

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование кафедры)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Общая теория электромеханического преобразования энергии

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Частотный электропривод насоса К 150-125-315

для водогрейного котла»

Студент

Д.Д. Ежов

_____ (И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Научный

В.В. Ермаков

_____ (И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

руководитель

Руководитель программы к.т.н., профессор В.В. Ермаков _____

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

« ____ » _____ 2018 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина _____

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

« ____ » _____ 2018 г.

Тольятти 2018

АННОТАЦИЯ

В данной магистерской диссертации была проведена модернизация асинхронного электропривода питательного насоса K150-125-315 водогрейного котла на базе частотного преобразователя MIKROMASTERvektor и асинхронного двигателя 4A200L4У3.

Произведен расчет силовой схемы электропривода и механических характеристик при использовании квадратичного закона частотного регулирования. Вычислены скорости и моменты стабильной работы системы электродвигатель – питательный насос для частот 50 Гц, 42,5 Гц. и 35 Гц. заданной производительности и напора.

Разработано математическое описание электромеханических процессов и произведен расчет переходных процессов при прямом и частотном пусках электропривода методом моделирования в программе Matlab-simulink..

В технологической части работы разработаны вопросы изготовления ротора асинхронного двигателя. Рассмотрены вопросы безопасности и экологии при проведении безопасных наладочных работ по настройке и обслуживании асинхронного двигателя с частотным регулированием. Дано экономическое обоснование проведенной модернизации.

Работа выполнена на 96 листах, содержит 10 рисунков, 5 таблиц.

Оглавление

Введение	5
1 Состояние перспективы электроприводов с частотным регулированием	10
1.2 Частотные преобразователи для насосов систем водоснабжения	13
1.3 Общие сведения	16
1.5 Характеристика системы пикового теплоснабжения	9
1.6 Расчет мощности двигателя насоса	13
1.7 Расчет элементов преобразователя частоты	18
1.7.1 Расчет и выбор ключей инвертора	18
1.7.2 Расчет и выбор вентилях диодного моста	21
1.7.3 Расчет фильтра	25
2 Расчет механических характеристик при скалярном управлении	28
2.1 Общий подход расчета механических характеристик асинхронного двигателя при частотном скалярном управлении	30
2.2 Математическое моделирование системы электропривода	38
2.3 Динамические характеристики системы	43
3 Технология изготовления ротора асинхронного двигателя и техника безопасности при эксплуатации электроприводов	46
3.1 Способы изготовления короткозамкнутых роторов асинхронного двигателя	46
3.2 Безопасность и экологичность электродвигателя с преобразователем частоты	49
3.3 Экономическое обоснование модернизации электропривода питательного насоса	55
Заключение	73
Список используемых источников	94

Введение

На сегодняшний день в России, приоритетным направлением является повышение энергоэффективности технической сферы. Наибольшее потребление электроэнергии в промышленности ложится на электроприводы (около 70%), поэтому более актуально будет рассмотреть задачу энергосбережения при работе именно этих устройств на электростанциях. Сегодня мы имеем серьезные успехи и прогресс в технической сфере, а именно в силовой электронике и энергетике. В промышленности налажено стабильное крупное производство силовых IGBT-модулей и транзисторов. Современная наука добилась значительного прогресса в различных информационных и вычислительных сферах. Так же замечен прогресс в развитии машин переменного тока и микропроцессорных систем управления. Все эти скачки в развитии электротехники создают благоприятные условия для развития и применения различных систем частотного управления, в частности систем в которые используется векторное и скалярное управление. У электроприводов на базе устройств для частотного регулирования их работы отсутствуют ограничения по максимальной скорости вращения и предельной мощности. При правильном применении электроприводов на базе преобразователей частоты задача энергоэффективности промышленности становится вполне решаемой, путем снижения электропотребления электроприводов.[6]

Существенное снижение потери электроэнергии в обмотках электродвигателя в первую очередь обуславливается тем, что при питании через преобразователь частоты обеспечивается синусоидальное трехфазное напряжение хорошего качества. Это стало возможным благодаря применению нового принципа, который является основой работы современных преобразователей частоты (ПЧ). Принцип основывается в основном на модуляции широтно-импульсного типа. Если сравнивать асинхронный двигатель с другими типами двигателей, можно выделить для него ряд преимуществ, таких как: низкая инерция от ротора, повышенная надежность, конструкция достаточно простая, прост в обслуживании.

живании и монтаже, и что самое важное очень высокий показатель надежности работы. Благодаря этим качествам, в сочетании с качествами современного преобразователя частоты с высокими показателями регулирования, такой электропривод становится все более и более распространенным во всех технических сферах и в промышленности.

