: подачи и напора, чаще всего в функции уровня в принимающей емкости или давления в диктующей точке технологической схемы;

- значительное количество и большая установленная мощность ЦН позволяет считать их наиболее значительным резервом экономии энергоресурсов;

- насосные агрегаты объединяет то, что они проектируются и устанавливаются с учетом максимального расхода, часто с запасом «на развитие», поэтому в значительной части рабочего цикла работают в режимах пониженной производительности;

- выбор способов регулирования выходных параметров ЦН должен выполняться с учетом особенностей режимов работы, параметров регулирования (диапазон, быстродействие), характерных для каждой из рассмотренных групп насосов и оценки энергозатрат на их реализацию.

1.2 Энергетические соотношения в силовом канале электропривода центробежных насосов

Задачей данного раздела является определение взаимозависимостей параметров электропривода, насоса и трубопровода, на который ЦН работает.

На рисунке 1.2 представлена полная функциональная схема автоматизированного электропривода производственного механизма. Система управления СУ привода, включающая в себя силовую (ССУ) и информационную (ИСУ) составляющие, получает питание от сети с параметрами U_c,I_c,f_c и преобразует их для питания двигателя ЭД в соответствии с режимом работы последнего. Передаточный механизм ПМ служит для преобразования механических параметров на валу ЭД – момента M_B и частоты вращения ω_B и передачи их исполнительному механизму ИМ. В замкнутых системах АЭП сигнал управления формируется при сравнении сигналов задающего устройства (ЗУ) и датчиков обратных связей (ДОС). В конкретных агрегатах могут отсутствовать отдельные элементы схемы.

Центробежные механизмы имеют ряд особенностей. Во - первых, ЦМ, как исполнительный механизм, преобразует механическую мощность, характеризуемую моментом на валу M_B и частотой вращения ω_B, в гидравлическую, которая определяется напором $H_{ЦМ}$ и подачей $Q_{ЦМ}$. Во - вторых, в подавляющем большинстве случаев, рабочее колесо ЦМ сопрягается непосредственно с валом двигателя, без передаточных устройств.

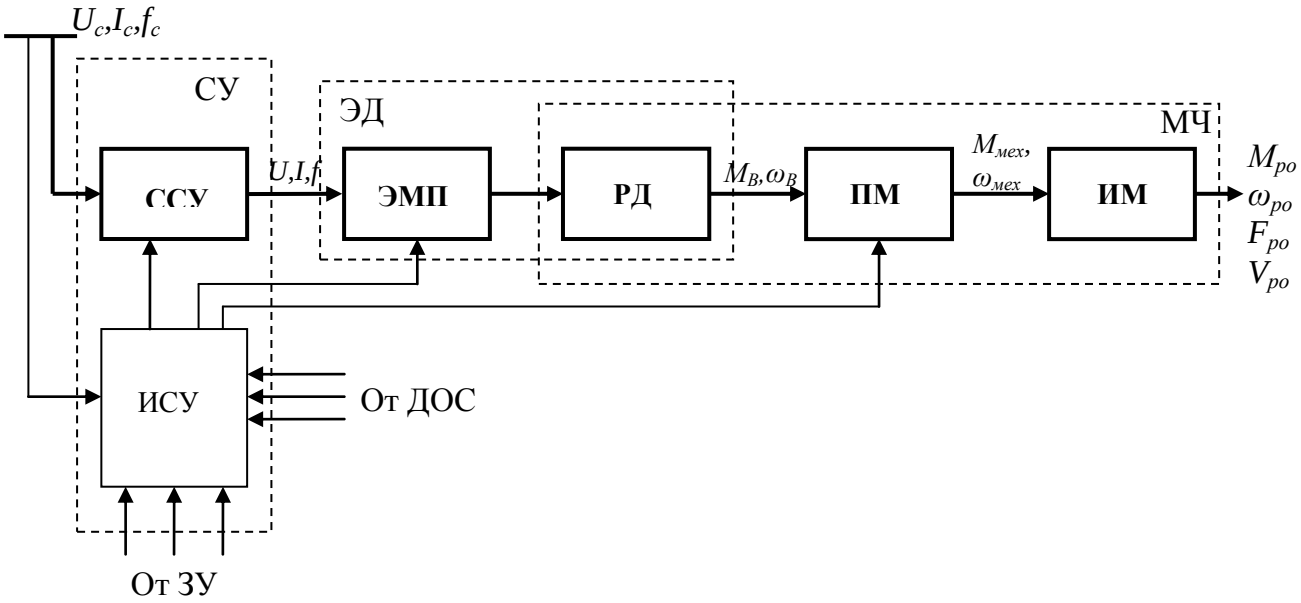


Рисунок 1.2 – Общая функциональная схема автоматизированного электропривода производственного механизма

Это позволяет получить максимальные эксплуатационные показатели. Для изменения напора и подачи на выходе агрегата вместо регулируемого электропривода (или одновременно с ним) используется разного рода

гидравлическая и пневматическая запорная аппаратура. Электродвигатель, поскольку нас интересует только возможность регулирования M_B и ω_B, представим одним блоком ЭД. С учетом изложенного, функциональная схема автоматизированного электропривода центробежного механизма примет вид, представленный на рисунке 1.3.

Рассматриваемая система содержит переменные различного характера – электрические, механические, гидравлические, поэтому для решения задачи воспользуемся диаграммой мощностей, изображенной на рисунке 1.4.

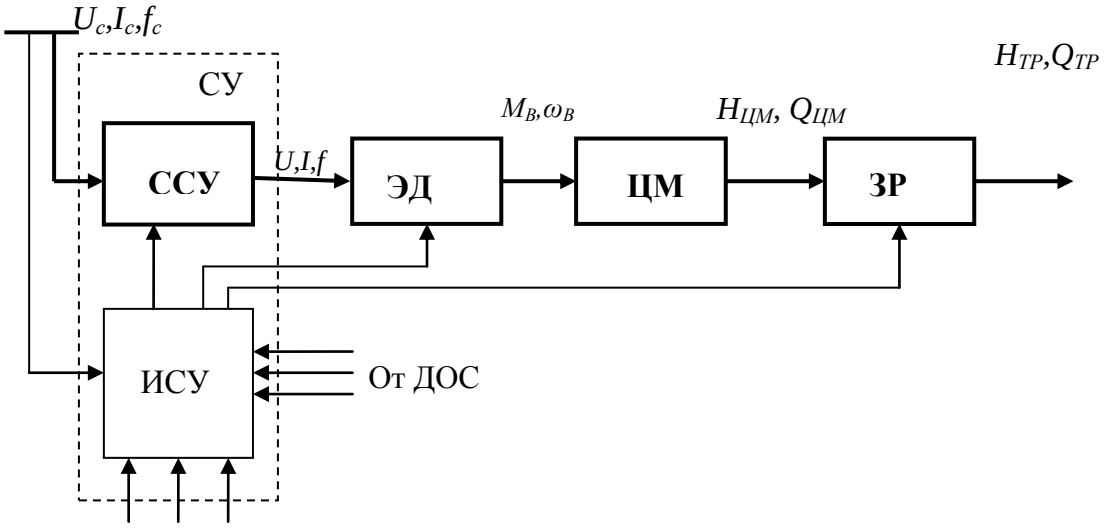
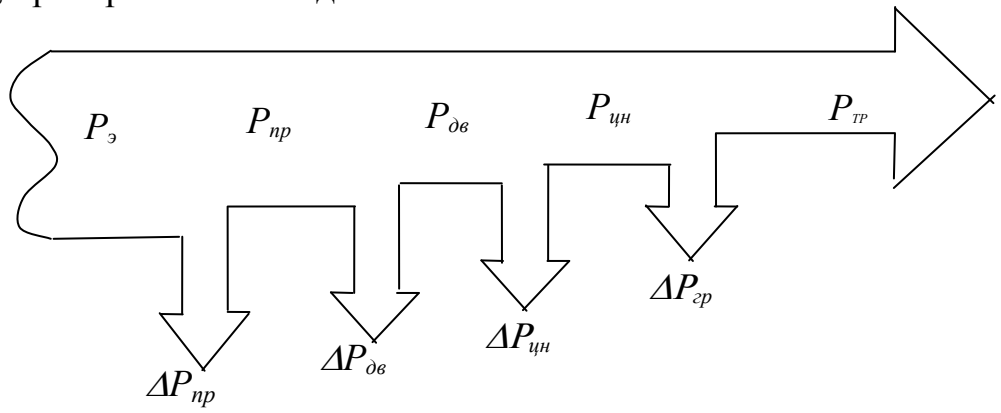


Рисунок 1.3 – Функциональная схема автоматизированного электропривода центробежного механизма

Последовательно рассмотрим составляющие баланса мощностей системы. Электрическая мощность, потребляемая двигателем в режиме, соответствующем полностью открытой задвижке и который назовем базовым режимом работы,

$$P_{Эб} = \frac{H_\delta Q_\delta}{\eta_\delta}, \qquad (1.1)$$

где H_δ, Q_δ, η_δ - значения напора, подачи и коэффициента полезного действия агрегата, равного произведению коэффициентов полезного действия насоса, преобразователя и двигателя.



$P_{тр}$ - полезная гидравлическая мощность на входе трубопровода; $P_{цн}$ - гидравлическая мощность на выходе ЦН; $P_{дв}$ - механическая мощность на валу двигателя насоса; $P_{пр}$ - электрическая мощность, потребляемая двигателем насоса; $P_{э}$ - электрическая мощность, потребляемая из сети электроприводом насоса; $\Delta P_{гр}$, $\Delta P_{цн}$, $\Delta P_{дв}$, $\Delta P_{пр}$ – потери мощности соответственно в гидравлическом регуляторе, насосе, двигателе и преобразователе.

Рисунок 1.4 - Диаграмма мощностей насосного агрегата

Гидравлическая мощность на входе трубопровода (после регулятора) равна:

$$P_{ТР}=H_{ТР}Q_{ТР,} \qquad (1.2)$$

где $H_{ТР}$ – давление на входе трубопровода при производительности $Q_{ТР}$.

$H_{ТР}$ определяется гидравлической характеристикой трубопровода

$$H_{ТР} = Hc + Z \cdot Q^{\alpha}, \qquad (1.3)$$

где H_c – статический напор, обусловленный разностью уровней начала и конца трубопровода;

Z – параметр, характеризующий гидравлическое сопротивление трубопровода;

степень α обычно принимают в пределах (1,5….2,5), предварительно примем $\alpha = 2$.

Гидравлическая мощность на выходе центробежного насоса (до регулятора) равна:

$$P_{ЦН}=H_{ЦН}Q_{ЦН,}$$

где $H_{ЦН}$ – давление на входе трубопровода при производительности Q.

Напорные характеристики ЦН приводятся заводом-изготовителем в паспортах, прейскурантах и каталогах. Для аналитических расчетов характеристику можно представить в виде:

$$H_{ЦН} = H_0 - k_H \cdot Q^2, \qquad (1.4)$$

где H_0 - напор насоса при закрытой задвижке ($Q = 0$);

k_H - коэффициент, определяемый по паспортной характеристике насоса.

В случае, когда насос работает непосредственно на трубопровод («на открытую задвижку») в стационарном режиме

$$P_{ЦН} = P_{ТР}.$$

и гидравлические параметры системы определяются точкой пересечения напорных характеристик ЦН и трубопровода.

В общем случае для обеспечения заданных напора и подачи на выходе ЦН устанавливается *гидравлический регулятор*, на котором теряется мощность $\Delta P_{гр}$. При данном Q

$$\Delta P_{гр} = \Delta H_{гр} \cdot Q,$$

где $\Delta H_{гр}$ - изменение напора на регуляторе.

Анализ потерь на гидрорегуляторе будет проведен ниже.

Для общности суждений и оценок последующие соотношения будут приведены в относительных единицах (о.е.). За базовые значения напора, подачи и частоты вращения рабочего колеса примем их номинальные значения для ЦН. Напор насоса при полностью закрытой задвижке для любой частоты вращения рабочего колеса равен:

$$H_{0*} = H_{0*}\, \omega_*^2,$$

и уравнения (1.3) и (1.4) в относительных единицах примут вид:

$$H_* = H_{0*}(\omega_*^2 - C_{H*} Q_*^2); \tag{1.5}$$

$$H_* = H_{C*} + Z_* Q_*^2, \tag{1.6}$$

где ω_* - угловая скорость вращения рабочего колеса насоса, о.е.;

Z_* - гидравлическое сопротивление трубопровода.

Коэффициент $C_н$ определяется из условия $H_* = 1$ при $Q_* = 1$:

$$C_H = 1 - \frac{1}{H_{0*}} \ .$$

Совместное решение уравнений (1.5) и (1.6) дает:

$$Q_* = \sqrt{\frac{H_{o*}\omega_*^2 - H_{C*}}{C_H H_{o*} + Z_*}} \ ; \tag{1.7}$$

$$H_* = \frac{H_{o*}(C_H H_{C*} + Z_* \omega_*^2)}{C_H H_{o*} + Z_*} \ . \tag{1.8}$$

Гидравлическая мощность на входе трубопровода

$$P_{TP*} = Q_{TP*} H_{TP*} = \frac{H_{0*}(C_H H_{C*} + Z_* \omega_*^{\,2})}{C_H H_{0*} + Z_*} \sqrt{\frac{H_{0*}\omega_*^{\,2} - H_{C*}}{C_H H_{0*} + Z_*}} \,. \qquad (1.9)$$

В частном случае, при $H_C = 0$, $Z = 1$, из уравнений (1.7), (1.8), (1.9) получаем известные формулы гидравлического подобия

$$Q_* = \omega_*; \quad H_* = \omega_*^{\,2}; \quad P_* = \omega_*^{\,3} \,. \qquad (1.10)$$

Потери мощности в ЦН обусловлены различного рода утечками жидкости, преодолением гидравлических сопротивлений при прохождении жидкости через насос, трением в подшипниках, уплотнениях, трением диска колеса ЦН о жидкость и т.д., являются функцией производительности насоса и оцениваются зависимостью $\eta_{цн} = f(Q)$.

Изменение КПД насоса при регулировании подачи определяется по паспортной характеристике, представляемой заводом – изготовителем. В аналитических расчетах для описания этой кривой используют различные варианты аппроксимации. Так, в [41] предлагается представление зависимости $\eta(Q)$ в виде:

$$\eta_{цн} = (2Q - Q^2)\eta_н \,, \qquad (1.11)$$

где $\eta_н$ – номинальное значение КПД данного насоса.

Авторами [3] использовалось представление КПД как гармонической функции

$$\eta_{цн} = \eta_н \sum_{n=1,2,4} k_n \sin(n\frac{\pi}{2}Q) \,, \qquad (1.12)$$

где k_α – коэффициент аппроксимации.

В [2] характеристику $\eta(Q)$ представляют в виде

$$\eta_{цн} = kQ - k_1 Q^2 \,,$$

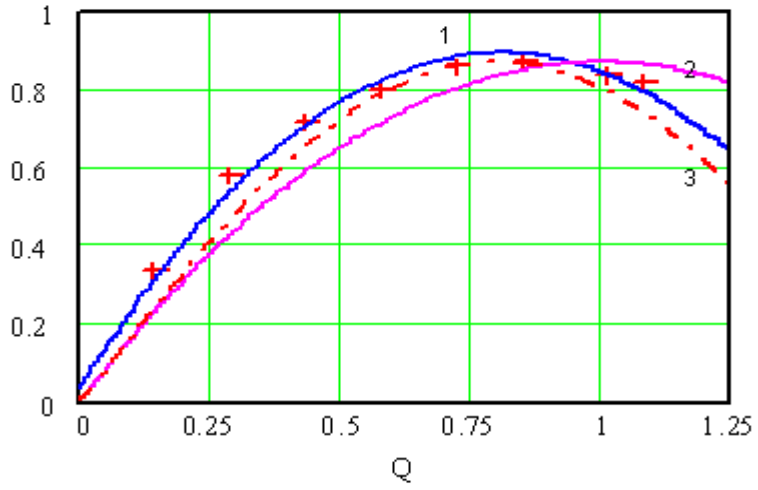
где k и k_1 – коэффициенты, значения которых для различных типов ЦН приведены в [2].

Современные вычислительные средства позволяют просто и с высокой точностью аппроксимировать кривую КПД. Ниже приведен вариант расчета коэффициентов аппроксимации паспортной или экспериментальной характеристик $\eta(Q)$ для подпорного насоса 12НД$_С$ Н с использованием стандартной подпрограммы (приложение Б).

В этом случае кривую $\eta(Q)$ представляем полиномом второй степени:

$$\eta_{цн}(Q) = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 . \qquad (1.13)$$

Коэффициент корреляции расчетных кривых (рисунок 1.5) и значений КПД из заводской характеристики (отмечены крестиками) составил 0.979 при использовании выражения (1.13), 0.990 - выражения (1.14). Расчеты показывают высокую точность последнего варианта (коэффициент корреляции 0.996), который без каких-либо затруднений может быть использован в дальнейших аналитических выводах и расчетах.



1 - по подпрограмме (1); 2 - по формуле (1.13); 3 – по формуле (1.14).
Рисунок 1.5 - Аппроксимация КПД ЦН

Мощность Рэ, потребляемая электроприводом насоса, может быть определена из (1.1) и (1.9), как

$$P_{Э*} = \frac{H_{0*}(C_H H_{C*} + Z_* \omega_*^{\,2})}{\eta(Q)(C_H H_{0*} + Z_*)} \sqrt{\frac{H_{0*}\omega_*^{\,2} - H_{C*}}{C_H H_{0*} + Z_*}} \ , \qquad (1.14)$$

где $\eta(Q)$ – общий КПД, учитывающий потери в преобразователе, двигателе, насосе агрегата.

Величина $P_э$ определяется, кроме характера нагрузки, режимом его работы, схемой и алгоритмами управления. При регулировании давления (расхода) гидрорегулятором электропривод, независимо от величины этих параметров, обеспечивает максимальный напор насоса и потребление электроэнергии у него изменяется несущественно, за счет гидравлических потерь на задвижке и самом насосном агрегате. При применении регулируемого электропривода, в соответствии с заданными параметрами снижается скорость вращения и потребление электрической энергии. Дополнительную экономию в этом случае даст и разработка оптимальных по

энергосбережению алгоритмов и законов управления приводом. Для расчета энергетических показателей насосного агрегата в целом необходимо определить потери электрической мощности в двигателе и используемом для регулирования преобразователе, составляющие мощности на входе системы. Важное значение имеет уровень потребления реактивной мощности, определяющий загруженность питающих сетей и потери в них. При использовании для регулирования двигателя насоса вентильных преобразователей учитывается и влияние несинусоидальности напряжений и токов на энергетические и эксплуатационные характеристики привода и на питающую сеть. Соотношения, полученные в данном разделе, являются основой для выбора и расчета системы автоматизированного электропривода ЦН.

1.3 Способы регулирования режимов работы насосных агрегатов

Целью регулирования режимов работы насосных станций является поддержание постоянства напора или подачи в заданной точке трубопровода либо их изменения в соответствии с требованиями технологии и изменениями внешних факторов. Осуществить такое управление можно, целенаправленно изменяя характеристики насоса или трубопровода.

Анализ, проведенный в предыдущем разделе, позволяет определить варианты воздействующих параметров системы, которые подразделяются на конструкторско-технологические и оперативно-эксплуатационные.

Конструкторско-технологические мероприятия (подбор параметров насоса, обточка или замена рабочего колеса насоса и др.) выполняются на стадии проекта, монтажа и наладки системы и далее не рассматриваются. В настоящее время известны четыре метода оперативного регулирования режимов работы нефтепроводов:

- регулирование методом перепуска части подачи насоса на его вход;
- регулирование методом последовательного (параллельного) включения насосов;
- регулирование методом дросселирования трубопровода;
- регулирование изменением частоты вращения рабочего колеса насоса.

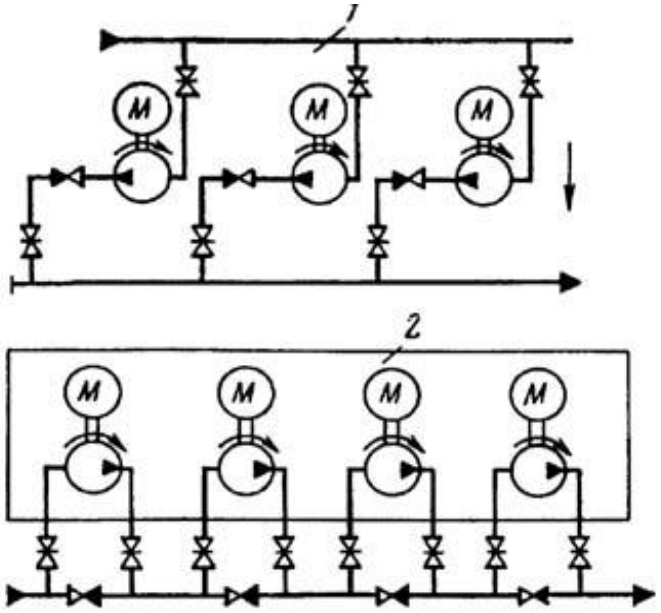
Регулирование перепуском относится к способам управления с заведомо низким КПД. Энергия, затрачиваемая на циркуляцию жидкости по холостому кругу, не создает полезной работы. Проведем краткий анализ других методов регулирования режимов работы насосных агрегатов.

1.3.1 Регулирование режимов работы насосных станций включением насосов на последовательную (параллельную) работу.

По компоновочному решению различают насосные станции с параллельным и последовательным соединением насосных агрегатов (рисунок 1.6). Первый вариант характерен для систем водоснабжения и канализации

населенных пунктов, промышленных предприятий, ТЭЦ, второй используется в магистральных трубопроводах.

При параллельной схеме соединения объединяются между собой соответственно входные и выходные патрубки насосов. В этом случае общая подача суммируется из подач каждого насоса, а напор всех ЦН одинаков и соответствует напору одного насоса. Для предотвращения перетоков жидкости из одного насоса в другой из-за разницы параметров ЦН, после выходных патрубков насосов предусматривают обратные клапаны. Такая схема позволяет при требуемом небольшом напоре, равном напору одного насоса, получить большую подачу за счет суммирования подач нескольких ЦН.



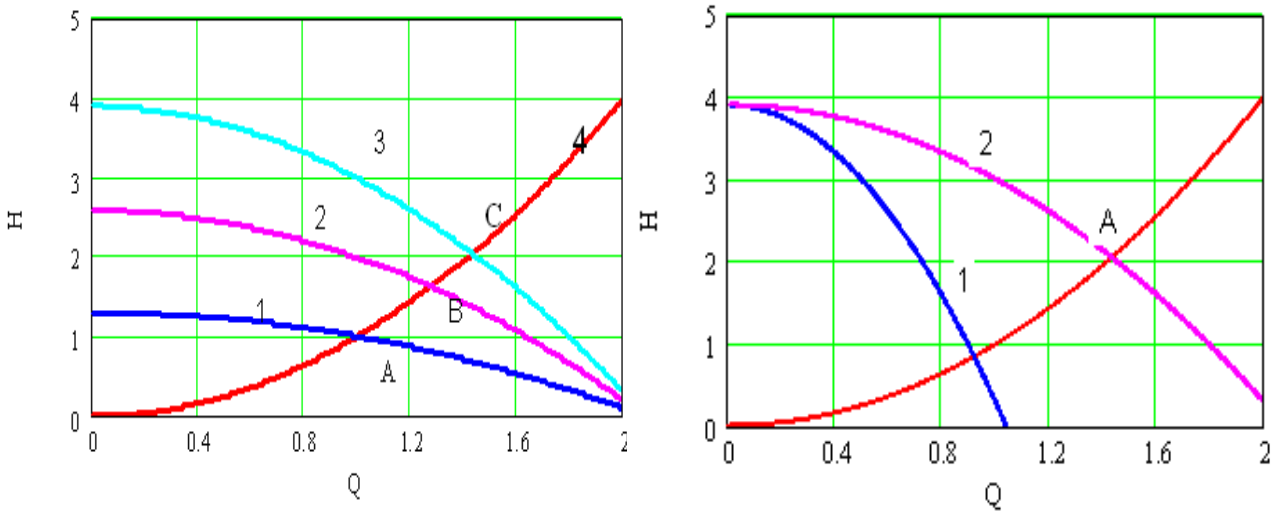
1 – параллельная схема соединения насосов; 2 – последовательная схема соединения насосов.