Существует ряд сфер и областей, в которые будет более логично и целесообразно внедрить такой электропривод. В первую очередь это сферы где задачи и вопросы регулирования частоты вращения различных устройств и механизмов стоят особо остро. Самыми эффективными и целесообразными сферами для внедрения частотного электропривода являются: насосные, питательные станции водоснабжения, с асинхронными двигателями, теплоснабжение. Так же актуальным, вопрос частотного регулирования стоит в сферах, использующих вентиляторы, компрессоры, нагнетателей и различных воздушных устройств.[11]

В сферах и областях, описанных выше по различным статистическим данным около 30% общей потребляемой электроэнергии из сети, приходится на электроприводы насосов и вентиляторов. Использование электропривода с частотным регулированием скорости открывает новые возможности в энергосбережении. Помимо экономии электроэнергии, использование ПЧ приводит к сбережению тепловой энергии и крупному снижению расходов воды, так как исключаются утечки в магистрали, которые до этого были обусловлены серьезным повышением давления в трубопроводе. Если сравнить привод, регулируемый преобразователем частоты, и привод с дроссельным регулированием, можно отметить что при частотном регулировании сильно снижается количество аварийных ситуаций при работе. В основном снижается вероятность гидравлического удара в системе трубопровода, которые часто возникают при пуске и различных изменениях режимов работы и настройки насоса. Проведя анализ полного списка характеристик асинхронного двигателя при регулировании от преобразователя частоты, можно уверенно сказать, что такой электропривод

сегодня самый эффективный и энергосберегающий. Поэтому стоит отдать предпочтение в использовании именно ему.[3]

Актуальность:

Современный электропривод осуществляет вращение и движение самых разных механизмов и устройств, приводит их в работу и в целом именно он представляет собой основную перспективу развития в большинстве технических сфер и отраслей. Так же большая часть бытовой деятельности людей зависит от эффективности работы электропривода. В начале 21 века появилась серьезная проблема энергосбережения в промышленных сферах и энергетики в целом. Проанализировав ситуацию, стало ясным что необходимо появление на рынке нового электропривода, регулирование которого происходило бы частотным способом. Стоит отметить что до этого очень широко применялись нерегулируемые электроприводы. Различный опыт, который передаю страны нашей планеты подтверждает, что внедрение регулируемого электропривода дает возможность резко повысить эффективность в различных системах, таких как например: водо и теплоснабжения, системы отопления и вентиляции зданий. Согласно различным общим статистическим данным, внедрение регулируемого электропривода в системы водоснабжения приводит к 50и процентной экономии электроэнергии. Показатели экономии тепла и воды варьируются около 20%. Такая модернизация в целом приводит к уменьшению количества гидравлических ударов магистрали водоснабжения, так же благодаря частотному регулированию становится возможным более просто и удобно вести учет и наблюдение за системой в целом. Средства на модернизацию регулируемого электропривода в системы тепло и водоснабжения как правило окупаются в срок не более года.[5]

В технической сфере из-за такой очевидной выгоде модернизации даже появилось выражение «энергосберегающий регулируемый электропривод». Благодаря переходу к более экономичному регулируемому электроприводу в системах тепло и водоснабжения, удалось получить колоссальное снижение

различных потерь, таких как потери воды и электроэнергии. В целом, отказ от низкоэффективных электроприводов, регулируемых заслонкой или дросселем, и переход на частотное регулирование скорости вращения, ведет к большому повышению энергоэффективности производства и промышленности в стране в целом. Давайте рассмотрим основные моменты и факторы, которые отвечают за оптимизацию показателей электропривода, а так же нюансы при его выборе по мощности. Коэффициент полезного действия асинхронного электропривода при работе с преобразователем частоты падает примерно на 3%, а мощность снижается до 4%. Существует ряд причин, приводящих к излишнему выделению тепла двигателем и снижению его КПД на величину до 8%. Главной причиной являются высокочастотные потери, которые объясняются не синусоидальностью напряжения. Как мы знаем из различных источников, кратковременные отключения частотного преобразователя от сети, из-за которых срабатывает электронная защита, негативно складываются на их работе. Как правило такие отключения, обусловленные различными факторами, перебоями в сети и авариями, вызывают крупные финансовые потери на предприятиях. В связи с этим, в зарубежной, и в том числе Российской практике все более серьезно стали просчитывать с экономической точки зрения, важность установки аккумуляторных и дублирующих устройств для бесперебойной работы. Так же из-за добавочных потерь в обмотках, которые объясняются высшими гармониками тока, нам становится необходимым применение устройств для изменения гармонического состава тока.[20,26]

Существуют различные современные устройства для повышения электромагнитной совместимости сети и преобразователя частоты. К примеру, на входе выпрямителя устанавливается фильтр, который изменяет состав питающего напряжения и состав тока из сети (гармонический). Так же он меняет коэффициент мощности системы. В настоящее время на различных технических предприятиях России в качестве электроприводов водогрейных котлов системы водоснабжения используется нерегулируемый электропривод. При этом регу-

лирование подачи воды осуществляется дроссельным способом, что приводит к большим затратам электрической энергии. Появление электроприводов с частотным управлением дает возможность осуществлять подачу воды регулируя скорость вращения вала насоса. Это дает возможность экономить электрическую энергию в 3 раза. Так же стоит заметить, что из-за регулирования подачи воды в магистраль дроссельным способом увеличивается количество аварий на магистрали, так как при закрывании заслонки в магистрали резко увеличивается давление, из-за которого со временем она начинается трескаться и лопаться. Появление частотного преобразователя в асинхронном электроприводе дает возможность экономить не только на электроэнергии, но также, экономит воду, теряемую при прорыве магистрали, и что не мало важно людские ресурсы, часто отправляемые на ремонт аварийной магистрали.[4]

Задачи:

Необходимо осуществить модернизацию асинхронного электропривода питательного насоса K150-125-315, работающего с преобразователем частоты MIKROMASTER vector и асинхронного двигателя 4A200L4У3.

Провести полный расчет силовой схемы электропривода, так же вычислить рассчитать полный спектр механических характеристик, при условии использования в расчетах квадратичного закона частотного регулирования. Определить моменты и скорости для обеспечения стабильной работы электропривода асинхронный двигатель – питательный насос для частот 50 Гц, 42,5 Гц, и 35 Гц.

Спроектировать математическое описание электромеханических процессов и рассчитать переходные процессы во время прямого и частотного пуска электропривода, путем проектирования в программе Matlab-simulink.[22].

Рассмотреть различные нюансы при изготовлении ротора асинхронного двигателя, а также рассмотреть положения о технической безопасности и экологии, во время проведения пусковых работ. Так же рассмотреть процесс настройки и обслуживания асинхронного двигателя с частотным регулированием.

ем. Рассчитать и составить экономическое обоснование, для модернизации электропривода.

Новизна:

Предложен новый алгоритм управления системой водоснабжения в разветвленных магистральных трубопроводах, отличающийся от известных ранее тем то что, контроль давления осуществляется при помощи частотного преобразователя, вместо дроссельной заслонки

Практическая значимость работы:

Разработанная система частотного управления асинхронным двигателем, обеспечивающая заданные механические характеристики и энергетические показатели, при работе электропривода с насосом водогрейного котла, решает проблему утечек в магистральных водоснабжения и снижает энергозатраты на питание оборудования.

На защиту выносятся:

- расчет силовой схемы электропривода и механических характеристик;
- математическое описание электромеханических процессов;
- экономическое обоснование проведенной модернизации;
- переходных процессов при прямом и частотном пусках электропривода.

1. Состояние перспективы развития электроприводов с частотным регулированием

Сегодня мы можем наблюдать как различные мировые лидеры по производству преобразователей частоты объединяют свои технические знания. Например, компания Schneider Electric которая уже более 25 лет занимается выпуском и производством различных видов преобразователей частоты, и имеет серьезный опыт и потенциал в этом деле, заключила договор с компанией Toshiba. Таким образом, слияние этих двух технических гигантов привело к тому, что они стали лидерами на рынке ПЧ. В 2006 году на техническом рынке появился первый результат работы объединения этих двух компаний, им стал современный аппарат, Altivar 71, являющийся преобразователем современного поколения, сочетающий в своей системе отличные характеристики и большой набор важных для работы функций. А самое главное, что данный тип преобразователя имеет простую конструкцию, и легок в обслуживании и монтаже. [8]

Объединенными усилиями компаний была разработана принципиально новая концепция устройств по преобразованию частот, которая называется «Простой (или доступный) интеллект», новые преобразователи явились как раз первыми современными представителями этой концепции товара. Главная особенность концепции в том, что устройства должны быть просты в эксплуатации, но при этом выполнять ряд сложных задач и функций, для того чтобы обеспечить эффективную работу отдельных элементов и промышленного процесса в целом. Такие преобразователи частоты способны управлять асинхронными двигателями различных мощностей, спектр очень широкий (от 0.36 до 500кВт), так же, они обеспечивают работу при перегрузке по моменту до 210%. Данный тип преобразователя является совершенно новым, принципиально отличающимся от своих предшественников, создавая новые возможности для использования на практике. Комплектующие такого преобразователя частоты состоят из фильтров типа В, для того чтобы обеспечить хорошую электромагнит-

ную совместимость с источником, и различные фильтры для того что подавлять излишние гармоники тока в сети. Так же можно выделить третий не маловажный элемент системы частотного преобразователя, это рекуперативный блок, который позволяет возвращать часть различной энергии обратно в питающую сеть. Данный тип преобразователя совсем не боится влияния промышленных помех, обеспечивается это с помощью фильтров ЭМС, которые встроены в общую систему преобразователя.[9] Как мы уже отмечали, преобразователь Altivar 71 помимо своей простоты в техническом применении, способен так же обеспечить высокие эксплуатационные характеристики. На лицевой части панели преобразователя размещается экран, который при желании можно русифицировать. Для Российских предприятий данная функция очень важна, так как она упрощает и делает более эффективной коммуникацию работника, обслуживающего технику и самого преобразователя. Происходит это благодаря различным информационным сообщениям на графической панели преобразователя, которые могут предупреждать об ошибке или необходимости проведения каких либо действий для работы. Так же хорошая коммуникация становится возможной, благодаря расположенной на лицевой части преобразователя клавиатуры, которая облегчает быстрый просмотр параметров или каких-либо других сообщений или сведений. Преобразователь Altivar 71 возможно настроить под какие-либо конкретные параметры, подходящие индивидуально, это будут как настройки работы, так и виды отображений сообщений. Данный преобразователь является современным экономическим решением для многих проблем и решения задач, связанных с повышением энергоэффективности в промышленности. Данный преобразователь имеет возможность работать с синхронными электродвигателями, система которых разомкнута, так же он имеет много различных входов и выходов, которые совместимы с большинством устройств и механизмов на производстве. Благодаря интеграции дополнительных микроэлектронных карт в систему преобразователя, удалось существенно расширить его функционал и возможности.[13]