Рисунок 1.6 - Схемы соединения агрегатов насосных станций

При последовательной схеме транспортируемый поток поступает из коллектора в первый насос и обратно в коллектор, потом во второй насос и после него в коллектор и т.д. На случай вывода насоса из работы параллельно насосному агрегату монтируется участок коллектора с обратным клапаном, позволяющим пропускать поток мимо неработающего агрегата. Последовательная схема включения используется для магистральных насосов и позволяет получить высокое давление в трубопроводе, требуемое для подачи жидкости до следующей станции. Магистральные насосы создают определенное давление жидкости в трубопроводе, которое снижается при перемещении жидкости в трубопроводе. При одинаковых характеристиках включенных последовательно трех насосов давление после каждого насоса добавляется на одну треть давления, развиваемого всей насосной.

Характеристики насосов, при одном (кривая 1), двух (кривая 2), трех (кривая 3), включенных последовательно, насосах и характеристика трубопровода (кривая 4), приведены на рисунке 1.7,а. Q_A, Q_B, Q_C - подача насосов в соответствующих режимах работы насосной станции (статическая составляющая напора $H_c = 0$). На рисунке 1.7,b представлены характеристики параллельной работы двух ЦН на один коллектор.

a) b)



A,B,C - рабочие точки при различном числе работающих агрегатов.
Рисунок 1.7 - Характеристики системы при различном количестве последовательно (a) и параллельно (b) работающих агрегатов

Преимуществами метода являются простота, возможность регулирования напора в широком диапазоне и высокий коэффициент полезного действия (отсутствие дополнительных потерь) системы насос-трубопровод, если их характеристики согласованы, хотя и требует изменения напора в широком диапазоне его значений. Однако этот метод имеет существенные недостатки:

- необходимость дополнительного парка насосов;
- дискретность регулирования подачи и напора, не позволяющая обеспечить непрерывное и качественное поддержание заданных параметров (нельзя получить промежуточные значения напора и подачи, в том числе меньше тех, что имеют место при работе одного насоса);
- возможность возникновения гидравлических ударов в системе при ступенчатом регулировании выходных параметров;
- частые пуски двигателей, что снижает срок службы оборудования.

Указанные недостатки в значительной мере устраняются при применении этого метода в сочетании с методами дросселирования или регулирования скоростью рабочего колеса насоса.

1.3.2 Регулирование режимов работы насосных агрегатов

дросселированием.

Из уравнений (1.7), (1.8), (1.9) следует, что при заданных характеристиках насоса и трубопровода подачу и напор можно регулировать, изменяя гидравлическое сопротивление на входе магистрали Z или частоту вращения рабочего колеса насоса ω. В первом случае в о.е. $\omega_* = 1$, уравнения (1.7) и (1.8) принимают вид:

$$Q_* = \sqrt{\frac{H_{o*} - H_{C*}}{C_H H_{o*} + Z_*}} \quad ;$$

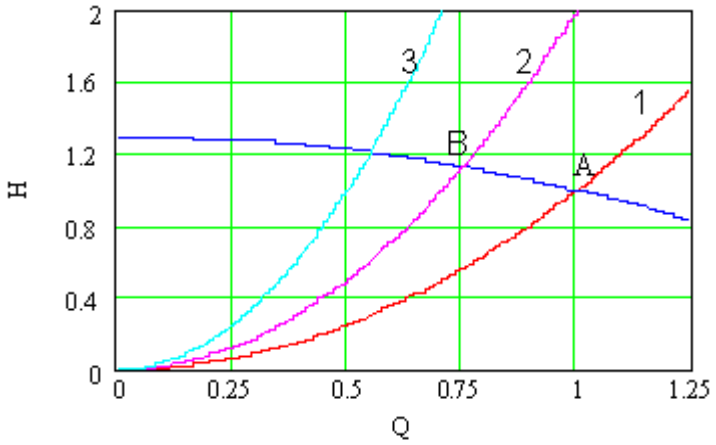
$$H_* = \frac{H_{o*}(C_H H_{C*} + Z_*)}{C_H H_{o*} + Z_*} \quad .$$

Гидравлическая мощность на входе трубопровода

$$P_{TP*} = Q_{TP*} H_{TP*} = \frac{H_{0*}(C_H H_{C*} + Z_*)}{C_H H_{0*} + Z_*} \sqrt{\frac{H_{0*} - H_{C*}}{C_H H_{0*} + Z_*}} \, .$$

Точка А напорной диаграммы системы «насос – трубопровод», изображенной на рисунке 1.8, соответствует работе агрегата с открытой задвижкой.

При дросселировании выходе насоса вводится дополнительное гидравлическое сопротивление регулятора $Z_{гр}$, изменяется характеристика трубопровода и система работает в точке В, с новыми значениями H и Q.



$1 - Z_{гр*} = 0$; $2 - Z_{гр*} = 1$; $3 - Z_{гр*} = 3$.

Рисунок 1.8 - Регулирование подачи ЦН дросселированием

Общее сопротивление на выходе насоса

$$Z_* = Z_{маг*} + Z_{гр*},$$

где $Zгр_*$- характеризует сопротивление гидрорегулятора.

Гидравлическое сопротивление регулятора, необходимое для обеспечения производительности Q; о.е.:

$$z_{гр*} = \frac{H_{0*}(1 - Q_*^{\,2}) - H_{c*}}{Q_*^{\,2}}, \qquad (1.15)$$

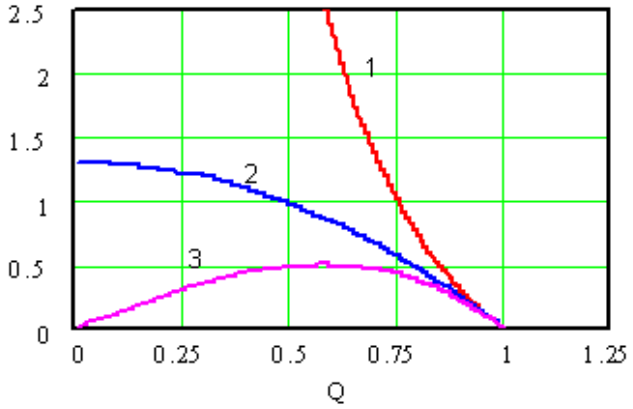
при этом на гидрорегуляторе давление изменится на величину

$$\Delta H_* = z_{ГР*} Q_*^{\,2} = H_{0*}(1 - Q_*^{\,2}) - H_C\ , \qquad (1.16)$$

а потери мощности на нем составят

$$\Delta P_{ГР*} = \Delta H_* Q_* = (H_{0*} - H_{C*})Q_* - H_{0*} Q_*^{\,3}. \qquad (1.17)$$

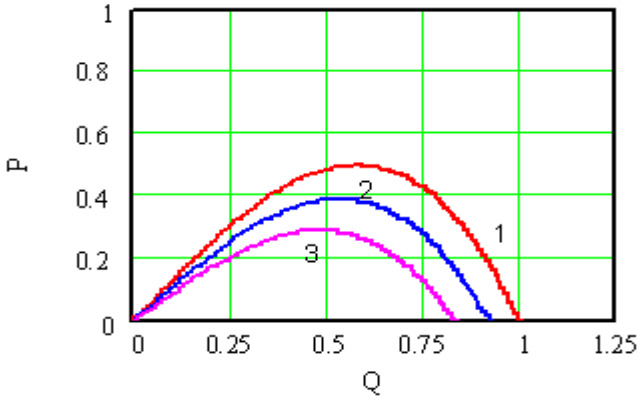
На рисунке 1.9 представлены результаты расчетов, характеризующие изменение сопротивления гидрорегулятора в зависимости от требуемой подачи и соответствующие им изменение напора и потери мощности. Последние зависят от величины H_C (рисунок 1.10) и могут достигать 50% потребляемой мощности (при $H_{C*}=0$, $H_{0*}=1.3$).



$1 - Z_{гр}$; $2 - \Delta H_{гр}$; $3 - \Delta P_{гр}$; $H_c=0$, $H_o=1.3$.

Рисунок 1.9 - Потери мощности при дросселировании

Относительные значения потерь мощности в гидрорегуляторе снижаются при увеличении величины H_c. Кроме того, при этом пик максимума потерь смещается в зону меньших значений Q, то есть выводится из области активного регулирования подачи.



$1 - H_c = 0$; $2 - H_c = 0.2$; $3 - H_c = 0.4$.

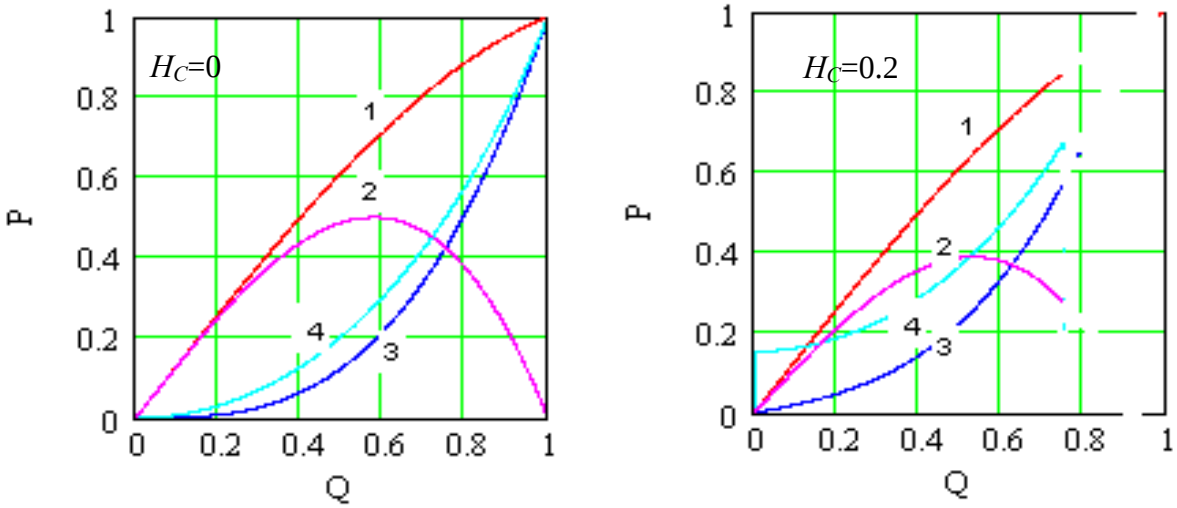
Рисунок 1.10 - Потери мощности при регулировании подачи дросселированием

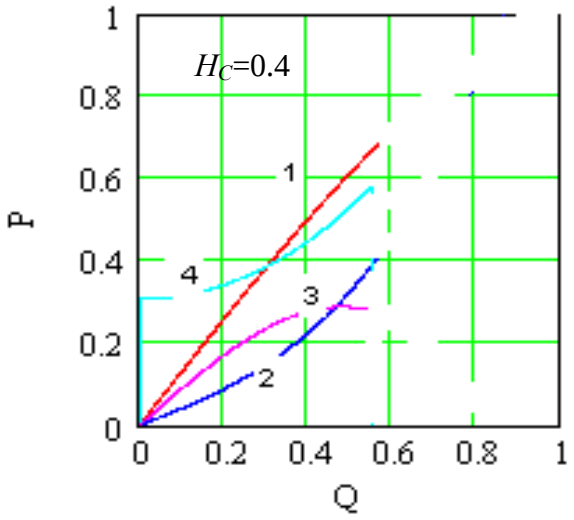
На рисунке 1.11 представлены результаты расчетов мощностей при регулировании подачи насосного агрегата дросселированием при различных значениях противодавления.

Для оценки влияния гидрорегулятора на баланс мощностей введем значение его КПД, равного отношению гидравлических мощностей на выходе гидрорегулятора и насоса (соответственно кривые 2 и 1). При заданной подаче Q КПД гидрорегулятора можно оценить, как

$$\eta_{гр} = \frac{H_{гр}}{H_{ЦН}} \quad ,$$

где $H_{гр}$ и $H_{ЦН}$ – напор соответственно на выходе гидрорегулятора и насоса.





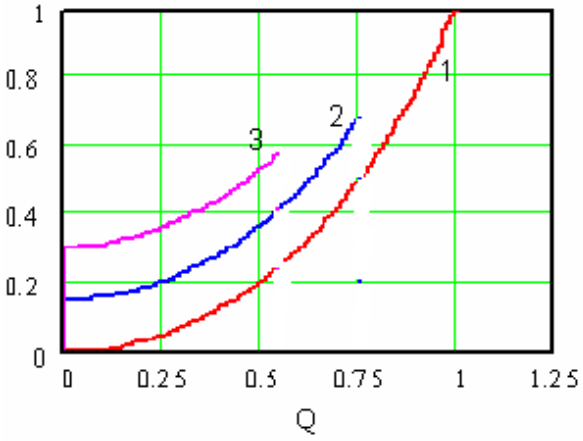
1 – гидравлическая мощность на выходе ЦН; 2 – гидравлическая мощность на выходе гидрорегулятора; 3 – потери на гидрорегуляторе; 4 – КПД гидрорегулятора.

Рисунок 1.11 - Регулирование подачи гидрорегулятором

Значения $\eta_{гр}$, расчитанные для различных значений *Hc*, приведены на рисунке 1.12 и иллюстрируют чрезвычайно низкую эффективность регулирования подачи насоса дросселированием.

Кроме потерь мощности на преодоление дополнительного гидравлического сопротивления, следует отметить увеличение относительных потерь (снижение КПД) самого центробежного насоса в соответствии с рисунком 1.5.

Зависимость общего КПД агрегата от величины подачи и противодавления рассчитана по (1.15) – (1.17) с учетом изменения КПД ЦН при регулировании и представлена на рисунке 1.13,а.



1 – H_c = 0; 2 – H_c = 0.2; 3 – H_c =0.4.

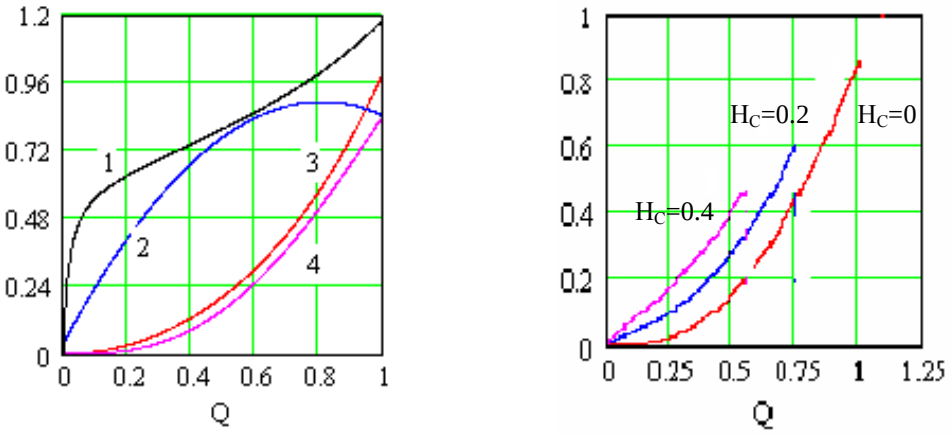
Рисунок 1.12 - КПД гидрорегулятора

Здесь механическая мощность на валу двигателя определена, как

$$P_{дв}(Q) = \frac{P_{ЦН}(Q)}{\eta_{ЦН}(Q)}, \qquad (1.18)$$

а КПД ЦН рассчитывается в соответствии с (1.13). Применение дросселирования приводит к значительному снижению общего КПД агрегата, потери в гидрорегуляторе при глубоком регулировании подачи превосходят потери в насосе в несколько раз.

a) b)



1 – механическая мощность на валу ЦН при регулировании дросселированием; 2 – паспортное значение КПД ЦН;
3 – КПД гидрорегулятора; 4 – общий КПД агрегата.
Рисунок 1.13 – КПД агрегата при регулировании подачи дросселированием

Рисунок 1.13,б иллюстрирует зависимость общего КПД агрегата от значения статического противодавления.

1.3.3 Регулирование режимов работы насосных агрегатов изменением частоты вращения рабочего колеса.

Применяя регулируемый привод, можно напрямую плавно управлять скоростью вращения рабочего колеса ЦН и тем самым обеспечить требуемые значения расхода и подачи без использования дросселирующей арматуры. Последняя устанавливается только для вспомогательных целей и в процессе перекачки полностью открыта, что снижает гидравлическое сопротивление сети.

При регулировании подачи изменением частоты вращения колеса насоса и полностью открытой задвижке на выходе (Z_*=1) уравнения (1.7), (1.8) и (1.9) примут вид:

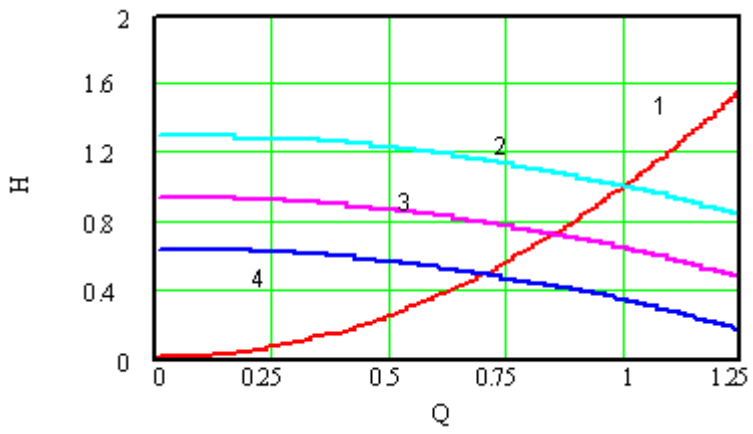
$$Q_* = \sqrt{\omega_*^2 - \frac{H_{c*}}{H_{0*}}}; \qquad (1.19)$$

$$H_* = C_н H_{c*} + \omega_*^2; \qquad (1.20)$$

$$P_{TP*} = (C_н H_{c*} + \omega_*^{\,2})\sqrt{\omega_*^{\,2} - \frac{H_{c*}}{H_{0*}}}. \qquad (1.21)$$

В этом случае снижение подачи происходит за счет уменьшения напора, создаваемого насосом (рисунок 1.14), при этом исключаются дополнительные потери мощности в гидрорегуляторе и при любом значении подачи $P_{ЦН} = P_{TP}$.

.



1 – характеристика магистрали; 2, 3, 4 – характеристики ЦН при регулировании $\acute{\omega}$.

Рисунок 1.14 - Регулирование подачи ЦН изменением частоты вращения рабочего колеса

При расчетах эффективности внедрения регулируемых электроприводов, часто учитывается только указанный эффект. Еще одним фактором снижения снижения энергопотребления ЦН при регулировании производительности изменением частоты вращения рабочего колеса насоса является следующее. Паспортное значение КПД ЦН (рисунок 1.5) получено при постоянной и равной номинальной частоте вращения. Любой способ снижения подачи при $\omega = const$ приводит к снижению $\eta_{ЦН}$. На рисунке 1.15 представлены значения КПД ЦН при пониженных частотах вращения, полученные с использованием формул гидравлического подобия (1.10).

Максимум КПД со снижением ω смещается влево и незначительно снижается. Из рисунка очевидно, что для снижения подачи рационально работать на пониженных скоростях. При подаче Q_* = 0.4 КПД ЦН при $\omega = const$ составляет 0.65 (точка b), при частотном регулировании возрастает до 0.8 (точка a). Таким образом, снижение частоты вращения в соответствии с заданной производительностью позволяет не только исключить гидравлические потери в гидрорегуляторе, но и повысить энергоэффективность за счет повышения КПД самого насоса.

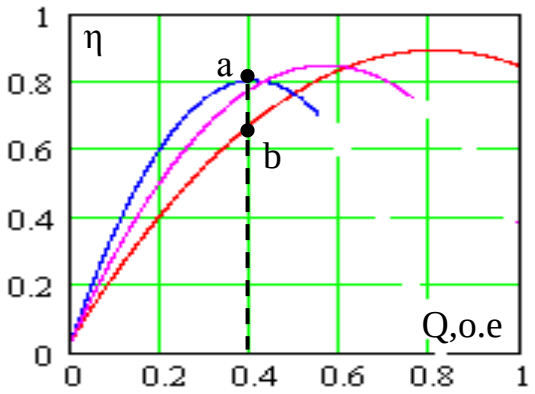


Рисунок 1.15 – КПД ЦН при различной частоте вращения рабочего колеса

Авторами [1,7] отмечалось это обстоятельство, однако для сетей с противодавлением предлагались достаточно сложные методы оценки изменения КПД ЦН при регулировании частоты вращения. Поскольку потери в ЦН составляют существенную долю общих потерь агрегата, важно получить инструмент их аналитической оценки при планировании и проектировании модернизации насосных агрегатов.

Кривая КПД, рассмотренная ранее, представляет собой характеристику потерь в ЦН при постоянной частоте вращения и регулировании подачи каким - либо другим способом. При отсутствии противодавления, в соответствии с формулами подобия, значение КПД ЦН при регулировании производительности скоростью рабочего колеса остается постоянным. Для расчета КПД при $H_C \neq 0$ используем полученные ранее соотношения.

При регулировании частоты вращения рабочего колеса ЦН точки установившегося режима работы расположены на характеристике трубопровода и полезная мощность равна, в соответствии с (1.2), (1.3),

$$P_{TP*} = H_{TP*} Q_* = (H_C + Q_*^2) Q_* . \qquad (1.22)$$

Для обеспечения подачи Q вал вращается с частотой

$$\omega_* = \sqrt{Q_*^{\,2} + \frac{H_{c*}}{H_{0*}}}$$

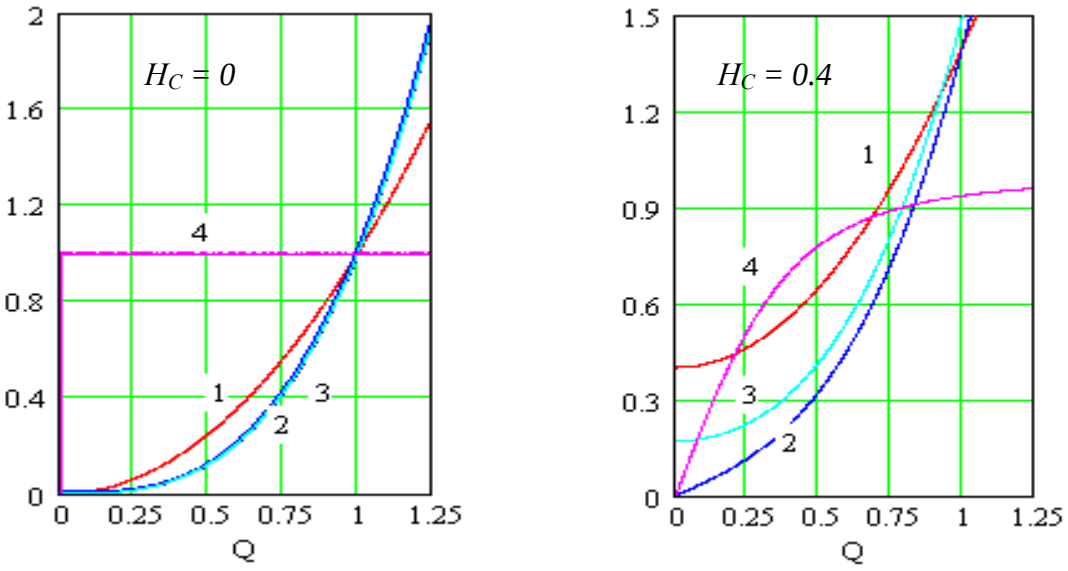
и механическая мощность на валу, по закону гидравлического подобия, равна

$$P_{мех*} = \omega_* M_* = (Q_*^2 + \frac{H_{C*}}{H_{0*}})^{3/2} . \qquad (1.23)$$

Относительное значение КПД при регулировании подачи можно определить, как

$$\eta_* = \frac{P_{TP*}}{P_{мех*}} = \frac{(H_C + Q_*^2)Q_*}{(Q_*^2 + \frac{H_{C*}}{H_{0*}})^{3/2}}\,. \qquad (1.24)$$

На рисунке 1.16 представлены расчеты мощностей и КПД ЦН при работе насоса на сеть без статического напора и с противодавлением, рассчитанные по выражениям (1.22), (1.23), (1.24). При $H_C = 0$, $\eta_* = 1$ во всем диапазоне регулирования подачи, при наличии противодавления КПД, изменяется в соответствии с выражением (1.24).