Давайте рассмотрим, какие преимущества и возможности может дать система электропривода асинхронного двигателя в работе с преобразователем частоты в устройствах и механизмах подъема и транспортировки, таких как например, грузоподъемный кран. Для того чтобы выбрать для него систему регулирования, нужно для начала учесть все особенности конструкции и специфику работы. Самым главным нюансом работы таких устройств является необходимость обеспечения качественного режима торможения для всех диапазонов скоростей, а так же нагрузок и моментов самого механизма подъема. Не маловажными являются возможности работы устройств, при различных нестандартных температурах, которые очень актуальны в регионах России и соседних стран. Необходимо обеспечивать стабильную перегрузочную способность и плавный пуск, и торможение, что требует применения различных резисторов торможения и устройств, рекуперировующих сигналы и механические нагрузки. В среднем диапазон регулирования скорости в устройствах подъемных механизмов составляет около 18:1. Для того чтобы избежать серьезных поломок и аварий в системе, необходимо средство для анализа и диагностики, которая смогла бы предупреждать о поломках различных механических устройств, и предотвращать их различными способами. Разрабатывая и создавая преобразователь нового поколения Altivar 71, разработчики постарались учесть все пожелания и рекомендации от сотрудников по разработке и обслуживанию оборудования по транспортировке и подъему. Одним из пожеланий было создание качественных тормозных резисторов для механизмов транспортировки и поворотных механизмов, мощность таких резисторов позволяет обеспечивать в системе режим торможения, который по продолжительности превышает старые виды тормозных резисторов. Так же было учтено пожелание, чтобы преобразователь частоты мог работать в различных режимах регулирования. Теперь ПЧ может изменять в системе скорость вращения вала и момент, что делает его применение в поворотных механизмах максимально эффективным. Таким образом, современный преобразователь частоты способен полно-

стью удовлетворить потребности электропривода, работающего с краном, и другими поворотными и транспортирующими механизмами.[24]

Рассмотрим требования, которые необходимы для полноценной стабильной работы лифтового электропривода. Для лифтового электропривода важно наличие регулирования скорости во всех 4х квадрантах, регулировка и управление тормозной системой, необходимо чтобы торможение и пуск происходили плавно. Система должна не бояться провалов в напряжении от питающей сети и при необходимости, должна быть возможность для экстренной эвакуации людей. Так же важно наличие определенного датчика, который позволял бы точно устанавливать время и место остановки кабины. В современном электроприводе с частотным регулированием скорости объединены все эти требования. Система лифтовых электроприводов является разомкнутой по скорости и основывается на преобразователях частоты, которые включают в себя различные функции присущи лифтовым системам.[28]

Например, очень важно учитывать логическую цепочку по управления тормозной системой, время торможения, скорость торможения по силе и частота, это очень важные критерии для полноценной стабильной работы лифта. Еще одним не маловажным аспектом системы лифтового электропривода является возможность измерить вес лифтовой кабины, эта информация даст нам возможность дополнительно регулировать момент пуска и направление нагрузки, при различном уровне загрузки лифтовой кабины. Модернизация систем транспортировочных и подъемных механизмов, путем введения в эксплуатацию электроприводов с частотным регулированием на базе асинхронного двигателя дает возможность экономить очень большое количество электроэнергии на потреблении электропривода. Это было доказано путем различных исследований в системах лифтов и грузоподъемных механизмах. Помимо экономии, такой электропривод способен обеспечивать системе оптимальные механические характеристики, необходимый технологический режим работы и увеличить срок безаварийной работы. По данным исследований и статистики, в среднем по-

требление электроэнергии частотно-регулируемых электроприводов с рекуперацией в лифтовой системе составляет около двадцати процентов. Если в состав преобразователя частоты входит только простой редуктор, то объем потребляемой электроэнергии составит около пятидесяти процентов. А двигатель с двумя скоростями и редуктором потребляет аж все сто процентов. Из данных приведенных выше можно сделать очевидный вывод, что внедрение частотно-регулируемого электропривода в систему намного более оптимизировано и эффективно, если сравнивать с тем же асинхронным двигателем с двумя скоростями.[8]

Опыт различных стран подтверждает данные заключения и по исследованиям так же доказывает, что электропривод с регулированием частоты в системе лифтовых и подъемных механизмов является самым приоритетным на данный момент времени. Чтобы убедиться в реальной перспективности этого направления мы проанализируем рынок крупных производителей, зарубежных и Российских. Сегодня мы видим, как все крупные производители, такие как LG, SCHNEIDER и MITSUBISHI сосредоточились на производстве данного типа регулирующих устройств, что еще раз подтверждает их дальнейшую перспективность и развитие направления. «МК «Энергосбережение» совместно с ЗАО «Харьков лифт», приступают к поставкам на рынок стран СНГ комплектных электроприводов для пассажирских и грузопассажирских лифтов грузоподъемностью 0.4 – 1 т со скоростью движения кабины от 0,5 до 2 м/с, а также грузовых лифтов грузоподъемностью от 0.1 до 5 т со скоростью движения кабины 0,25 и 0,5 м/с.» [7, 33с].

Еще, одним из основных устройств которое в перспективе будет внедрено в многие промышленные и технологические процессы является устройство для обеспечения плавного пуска. К сожалению, информации о них не очень много, в отличии от тех же преобразователей частоты, но их разработка так же является очень перспективным направлением развития. Давайте определим и проанализируем какие же задачи выполняет устройство плавного пуска. В различных

системах функции таких устройств будут немного изменяться. Например, в сфере водоснабжения устройство плавного пуска помогает снизить количество гидравлических ударов во время пуска насоса, делая более плавным пуск и разгон питательного насоса, тем самым уменьшая количество аварийных ситуаций в системе и увеличивая время безаварийной работы. Такое устройство так же способно снизить нагрузку на сеть. Это очень важно в системах, где ток сети в несколько раз больше номинального тока системы, что способно вызвать серьезную просадку по напряжению, что негативно влияет на общую работу системы электропривода с управлением частоты от преобразователя.[1]

Устройство плавного пуска останавливает насос если в нем отсутствует вода, защищая его тем самым от поломки, ведь в это время нагрузка насоса сильно падает. Это основное свойство защиты плавного пускателя. Для нормальной работы устройства плавного пуска необходимо настроить минимальные допустимые значения нагрузки, тогда защита данного устройства исключит работу насоса при закрытой заслонке или сорванной муфте. Данное защитное устройство многофункционально и при качественной настройке может даже не отключаться при обесточивании фазы. Так же устройство предотвращает пуск двигателя при роторе, заклиненном в положении, защищает систему от очень высокого или наоборот низкого напряжения. Если неисправность все-таки произошла – на экране устройства защиты появится код ошибки, который сообщит о том какая конкретная проблема произошла. В памяти устройств плавного пуска может храниться около двадцати сообщений об ошибках с указанием кодов, для того чтобы можно было определить причины возникновения той или иной проблемы или сбоя. Устройства плавного пуска могут использоваться в системах различных механизмов, в которых важно держать оптимальные статические и динамические характеристики.[10]

Перейдем к анализу работы устройств плавного пуска в конвейерной системе. Внедрение устройства плавного пуска в систему конвейера обеспечивает снижение ударных нагрузок при пуске на все механизмы, а также, измерение веса груза для оценки необходимой нагрузки. При превышении разрешенного

веса замедляет движение конвейера. При обрыве конвейерной ленты защита автоматически отключит двигатель от питания из-за низкой нагрузки. Далее рассмотрим оборудование промышленных станков. Устройство плавного пуска в этой системе позволит с высокой скоростью остановить механизмы выполняющие инерционные движения. Так же это устройство постоянно проверяет насколько износился инструмент системы и контролирует момент нагрузки. «Достойную конкуренцию системе ПЧ-АД составляет вентильно-индукторный электропривод (ВИП), представленный в двух вариантах: с возбуждением со статора (силовая версия известного шагового электропривода); с независимым возбуждением, интенсивно развивающимся в последнее десятилетие» [7, 33с].

1.2 Частотные преобразователи для насосов систем водоснабжения

Впервые насосами начали пользоваться далеко в древности, примерно в 1 веке до нашей эры. Сегодня же мы видим эти устройства практически везде, во всех сферах жизни и промышленности в частности, без него даже самые простые процессы были бы для нас невозможны. В быту мы постоянно пользуемся насосами, когда моем руки, накачиваем колеса или пользуемся газом. Чтобы пользоваться такими простыми вещами, над процессом работы которых мы даже не задумываемся, необходимо насосное оборудование, в виде электропривода для накачки воды, или же небольшой воздушный насос для тех же колес. Даже электронная лампа в своем изготовлении требует присутствие насоса, чтобы выкачать воздух при отливе. Применение насосов позволяет решать многие задачи, такие как например подача воды или воздуха на расстояния, насосы бывают нефтяные, бензиновые и даже цементные, воздушные и водные. Масштаб применения насосов велик, от простых вентиляторов и водопровода, до сложных, таких как самолеты и атомные электростанции.[27]

К сожалению, как отдельный элемент в системе он работать не может. Для полноценной работы насоса необходимы и другие элементы, такие как двигатель, и устройство, которое сможет изменять и регулировать давление и разрежение насоса. Сегодня практически на всех производствах используется такой способ регулирования подачи как дроссельный, он очень распространен из-за своей простоты и небольшой цене. Принцип его работы очень прост, двигатель продолжает работать в своем рабочем режиме, не понижая нагрузки, для понижения давления подачи в систему вводят дроссельную заслонку, это может быть кран, задвижка или вентиль, тем самым поток уменьшается, но увеличивается давление в системе. Для того чтобы понять этот принцип можно привести пример с автомобилем, представьте, что при езде вы будите нажимать педаль тормоза вместе с педалью газа для того чтобы снизить скорость, выглядит немного странно. Как и тот факт, что после этой зимы, из-за плохой работы до-

рожников в моей любимой приоре пошла ржавчина на низах дверей и капот вообще ужас, буду в ближайшее время красить. Для того чтобы сделать наше производство более рациональным, нам необходимо использовать такие устройства как частотные преобразователи, которые способны управлять и самое главное регулировать уровень давления и разряжения в трубопроводе. Таким образом удастся уменьшить мощность двигателя, до нужного нам уровня, без увеличения давления в магистрали. Если проанализировать стоимость электроэнергии на рынке и посчитать сколько затрачивается ресурсов на работу среднего электропривода, то сразу становится очевидной выгода установки частотного преобразователя, ведь экономия в потреблении электроэнергии составляет около 30%! Приведу пример, в среднем двигатель мощностью 12 кВт расходует электроэнергии на сумму 90 тыс. рублей в год, с учетом работы по 8-9 часов в рабочий день. Покупка частотного преобразователя в таком случае окупит свою стоимость примерно за год, а в дальнейшем будет хорошо экономить средства на электроэнергии, и на ремонте, тем самым принося чистую прибыль в карман предприятию. [14]

Теперь давайте более подробно рассмотрим методы регулирования давления, которые мы описывали выше.