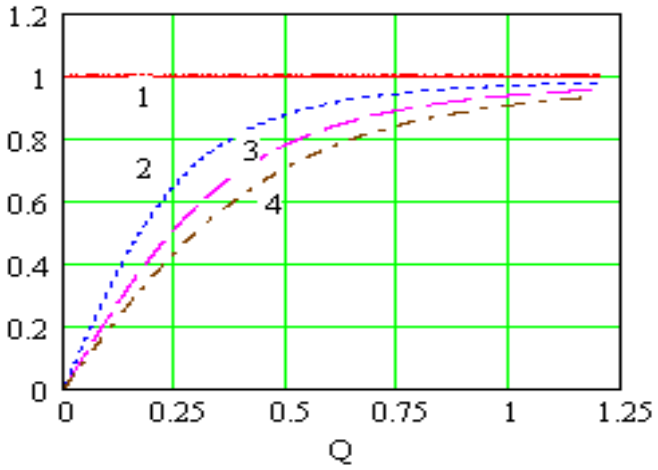


1 – характеристика трубопровода; 2 – полезная гидравлическая мощность; 3 – механическая мощность на валу ЦН;
4 – относительный КПД ЦН.
Рисунок 1.16

На рисунке 1.17 приведены расчетные кривые КПД регулируемого по частоте вращения ЦН для различных значений статического напора и экспериментально полученная характеристика КПД. Рисунок иллюстрирует достаточно высокую точность предлагаемого аналитического способа расчета (погрешность не превышает 6.5%).

Абсолютное значение КПД ЦН определяется, как произведение относительного КПД на номинальное значение

$$\eta_{цн} = \eta_* \eta_{цн\,ном}\,.$$



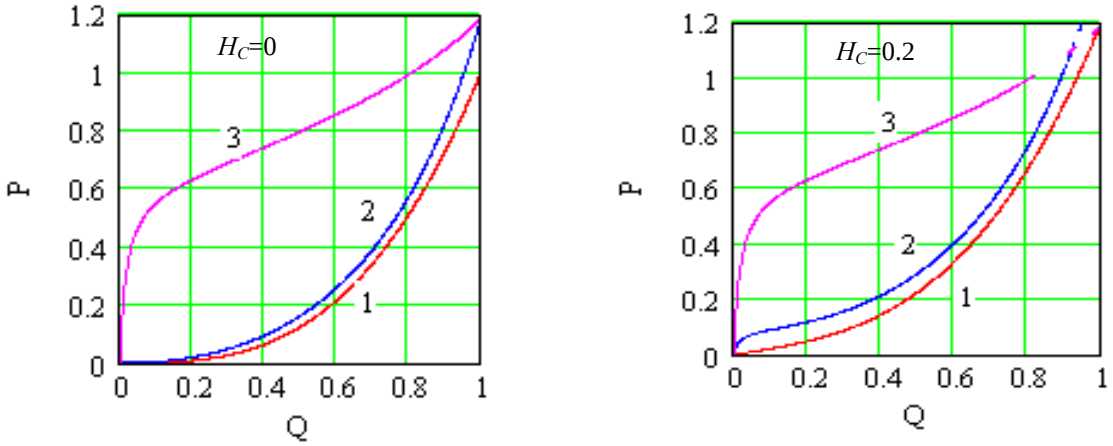
1 – H_C = 0; 2 – H_C = 0.2; 3 – H_C = 0.4; 4 – H_C = 0.4 (эксперимент).

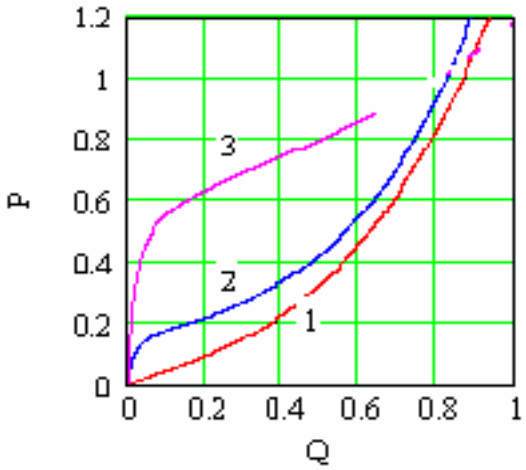
Рисунок 1.17 – Относительный КПД ЦН при регулировании частотой вращения

Результаты расчета мощности при частотном регулировании ЦН для различных значений *Hc* (*Ho*=1.3) приведены на рисунке 1.18. Механическая мощность на валу приводного двигателя определялась по (1.18). Разность ординат кривых 3 (дросселирование) и 2 (управление скоростью колеса ЦН) представляет собой величину экономии мощности при переводе насосного агрегата на системы регулируемого электропривода.

Сравнение значений мощности, потребляемой насосом с вала двигателя, указывает на значительный экономический эффект от перевода ЦН на регулируемый привод. Поскольку расчет проведен в относительных единицах и для *Ho*=1.2..1.4, что соответствует параметрам подавляющего большинства насосных агрегатов, мы можем оценить указанный эффект для режима работы конкретного трубопровода с известным H_C, используя полученные выше зависимости.

При расчете мощности на валу насоса использовалась полученная ранее кривая КПД насоса. Следует отметить, что КПД насоса с увеличением ω несколько возрастает, так как пропорционально мощности изменяются только





1 – гидравлическая мощность на выходе ЦН; 2 – механическая мощность на валу ЦН при регулировании частотой вращения; 3 – механическая мощность на валу ЦН при регулировании дросселированием.

Рисунок 1.18 - Мощность ЦН при регулировании подачи

гидравлические потери в насосе и потери на дисковое трение. Составляющие потерь на трение в подшипниках и в сальниках не увеличиваются пропорционально мощности насоса.

Еще одним существенным преимуществом регулируемого привода насосов является следующее. Электроприводы ЦН выбираются для обеспечения максимально возможного расхода при сохранении необходимого напора в системе. На выходе установки создается давление (порой значительно превышающее номинальное для системы), которое затем снижается оперативной арматурой до требуемого значения. Снижение давления насоса изменением частоты вращения рабочего колеса позволяет уменьшить нагрузки и увеличить срок службы деталей агрегата и снизить утечки в нем.

Современный автоматизированный электропривод ЦН без принципиальных сложностей может быть включен в систему автоматического управления процессом любой сложности.

Все приведенные аргументы позволяют считать регулируемый привод насосов важнейшим средством энерго- и ресурсо- сбережения во всех отраслях, использующих трубопроводный транспорт. Полученные соотношения могут служить основой для экономической оценки внедрения регулируемого электропривода в насосные агрегаты с конкретными характеристиками ЦН и трубопровода.

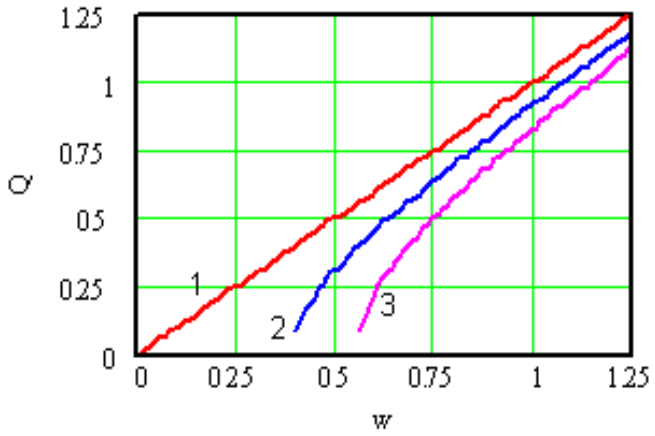
1.3.4 Центробежный насос как нагрузка регулируемого привода.

При выборе системы регулируемого электропривода ЦН одним из важных является вопрос о необходимом диапазоне регулирования частоты

вращения колеса. Скорость, необходимую для обеспечения подачи Q при заданных H_c и H_o, определим из (1.19):

$$\omega_* = \sqrt{Q_*^{\,2} + \frac{H_{c*}}{H_{0*}}} \quad . \tag{1.25}$$

Таким образом, закон гидравлического подобия (ω_*=Q_*) верен только при H_C = 0 и его необходимо корректировать с учетом значения статического подпора, что показано на рисунке 1.19.



$1 - H_c = 0$; $2 - H_c = 0.2$; $3 - H_c = 0.4$.

Рисунок 1.19- Зависимость подачи от скорости колеса насоса при различных значениях статического подпора

Из (1.25) следует, что с увеличением величины статического подпора уменьшается диапазон регулирования скорости насоса $D_н$, необходимый для изменения подачи от 0 до номинального значения:

$$D_н = \frac{\omega_н}{\omega_{\min}} = \sqrt{\frac{H_{o*}}{H_{c*}}} \, . \tag{1.26}$$

Следует отметить, что, согласно (1.25), при Hc>0 номинальное значение подачи Q будет иметь место при частоте вращения колеса насоса больше номинальной. По выражению (1.26) построена графическая зависимость, иллюстрирующая заметное снижение диапазона регулирования с ростом противодавления (рисунок 1.20).

Насосные агрегаты, работающие в режимах с «пиковыми» нагрузками и значительными пределами регулирования выходных параметров, имеют в нагрузке значительное противодавление, что снижает необходимый диапазон регулирования частоты вращения колеса насоса. Магистральные насосы, напротив, меняют давление на выходе в небольших пределах, но статический

напор имеет геодезический характер и не превышает H_C =0.2. Таким образом, основным рабочим диапазоном регулирования частоты вращения подавляющего большинства ЦН можно считать D = 2.

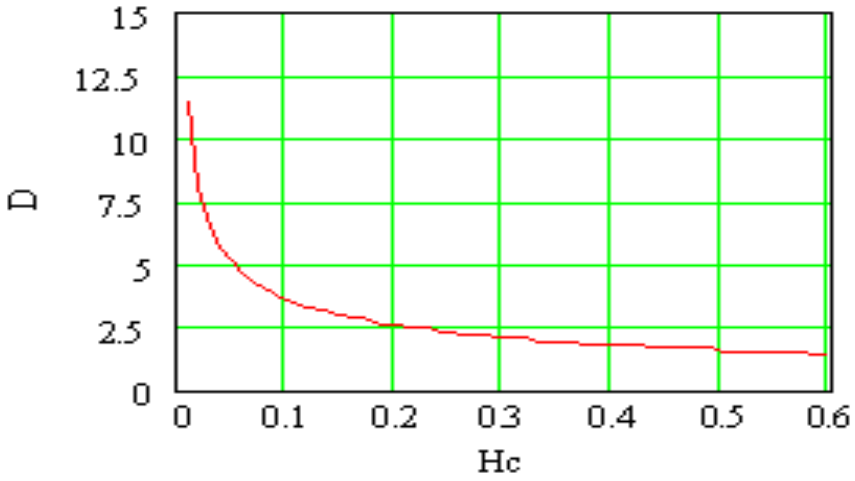


Рисунок 1.20 - Зависимость диапазона регулирования скорости колеса ЦН от величины статического подпора

Основной характеристикой центробежных насосов как нагрузочных машин для электропривода является зависимость статического момента сопротивления на валу от частоты его вращения $M_{ст}=f(\omega)$, называемая механической характеристикой. Вид этой характеристики и механической характеристики привода определяют, в частности, и энергетические параметры работы агрегата. В соответствии с выражениями (1.19) и (1.22), момент на валу приводного двигателя ЦН при полностью открытой задвижке на выходе и регулировании ω равен:

$$M_C = M_{C0} + \frac{C_н H_c + \omega^2}{\omega \eta_{цн}(\omega, H_c)} \sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_o}} \,. \qquad (1.27)$$

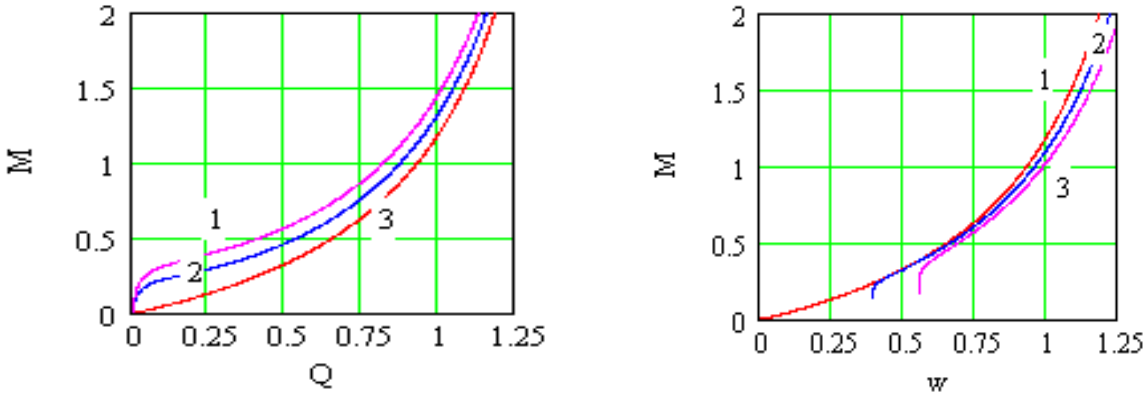
В формуле (1.24) необходимо учесть изменение потерь в ЦН при регулировании ω. Подача изменяется при определенном статическом подпоре Hc в функции ω согласно (1.19). Тогда полином, аппроксимирующий КПД насоса, примет вид:

$$\eta_{цн}(\omega, H_c) = a_0 + a_1 \sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}} + a_2 (\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}) \,. \qquad (1.28)$$

На рисунке 1.21 представлены зависимости $M_{ст}=f(\omega)$, $M_{ст}=f(Q)$, рассчитанные по (1.27) для различных значений статического подпора.

На характер рассматриваемой зависимости существенным образом влияет вид характеристики сети, на которую работает ЦН, а именно:

соотношение между статической и динамической составляющими требуемого напора. С увеличением H_c относительное значение момента сопротивления M_c при той же частоте вращения становится меньше.



$1 - H_c = 0$; $2 - H_c = 0.2$; $3 - H_c = 0.4$.

Рисунок 1.21 - Механические характеристики ЦН

Полученное выражение механической характеристики содержит основные параметры напорных характеристик насоса, трубопровода, изменение КПД при регулировании и позволяет в дальнейших исследованиях точно учесть их как нагрузку на валу привода.

1.4 Анализ способов регулирования частоты вращения электродвигателей насосных агрегатов

Выбор способов регулирования выходных параметров ЦН должен выполняться с учетом особенностей режимов работы, параметров регулирования (диапазон, быстродействие), характерных для каждой из рассмотренных групп насосов и оценки энергозатрат на их реализацию.

Как показано в предыдущем разделе, при выборе того или иного типа регулируемого электропривода для насосных агрегатов, наряду с общепринятыми критериями (массогабаритные показатели, стоимость, надежность и т.д.), следует учесть следующие особенности:

- рабочий диапазон регулирования скорости в подавляющем большинстве случаев невелик;
- распространенность, значительные установленные мощности и продолжительный режим работы насосных агрегатов определяют повышенные требования к энергетическим показателям электропривода;
- насосы НПС не требуют предельной точности и высокого быстродействия при регулировании производительности.

Поэтому из возможных вариантов регулирования следует исключить двигатели постоянного тока, уступающие машинам переменного тока по

надежности, стоимости, массогабаритным показателям. Далее будут рассмотрены способы регулирования насосных агрегатов на базе асинхронных и синхронных двигателей.

Частоту вращения ротора электродвигателя переменного тока можно определить, как

$$\omega = \frac{2\pi f}{p_n}(1-s), \qquad (1.29)$$

где f - частота питающего напряжения;

p_n - число пар полюсов;

s - скольжение.

Изменяя один или несколько параметров, входящих в (1.29), можно регулировать частоту вращения электродвигателя и, следовательно, насоса. На рисунке 1.22 представлены возможные системы регулируемого электропривода ЦН.

1.4.1 Частотно - регулируемый электропривод центробежных насосов.

Питание двигателя частотно – регулируемого электропривода осуществляется вентильным преобразователем частоты (ПЧ – рисунок 1.22, а.б), в котором постоянная частота питающей сети f_1 преобразуется в переменную f_2. Пропорционально частоте f_2 изменяется частота вращения электродвигателя, подключенного к выходу преобразователя. В настоящее время для реализации частотного управления машинами переменного тока применяют различные варианты преобразователей частоты, отличающиеся принципом действия, схемными решениями, алгоритмами управления и т.д. Исключив из рассмотрения применявшиеся ранее электромашинные ПЧ с известными их недостатками, далее будем рассматривать приводы с современными статическими преобразователями.

Хотя в целом фундаментальные вопросы частотного управления АД и прежде всего принцип управления с ориентацией по потоку двигателя достаточно глубоко разработаны, развитие элементной базы и техники управления, появление новых датчиков, применение микропроцессорного и компьютерного управления обусловливают непрерывное совершенствование системы частотного асинхронного электропривода.

К достоинствам системы ПЧ-АД следует отнести следующее:

- высокий КПД в широком диапазоне регулирования скорости АД, так как последний во всем диапазоне регулирования работает с малой величиной скольжения ротора (малыми потерями скольжения);

- хорошие регулировочные свойства, обеспечивающие возможность плавно регулировать скорость и формировать требуемые характеристики и законы регулирования;

- надежность используемого в системе АД с короткозамкнутым ротором.

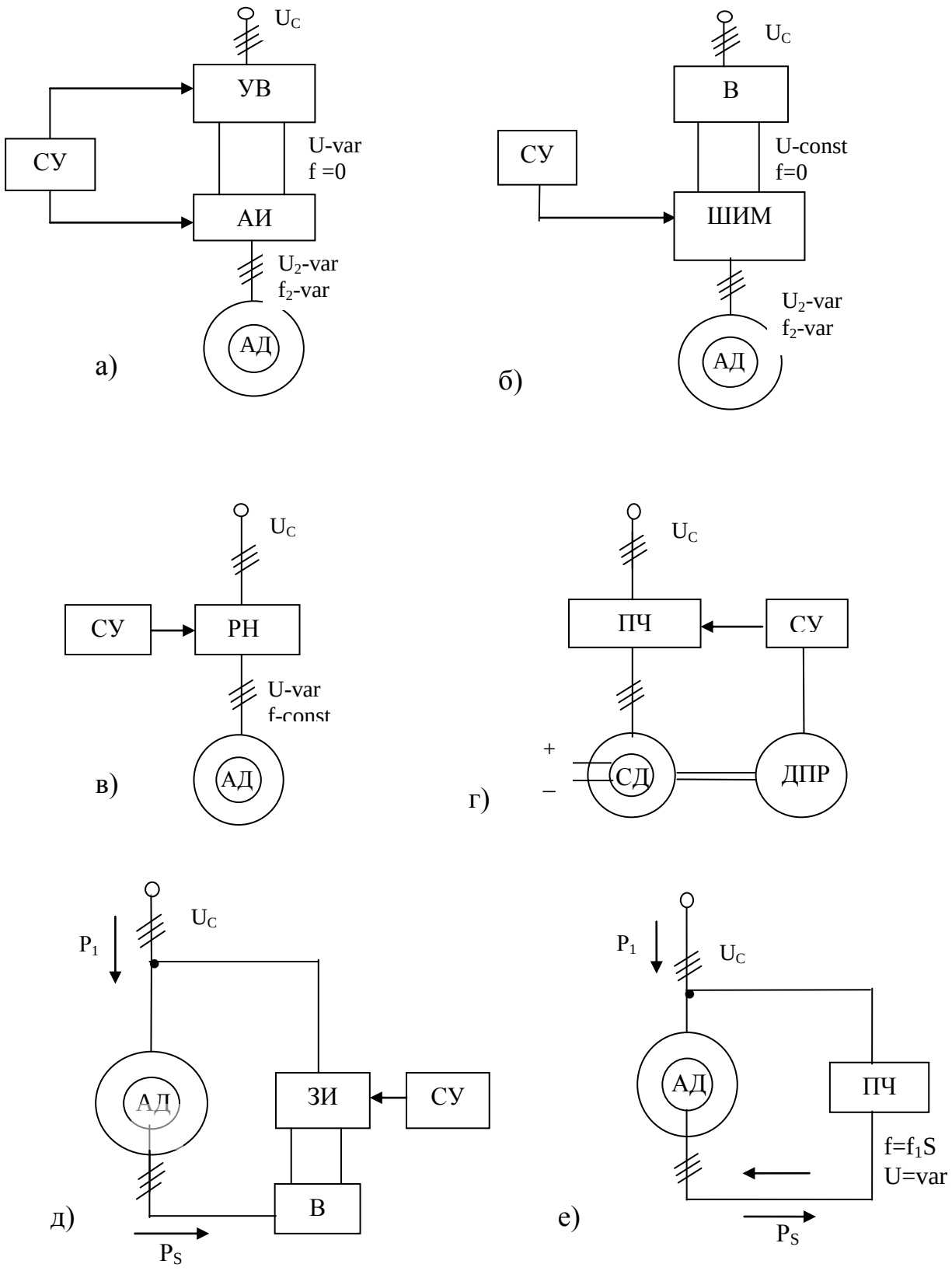


Рисунок 1.22 - Варианты систем регулируемого электропривода центробежных насосов

В России уже накоплен опыт применения регулируемых электроприводов с частотным управлением на насосных станциях ЖКХ, ТЭЦ, промпредприятиях. Так, на насосной станции АО «Мосводоканал» реализован привод «ПЧ – АД» с преобразователем фирмы ABB SAMI 300A380 [5], годовая экономия электроэнергии составляет *0.2 – 0.25 млн кВт/час* при общем расходе станции *1.5 млн кВт/час.* Аналогичные проекты реализуются в системах Водоканалов Чебоксар, Уфы, Стерлитамака, Вильнюса и др. [8]. В ОАО «Мосэнерго» в рамках реализации программы энергосбережения, начиная с 1995 г., развернуты работы по широкому внедрению частотного регулирования в двух направлениях: на реконструируемых насосно – перекачивающих станциях теплосетей и в собственных нуждах наиболее крупных ТЭЦ. Введено 26 частотно – регулируемых электропривода мощностью от 500 до 4000 кВт напряжением 3300 и 6000 В. Только прямая экономия электроэнергии составила более *60 млн кВт.час* в год.

Примером успешного внедрения регулируемого электропривода на магистральных насосных станциях является установка частотно - регулируемого электропривода ЦН серии ПЧТЭ производства НПП «ЗОС» на НПС «Каламкас» АО «КазТрансОйл». Фактические годовые затраты электроэнергии на перекачку 4 192 тыс. тонн нефти вместо *14 тыс. кВт/ч*, составили *9.5 тыс кВт/час*. Сэкономлено только электроэнергии на 19.5 млн. тенге. Эксплуатирующая организация отмечает и важные сопутствующие факторы: отсутствие гидравлических ударов, явлений кавитации, утечек в сети и оборудовании.

К сегодняшнему дню более тридцати крупных мировых фирм заняты выпуском преобразователей частоты и электроприводов на их основе. Лидерами на мировом рынке в области частотно – регулируемого привода являются такие фирмы, как Siemens (Германия), Allen Bradley (США), транснациональная ABB, Schneider Electric (Франция), Mitsubishi (Япония), разработки которых (SIEMOVERT MV, ACS и другие) не уступают по регулировочным характеристикам приводам постоянного тока. Шкала типоразмеров ПЧ, выпускаемых этими фирмами, содержит мощности от 0.75 кВт до десятков МВт.

В СНГ приводы по схеме «ПЧ – АД» выпускаются такими предприятиями, как ХЭМЗ (Харьков), ЗЭАЗ (Запорожье), ЧЭАЗ (Чебоксары), «Электровыпрямитель» (Саранск). В ОАО «Чебоксарский электроаппаратный завод» освоен выпуск ПЧ в аналоговом и цифровом вариантах, ориентированных на приводы насосов с вентиляторным характером нагрузки [53]. Корпорацией «Триол» производятся преобразователи частоты АТО1,2, выполненные на транзисторных модулях по принципу ШИМ. Одним из последних крупных проектов, реализуемых в настоящее время, является внедрение электроприводов с преобразователями ЭТВА 630/10 и СПЧРС 10000/100 российского производства на НС «Коломенская» [8].

Электротехническими предприятиями Белоруссии, России и Украины, объединенными в консорциум «Энергосбережение», разработано и освоено серийное производство на заводах СНГ серии энергосберегающих электроприводов РЭН мощностью от 3.5 до 1000 кВт] с ПЧ по схеме с АИН.

Наличие в составе электропривода частотного преобразователя дает основание отнести к группе частотных электроприводов и *вентильный двигатель* - электромеханическую систему, состоящую из преобразователя частоты, синхронного электродвигателя и устройства, указывающего положение его ротора в пространстве (ДПР – рисунок 1.22,г). Преобразователь выполнен с явно выраженным звеном постоянного тока и состоит из управляемых выпрямителя и инвертора. Коммутация тиристорных вентилей инвертора в зоне малых частот осуществляется с помощью датчика положения ротора, а в зоне частот более 3-5 Гц осуществляется по коммутирующей сверхпереходной ЭДС, получаемой из напряжения на зажимах электродвигателя с помощью узла выделения коммутирующей ЭДС. По принципу действия эта система аналогична электродвигателю постоянного тока, у которого функции коллектора и щеточного аппарата выполняют тиристорный инвертор и датчик положения ротора.

ОАО «Электропривод», АООТ «ЭНИН им. Кржижановского» совместно с ОАО «Электровыпрямитель» в течение 1995-1998 гг. разработаны комплектные высоковольтные ПЧ для пуска и регулирования СД мощностью до 21.5 МВт на напряжения питания 6,10,15 и 75 кВ по схеме «вентильного двигателя» для приводов насосов, вентиляторов и компрессоров [7]. Однако известные сложности реализации ВД ограничивает возможности его широкого внедрения.

Основным недостатком рассмотренных схем является высокая сложность и стоимость преобразователя, выполняемого на полную мощность электродвигателя. В настоящее время стоимость ПЧ в несколько раз превышает стоимость других типов преобразователей, например, системы АВК. Следует отметить, что стоимость выпускаемых преобразователей частоты значительно завышена также из-за наличия сложных функций, в которых нет необходимости для привода ЦН. Это такие возможности, как прецизионное регулирование на «ползучих» скоростях или формирование сложных пусковых характеристик.

Особые проблемы вызывает использование частотного регулирования мощных ЦН. В высоковольтном (двигатели от 400 кВт и выше выполняются на напряжение 6(10) кВ) преобразователе приходится использовать дорогие и сложные вентили на повышенное напряжение. Для снижения общей стоимости системы используют двухтрансформаторную схему включения низковольтного ПЧ, понижая напряжение на его входе и затем повышая выходное напряжение до необходимого, что также увеличивает стоимость и массо – габаритные показатели установки.

1.4.2 Регулирование частоты вращения электродвигателей изменением их скольжения.

Этот принцип регулирования основан на введении в цепь ротора АД дополнительного сопротивления или ЭДС, а также изменении напряжения на статоре электродвигателя.

Изменение добавочного сопротивления в цепи фазного ротора двигателя позволяет изменять форму механической характеристики электродвигателя и, следовательно, частоту вращения насосного агрегата. Мощность скольжения, пропорциональная глубине регулирования, при этом рассеивается в виде тепла в регулировочных реостатах. К этой же группе приводов, характеризующейся потерей мощности скольжения, следует отнести и вариант *с импульсным регулированием выпрямленного тока ротора, и систему А.С. Сандлера с поворотным статором*. Все эти способы регулирования при безусловной простоте и малой стоимости оборудования чрезвычайно неэкономичны из-за увеличения потерь скольжения пропорционально глубине регулирования скорости. Обычно они используются для двигателей малой мощности и формирования пусковых режимов АД.

Регулирование частоты вращения электродвигателей изменением напряжения на его статоре осуществляется обычно системой «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель» (ТРН – АД, рисунок 1.22,в).

Вращающий момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату напряжения, подводимого к электродвигателю. При изменении напряжения значение критического скольжения не изменяется, поэтому максимальный момент при любых изменениях напряжения соответствует одному и тому же значению критического скольжения, равному примерно 0,1-0,2. Этим определяется сравнительно узкий диапазон регулирования по частоте вращения, который может обеспечить этот способ регулирования. Пределы регулирования можно увеличить, используя АД с повышенным скольжением или включение добавочного сопротивления в цепь фазного ротора, а также применяя системы управления, замкнутые по скорости.

При относительной дешевизне и простоте в обслуживании, основным недостатком данного варианта является то, что энергия скольжения рассеивается в двигателе, а коэффициент мощности системы уменьшается с увеличением скольжения двигателя. В [3,6] проведен анализ возможности использования этого способа для регулирования частоты вращения рабочего колеса насоса в продолжительном режиме, и показано, что необходимость завышения в данном случае габаритной мощности двигателя (в два и более раза), использования двигателей со специальным исполнением ротора, наличия дополнительных потерь в двигателе, требующих принудительного отвода тепла от последнего, не позволяют рекомендовать вариант «ТРН-АД» в качестве электропривода насосных агрегатов.

Интерес представляет применение системы «ТРН-АД» для реализации энергосберегающих режимов в зоне номинальной скорости при недогрузках, управления режимами пуска и торможения, а также для электроприводов с режимами кратковременного снижения скорости. Впервые предложено изменять напряжение на двигателе при изменении нагрузки таким образом, чтобы оптимизировать какой - либо энергетический показатель – потери в АД, потребляемую мощность, коэффициент мощности. В МЭИ был разработан привод с экстремальным регулятором напряжения, минимизирующим потребляемый двигателем ток при изменении нагрузки.

Электропривод центробежных механизмов является основной областью, где системам частотного регулирования асинхронных двигателей (ПЧ-АД) имеется альтернатива – *каскадные схемы управления*. Наряду с известными преимуществами, первый вариант имеет и значительные недостатки: большая мощность преобразователя, которая, независимо от диапазона регулирования скорости, рассчитывается на полную мощность двигателя, высокая сложность силовой схемы и системы управления и обусловленная всем этим высокая стоимость.

В электроприводе по схеме *асинхронного вентильного каскада* (АВК – рисунок 1.22, д) регулирование частоты вращения электродвигателя осуществляется изменением противо-*ЭДС* инвертора, вводимой в цепь выпрямленного тока ротора асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Энергия скольжения ротора рекуперируется в питающую электрическую сеть через преобразователь АВК, который состоит из двух основных элементов: неуправляемого выпрямителя и зависимого инвертора. Согласующий трансформатор необходим в том случае, если номинальное напряжение питающей сети отличается от номинального напряжения преобразователя АВК.

Основными достоинствами данной системы по сравнению с вариантом ПЧ-АД являются меньшая установленная мощность преобразователя, соответствующая глубине регулирования скорости, и простота управления. Как положительное качество отмечается также возможность при аварии в преобразователе перейти в нерегулируемый режим (закоротив ротор) или в режим с пониженной частотой вращения при введении в цепь ротора резистора.

Особенно заметными эти преимущества становятся для центробежных механизмов, момент сопротивления которых зависит от частоты вращения рабочего колеса. Определим мощность скольжения электропривода центробежного насоса из выражения для механической характеристики ЦН (1.27). В первом разделе номинальную частоту вращения ротора в относительных единицах мы приняли за $\omega_{н*} = 1$. Тогда частота вращения электромагнитного поля статора

$$\omega_{0*} = \frac{1}{1 - s_н}, \qquad (1.30)$$

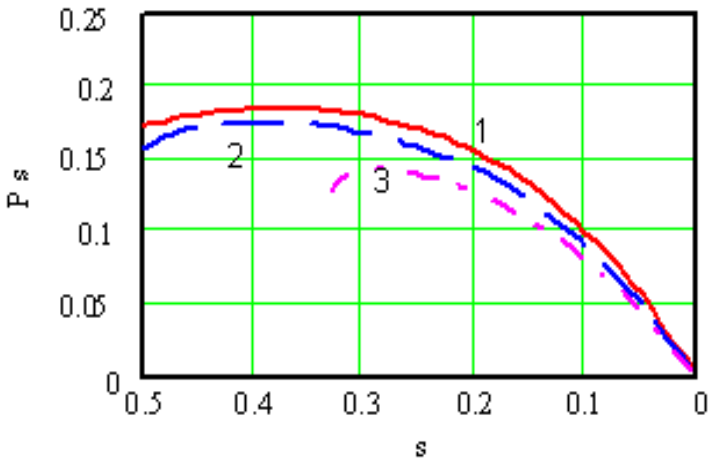
а частоту вращения ротора в относительных единицах можно записать, как

$$\omega_* = \frac{1-s}{1-s_н}. \qquad (1.31)$$

После подстановки в (1.9) и простых преобразований получим

$$P_s = \frac{s(C_н H_c + \left(\frac{1-s}{1-s_н}\right)^2)}{(1-s_н)\eta_{цн}(\omega, H_c)} \sqrt{1 - \frac{H_c}{H_o}\left(\frac{1-s_н}{1-s}\right)^2}. \qquad (1.32)$$

Зависимость величины мощности, возвращаемой в сеть через преобразователь, от диапазона регулирования ЦН рассчитана по (1.28) в относительных единицах и представлена на рисунке 1.23. В рабочем диапазоне регулирования ЦН эта мощность не превышает 18% номинальной мощности двигателя и уменьшается с увеличением H_c. Таким образом, установленная мощность преобразователя АВК в 4-5 раз меньше, чем в системе ПЧ-АД. Одновременно это ведет к снижению искажающих составляющих токов и напряжений, так как преобразованию подвергается только часть потребляемой приводом мощности.



1 – *Hc*=0; 2 - *Hc*=0.3; 3 - *Hc*=0.6.
Рисунок 1.23

Еще одним преимуществом каскадных схем является следующее. Выше указывалось, что для регулирования высоковольтных двигателей в схеме ПЧ – АД используется двухтрансформаторная схема ПЧ, что связано с отсутствием надежных и недорогих вентилей для коммутаций напряжений 6(10) кВ. Максимальное значение ЭДС ротора $E_{2к}$ таких двигателей лежит в пределах

1..2 кВ, а с учетом диапазона регулирования ЦН ($E_{2max} = E_{2к}\ s_{max}$) не превышает 600 В. Это позволяет использовать в каскадных схемах низковольтную элементную базу для преобразователей.

Наиболее общим вариантом привода с регулированием мощности скольжения является *машина двойного питания* **(**МДП **–** рисунок 1.22,е**)** – асинхронный двигатель, к контактным кольцам ротора которого подводится регулируемое по амплитуде, частоте и фазе напряжение. Сохраняя все преимущества АВК, МДП выгодно отличается более высоким КПД, обусловленным однократным преобразованием энергии скольжения в непосредственном преобразователе частоты (НПЧ). Кроме того, возможность регулирования реактивной мощности по цепи статора позволяет принципиально обеспечить работу привода с единичным (и даже опережающим, как будет показано ниже) коэффициентом мощности. Аналитические соотношения для такого варианта известны [1,8] и используются для теоретических исследований и разработок алгоритмов управления и отдельных схемных решений. Мощность преобразователя МДП, благодаря двухзонному регулированию скорости, ниже, чем у АВК, но система управления - сложнее. Учитывая бурное развитие силовой электроники, можно предположить МДП наиболее перспективным вариантом привода ЦН.

Изложенное позволяет утверждать, что каскадные схемы электропривода переменного тока наиболее адаптированы к центробежной нагрузке, в них преобразуется не вся мощность, подводимая к насосному агрегату, а только рекуперируемая мощность скольжения, которая в приводе насосных агрегатов не превышает 18% номинальной мощности электропривода; ограниченный диапазон регулирования насосов позволяет использовать менее мощные и более простые преобразователи, чем при частотном регулировании.

1.4.3 Каскадные схемы регулирования двигателей ЦН.

На рисунке 1.24 представлена диаграмма мощностей электропривода с регулированием мощности скольжения.

Если считать, что мощность P_2 может иметь как положительное, так и отрицательное направление, можно определить четыре возможных режима работы АД в данной схеме:

1) Двигательный подсинхронный режим: $P_1>0,\ P_M>0,\ P_2>0,\ 0<S<1$.

2) Двигательный сверхсинхронный режим: $P_1>0,\ P_M>0,\ P_2<0,\ S<0$.

3) Рекуперативное торможение в подсинхронном режиме: $P_1<0,\ P_M<0,\ P_2<0,\ S<0$.

4) Генераторный при сверхсинхронной скорости: $P_1<0,\ P_M<0,\ P_2>0,\ S<0$.

На диаграмме:

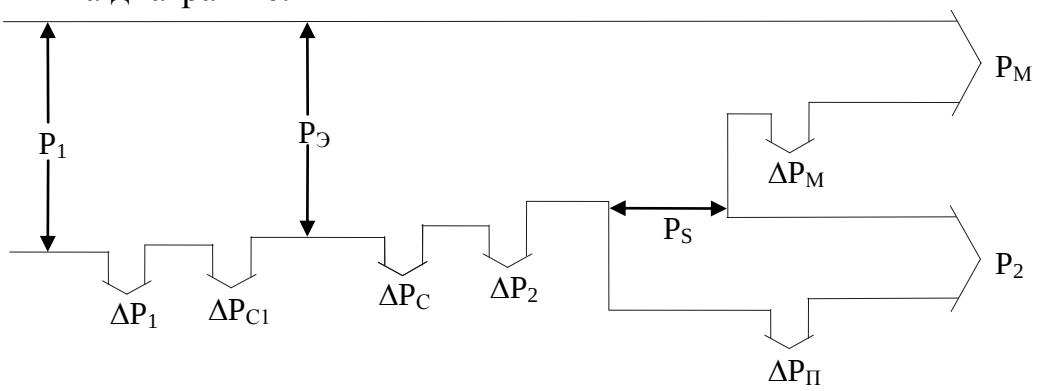


Рисунок 1.24

P_1 - мощность, потребляемая (или отдаваемая) двигателем со стороны статора;

ΔP_1 - потери мощности в обмотке статора: $\Delta P_C = I_1^2 r1$;

ΔP_C - потери мощности в железе статора;

$P_Э$ - мощность, передаваемая через воздушный зазор;

P_M - механическая мощность на валу двигателя: $P_M = M\omega_0(1-s)$;

ΔP_2 - потери мощности в обмотке ротора: $\Delta P_2 = I_2^2 r_2$;

P_2 - мощность, потребляемая (или отдаваемая) двигателем со стороны ротора;

P_S - мощность скольжения: $P_S = P_э s$;

ΔP_n - потери мощности в преобразователе;

ΔP_M - мощность механических потерь.

Приведенные режимы работы возможны, если преобразователь в цепи ротора может обеспечить двунаправленный поток мощности P_2. В АВК используется неуправляемая роторная группа вентилей, P_2 может передаваться только из ротора в сеть, что позволяет реализовать только первый и четвертый режимы.

В режиме двойного питания двигатель может работать при частоте вращения как ниже, так и выше синхронной в двигательном и тормозном режимах, т. е. допускает двухзонное регулирование частоты вращения.

Основное свойство систем регулирования машин двойного питания - это возможность изменять параметры ЭДС питания со стороны ротора, т.е. изменять независимо амплитуду, фазу и частоту ЭДС [8]. Введение в цепь ротора асинхронного двигателя ЭДС частоты скольжения позволяет регулировать частоту вращения и реактивную мощность асинхронного двигателя, т.е. асинхронный двигатель приобретает в этом случае некоторые свойства синхронного двигателя. Поэтому машины двойного питания, сочетающие в себе свойства асинхронных и синхронных машин,

получили название асинхронизированных синхронных машин [3,4]. По своей энергетической структуре эти машины полностью соответствуют каскадным схемам включения асинхронного двигателя и имеют такие же энергетические диаграммы для двигательного режима при подсинхронной и сверхсинхронной частоте вращения.

В установившемся режиме работы ЭДС, вводимая в цепь ротора, должна иметь частоту скольжения. В то же время эта частота определяется частотой задающего сигнала, поступающего в схему управления вентильного преобразователя частоты.

В зависимости от способа задания частоты преобразователя различают два режима работы машины двойного питания: синхронный и асинхронный. При синхронном режиме работы частота скольжения задается независимо от частоты вращения, вследствие чего при постоянном сигнале управления скорость привода остается строго определенной, не зависящей от нагрузки, т. е. МДП работает как синхронный двигатель. Изменяя задающую частоту, можно менять частоту вращения двигателя. Вопросы стабилизации синхронного режима работы МДП исследованы пока недостаточно.

Более надежен асинхронный режим работы МДП, при котором выходная частота преобразователя жестко связана с частотой скольжения. В этом случае машина работает как асинхронная, и частота вращения изменяется с изменением нагрузки, что сопровождается изменением частоты преобразователя.

Разработки электроприводов, выполненных по схемам асинхроно-вентильного и вентильно-машинного каскадов, широко освещены в отечественной и зарубежной литературе, например, [7] и др. К настоящему времени накоплен определенный опыт эксплуатации и проектирования этих систем.

Следует отметить огромный вклад в разработку каскадных систем электропривода таких ученых, как Е.Л. Эттингер и Ф.И. Бутаев, предложивших первые основные схемы вентильного каскада и развивших это направление М.М. Ботвинника, Г.Б. Онищенко, Ю.Г. Шакаряна, С.В. Хватова и других представителей отечественной научной школы.

В СССР по разработкам ВНИИЭлектропривод был освоен серийный выпуск регулируемых электроприводов, выполненных по схеме асинхронно-вентильного каскада, с диапазоном регулирования 1:5 для компрессорных установок и других механизмов химической промышленности мощностью до 125 кВт. Имеется опыт применения этих приводов для регулирования производительности шахтных вентиляторов, систем водоснабжения населенных пунктов, систем оборотного водоснабжения промышленных предприятий, ТЭЦ и АЭС, буровых насосов и др.

Заводом «Сибэлектротяжмаш» совместно с ВНИИЭ и институтом «Гипроуглеавтоматизация» разработан асинхронизированный электропривод для регулирования частоты вращения турбокомпрессора мощностью 630 кВт.

Он позволяет регулировать частоту вращения в диапазоне ±10% синхронной, равной 3000 об/мин. Промышленные испытания подтвердили высокую надежность и работоспособность всех узлов асинхронизированного двигателя, а также показали высокие технико-экономические результаты. Коэффициент мощности во всем диапазоне регулирования составляет 0,99 – 1,0. Коэффициент полезного действия привода в рабочем диапазоне скольжений лежал в пределах 0,9 – 0,93. Включен в опытно-промышленную эксплуатацию асинхронизированный привод для регулирования частоты вращения дутьевого вентилятора теплового котла. Он является первым из установочной партии приводов такого типа, предназначенных для механизмов собственных нужд ряда электростанций. Мощность вентилятора 1000 кВт, диапазон регулирования частоты вращения ±25% синхронной, равной 750 об/мин. Ряд зарубежных фирм (AEG, Brown Boveri, Siemens и др.) также внедряли такие установки.

Разработки и исследования каскадных систем управления двигателей переменного тока продолжаются и в наше время. Большинство публикаций касается, главным образом, различных способов, схем и средств совершенствования каскадных электроприводов. Рассматриваются технико-экономические показатели и характеристики различных схем вентильных каскадов, пути их улучшения и оптимизации. При этом значительное внимание уделяется вопросам, связанным с такими недостатками схемы АВК, как возникновение резонанса в системе валов и механических частей.

Разрабатывается частотно-каскадный электропривод на основе АД с фазным ротором. В [3] приведены структурная и расчетная схемы такого привода, в [4] получены механические характеристики и энергетические зависимости при регулировании со стороны статора и ротора АД.

В [5] предложен вариант АВК, для улучшения энергетических показателей которого в цепь статора АД включен тиристорный регулятор напряжения. Привод обеспечивает управление по минимуму тока статора, минимуму суммарных потерь, минимуму потребляемой мощности, максимуму КПД. Еще один вариант – частотно- регулируемый асинхронный двигатель двойного питания содержит двухступенчатый преобразователь частоты для питания статора и инвертор напряжения с ШИМ для регулирования амплитуды напряжения ротора. Такое решение позволило улучшить энергетические, пусковые и перегрузочные характеристики привода. Недостатком обеих систем является использование преобразователей в цепи статора, рассчитываемых на полную мощность привода, что значительно увеличивает его стоимость.

В [6] как вариант обобщенной электромеханической системы предложен асинхронизированный вентильный двигатель с поддержанием неизменного результирующего магнитного потока, что позволяет получить высокие энергетические характеристики и перегрузочную способность по

моменту. В данном случае МДП приобретает все свойства двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

ОАО «ВНИИР» ведутся разработки и поставки преобразователей и станций управления для электроприводов по схеме АВК на мощности до 5000 кВт, ориентированных на насосы и воздуходувки, на новой современной элементной базе. Два таких электропривода серии ЭАВК мощностью по 1000 кВт, установленные в 2000 г. на втором водоподъеме Камского водозабора, позволяют сэкономить свыше 7 млн кВт×ч в год. По данным ВНИИР, приводы по схеме АВК позволяют получить значительную экономию электрической энергии при сравнительно скромных капитальных затратах, которые в 2.5 – 3 раза меньше, чем затраты на высоковольтные частотно – регулируемые электроприводы с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором.

Указанные выше преимущества привода по схеме МДП инициируют работы по расширению области его применения. В [6] предложен новый подход к синтезу и реализации релейных схем оптимального управления МДП. Полученные алгоритмы обеспечивают оптимальное по точности управление в системах стабилизации положения и следящих автоматических системах при сохранении возможности управления потоком реактивной мощности.

Современные исследователи отмечают ряд направлений, в которых необходимо продолжить совершенствование приводов с МДП.