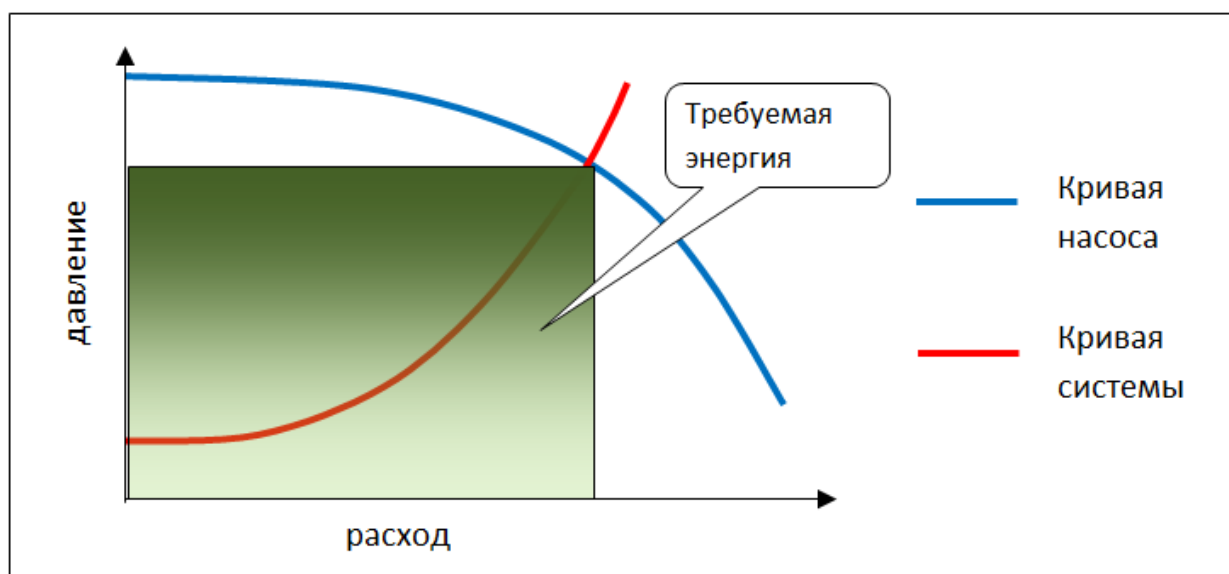


Рисунок 1.2.1 - Типовая схема вычисления необходимой мощности насоса

Для расчета мощности насоса конкретной системы необходимо всегда знать максимальный уровень потребления насоса, для того чтобы создать определенный запас. На рисунке 1.2.1 синяя линия обозначает «кривую насоса» (часть подачи), отражающую зависимость расхода от давления, которое нагнетается в насосе. Кривую системы на рисунке описывает красная линия, часть потребления водоснабжения, она зеркально отражает зависимость расхода насоса от давления в нем. Точкой, так называемого оптимума, является пересечение этих кривых, обозначая момент, когда необходимый уровень давления в системе обеспечивается насосом, тем самым обеспечивая оптимальный проток в магистрали.[15]

На рисунке 1.2.2 можно наглядно просмотреть, сколько энергии расходуется при обычной работе двигателя при дроссельном регулировании подачи воды. Это обусловлено тем, что в системе появляется избыточное давление при снижении расхода, из-за этого давления происходит очень большая потеря энергии в пустую, так как двигатель продолжает работать в это время в своем обычном режиме с номинальной мощностью. А в режиме максимального потребления система работает редко.

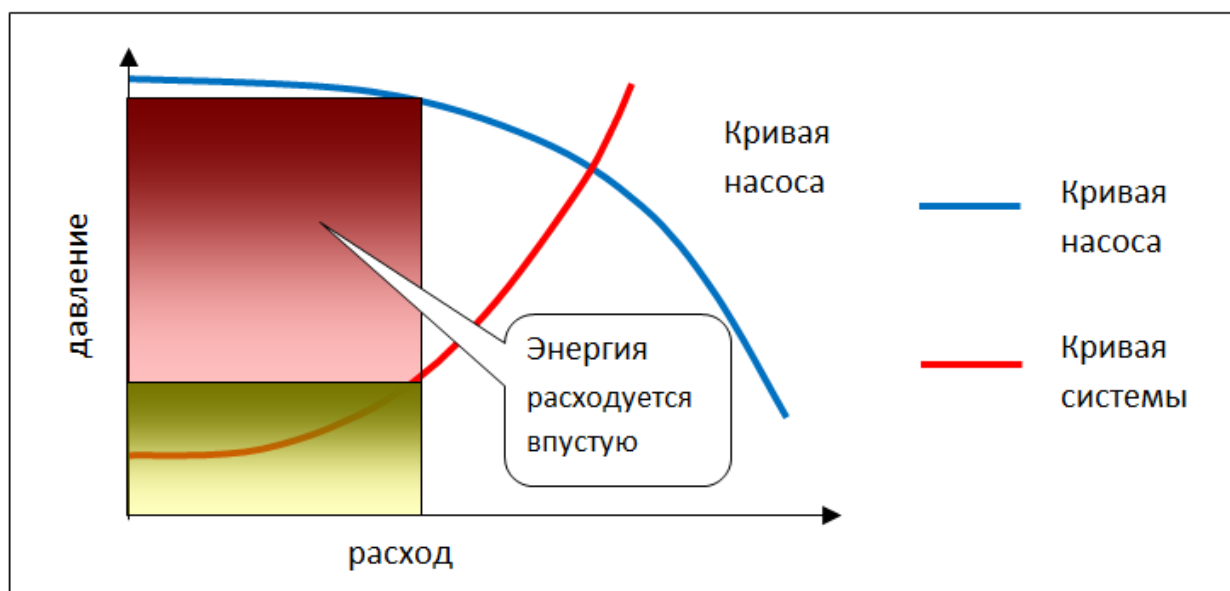


Рисунок 1.2.2 – Расход энергии

Чтобы максимально совместить кривую системы и кривую насоса, необходимо использование частотно преобразователя, который позволит снизить мощность двигателя, избавляя систему от появления излишнего давления в магистрали.