Из электроприводов, выпускаемых зарубежными фирмами, можно выделить привод питательных насосов мощностью 8,2 МВт, скорость которых регулируется в диапазоне 1:2 [7]. В роторной цепи асинхронного двигателя установлено два преобразователя с возможностью их переключения с последовательного на параллельное соединение и наоборот. Такая схема позволяет вдвое, по сравнению с обычной схемой асинхронно-вентильного каскада, снизить установленную мощность преобразователей в роторной цепи двигателя. Для повышения энергетической эффективности и улучшения электромагнитной совместимости предпочитают применять для мощных насосов и вентиляторов двенадцатипульсные переключаемые схемы преобразователей. Для средних мощностей схемы преобразователей – шестипульсные.

Выводы и результаты

1. Проведенный анализ показывает, что требования к параметрам регулирования различных насосных агрегатов во многом определяется их назначением. Для ЦН, применяемых в системах водоснабжения и канализации, характерны суточные и сезонные колебания потребления, «пиковые» нагрузки. Для поддержания давления в заданных пределах, регулирование должно проводиться в рамках автоматических систем

управления, в которых динамические режимы работы могут занимать значительную часть рабочего цикла. Нагрузка магистральных агрегатов, напротив, изменяется достаточно редко и в меньших пределах. Режимы работы ЦН, используемых в различных других технологических схемах производства, непосредственно связаны с параметрами и режимами последних.

2. Получены аналитические соотношения для энергетического (силового) канала насосного агрегата, позволяющие по параметрам насоса и трубопровода оценить различные варианты регулирования напора и подачи ЦН на этапе проектирования или модернизации. На примере насосов ТЭЦ, ЖКХ и магистральных НПС показана технико – экономическая эффективность передачи функций гидрорегулятора регулируемому по частоте вращения электроприводу насоса.

3. На базе полученных зависимостей, характеризующих режимы работы ЦН, проведен сопоставительный анализ возможных вариантов регулируемого электропривода центробежных насосов. Как наиболее перспективные схемы АЭП ЦН, объектом исследования определены схемы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» и «машина двойного питания». Определены области возможного использования этих систем электропривода.

Привод по схеме «ПЧ-АД» является приводом достаточно универсальным, экономичным, с широким диапазоном регулирования и высокими динамическими свойствами. Он может быть рекомендован для агрегатов, требующих глубокого регулирования подачи и напора, частых пусков и остановов. Применение этой системы для высоковольтных (6 – 10 кВ) двигателей ограничено резким повышением стоимости ПЧ, связанной с применением дополнительных трансформаторов, удорожанием элементной базы.

Областью наиболее эффективного использования привода с МДП являются насосные агрегаты большой мощности с ограниченным диапазоном регулирования скорости и редкими пусками. Мощность преобразователей и их стоимость для МДП значительно ниже, чем для системы «ПЧ – АД». Максимальное напряжение ПЧ в цепи ротора высоковольтного АД не превышает 2 кВ, что снимает проблемы высоковольтного преобразования мощности. Кроме того, МДП обладает дополнительным резервом энергосбережения - возможностью регулирования потребляемой реактивной мощности.

4. В разделе получены взаимозависимости основных параметров режимов работы трубопровода, насоса и двигателя, которые являются базовыми для дальнейших исследований электроприводов ЦН. Выражения для частоты вращения, мощности, момента приводного двигателя учитывают основные параметры напорных характеристик насоса, трубопровода, изменение КПД при регулировании и позволяют в дальнейших исследованиях точно учесть их как нагрузку на валу привода.

2 Энергосберегающих системы и режимы работы асинхронного электропривода центробежных насосов

2.1 Методы расчета и анализа электромагнитных и электромеханических процессов

В первом разделе проведен сопоставительный анализ систем электропривода и определены два варианта, наиболее полно отвечающих специфическим особенностям работы ЦН. Это приводы на базе асинхронного двигателя – «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» («ПЧ – АД») и схемы регулирования по цепи ротора, самым перспективным вариантом которых является машина двойного питания (МДП). Следующим этапом является оптимизация энергетических и эксплуатационных показателей этих систем электропривода при работе на центробежную нагрузку, включающая в себя выбор или разработку схемных решений, синтез законов и алгоритмов управления, минимизирующих энергопотребление. Для этого необходимо определение методов расчета и анализа электромагнитных и электромеханических процессов, эксплуатационных и энергетических показателей различных систем асинхронного электропривода в статических и динамических режимах работы центробежных механизмов.

Полная система исходных уравнений, описывающих процессы в асинхронном электроприводе центробежных насосов, состоит из четырех групп: уравнений электромагнитного равновесия (Кирхгофа), описывающих электромагнитные процессы в двигателе, уравнений электромеханического преобразования энергии, уравнений, характеризующих особенности механической нагрузки на валу двигателя и уравнений, отражающих выходные параметры и свойства источников питания. Рассмотрим каждую составляющую математического описания.

2.1.1 Электромагнитные соотношения, характеризующие работу регулируемого асинхронного электропривода.

В случае питания со стороны статора (короткозамкнутые АД по схемам ПЧ-АД, ТРН-АД) при выборе преобразователя необходимо учесть реальную форму токов и напряжений статора, то есть рассчитать их в системе координат α,β, жестко связанной с неподвижным статором. При расчете преобразователей в каскадных схемах нас интересуют значения токов и напряжений в координатах d,q вращающегося ротора. В обоих случаях напряжения и токи изменяются по гармоническому закону, что делает громоздкими элементы математической модели. В синхронных координатах x,y векторы электромагнитных величин неподвижны относительно поля статора и становятся в модели величинами постоянными. Таким образом, выбор системы координат обусловлен задачами исследования.

В системе координат *u,v*, вращающихся с произвольной скоростью $\omega_к$, уравнение обобщенного электромеханического преобразователя запишем в виде

$$\begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 + (l_1 + l_m)(p + j\omega_к) & l_m(p + j\omega_к) \\ l_m(p + j(\omega_к - \omega)) & r_2 + (l_2 + l_m)(p + j(\omega_к - \omega)) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \end{vmatrix} . \quad (2.1)$$

где: u_1 – напряжение, приложенное к статорной цепи АД;
u_2 – напряжение, приложенное к роторной цепи АД;
i_1,i_2 – токи статора и ротора АД;
l_1,l_2 –индуктивности рассеяния фазы статора и ротора;
l_m– индуктивность контура намагничивания;
ω - угловая частота вращения ротора;
r_1, r_2 – активные сопротивления фазы статора и ротора;

$p=d/dt$ – оператор.

Важным достоинством предлагаемого метода является возможность использования в математических моделях различных типов асинхронного электропривода одного исходного уравнения (2.1). Разные варианты привода и запись в различных системах координат являются частным случаем. Так, при моделировании системы «ПЧ – АД» в осях α,β принимаем в (2.1) $u_2 = 0$ и $\omega_к = 0$; в синхронных осях $\omega_к = \omega_0$.

Запись обобщенного вектора в виде проекций на соответствующие оси координат позволяет наиболее просто провести расчет действующих значений и интегральных характеристик высших гармоник токов и напряжений:

$$\begin{vmatrix} u_{1u} \\ u_{1v} \\ u_{2u} \\ u_{2v} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 + p(l_1 + l_m) & -\omega_к(l_1 + l_m) & pl_m & -\omega_к l_m \\ \omega_к(l_1 + l_m) & r_1 + p(l_1 + l_m) & \omega_к l_m & pl_m \\ pl_m & -\omega_к s l_m & r_2 + p(l_2 + l_m) & -\omega_к s(l_2 + l_m) \\ \omega_к s l_m & pl_m & \omega_к s(l_2 + l_m) & r_2 + p(l_2 + l_m) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_{1u} \\ i_{1v} \\ i_{2u} \\ i_{2v} \end{vmatrix} . \quad (2.2)$$

В проекциях на ортогональные оси α,β, жестко связанные со статором АД, выражение (2.2) можно записать, как ($\omega_к = 0$)

$$\begin{vmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{1\beta} \\ u_{2\alpha} \\ u_{2\beta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 + p(l_1 + l_m) & 0 & pl_m & 0 \\ 0 & r_1 + p(l_1 + l_m) & 0 & pl_m \\ pl_m & \omega l_m & r_2 + p(l_2 + l_m) & \omega(l_2 + l_m) \\ -\omega l_m & pl_m & -\omega(l_2 + l_m) & r_2 + p(l_2 + l_m) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{2\alpha} \\ i_{2\beta} \end{vmatrix}.$$

Для упрощения моделей анализа электромагнитных процессов в АД удобно использовать запись в проекциях обобщенного вектора на оси *x,y*, вращающиеся синхронно с полем статора, также полученное из выражения (2.2) при $\omega_к = \omega_0$.

$$\begin{vmatrix} u_{1x} \\ u_{1y} \\ u_{2x} \\ u_{2y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 + p(l_1 + l_m) & -\omega_0(l_1 + l_m) & pl_m & -\omega_0 l_m \\ \omega_0(l_1 + l_m) & r_1 + p(l_1 + l_m) & \omega_0 l_m & pl_m \\ pl_m & -\omega_0 s l_m & r_2 + p(l_2 + l_m) & -\omega_0 s(l_2 + l_m) \\ \omega_0 s l_m & pl_m & \omega_0 s(l_2 + l_m) & r_2 + p(l_2 + l_m) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_{1x} \\ i_{1y} \\ i_{2x} \\ i_{2y} \end{vmatrix},$$

где ω_0 – угловая частота вращения поля статора;
$s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ – скольжение.

Для сокращения записи и удобства расчетов в решении (2.2) относительно токов используем элементы матричного исчисления. Подразделив матрицу (2.6) на субматрицы, можно записать:

$$\begin{vmatrix} \mathbf{u_1} \\ \mathbf{u_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{Z_1} & \mathbf{Z_3} \\ \mathbf{Z_4} & \mathbf{Z_2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{i_1} \\ \mathbf{i_2} \end{vmatrix}, \qquad (2.3)$$

где

$\mathbf{i}_1 = \begin{vmatrix} i_{1u} \\ i_{1v} \end{vmatrix}$ - вектор-матрица тока статора АД;

$\mathbf{i}_2 = \begin{vmatrix} i_{2u} \\ i_{2v} \end{vmatrix}$ - вектор- матрица тока ротора АД;

$\mathbf{u_1} = \begin{vmatrix} u_{1u} \\ u_{1v} \end{vmatrix}$ - вектор- матрица напряжения статора АД;

$\mathbf{u_2} = \begin{vmatrix} u_{2u} \\ u_{2v} \end{vmatrix}$ - вектор- матрица напряжения ротора АД;

$$\mathbf{Z_1} = \begin{vmatrix} r_1 + (l_1 + l_m)p & -\omega_к (l_1 + l_m) \\ \omega_к (l_1 + l_m) & r_1 + (l_1 + l_m)p \end{vmatrix}$$ - субматрица сопротивлений статора;

$$\mathbf{Z_2} = \begin{vmatrix} r_2 + (l_2 + l_m)p & -\omega_к s(l_2 + l_m) \\ \omega_к s(l_2 + l_m) & r_2 + (l_2 + l_m)p \end{vmatrix}$$ - субматрица сопротивлений ротора;

$$\mathbf{Z}_3 = \begin{vmatrix} l_m p & -\omega_к l_m \\ \omega_к l_m & l_m p \end{vmatrix}$$ - субматрица сопротивлений намагничивающей цепи;

$$\mathbf{Z}_4 = \begin{vmatrix} l_m p & -\omega_к s l_m \\ \omega_к s l_m & l_m p \end{vmatrix}$$ - субматрица сопротивлений намагничивающей цепи.

Решением выражения (2.1) относительно векторов токов будет:

$$\begin{vmatrix} \mathbf{i_1} \\ \mathbf{i_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{Z_1} & \mathbf{Z_3} \\ \mathbf{Z_3} & \mathbf{Z_2} \end{vmatrix}^{-1} \begin{vmatrix} \mathbf{Z_2} & \mathbf{Z_3} \\ -\mathbf{Z_4} & \mathbf{Z_1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{u_1} \\ \mathbf{u_2} \end{vmatrix}$$

или

$$\mathbf{I_1} = \frac{\mathbf{Z_2 U_1} - \mathbf{Z_3 U_2}}{\mathbf{Z_1 Z_2} - \mathbf{Z_4 Z_3}}\ ; \qquad \mathbf{I_2} = \frac{-\mathbf{Z_4 U_1} + \mathbf{Z_1 U_2}}{\mathbf{Z_1 Z_2} - \mathbf{Z_4 Z_3}}\ . \tag{2.4}$$

Активную и реактивную составляющие токов статора и ротора АД можно определить достаточно просто как элементы соответствующих векторов.

Электромагнитный момент АД можно записать, как

$$\mathbf{M} = \frac{3}{2} p_n L_\mu \mathbf{I_1 I_2},$$

где p_n – число пар полюсов машины.

Через проекции токов АД момент вычисляется

$$\mathbf{M} = -\frac{3}{2} p_n L_\mu \begin{vmatrix} i_{1x} & i_{2x} \\ i_{1y} & i_{2y} \end{vmatrix}. \tag{2.5}$$

2.1.2 Электромеханические соотношения в регулируемом электроприводе центробежных механизмов.

Уравнения электромагнитного момента АД и уравнения, характеризующие особенности механической нагрузки на валу двигателя, представляют собой единое математическое описание электромеханического преобразования энергии в электроприводе ЦН.

Взаимодействие полей статора и ротора ЭМП создает электромагнитный момент

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p_П L_m (i_{1y} i_{2x} - i_{1x} i_{2y}) . \qquad (2.6)$$

Уравнения (2.1), (2.3), (2.6) совместно с уравнением движения электропривода

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt} \qquad (2.7)$$

описывают процессы электромеханического преобразования энергии в двигательном режиме работы электропривода. К ротору АД от двигателя приложен развиваемый им электромагнитный момент, а также $\Delta M_{мех}$ – момент механических потерь АД. В нерегулируемом приводе $\Delta M_{мех}$ учитывают, как часть статической нагрузки M_C. В [5] показано, что при расчете систем регулируемого привода это приводит к погрешностям и предлагается рассматривать $M_{эм}$ как функцию всех нагрузочных моментов – статического M_C, динамического $Jd\omega/dt$ и момента механических потерь $\Delta M_{мех}$. В [5] предлагается методика, позволяющая согласовать уравнения (2.6) и (2.7). Используем ее для получения уравнения движения электропривода ЦН.

Электромагнитный момент обусловлен электромагнитной мощностью $P_{эм}$, передаваемой через воздушный зазор от статора к ротору, и определяется, как

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_0} = \frac{3 I_2^2 r_2}{\omega_0 s} . \qquad (2.8)$$

За вычетом электрических потерь в обмотке ротора (мощности скольжения) $P_s = 3 I_2^2 r_2$, $P_{эм}$ преобразуется в механическую мощность

$$P_{мех} = 3 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} , \qquad (2.9)$$

уравновешивающую мощность на валу двигателя P_C и мощность механических потерь $\Delta P_{мех}$:

$$P_{мех} = P_C + \Delta P_{мех} , \qquad (2.10)$$

Переходя к уравнению моментов, получим

$$M_{эм} = M_{мех} = \frac{P_{мех}}{\omega} = M_C + \Delta M_{мех} + J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (2.11)$$

В [7.8] показано, что $\Delta M_{мех}$ линейно зависит от скорости

$$\Delta M_{мех} = \Delta M_{мех0} + k_{мех}\omega, \qquad (2.12)$$

где $\Delta M_{мех0}$ – момент трения трогания.

Из первого раздела исследований следует, что в отличие от процессов с M_C=*const,* при центробежной нагрузке момент сопротивления механизма является достаточно сложной функцией частоты вращения рабочего колеса насоса и параметров трубопровода. Так, для центробежного насоса M_C определяется, в соответствии с (1.24), как

$$M_C = M_{C0} + \frac{C_н H_c + \omega^2}{\omega\eta_{цн}(\omega, H_c)}\sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_o}}. \qquad (2.13)$$

Таким образом, и момент сопротивления ЦН, и момент механических потерь АД имеют составляющие трогания (при ω = 0) и составляющие, зависящие от частоты вращения, которые, очевидно, следует объединить. Тогда уравнение (2.15) примет вид:

$$M_{эм} = (M_{C0} + \Delta M_{мех0}) + (\frac{C_н H_c + \omega^2}{\omega\eta_{цн}(\omega, H_c)}\sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_o}} + k_{мех}\omega) + J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (2.14)$$

В уравнении (2.14)

$$\Delta M_{мех0} = \frac{3I_{2н}^2 r_2}{\omega_0}. \qquad (2.15)$$

Номинальный момент механических потерь определяется, как

$$\Delta M_{мех.н} = \frac{P_{мех.н} - P_н}{\omega_н}, \qquad (2.16)$$

где $P_{мех.н}$ – определяется по (2.13) при номинальных значениях тока ротора и скольжения;

$P_н$, $\omega_н$ – номинальные мощность и скорость двигателя.

С учетом уравнения (2.16) коэффициент в уравнении (2.14) равен:

$$k_{мех} = \frac{\Delta M_{мех.н} - \Delta M_{мех0}}{\omega_н}.$$

Полученное выражение (2.14), являясь уравнением движения электропривода ЦН, вместе с уравнениями (2.1), (2.3) описывает процессы электромеханического преобразования энергии в динамическом и установившемся режимах.

Математическое описание напряжений и токов преобразователей частоты, питающих АД достаточно сложно и будет подробно рассмотрено в третьем разделе данной работы. Таким образом, в данной главе, как на первом этапе исследования, рассматриваются системы электропривода при допущении синусоидальности питающего двигатель напряжения.

Можно отметить:

1) В качестве инструмента анализа электромагнитных процессов в приводе определен векторно – гармонический метод, позволяющий исследовать работу элементов привода во всех режимах работы центробежного агрегата. Определен единый математический аппарат для описания и анализа двух различных систем электропривода переменного тока - «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» («ПЧ – АД») и машины двойного питания (МДП). Получены основные соотношения для создания математических моделей этих двух систем.

2) Для полного и адекватного описания процессов электромеханического преобразования энергии в исследуемом электроприводе известные уравнения моментов электрических машин решаются совместно с уточненным выражением механической характеристики центробежных насосов, полученным в первом разделе данной работы и учитывающем конструктивные и технологические параметры ЦН и трубопровода. Вместе с использованием методики, предложенной в [4], это позволило получить точное уравнение движения асинхронного электропривода центробежного насоса.

2.2 Энергосберегающий электропривод центробежных насосов по схеме «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

Как указывалось выше, на базе векторного управления созданы сложнейшие замкнутые системы автоматического управления асинхронного электропривода по схеме «ПЧ – АД». В результате улучшены регулировочные характеристики: расширен диапазон, достигнуты высокое быстродействие и прецизионная точность быстродействия. Однако во многих случаях при синтезе таких САУ не уделялось достаточного внимания энергетическим аспектам. Не учитывались потери в стали машины, влияние несинусоидальности питающего напряжения и распределения магнитной индукции в машине, нелинейность характеристик намагничивания.

На первом этапе рассмотрим работу асинхронного электропривода ЦН при питании от идеализированного преобразователя частоты, выходное напряжение которого синусоидально. В этом случае в установившемся режиме уравнения электрического равновесия (2.1), записанные в синхронных осях при p=0, принимают вид:

$$\begin{vmatrix} U_{1x} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 & -\omega_1(l_1+l_m) & 0 & -\omega_1 l_m \\ \omega_1(l_1+l_m) & r_1 & \omega_1 l_m & 0 \\ 0 & -\omega_1 s l_m & r_2 & -\omega_1 s(l_2+l_m) \\ \omega_1 s l_m & 0 & \omega_1 s(l_2+l_m) & r_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{1x} \\ I_{1y} \\ I_{2x} \\ I_{2y} \end{vmatrix}. \qquad (2.17)$$

Таким образом, в данном разделе мы рассматриваем двигатель с короткозамкнутым ротором при питании статора синусоидальным напряжением с регулируемыми амплитудой $U_1 = U_{1x}$ (ось координат совмещена с вектором поля) и частотой ω_1.

Векторы токов статора и ротора, в соответствии с (2.4), в установившемся режиме определяются, как

$$\mathbf{I_1} = \frac{\mathbf{Z_2 U_1}}{\mathbf{Z_1 Z_2 - Z_4 Z_3}}\ ; \qquad \mathbf{I_2} = \frac{-\mathbf{Z_4 U_1}}{\mathbf{Z_1 Z_2 - Z_4 Z_3}}\ , \qquad (2.18)$$

где

$\mathbf{Z_1} = \begin{vmatrix} r_1 & -\omega_0(l_1+l_m) \\ \omega_0(l_1+l_m) & r_1 \end{vmatrix}$ - субматрица сопротивлений статора;

$\mathbf{Z_2} = \begin{vmatrix} r_2 & -\omega_0 s(l_2+l_m) \\ \omega_0 s(l_2+l_m) & r_2 \end{vmatrix}$ - субматрица сопротивлений ротора;

$\mathbf{Z}_3 = \begin{vmatrix} 0 & -\omega_0 l_m \\ \omega_0 l_m & 0 \end{vmatrix}$ - субматрица сопротивлений намагничивающей цепи;

$\mathbf{Z}_4 = \begin{vmatrix} 0 & -\omega_0 s l_m \\ \omega_0 s l_m & 0 \end{vmatrix}$ - субматрица сопротивлений намагничивающей цепи.

Проекции векторов токов АД, в соответствии с (2.18), определяются, как

$$I_{1x} = \frac{U_{1x} r_1 (r_2^2 + x_2^2 s^2 + \frac{r_2}{r_1} x_m^2 s)}{r_1^2 (r_2^2 + x_2 s^2 + \frac{r_2}{r_1} x_m^2 s) + x_1^2 (r_2^2 + x_2^2 s^2 \sigma) + x_m s (r_1 r_2 - x_1 x_2 \sigma s)};$$

$$I_{1y} = \frac{-U_{1x} x_1 (r_2^2 + x_2^2 s^2 \sigma)}{r_1^2 (r_2^2 + x_2 s^2 + \frac{r_2}{r_1} x_m^2 s) + x_1^2 (r_2^2 + x_2^2 s^2 \sigma) + x_m s (r_1 r_2 - x_1 x_2 \sigma s)};$$

$$I_{2x} = -x_m s \frac{U_{1x} (r_1 x_2 s + r_2 x_1)}{r_1^2 (r_2^2 + x_2 s^2 + \frac{r_2}{r_1} x_m^2 s) + x_1^2 (r_2^2 + x_2^2 s^2 \sigma) + x_m s (r_1 r_2 - x_1 x_2 \sigma s)};$$

$$I_{2y} = -x_m s \frac{U_{1ч} (r_1 r_2 - x_1 x_2 \delta s)}{r_1^2 (r_2^2 + x_2 s^2 + \frac{r_2}{r_1} x_m^2 s) + x_1^2 (r_2^2 + x_2^2 s^2 \sigma) + x_m s (r_1 r_2 - x_1 x_2 \sigma s)}.$$

Кроме того, в разделе используются электромеханические соотношения, полученные в разделе 2.1.

Влияние несинусоидальности временных гармоник выходного напряжения ПЧ, распределения магнитных индукций и нелинейности характеристик намагничивания будет рассмотрено последовательно ниже, на базе известных соотношений для первых гармоник.

2.2.1 Законы оптимального управления частотно – регулируемым асинхронным приводом центробежных насосов.