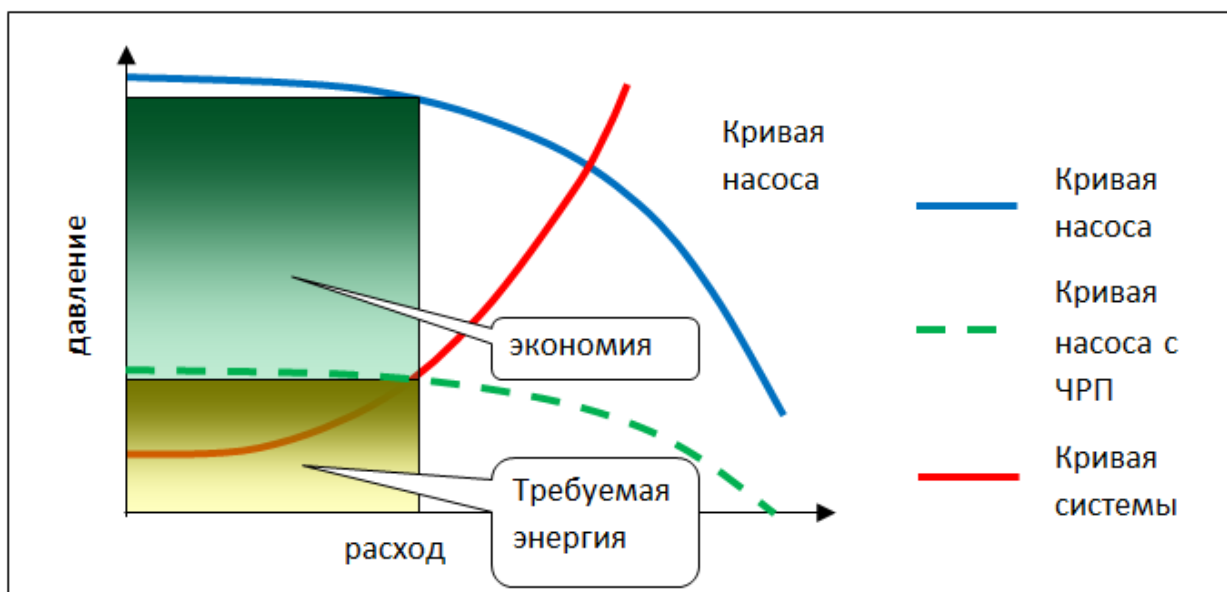


Рисунок 1.2.3 -

Мы все прекрасно знаем, что в зависимости от дня расход воды в нашем доме очень сильно меняется, мы по-разному потребляем воду на разные нужды в течении дня. К примеру, днем и вечером многие пользуются водой в доме, что-то моют, стирают и так далее. В основном это происходит вечером, а ночью, например, наоборот никто не использует воду, в связи с этим появляются такие проблемы как нехватка напора воды. Возможно, многие замечали подобное, особенно в старых домах, где системы водоснабжения еще не были до конца продуманы, а модифицировать сейчас их никто не хочет по разным причинам, обусловленных в первую очередь ценой модернизации. Из-за подобных скачков давления в системе со временем изнашиваются трубы, арматура и другие устройства в магистрали. [25]

В новых постройках давление не снижается, и задача с его стабилизацией не стоит так остро как раньше, так система является более современной. Но зато встала другая задача, не менее важная. Это повышение КПД насосов в системе, для большей эффективности работы, т.е. необходимо добиться больших результатов работы электропривода, при минимальных вложениях в проект,

снижая расход электроэнергии на работу насоса. С этой задачей очень хорошо справляется электропривод, регулируемый частотным преобразователем. Если заглянуть в статистику, то можно сделать вывод что для насосных станций применение ПЧ на электроприводе позволяет достичь очень большой экономии электроэнергии, порядка 45%, а сама модернизация окупится всего за год в среднем. При модернизации привода мы не только экономим на потреблении электроэнергии, но также снижаем расход человеческих ресурсов, так как снижается количество аварий и нам уже не нужно столько ремонтников и обслуживающих электропривод работников.