Современные частотно – управляемые электроприводы следует подразделить на ЭП с векторным и скалярным управлением. Первая модель основана на векторно – матричной модели АД, которая до последнего времени служила лишь для теоретического анализа переходных процессов в электроприводе. Первым и наиболее показательным вариантом является система «Трансвектор» - векторная модель АД в координатах, связанных с потокосцеплениями ротора. Упрощение определения момента при привязке системы координат позволило приблизить АД по регулировочным качествам

к двигателям постоянного тока. Развитие векторных систем управления идет в направлении оптимизации динамических свойств и глубины регулирования ЭП. Так, в [6] предложен способ управления АД, при котором постоянным поддерживается ток намагничивания (то есть величина основного магнитного потока). Результатом является максимальное быстродействие привода. Однако величина Φ не является оптимальной с точки зрения потерь мощности в двигателе или других энергетических критериев при изменении нагрузки. Электропривод с векторным управлением используется, в основном, в качестве глубокорегулируемого привода с оптимальными динамическими свойствами. Требования к приводам ЦН, сформулированные в первом разделе, позволяют определить функциональную избыточность (и, соответственно, дополнительные затраты) применения таких приводов для насосных агрегатов.

При частотном управлении значение электромагнитного момента зависит от частоты и величины напряжения, приложенного к статору электрической машины. Скалярное управление подразумевает управление двумя каналами, заранее связанное какой – либо зависимостью. Законы частотного управления – это соотношения между частотой ω_1 и напряжением U_1, подаваемыми на статор двигателя АД, обеспечивающие заданные статические характеристики привода. Распространенным на практике является регулирование при постоянном магнитном потоке ($U_1/\omega_1=const$). С точки зрения энергетики привода этот вариант может быть использован только при постоянной нагрузке, так как с уменьшением последней поток становится избыточным, что приводит к завышению потерь и неоптимальности этого закона регулирования при переменном моменте нагрузки.

Наличие двух независимых каналов управления дает возможность реализовать в системах частотного регулирования оптимальное управление. Первым из таких вариантов является закон сохранения постоянной перегрузочной способности двигателя, предложенный академиком М.П.Костенко:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \sqrt{\frac{M_{c1}}{M_{cH}}} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{1H}} . \qquad (2.19)$$

Им впервые пояснено, как надо изменять напряжение, когда двигатель с номинальной частоты питания ω_{1H} переходит на пониженное (повышенное) значение частоты ω_1 и что для выяснения нового значения напряжения необходимо учитывать свойства нагрузки. Управляя двигателем в соответствии с выражением (2.19) при ненасыщенной магнитной системе машины, можно сохранить практически неизменным коэффициент мощности и абсолютное скольжение привода, а его КПД независимым от изменения скорости.

Из (2.19) следует зависимость формы взаимосвязанного управления частотой и напряжением от вида нагрузки. Для «упрощенной» центробежной нагрузки, при $M_C \equiv \omega^{\alpha}$, (2.1) приобретает вид:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_{1H}} \right)^{1+\frac{\alpha}{2}}. \qquad (2.20)$$

Вывод соотношения (2.19) справедлив при условии пренебрежения падением напряжения на активном сопротивлении обмотки статора, то есть для крупных машин в диапазоне изменения частот 2:1. При низких частотах увеличивается влияние r_1 относительно индуктивных сопротивлений. Напряжение, приложенное к обмотке статора, уравновешивается ЭДС E_1, индуктируемой основным потокам и падениями напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{J}_1 x_1 + \dot{J}_1 r_1;$$

$$E_1 = 4{,}44 w_1 K_{01} f_1 \Phi; \qquad (2.21)$$

где w_1, K_{01} - число витков и обмоточный коэффициент обмотки статора.

Из (2.21) следует, что принципиальная необходимость регулирования напряжения при изменении частоты обусловлена, если отвлечься от предъявляемых к характеристикам двигателя требованиям, насыщением магнитопровода электрической машины. Во избежание насыщения при снижении частоты необходимо уменьшать подводимое к двигателю напряжение.

Для машин средней и малой мощности, а также при широком диапазоне регулирования, оптимальный закон Костенко уточняется:

$$\frac{\left|\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \dot{Z}_1\right|}{U_{1H}} = \sqrt{\frac{M_{c1}}{M_{cH}}} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{1H}}. \qquad (2.22)$$

На рисунке 2.1 представлены механические характеристики АД, работающего на центробежную нагрузку и управляемого по закону (2.19) и рассчитанные по скорректированному соотношению (2.22) (обозначены пунктиром).

Кроме указанного, в (2.19) не учитывается величина скольжения так как частота вращения ротора

$$\omega = \omega_1 (1 - s).$$

Погрешность, обусловленная пренебрежением скольжением, тем больше, чем глубже регулирование частоты вращения.

Законы частотного управления должны обеспечивать не только соответствие характеристик двигателя характеристикам нагрузки, но также и экономичность регулирования частоты вращения, которая определяется в значительной степени уровнем потерь в двигателе. Управление АД по (2.19) не обеспечивает работу двигателя с минимальными потерями и является только первым шагом к оптимизации режимов энергопотребления электропривода ЦН.

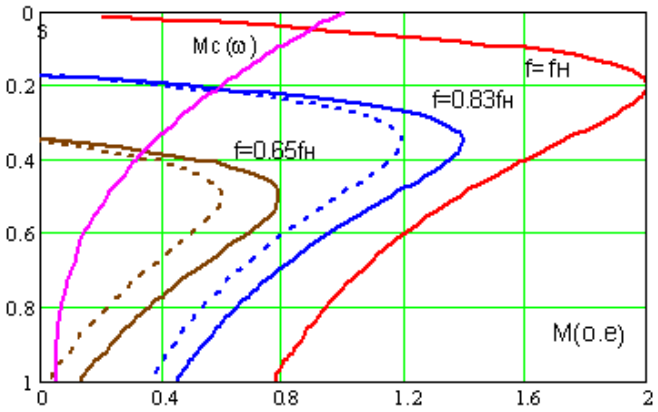


Рисунок 2.1 - Механические характеристики привода ПЧ-АД при центробежной нагрузке

Другим законом управления в функции момента нагрузки, обеспечивающим снижение потерь в двигателе при регулировании, является закон минимального тока [7], который выводится с учетом нелинейности магнитной цепи АД. В [7] устанавливается математическая взаимосвязь момента с потокосцеплением и скольжением для минимизации тока статора. В [7] предложено управление по минимуму потерь, при котором создание необходимого момента, пропорционального произведению тока ротора на поток, осуществляется при равенстве переменных и постоянных потерь, связанных с магнитным потоком АД. Сложность математической интерпретации не позволила в свое время широко распространить этот закон. В настоящее время создание системы управления, реализующей необходимые алгоритмы, вполне реально, что делает предложения [5] актуальными.

Известны и законы оптимального управления, позволяющие минимизировать отдельные составляющие потерь в АД при частотном управлении в статическом режиме.

В [4,5], исходя из схемы замещения асинхронного двигателя при переменной частоте питающего напряжения, решается задача частотного управления по минимуму потерь. Показано, что для определенных значений момента, частоты и напряжения имеет место вполне определенное значение абсолютного скольжения в относительных единицах, при котором потери

двигателя будут минимальны. Однако задача решена в линейной постановке и корректность выводов определяется линейной частью кривой намагничивания (при $U_1 < 0{,}8\ U_{1н}$), выражения приведены для многих параметров в неявном виде, сложны.

В [6] при ряде допущений даются общие функциональные рекомендации, которым должны удовлетворять законы частотного управления и по напряжению, и по соотношению этих потерь, однако для конкретных механизмов (в том числе насосов) эти вопросы не рассматриваются.

2.2.2 Минимизация потерь в двигателе частотно – регулируемого электропривода центробежных насосов.

Разработка энергосберегающих систем электропривода в значительной степени сводится к определению алгоритмов управления, минимизирующих потери в отдельных элементах этих систем во всех режимах их работы. Главным из таких объектов в частотно – регулируемом электроприводе ЦН является асинхронный двигатель.

Изучению структуры электромагнитных, механических и других потерь в электрических машинах посвящено много работ [6,7 и др.]. В целом, для АД получены расчетные формулы, основанные на эмпирических коэффициентах, позволяющие проводить расчет и анализ энергетических показателей и синтезировать законы частотного управления с минимизацией потерь в двигателе. Однако эти соотношения не учитывают особенностей нагрузки электропривода, которая часто имеет решающее значение. В данном разделе на базе результатов этих исследований и уточненной механической характеристики ЦН разрабатывается методика расчета и определяется способ оптимального частотного регулирования из условия минимума потерь в двигателе ЦН.

Весь диапазон регулирования частоты вращения разделим на два поддиапазона – регулирование «вниз» при $\omega < \omega_H$ и регулирование «вверх» - при $\omega > \omega_H$. Это позволяет на участке регулирования «вниз», охватывающем практически весь рабочий диапазон регулирования ЦН, считать магнитную цепь машины ненасыщенной и магнитный поток пропорциональным току намагничивания. При регулировании «вверх» магнитная цепь АД насыщена. Рассмотрим энергетические соотношения на первом участке.

Потери мощности в АД определяются, как

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{Э1} + \Delta P_{Э2} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}, \qquad (2.23)$$

где $\Delta P_{Э1}$, $\Delta P_{Э2}$ – электрические потери в обмотках соответственно статора и ротора;

$\Delta P_{ст}$ - потери в стали статора;

$\Delta P_{мех}$ – механические потери;

$\Delta P_{доб}$ – добавочные потери.

Составляющие потерь имеют различную природу, различный вес в приведенном балансе и по-разному зависят от параметров и режимов работы двигателя.

Электрические потери в меди обмотки ротора

$$\Delta P_{Э2} = 3I_2^2 r_2. \tag{2.24}$$

Если вращающий момент АД записать, как

$$M = K_M \Phi I_2 \cos\psi_2 \tag{2.25}$$

и принять, что в диапазоне регулирования ЦН $cos\psi_2 \approx 1$, потери в обмотке ротора при регулировании скорости можно определить, как

$$\Delta P_{Э2} = \Delta P_{\Sigma} k_{Э2} \frac{M^2}{\Phi^2}, \tag{2.26}$$

где $k_{Э2}$ – относительный вес потерь в обмотке ротора в базовом режиме.

Ток фазы статора представляет собой векторную сумму токов ротора и тока холостого хода

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + (-\bar{I}_2'). \tag{2.27}$$

При допущении $cos\psi_2 \approx 1$ и линейности магнитной цепи при $\omega < \omega_H$, электрические потери в обмотке статора можно разделить на составляющие, обусловленные рабочим током и током холостого хода:

$$\Delta P_{Э1} = \Delta P_{Э1Р} + \Delta P_{Э10}. \tag{2.28}$$

Потери от рабочего тока, по аналогии с (2.26),

$$\Delta P_{Э1Р} = \Delta P_{\Sigma} k_{Э1} \frac{M^2}{\Phi^2}. \tag{2.29}$$

Потери от тока холостого хода

$$\Delta P_{Э10} = \Delta P_{\Sigma} k_{Э0} \Phi^2. \tag{2.30}$$

В (2.29), (2.30) $k_{Э1}$, $k_{Э0}$ – относительный вес потерь в обмотке статора соответственно от рабочего тока и тока холостого хода в базовом режиме.

Потери в стали АД составляются из потерь на гистерезис и потерь, вызванных вихревыми токами. В целом их можно оценить, как

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{\Sigma} k_{ст} \omega^{\frac{3}{2}} \Phi^2 \ , \qquad (2.31)$$

где $k_{ст}$ – относительный вес потерь в стали в базовом режиме.

Механические потери мощности можно принять пропорциональными квадрату скорости ротора АД:

$$\Delta P_{мех} = \Delta P_{\Sigma} k_{мех} \omega^2 \ , \qquad (2.32)$$

где $k_{мех}$ – относительный вес потерь в обмотке ротора в базовом режиме.

Добавочные потери вызваны в основном высшими гармониками магнитных полей, возникающих ввиду наличия высших гармоник намагничивающих сил обмоток и зубчатого строения статора и ротора. Согласно нормативным документам, $\Delta P_{доб}$ принимают равным 0.5% от подводимой мощности [5]. Кроме того, пренебрежимо малыми являются магнитные потери в сердечнике ротора.

Анализ приведенных выше соотношений показывает, что, в отличие от нерегулируемого АД, в двигателе с частотным управлением все составляющие потерь являются функцией частоты питающего напряжения, момента нагрузки и магнитного потока. Суммарные потери мощности регулируемого АД, группируя их составляющие, можно записать, как

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma H} \left((k_{Э0} + k_{ст} \omega^{\frac{3}{2}}) \Phi^2 + k_{Э} \frac{M^2}{\Phi^2} + k_{мех} \omega^2 + k_{доб} \right) , \qquad (2.33)$$

где $k_{Э}=k_{Э1}+k_{Э2}$.

Минимизация ΔP_{Σ} при известных весовых коэффициентах, заданных частоте и моменте нагрузки, сводится к определению оптимальной величины магнитного потока в диапазоне регулирования ЦН, то есть зависимость $\Phi_{опт}(\omega)$. Эта зависимость получена в при $d\Delta P_{\Sigma} \big/ d\Phi = 0$:

$$\Phi_{опт}(\omega) = \sqrt[4]{\frac{k_{Э} M(\omega)^2}{k_0 + k_{ст} \omega^{\frac{3}{2}}}} \ . \qquad (2.34)$$

Особенностью центробежных механизмов является зависимость момента сопротивления от частоты вращения рабочего колеса или крыльчатки. В [4], рассматривается привод ЦН с приближенной зависимостью $M=\omega^{3/2}$.

Применение современных компьютерных математических приложений позволяет достаточно просто провести уточненный расчет с использованием зависимостей, полученных в первом разделе. Момент сопротивления, создаваемый ЦН на валу двигателя, определен, как

$$M = \frac{P_{маг}}{\omega\eta_{цн}} = \frac{C_н H_c + \omega^2}{\omega\eta_{цн}(\omega, H_c)}\sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_o}}\,. \qquad (2.35)$$

В формуле (2.35) необходимо учесть изменение потерь в ЦН при регулировании ω. Подача изменяется при определенном статическом подпоре Hc в функции ω согласно выражению (1.19). Тогда полином, аппроксимирующий КПД насоса, примет вид:

$$\eta_{цн}(\omega, H_c) = a_0 + a_1\sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}} + a_2(\omega^2 - \frac{H_c}{H_0})\,. \qquad (2.36)$$

Таким образом, расчет оптимального, по минимуму потерь в частотно-регулируемом АД центробежного агрегата, закона изменения магнитного потока, сводится к совместному решению уравнений (2.34), (2.35), (2.36):

$$\Phi_{опт}(\omega) = \sqrt[4]{\frac{k_Э\left(\frac{C_н H_c + \omega^2}{\omega\eta_{цн}(\omega, H_c)}\right)^2(\omega^2 - \frac{H_c}{H_o})}{k_0 + k_{ст}\omega^{\frac{3}{2}}}}\,.$$

Автором разработана программа расчета $\Phi_{опт}(\omega)$ с учетом параметров АД, насоса и трубопровода. Некоторые результаты расчетов приведены ниже. На рисунке 2.2 приведены зависимости $\Phi_{опт}(\omega)$, рассчитанные для привода ЦН по предлагаемой методике (кривая 1) и при упрощенной механической характеристике ЦН $M=\omega^{3/2}$ (кривая 2). Для сравнения здесь же показана кривая 3, полученная для линейной зависимости $M(\omega)$. Данные получены при весовых коэффициентах $k_Э$ =0.55, $k_{ст}$=0.3. Учет параметров насоса и трубопровода позволяет в значительной мере уточнить расчет.

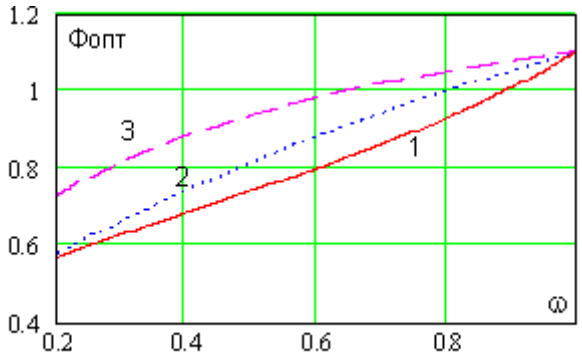
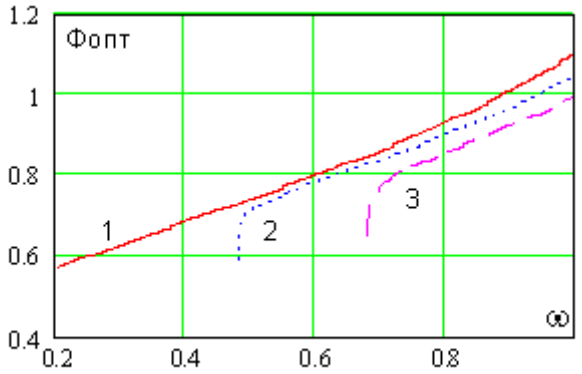


Рисунок 2.2 - Оптимальные значения потока частотно – регулируемого АД в приводе ЦН

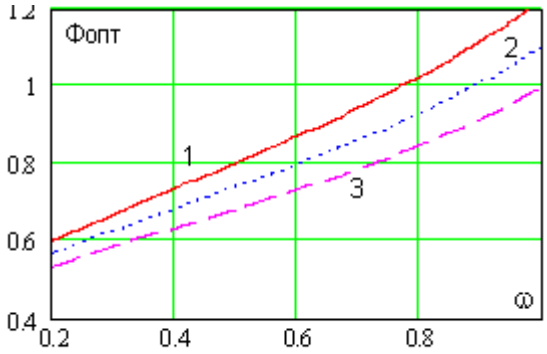
Рисунок 2.2 иллюстрирует зависимость значений оптимального магнитного потока от противодавления на выходе насосного агрегата. «Обрыв» кривых 2 и 3 показывает снижение рабочего диапазона регулирования скорости рабочего колеса насоса при увеличении величины статического подпора трубопровода. Расчет проведен для тех же значений весовых коэффициентов потерь.



1- $H_c = 0$; 2 - $H_c = 0.3$; 3 - $H_c = 0.6$.

Рисунок 2.3 - Кривые $\Phi_{опт}(\omega)$ для различных значений статического подпора

При выборе двигателей и проектировании оптимальных САУ для привода ЦН интерес представляет влияние параметров АД на характер изменения оптимального магнитного потока в диапазоне регулирования скорости рабочего колеса насоса. В частности, значение $\Phi_{опт}$ в значительной степени зависит от распределения потерь в АД в базовом режиме. На рисунке 2.4 приведены результаты расчетов оптимального значения магнитного потока при значениях удельных потерь, наиболее распространенных в серийно выпускаемых асинхронных двигателях.



1- $k_Э$ =0.65, $k_{ст}$=0.2; 2 - $k_Э$ =0.55, $k_{ст}$=0.3; 3 - $k_Э$ =0.45, $k_{ст}$=0.4.

Рисунок 2.4 - Кривые $\Phi_{опт}(\omega)$ для различных значений относительных потерь в АД

Регулирование частоты вращения «вверх» ограничено весьма узким его диапазоном, так как связано с резким увеличением механической нагрузки, насыщения, нагрева обмоток двигателя и возможности возникновения кавитационных процессов в ЦН. Но технологическая необходимость в таком регулировании есть, поэтому основные соотношения при регулировании «вверх» представляют непосредственный практический интерес.

Кривую намагничивания приближенно аппроксимируем выражением:

$$I_{0*}^2 = c_1 \Phi_*^{\ 2} + c_2 \Phi_*^{\ 6}. \qquad (2.37)$$

Коэффициенты аппроксимации C_1 и C_2 определяются выбранными координатами пересечения действительной кривой с аппроксимирующей. За одну из таких точек можно выбрать номинальный режим (или близкий к нему), за вторую – режим насыщения.

Принимая во внимание (2.37), потери в обмотке статора, обусловленные намагничивающим током, могут быть записаны в следующем виде.

$$\Delta P_{Э1} = \Delta P_{\Sigma H} (k_{Э0} c_1 \Phi^2 + k_{Э0} c_2 \Phi^6).$$

Суммарные потери при любой частоте вращения

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_{\Sigma H} ((k_{Э0} c_1 + k_{ст} \omega^{\frac{3}{2}}) \Phi^2 + k_{Э0} c_2 \Phi^6 + k_Э \frac{M^2}{\Phi^2} + k_{мех} \omega^2 + k_{доб}). \qquad (2.38)$$

Для определения экстремума функции приравняем к нулю производную от (2.38)

$$\frac{d}{d\Phi} \Delta P_\Sigma = \Delta P_{\Sigma H} (2(k_{Э0} c_1 + k_{ст} \omega^{\frac{3}{2}}) \Phi \ + 6 k_{Э0} c_2 \Phi^5 - 2 k_Э \frac{M^2}{\Phi^3})$$

и после последующих преобразований получим относительное значение потока асинхронного двигателя, соответствующее минимуму потерь в области $n>n_\delta$:

$$\Phi_{опт}(\omega) = \sqrt[4]{\frac{-b^2(\omega) + \sqrt{b^2(\omega) + 12a(\omega)c(\omega)}}{6a(\omega)}}, \qquad (2.39)$$

где $a = k_0c_2$; $b(\omega) = k_0c_1 + k_c\omega^{3/2}$; $c(\omega) = k_Э M(\omega)$.

На основании проведенных аналитических исследований выполнены расчеты оптимальных относительных значений напряжений для асинхронного двигателя. Очевидно, имеет смысл объединить оба расчета в единый алгоритм, представленный на рисунке 2.5.

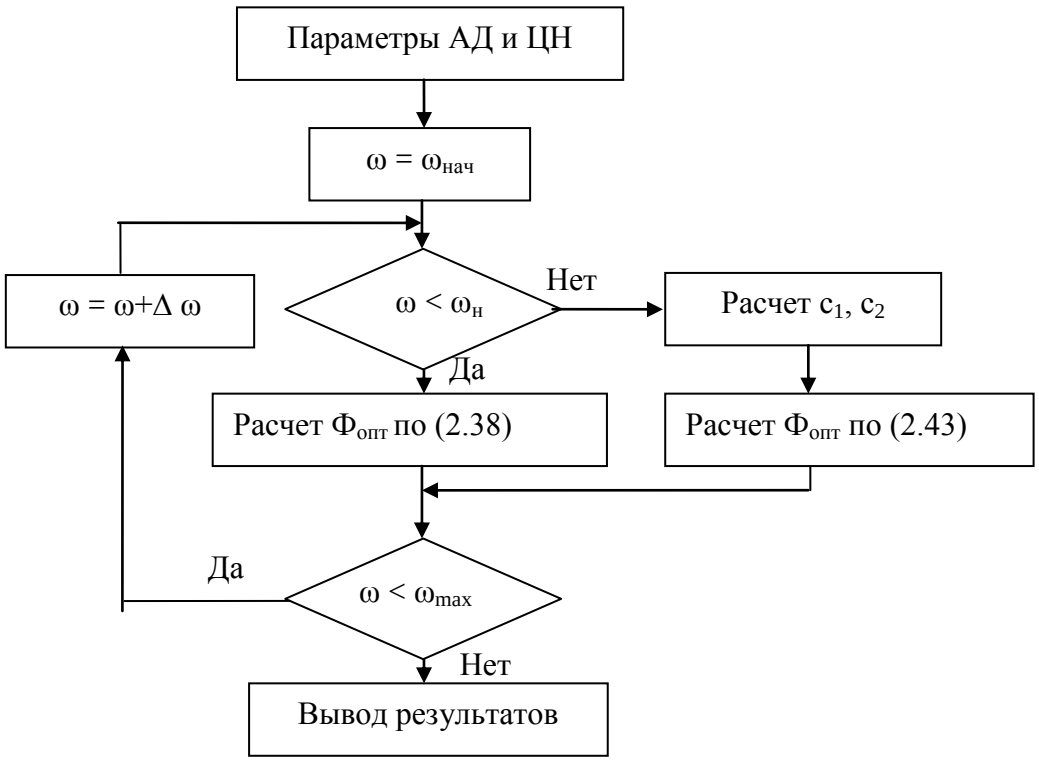


Рисунок 2.5 – Блок – схема алгоритма расчета оптимального значения потока

Результаты расчетов представлены на рисунке 2.6,а; кривые 1,2,3 соответствуют относительным значениям потерь в стали - 0,2; 0,3;0,4 и соответственно, относительным потерям в обмотках - 0,65; 0,55; 0,45. На рисунке 2.6,*b* – оптимальные значения потока для различных значений статического подпора (1- $H_c = 0$; 2 - $H_c = 0.3$; 3 - $H_c = 0.6$).

a) b)

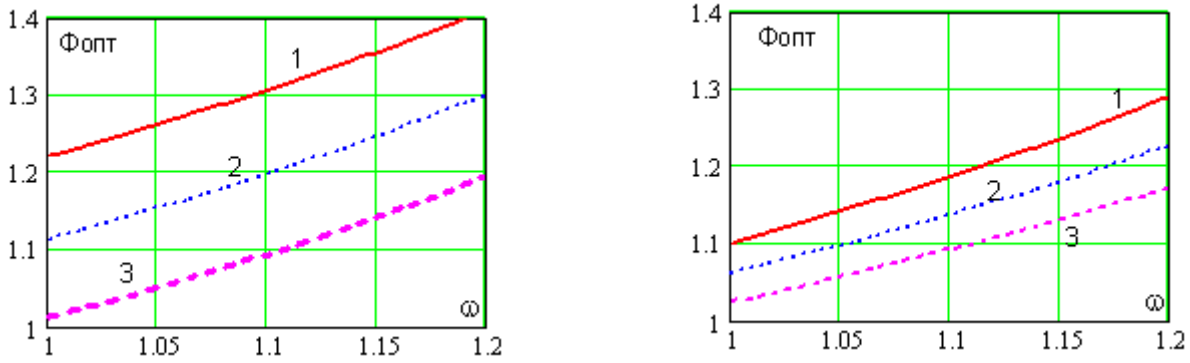


Рисунок 2.6 - Кривые $\Phi_{опт}(\omega)$ при регулировании скорости ЦН выше номинального значения

Основные тенденции изменения $\Phi_{оп,}$ которые были получены для области изменения $1>\omega$, остается принципиально там же и для области изменения $\omega>1$: $\Phi_{оп}$ увеличивается с увеличением ω, кривые соответствующих машинам с меньшей долей потерь в стали, лежат выше кривых, соответствующих машинам с большей долей этих же потерь.

Таким образом, полученная методика позволяет повысить точность расчета оптимального закона изменения магнитного потока регулируемого по частоте АД, учесть параметры ЦН, трубопровода и двигателя и может служить основой для проектирования энергосберегающих систем электропривода агрегатов центробежного действия.

Выполненные аналитические исследования позволили установить основные закономерности для частотно-управляемого электропривода центробежного насоса. Оценка точных количественных соотношений может быть выполнена на базе более сложных математических моделей, предлагаемых ниже.

2.3 Разработка математической модели системы электропривода «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» центробежного насоса

В предыдущих разделах были получены основные закономерности частотного управления асинхронным двигателем, исходя из общего анализа режимов работы системы «ПЧ -АД – насос – трубопровод». Уточненные исследования оптимальных режимов работы асинхронного двигателя в системе частотно - управляемого электропривода ЦН возможны лишь на основе математической модели, учитывающей нелинейность системы, конкретную геометрию сердечника машины и другие факторы.

При построении модели используются основные соотношения, характерные для асинхронного двигателя, гармонический метод расчета

магнитной цепи сердечника и полученные в 2.1, 2.2 соотношения частотного управления.

Построенная модель обеспечивает уточненный поиск минимизации потерь в широком диапазоне частотного управления асинхронного двигателя.

2.3.1 Аналитические соотношения переменных магнитной цепи асинхронного двигателя при гармоническом методе моделирования.

Если принять изменение магнитной индукции в воздушном зазоре синусоидальным:

$$b_\delta = b_{\delta 1} = B_{\delta 1} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_1} x - \omega_1 t\right), \tag{2.40}$$

то *МДС* на воздушный зазор

$$f_\delta = f_{\delta 1} = F_{\delta 1} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_1} x - \omega_1 t\right). \tag{2.41}$$

При определении *МДС* на зубцы и ярмо, кривую намагничивания стали аппроксимируем в виде гиперболического синуса

$$h = \alpha sh(\beta b), \tag{2.42}$$

где α и β - коэффициенты, зависящие от марки стали, и *МДС* на зубцы. Тогда

$$f_z = L_z \cdot h_z = L_z \cdot \alpha sh\left[\beta B_{z1} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_1} x - \omega_1 t\right)\right]. \tag{2.43}$$

Разложим полученное выражение в ряд [5]

$$f_z = -2L_z \alpha \sum_{n=0}^{n=\infty} jI_{2n+1}\left(j\beta B_{z1}\right)\sin\left(2\pi + 1\right)\left(\frac{\pi}{\tau_1} x - \omega_1 t\right). \tag{2.44}$$

Коэффициенты I_i *(j* β *B)* - есть функция Бесселя *i -го* порядка от чисто мнимого аргумента.

Пренебрегая выражениями второго порядка, имеем:

$$f_z = \sum_\nu F_{z\nu} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_\nu} x - \omega_\nu t\right), \tag{2.45}$$

где $F_{z\nu} = -2L_z\alpha_j I_{2n+1}(j\beta B_{z1})$ - амплитуды гармонических *МДС* на зубцы;

$\nu=2n+1$ - относительные порядки гармонических МДС (n=0,1,2,...);

$\omega_\nu=\omega_1\nu$ *и* $\tau_\nu=\frac{\tau_1}{\nu}$ - угловые частоты вращения и полюсные деления гармонических *МДС*.

Магнитная индукция в ярме является интегральной функцией от магнитной индукции в воздушном зазоре, т.е.

$$b_a = -B_{a1}\cos\left(\frac{\pi}{\tau_1}x - \omega_\nu t\right), \tag{2.46}$$

напряженность магнитного поля в сечении ярма, лежащего в плоскости, проходящей через точку x и ось машины:

$$h_a = \sum_\nu H_{a\nu}\cos\left(\frac{\pi}{\tau_\nu}x - \omega_\nu t\right), \tag{2.47}$$

где

$$H_{\alpha\nu}=(-1)^n\,2\cdot\alpha\cdot j\cdot I_\nu(j\beta B_{\alpha1});$$

$$\nu=2n+1, \quad n=0,1,2,...$$

МДС на ярмо

$$f_a = \sum_\nu f_{a\nu} = \sum_\nu \frac{L_{a1}}{\pi}\frac{1}{\nu}\int_\psi^0 h_{a\nu}d\psi_\nu .$$

После преобразования имеем:

$$f_a = \sum_\nu F_{a\nu}\sin(\frac{\pi}{\tau_\nu}x - \omega_\nu t), \tag{2.48}$$

где $F_{a\nu} = -(-1)^n\frac{4}{\pi}L_{a1}\cdot\alpha\cdot jJ_\nu(j\beta B_{a1})$;

L_{a1} - длина силовой линии в ярме для основной гармонической на один полюс.

МДС на магнитную цепь

$$f = \sum_\nu F_\nu\sin(\frac{\pi}{\tau_\nu}x - \omega_\nu t), \tag{2.49}$$

где $F_\nu = F_{\delta\nu} + F_{z\nu} + F_{d\nu}$,

(*для* $\nu>1$ $F_{\delta\nu}=0$, *т.к.* $B_{\delta\nu}=0$).

Выражение (2.49) получено из условия синусоидального распределения магнитных индукций. Однако в реальных электрических машинах с фазными обмотками, в силу свойств последних, высшие гармонические *МДС*, представленные (2.49), отсутствуют, т.е. в реальных электрических машинах условие синусоидального распределения магнитных индукций не выполняется [6]. Поэтому в воздушном зазоре должны иметь место высшие гармонические индукции, которые находятся в противофазе с высшими гармоническими МДС (2.49) и имеют равные им число пар полюсов и скорость вращения.

Наличие высших гармонических индукции приводит к усложнению общей картины поля в воздушном зазоре.

Для определения расчетной напряженности в зубцах и ярме с учетом высших гармонических магнитной индукции, обусловленных насыщением магнитной цепи, необходимо вывести эти гармонические в (2.40), (2.44), (2.46) и произвести операции, аналогичные приведенным.

Анализ приведенных выражений показывает, что зависимости в магнитной цепи сердечника асинхронной машины являются сложной функцией многих параметров: геометрии сердечника, магнитных нагрузок, и их соотношений.

2.3.2 Численный гармонический метод исследования магнитной цепи асинхронного двигателя.

Аналитический метод исследования магнитного поля с использованием функций Бесселя является хорошим инструментом для качественного анализа явлений, поскольку позволяет выявить спектр гармонических, обусловленных насыщением магнитопровода, основные соотношения и функциональные связи, однако область его применения ограничивается, во-первых, погрешностью, вносимой аппроксимацией кривой намагничивания в виде гиперболического синуса, во-вторых, сложностью выражений, получающихся при сложной геометрии магнитопровода.

Поэтому для достаточно точной количественной оценки явлений на основе аналитического метода разработан численный гармонический метод расчета.

Согласно методу, магнитная индукция в воздушном зазоре в функции координаты x как по продольной, так и по поперечной оси машины аппроксимируется рядом Фурье, спектр которого определен из аналитических исследований. Зубцовая зона и ярма машины разбиваются на необходимое количество отрезков равностоящими точками на их концах, при этом число точек выбирается из условия, таким образом непрерывная координата пространства x заменяется дискретной.

Так как метод решения задачи итерационный, то на каждом этапе расчета амплитуды гармонических магнитных индукции известны либо из

результатов расчета предыдущего итерационного цикла, либо (в первом итерационном цикле) из результатов прогноза.

Для любой, произвольно взятой на окружности расточки статора точки, находящейся на расстоянии x делений от исходной, принятой за начало координат, синхронно вращающихся с полем основной гармонической, величина магнитной индукции

$$b_\delta = \sum_\nu \left[B_{\delta\nu d} \sin(\frac{\nu 2\pi}{N} x) + B_{\delta\nu q} \cos(\frac{\nu 2\pi}{N} x) \right], \qquad (2.50)$$

где $B_{\delta\nu d}$, $B_{\delta\nu q}$ - амплитуды ν - ых гармонических магнитной индукции по продольной и поперечной осям;

N – число интервалов, на которое разбивается окружность расточки статора;

$x = 0,1,2\ldots, N-1$ - текущая пространственная координата.

$$\nu = p \cdot \kappa ,$$

$$\kappa = 1,3,5,\ldots,M.$$

Расчетные значения магнитных индукций в зубцах статора и ротора пропорциональны b_δ:

$$b_{zc} = b_\delta \cdot m_{zc}; \qquad b_{zp} = b_\delta \cdot m_{zp}. \qquad (2.51)$$

Коэффициенты в (2.55) определяются, как

$$m_{zc} = \frac{\tau_c}{d_{z1} k_c}, \qquad m_{zp} = \frac{d_{z2}}{d_{z2}^1 k_c},$$

где τ_c – зубцовый шаг статора;

d_{zc} – ширина зубца статора;

k_c – коэффициент заполнения пакета сталью;

d_{z2} – ширина зубца на расточке статора;

d_{z2}^1 - средняя ширина зубца ротора.

Магнитная индукция в ярме является интегральной функцией от магнитной индукции в воздушном зазоре

$$b_a = \frac{1}{c} \int_0^x b_\delta dx .$$

Тогда в ярме статора

$$b_{ac} = \frac{\tau_1}{\pi h_c k_c} \sum_{\nu} \left[-\frac{\nu_1}{\nu} B_{\delta \nu d} \sin(\frac{\nu 2\pi}{N} x) + \frac{\nu_1}{\nu} B_{\delta \nu q} \cos(\frac{\nu 2\pi}{N} x) \right],$$

где h_c – высота ярма.

Магнитная индукция в ярме ротора определяется, как

$$b_{ac} = \frac{\tau_1}{\pi h_p k_p} \sum_{\nu} \left[-\frac{\nu_1}{\nu} B_{\delta \nu d} \sin(\frac{\nu 2\pi}{N} x) + \frac{\nu_1}{\nu} B_{\delta \nu q} \cos(\frac{\nu 2\pi}{N} x) \right]. \quad (2.52)$$

Далее приступаем к определению магнитодвижущих сил. Амплитудные значения ν – ой гармонической *МДС* на воздушный зазор по осям *d, q*

$$F_{\delta \nu d} = B_{\delta \nu d} k_\delta \delta, \qquad F_{\delta \nu q} = B_{\delta \nu q} k_\delta \delta,$$

где δ – величина воздушного зазора;

k_δ – коэффициент воздушного зазора.

МДС на зубцы статора и ротора

$$f_{zc} = L_{zc} h_{zc}(b_{zc}), \qquad f_{zp} = L_{zc} h_{zp}(b_{zp}),$$

где $h_{zc}(b_{zc})$, $h_{zp}(b_{zp})$ – напряженность магнитного поля в зубцах статора и ротора, определяемая по кривой намагничивания стали.

Амплитуды гармонических *МДС* на зубцах статора и ротора получаются разложением f_{zc} *и* f_{zp} в ряд Фурье.

$$\begin{aligned}
F_{zc\nu d} &= \tfrac{2}{N} \sum_{x=1}^{N} f_{zc} \cdot \sin\left(\frac{\nu 2\pi}{N} x \right), \\
F_{zp\nu q} &= \frac{2}{N} \sum_{x=1}^{N} f_{zc} \cdot \cos\left(\frac{\nu 2\pi}{N} \cdot x \right), \qquad (2.53) \\
F_{zp\nu d} &= \frac{2}{N} \sum_{x=1}^{N} f_{zp} \cdot \sin\left(\frac{\nu 2\pi}{N} x \right), \\
F_{zp\nu q} &= \frac{2}{N} \sum_{x=1}^{N} f_{zp} \cdot \cos\left(\frac{\nu 2\pi}{N} x \right).
\end{aligned}$$

Напряженность в любом сечении ярма статора $h_{ac}(b_{ac})$ и ротора $h_{ap}(b_{ap})$ определяется по кривой намагничивания. Амплитуды гармонических напряженностей

$$H_{ac\nu d} = \tfrac{2}{N} \sum_{x=1}^{N} h_{ac} \cdot \sin\left(\frac{\nu 2\pi}{N} x \right),$$

$$H_{acvq} = \frac{2}{N}\sum_{x=1}^{N} h_{ac} \cdot \cos\left(\frac{v2\pi}{N} \cdot x\right); \qquad (2.54)$$

$$H_{apvd} = \frac{2}{N}\sum_{x=1}^{N} h_{ap} \cdot \sin\left(\frac{v2\pi}{N} x\right);$$

$$H_{apvq} = \frac{2}{N}\sum_{x=1}^{N} h_{ap} \cdot \cos\left(\frac{v2\pi}{N} x\right).$$

По полученным значениям определяем амплитуды гармонических *МДС* на ярмо статора и ротора

$$F_{acvd} = \frac{2L_{ac}}{\pi v} H_{acvd},$$
$$F_{acvq} = \frac{2L_{ac}}{\pi v} H_{acvq},$$
$$F_{apvd} = \frac{2L_{ap}}{\pi v} H_{apvd},$$
$$F_{apvd} = \frac{2L_{ap}}{\pi v} H_{apvd}.$$

Суммируя *МДС* участков, получаем амплитуды гармонических на магнитную цепь (по осям)

$$F_{vd} = F_{\delta vd} + F_{zcvd} + F_{zpvd} + F_{acvd} + F_{apvd},$$

$$F_{vq} = F_{\delta vq} + F_{zcvq} + F_{zpvq} + F_{acvq} + F_{apvq}. \qquad (2.55)$$

МДС по продольной и поперечной осям, обусловленные токами обмотки ротора, равны:

$$F_{2d\,(v=p)} = - B_{(v=p)} \cdot K_{F2(v=p)} \cdot \sin\,\psi_{2(v=p)}; \qquad (2.56)$$

$$F_{2q(v=p)} = - B_{\delta(v=p)} \cdot K_{F2(v=p)} \cos\psi_{2(v=p)};$$

$$K_{F2(v=p)} = \frac{z_2 f_2 D \cdot l \cdot K_{ck}}{2p^2 z_{2(v=p)}},$$

где D, l – внутренний диаметр и длина сердечника;
Z_2 – число пазов ротора;
f_2 – частота ЭДС в обмотке ротора для скольжения s;
p – число пар полюсов;

$Z_{2(\nu=p)}$ – сопротивление обмотки ротора для скольжения *s*;

$K_{ск}$ – скос пазов.

Гармонические МДС, обусловленные токами, протекающими под воздействием ЭДС, индуктируемых высшими гармоническими магнитной индукции

$$F_{2\nu d} = - B_{\delta\nu d} K_{F2\nu} \cdot \sin \psi_{2\nu} + B_{\delta\nu q} \cdot K_{F2\nu} \cdot \cos \psi_{2\nu}; \qquad (2.57)$$

$$F_{2\nu q} = - B_{\delta\nu d} \cdot K_{F2\nu} \cdot \cos \psi_{2\nu} = B_{\delta\nu q} \cdot K_{F2\nu} \cdot \sin \psi_{2\nu};$$

$$K_{F2\nu} = \frac{z_2 f_{2\nu} \cdot D \cdot l \cdot K_{ck}}{2\nu^2 z_{2\nu}};$$

$$\psi_{2\nu} = arctg \frac{z_{2\nu}}{x_{2\nu}}.$$

С использованием этого метода в [5] проведен ряд расчетов магнитной цепи и режимов работы асинхронной машины, носящих, однако, ограниченный характер. Это связано с тем, что они выполнялись без учета особенностей нагрузки, по заданным значениям скольжения. Полное и точное решение должно содержать, кроме электромагнитных соотношений, и электромеханические.

2.3.3 Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в системе частотно – регулируемого электропривода центробежных насосов.

Исходными данными при исследовании и оптимизации режимов работы асинхронного двигателя в системе регулируемого электропривода насоса нефтеперекачивающей станции является: механическая характеристика насоса $M = f(\omega, Q, H_C, H_0, H)$, полученная в первом разделе, геометрия сердечника, марка его стали и обмоточные данные. Искомыми, при решении задачи на ЭВМ, являются: оптимальное питающее напряжение, энергетические характеристики при оптимальных режимах работы (в режимах работы при минимуме потерь), т.е. оптимальные, определенные с высокой точностью, законы частотного управления асинхронным двигателем. Поскольку метод решения задачи численный интерационный, все искомые величины на каждом этапе расчета считаем известными из прогноза, либо из результатов расчета предыдущего итерационного цикла. Математическая модель режимов работы асинхронного двигателя представляет собой нелинейную систему уравнений ЭДС, моментов и МДС, однозначно описывающих эти режимы работы.

Уравнение напряжений двигателя

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_{б1} + \dot{I}_1 z_1 = -\dot{E}_1 + (I_{1q} - jI_{1d}) \cdot (r_1 + jx_1). \qquad (2.58)$$

Обозначая

$$K_u = \frac{E_{\delta 1}}{\mathrm{B}_\delta} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_1 W_1 \mathrm{K}_{01} \frac{Dl}{p}; \tag{2.59}$$

$$K_I = \frac{I_1}{F_1} = \frac{\pi p}{\sqrt{2} W_1 \mathrm{K}_{01}}, \tag{2.60}$$

имеем

$$\dot{U}_1 = U_{1q} + jU_{1d} = K_u \mathrm{B}_{\delta d} + K_I F_{1d} x_1 + K_I F_{1q} r_1 + j\left(K_U B_{\delta q} - K_I F_{1d} r_1 + \mathrm{K}_{1q} \cdot x_1\right).$$

Если за продольную ось d принять ось основной гармонической магнитной индукции ($B_{\delta d(\nu=p)}$), то

$$B_{\delta d(\nu=p)} = B_{\delta(\nu=p)};$$

$$F_{1d(\nu=p)} = F_{ц(\nu=p)} - F_{2d(\nu=p)};$$

$$F_{1q(\nu=p)} = -F_{2q(\nu=p)},$$

и уравнение напряжений приобретает следующий вид:

$$U_1 - \sqrt{U_{1q}^2 + U_{1d}^2} = 0; \tag{2.61}$$

$$U_{1q} = K_u \mathrm{B}_{\delta(\nu=p)} + K_I \left[\left(F_{ц(\nu=p)} - F_{2d(\nu=p)}\right) x_1 - K_I F_{2q(\nu=p)} \cdot r_1\right];$$

$$U_{1d} = K_I \left[\left(F_{ц(\nu=p)} - F_{2d(\nu=p)}\right) r_1 - F_{2d(\nu=p)} x_1\right]. \tag{2.62}$$

Уравнение равновесия моментов для установившегося режима работы, в соответствии с уравнением движения электропривода,

$$M(\omega, H, Q, H_C, H_0) - M_i(B_{\delta q}, B_{\delta q}, F_{2d}, F_{2q}) = 0, \tag{2.63}$$

где M – значение момента сопротивления насоса по его механической характеристике;

M_i – значение момента i – ом итерационном цикле расчета.

Значение момента ЦН получено нами в первом подразделе главы (2.18) с учетом основных параметров насоса и трубопровода, что позволяет проводить расчеты для конкретных насосных агрегатов во всех режимах их работы.

Высшие гармонические индукции, обусловленные насыщением магнитной цепи, имеют порядок

$$\nu = 3,5,7\ldots$$

Уравнения равновесия МДС для ν- ой гармонической имеют следующий вид:

$$F_{\nu d}\,(B_{\delta d\,(\nu=p)},\ldots,B_{\delta d(\nu=pk)},\ldots,B_{\delta q(\nu=p)},\ldots,B_{\delta q(\nu=kp)},\ldots) - F_{2\nu d}\,(B_{s\nu d},B_{\delta\nu q}) = 0$$

$$F_{\nu q}(B_{\delta d(\nu=p)},\ldots,B_{\delta d(\nu=pk)},\ldots,B_{\delta q(\nu=p)},\ldots,B_{\delta q(\nu=kp)},\ldots) - F_{2\nu q}(B_{\delta\nu d},B_{\delta\nu q}) -$$

$$F_{i\nu q}(B_{\delta\nu d},B_{\delta\nu q})=0 \qquad (2.64)$$

Таким образом, система нелинейных уравнений (2.61), (2.63), (2.64) со всеми входящими в них функциональными зависимостями в неявном виде однозначно описывает режимы работы асинхронного двигателя, т.е. является их математической моделью. Все входящие в эти функциональные зависимости величины, все энергетические параметры являются производными исходных данных для модели и ее неизвестных. Решение задачи сводится к определению амплитуд гармонических *МДС* на магнитную цепь и ее участки и решения систем нелинейных уравнений МДС, ЭДС и момента АД.

Если уравнениям системы и ее неизвестным – X присвоить порядковый индекс i, изменяющийся от I до N_c, то система уравнений может быть представлена в общем свернутом виде

$$\begin{cases} \varphi_1 \quad (X_1,\ldots\ldots,X_i,\ldots\ldots,X_{Nc})=0 \\ \quad\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \varphi_i \ (X_1,\ldots\ldots,X_i,\ldots\ldots,X_{Nc})=0 \\ \varphi_{Nc}\,(X_1,\ldots\ldots,X_i,\ldots\ldots,X_{Nc})=0 \quad . \end{cases} \qquad (2.65)$$

Рассматривая систему уравнений как вектор – функцию, можно записать

$$\varphi(\overline{X}) = 0, \qquad (2.66)$$

где $\overline{X}$ – вектор корней системы (2.70).

Полученная система уравнений принципиально может быть решена любым численным итерационным методом решения нелинейной системы уравнений. Однако, одним из наиболее общих методов, хорошо зарекомендовавших себя при численных исследованиях как асинхронных машин, так и широкого класса специальных машин, является метод Ньютона.

Весь диапазон исследуемых режимов работы разобьем на K этапов. Исследование рекомендуется начинать с базового режима, для которого в качестве прогноза амплитуда основной гармонической магнитного поля принимается равной $B_{б(\nu=p)} = 0{,}95U_1/K_u$; амплитуду высших гармонических принимаются равными нулю; за прогноз скольжения принимаем скольжение базового режима.

Для любого последующего режима за прогноз можно принимать данные решения предыдущего режима. Решение системы, согласно методу Ньютона, сводится к следующему.

Если на этапе прогноза или j-го этапа решения системы вектор ее корней

$$\bar{X}_j = (X_{1j},....., X_{Nj}),$$

то точное решение системы

$$\bar{X} = \bar{X}_j - \bar{\varepsilon}_j,$$

где $\overline{\varepsilon_j}$ - вектор погрешностей на j-ом этапе.

Вектор погрешности на j-ом этапе определяется

$$\bar{\varepsilon}_j = -W^{-1}\left(\bar{X}_j\right)\cdot\bar{\varphi}\left(\bar{X}_j\right), \qquad (2.67)$$

где $\bar{\varphi}(X_j)$- вектор – функция на j – ом этапе;

W^{-1}- обращенная матрица Якоби, определяемая численным методом.

На каждом этапе итерационных приближений

$$\bar{X}_{(j-1)} = \bar{X}_j - \bar{\varepsilon}_j. \qquad (2.68)$$

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока погрешность решения не окажется меньше заданной.

После решения системы (2.65), по полученным в последнем итерационном цикле амплитудам гармонических магнитной индукции, МДС на магнитную цепь и отдельные участки, МДС обмоток статора и ротора АД, рассчитываются рабочие характеристики и функциональные зависимости.

Блок схема функционирования математической модели асинхронного двигателя, работающего в системе регулируемого частотного электропривода насоса, приведена на рисунке 2.7. На схеме приводится назначение отдельных блоков, их взаимодействие между собой согласно изложенным теоретическим положениям.

2.4 Результаты численных исследований

Как уже отмечалось, аналитический метод исследования оптимизации частотного регулирования асинхронного двигателя насоса является хорошим инструментом для качественной оценки физических явлений, основных соотношений, закономерностей.

Количественная оценка основных соотношений может быть выполнена на базе достаточно точной математической модели. Такой моделью является разработанная и приведенная выше математическая модель, которая имеет блок автоматического поиска оптимального, по минимуму потерь, напряжения.

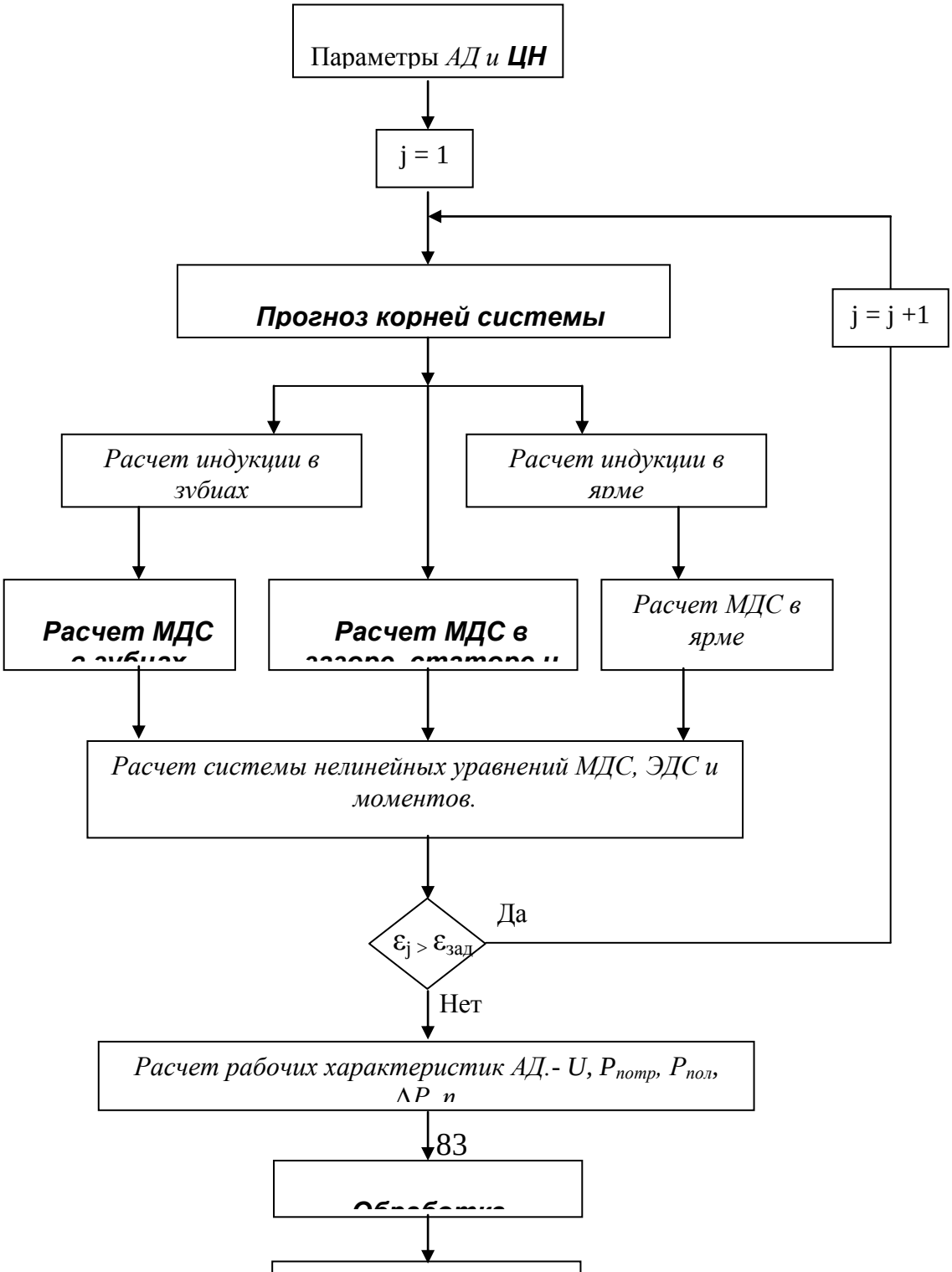


Рисунок 2.7 - Блок – схема математической модели АД

Математическая модель учитывает всю совокупность электрических параметров, конструкционных параметров сердечника и, главное, весьма точно учитывает нелинейность магнитной цепи. При решении задачи магнитная цепь подразделяется на сотни элементов со взаимосвязанным учетом магнитного состояния каждого элемента, с учетом их нелинейного характера, чем и обеспечивается высокая точность результатов исследований, проводимых с использованием разработанной модели системы асинхронный двигатель - насос.

Численные исследования оптимизации частотного регулирования проводились на примере асинхронного двигателя серии *4А – 4АН355М2*. Мощность двигателя P_2=400 кВт, синхронная частота вращения n_C=3000 об/мин, номинальное фазное напряжение $U_{ФН}$=380 В. Остальные технические, конструкционные, обмоточные данные приведены в справочнике [3].

При поиске оптимального закона частотного управления полагали, что номинальная мощность насоса равна номинальной мощности двигателя, диапазон изменения частоты вращения двигателя (насоса) находится в пределах $(0{,}3 – 1{,}2)\omega_H$.

Исследования проводились для четырех моделей двигателей с использованием трех различных электротехнических изотропных холоднокатаных сталей с удельными потерями соответственно 1,2,4 Вт/кг и одного двигателя, сердечник которого набран из листов горячекатаной стали, имеющей худшие, чем холоднокатанная, магнитные характеристики. При численных исследованиях полагали, что частота вращения и момент связаны зависимостью (2.13).

Поскольку разработанная модель асинхронного двигателя учитывает всю совокупность параметров, нелинейность магнитопровода, численные исследования позволили непосредственно оптимизировать напряжение питания обмотки статора, исходя из минимума потерь, для всего диапазона регулирования частоты его вращения.

Результаты оптимизации напряжения питания обмотки статора (двигателя) для указанных выше вариантов численных исследований приведены на рисунке 2.8.

На рисунке 2.9 представлены рабочие характеристики АД – момент, полезная и потребляемая мощность, мощность потерь. При использовании предложенного оптимального, по минимуму, потерь, закона частотного управления значение КПД во всем диапазоне регулирования подачи ЦН остается высоким и равным номинальному.

Модификация математической модели и ее использование в системах частотного управления асинхронных двигателей насосов (в рамках исследовательских работ и построения систем управления).

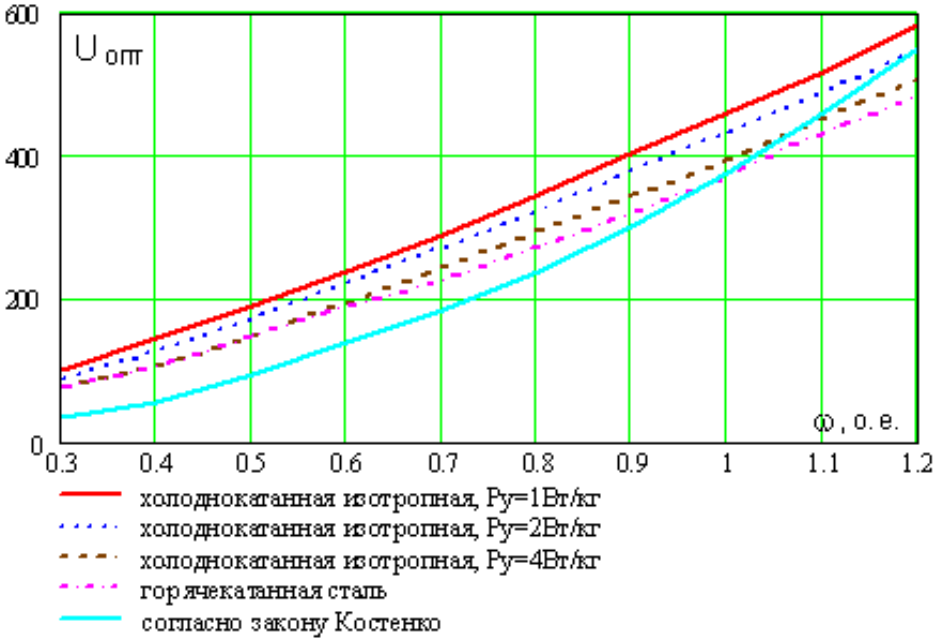


Рисунок 2.8 - Оптимальные напряжения статора АД в режиме частотного регулирования

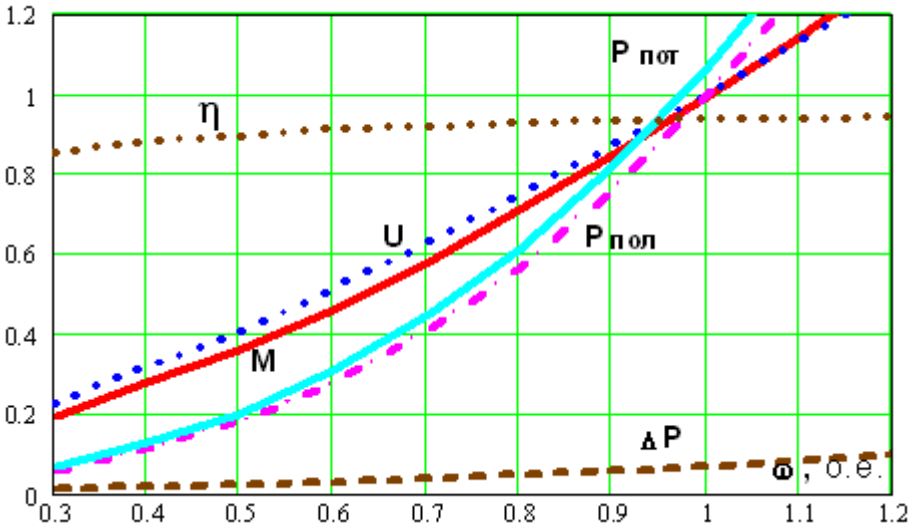


Рисунок 2.9 – Рабочие характеристики АД в диапазоне регулирования ЦН при оптимальном частотном регулировании

В представленной математической модели ставится и решается задача определения по трем интегральным параметрам: U, f, M - всех остальных электромеханических параметров конкретного двигателя ($P, I, \cos\varphi, n, S$, составляющие потерь и т.д.).

Соответствующее функционирование математической модели мы впредь будем называть прямым (нормальным). В такой постановке

математическая модель широко используется нами и при исследованиях оптимальных законов частотного управления, и в рамках поисковых исследований энергосберегающего асинхронного двигателя насоса (глава 3). Однако возможна и другая постановка задачи: определения по трем интегральным параметрам: U, f, P_1-всех остальных, в том числе M, n. Этот режим работы математической модели будем называть инверсным. Для уравнений математической модели (в соответствии с логикой функционирования модели – прямое, инверсное) необходимо вместо уравнения моментов (2.63) ввести уравнение подведенной мощности:

$$P_1 - P_{1i}(B_{бd}, B_{бq}, F^1_{2d}, F^1_{2q}) = 0. \qquad (2.69)$$

Такая унифицированная математическая модель может быть непосредственно использована в системе автоматического частотного электромеханотронного управления электроприводом насоса нефтеперекачивающей станции.

В такой системе управления инверсный режим функционирования математической модели реализует информационное обеспечение системы управления о величине момента и частот вращения ротора по данным U, f, P_1- (при этом отпадает необходимость в получении такой информации непосредственно с вала двигателя посредством соответствующих устройств).

Прямой (нормальный) режим функционирования математической модели обеспечивает поиск оптимального закона управления (оптимального $U_{1ОП}$) для вычисленных, в координатах текущего времени, значений M, f_1, с коррекцией напряжения U_1 (приведения его к оптимальному) системой автоматического управления асинхронного двигателя.

Такая электромеханотронная система включает в себя электромеханический преобразователь - асинхронный двигатель, преобразователь частоты и микропроцессорную систему управления, головным элементом которой является компьютер.

Такая система управления может работать при полном отсутствии непосредственной информации с вала асинхронного двигателя (насоса) о величине момента и частоте вращения ротора (насоса). А это очень важно, для тех случаев, когда система насос – трубопровод работает в режиме изменяющихся параметров: статического напора H_C, вязкости и др.

Исходной информацией для функционирования математической модели являются внешние параметры асинхронного двигателя: напряжение, потребляемая мощность, частота. Математическая модель выдает данные обо всех (необходимых для системы управления) интегральных характеристиках асинхронного двигателя - в том числе и моменте, и частоте вращения ротора, оптимизирует их с выдачей соответствующей информации на систему управления.

Таким образом, система управления работает в состоянии постоянного поддержания оптимального режима работы системы: «трубопровод - насос - частотно управляемый электропривод», при любых, в том числе наперед неизвестных изменений параметров системы «насос – трубопровод», можно сделать следующие выводы:

1) На основе анализа известных законов частотного регулирования показано, что они не удовлетворяют полностью задачам минимизации энергопотребления электроприводов центробежных агрегатов. В них не учтены особенности центробежной нагрузки, реальное распределение магнитной индукции в асинхронной машине.

2) Выполнены аналитические исследования, позволившие установить основные закономерности для частотно-управляемого электропривода центробежного насоса. Разработана методика, повышающая точность расчета оптимального закона изменения магнитного потока регулируемого по частоте АД, учитывающая параметры ЦН, трубопровода и двигателя, которая может служить основой для проектирования энергосберегающих систем электропривода агрегатов центробежного действия.

3) На базе гармонического метода разработана математическая модель системы «частотно-управляемый асинхронный двигатель – центробежный насос» с учетом технологических параметров ЦН, геометрических параметров сердечника машины, реальной картины распределения магнитной индукции. Модель учитывает всю совокупность электрических параметров, конструкционных параметров сердечника и, главное, весьма точно учитывает нелинейность магнитной цепи.

4) На полученной модели выполнены численные исследования, в результате которых выявлены основные закономерности и пути снижения потерь в двигателе. Рассчитаны законы оптимального, по минимуму, потерь в двигателе, частотного управления приводом ЦН для различных вариантов исполнения сердечника АД. Полученные при этом рабочие характеристики АД подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов управления и высокий уровень энергетических показателей.

5) Разработанная математическая модель может быть непосредственно использована, как элемент системы автоматического управления электроприводом по схеме «ПЧ – АД» центробежных агрегатов, оптимизированной по энергопотреблению.

2.5 Выводы и результаты по разделу

1) В качестве инструмента анализа электромагнитных процессов в приводе определен векторно – гармонический метод, позволяющий исследовать работу элементов привода во всех режимах работы центробежного агрегата.

Определен единый математический аппарат для описания и анализа двух различных систем электропривода переменного тока - «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» и машины двойного питания. Получены основные соотношения для создания математических моделей этих двух систем.

2) Для полного и адекватного описания процессов электромеханического преобразования энергии в исследуемом электроприводе известные уравнения моментов электрических машин решаются совместно с уточненным выражением механической характеристики центробежных насосов, полученным в первом разделе данной работы и учитывающем конструктивные и технологические параметры ЦН и трубопровода. Использование предложенной методики, позволило получить точное уравнение движения асинхронного электропривода центробежного насоса.

3) Выполненные аналитические исследования позволили установить основные закономерности для частотно-управляемого электропривода центробежного насоса. Оценка точных количественных соотношений выполнена на базе разработанных моделей оптимального, по минимуму, потерь, управления АД, учитывающей нелинейность системы, конкретную геометрию сердечника машины и другие факторы.

Таким образом, полученная методика позволяет повысить точность расчета оптимального закона изменения магнитного потока регулируемого по частоте АД, учесть параметры ЦН, трубопровода и двигателя и может служить основой для проектирования энергосберегающих систем электропривода агрегатов центробежного действия.

4) Выполнены аналитические исследования с целью определения энергосберегающих возможностей электропривода центробежных насосов по схеме машины двойного питания. Показано, что, при центробежной нагрузке по сравнению с частотно – управляемым асинхронным приводом, машина двойного питания имеет еще один, очень важный резерв – регулирование реактивной мощности.

5) Проведен анализ известных законов оптимального управления МДП и предложен новый вариант регулирования реактивной мощности – по номинальному току ротора. Согласно последнему, в значительном диапазоне регулирования ЦН, АД работает с опережающим коэффициентом мощности, то есть в режиме компенсатора реактивной мощности. Составлен алгоритм управления и программы расчета энергетических характеристик для нового способа оптимального управления.

6) Разработана математическая модель электропривода центробежных насосов по схеме машины двойного питания, позволяющая исследовать процессы и характеристики как основных силовых элементов привода – асинхронного двигателя и преобразователя частоты, так и в целом МДП –

привода во всех режимах работы ЦН и при различных способах оптимизации энергопотребления.

Результаты расчетов послужили основой для сопоставительного анализа известных и вновь разработанного способов оптимального, с позиций энергосбережения, управления. Показано, увеличение коэффициента сдвига (коэффициента мощности по первым гармоникам) привода сопровождается некоторым увеличением потерь мощности в обмотках двигателя.

Для однозначной оценки энергетики разрабатываемых приводов предложено использовать комплексный показатель – приведенный коэффициент полезного действия, учитывающий как потери активной мощности, так и уровень потребляемой (или генерируемой) реактивной мощности. Результаты расчета приведенного значения КПД, проведенного для различных законов управления МДП – привода ЦН, показали значительное преимущество регулирования по номинальному значению тока ротора.

7) На полученной модели выполнены численные исследования, позволившие не только сравнить эффективность различных критериев оптимизации, но и определить влияние на энергетику двигателя, преобразователя и привода в целом таких параметров, как коэффициент трансформации трансформатора, противодавление в трубопроводе, что позволяет определить основные закономерности и пути снижения потерь в электроприводе ЦН.

8) Для оценки энергопотребления в переходных режимах работы центробежных агрегатов разработана модель динамических процессов асинхронного электропривода. Созданная на базе компьютерного математического приложения «Mathcad» модель является универсальной, поскольку охватывает все варианты управления АД. Путем задания необходимых начальных условий, моделируются все виды переходных процессов (пуск, останов, реверс, сброс и наброс нагрузки), различные формы задающих воздействий для их формирования.

Расчет мгновенных значений токов, моментов, мощностей сопровождается расчетом интегральных характеристик – мощностей за время переходного процесса, коэффициентов мощности и КПД. Модель учитывает основные технические характеристики ЦН и трубопровода.

Обозначения и сокращения

АД – асинхронный двигатель
АИ – автономный инвертор
АЭП – автоматизированный электропривод
КПД – коэффициент полезного действия
МДП – машина двойного питания
M_c – момент статической нагрузки
НПЧ – непосредственный преобразователь частоты (циклоконвертор)
ТРН – тиристорный регулятор напряжения
ПК – персональный компьютер
ПЧ – преобразователь частоты
P_c – мощность статической нагрузки
ΔP – потери мощности
УВ – управляемый выпрямитель
ЦН – центробежный насос
ШИМ – широтно-импульсная модуляция
ЭВМ – электронная вычислительная машина
ЭДС – электродвижущая сила
B – магнитная индукция
E – электродвижущая сила
КПа – килопаскаль
МВт – мегаватт
МПа – мегапаскаль
H – напор
H_c – напор статический
D – диапазон регулирования
Ф – магнитный поток
$I_{1(2)}$ – ток статора (ротора)
f - частота, Герц
$k_и$ – коэффициент искажения токов
$k_м$ – коэффициент мощности
k_c – коэффициент сдвига (коэффициент мощности по первым гармоническим токов и напряжений)
n – частота вращения, обороты в минуту
η – коэффициент полезного действия
$\eta_{цн}$ - коэффициент полезного действия *ЦН*
$\eta_{цн\ ном}$ - коэффициент полезного действия *ЦН* номинальное
s – скольжение двигателя
U – напряжение
Q – производительность насоса
σ – коэффициент рассеяния
ω - частота вращения, рад/сек
$cos\ \varphi$ – коэффициент мощности по первым гармоникам

Список литературы

1 Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод:энерго- и ресурсосбережение. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. - 208 с.

2 Мустафин М.А., Мустафин Е.М. Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосных агрегатов. - Алматы, 2009. - 248 с.

3 Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках. - М.: Энергоатомиздат, 1991.

4 Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. - М.: Высш. Шк., 1987. -248 с.

5 Сембин Д.Е., Новокшенов В.С. Оптимизация режимов работы асинхронного частотно-регулируемого привода насоса по минимуму потерь двигателя. Сб. научных трудов по материалам второй международной научно-технической конференции.- Алматы: АИЭС, 2001.

6 Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2000.- 496 с.

7 Очков В.Ф. MathCAD 14 для студентов, инженеров и конструкторов. - СПб.: БХВ Петербург. 2007. - 368 с.

Марат Аскарович Мустафин
Нургуль Канаевна Алмуратова
Сайын Сейдинкожаевич Табултаев

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Учебное пособие

Редактор Л.Т. Сластихина

Подписано в печать _____2016г.
Тираж 15 экз. Формат 60х84 1/16

Бумага типографская №2
Уч.-изд. л. 6. Заказ №____.
Цена 2815 тенге.

Некоммерческое АО «АУЭС»
Г.Алматы, ул. Байтурсынова, 126

Копировально-множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
Г.Алматы, ул. Байтурсынова, 126

92