Как раз благодаря тому, что преобразователь частоты меняет скорость вращения вала и очень плавно регулирует ее в достаточно широком диапазоне, мы можем добиться такой значительной экономии. В действительности при таком частотном регулировании насос не будет потреблять лишней электроэнергии, а лишь столько сколько ему нужно для того чтобы поддерживать тот или иной уровень давления, который необходим. Обеспечивая при этом стабильное давление в системе магистрали, не смотря на то, сколько в данный момент потребляется воды. Помимо того, что мы можем плавно изменять скорость вращения вала, мы так же можем плавно запускать и останавливать двигатель, что в свою очередь помогает избежать ряда различных поломок и чрезвычайных ситуаций, возникающих при авариях. Так же частотное регулирование помогает избегать протечек в магистрали водоснабжения, поломки различных приборов измерения, различной арматуры и самих труб. Стоит заметить, что помимо экономии электроэнергии, мы так же снижаем потери воды в системе и увеличиваем срок службы труб без аварий и замены, из-за которых мы так часто остаемся без воды в доме. И помимо этого, модернизируя электропривод, мы снижаем количество проверок труб, которые проходят в начале и в конце сезонов, оставляя нас опять же без водоснабжения и отопления.[14]

1.3 Общие сведения

Преобразователь частоты (ПЧ) – прибор который выполняет функцию регулирования частоты в электроприводе, при этом он не меняет тип напряжения, оставляя его переменным. ПЧ способен менять частоту на выходе в очень широком диапазоне, и может, как увеличивать, так и уменьшать ее относительно питающей сети.

Состав ПЧ включает в себя всего две части, это силовая, которая исполнена преимущественно на основе тиристоров, реже на основе транзисторов, работа которых происходит в режиме ключей в электронной системе. Вторая часть – управляющая, она регулирует силовые ключи электронной системы, и позволяет решать такие задачи, как например защита и контроль всей системы. Возможность решения этих задач дает применение цифровых микропроцессоров.[12]

Можно поделить ПЧ на два типа, с непосредственной связью, при которой в системе отсутствует промежуточное звено, и ПЧ, промежуточное звено которого явно выражено. У вышеперечисленных типов преобразователей существуют свои отрицательные и положительные стороны. Их применение определяется в зависимости от различных параметров, для того чтобы сделать использование определенного ПЧ более рациональным в конкретной системе.

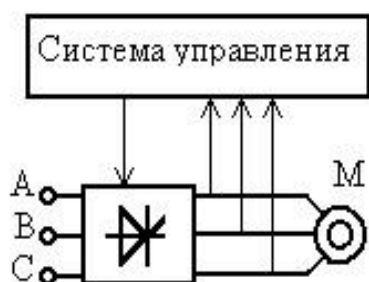


Рисунок 1.3.1 – ПЧ с непосредственной связью

С техническим прогрессом на рынке начали появляться первые ПЧ с непосредственной связью. Силовая часть в таких ПЧ состояла из выпрямителя который управлялся электронно. Так же, еще одной особенностью силовой ча-

сти таких ПЧ было то, что она была выполнена из тиристоров, которые не запирались. Такие тиристоры поочередно отпирались и запирались, при этом система в это время еще подключала статорные обмотки к сети.[23]

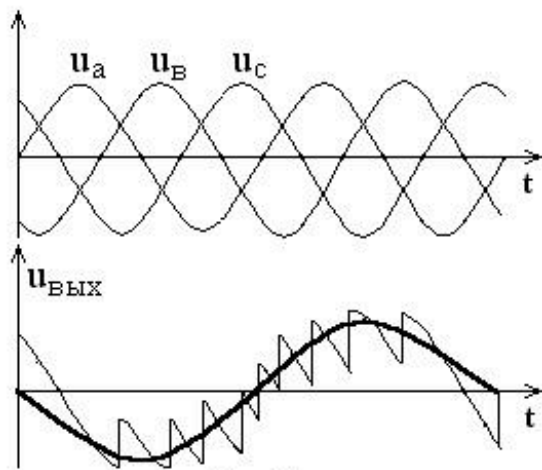


Рисунок 1.3.2- Выходное напряжение на фазе

Формирование выходного напряжения происходит из синусоид напряжения на входе. На рисунке 1.3.2 мы это отчетливо видим. Напряжение на входе ПЧ имеет форму трехфазного и синусоидального. На выходе же это напряжение уже имеет несинусоидальную форму, которая обозначена более толстой линией.

Частота напряжения на выходе имеет в среднем диапазон от 0 Гц и до 35 Гц, это видно из рисунка. Это означает, что частота питающей сети никогда не опускается ниже и не равняется частоте на выходе. Из-за того, что помимо этого ограничения у этих ПЧ еще и небольшой диапазон управления, (около 1:10), то его становится невозможно использовать для новых, современных электроприводов. Функции ПЧ заключаются в управлении, информировании и контроле работы системы электропривода. Этот компонент полностью автоматизирован и является вспомогательным. Сегодня же преобразователи частоты вышли на новый уровень технического развития. Они имеют ПИД регуляторы, которые встроены в их прошивку и способны обрабатывать огромное количество входящих и исходящих сигналов. Они способны диагностировать и защищать систему электропривода, способны генерировать сообщения об ошибках и ава-

риях, имеют электронный интерфейс и много других функций, которые делают работу электропривода максимально эффективной. [27]

Эффективность заключается не только в скорости и качестве работы, а также в экономии которую дает использование ПЧ в работе с электроприводом. Помимо очевидного снижения энергопотребления электропривода от источника питания, так же снижается количество аварий и чрезвычайных ситуаций. Снижается вероятность гидравлического удара и протечки в магистрали водоснабжения. Так же на предприятии сокращается количество необходимого персонала для обслуживания электропривода, так как его управление происходит электронно. Давайте теперь рассмотрим, как работает система насоса. Энергопотребление насоса очень сильно зависит от количества оборотов вала двигателя. Расход электроэнергии снижается в два раза, если снизить обороты вала всего на 25%! Из этого сразу можно сделать вывод о высокой эффективности внедрения ПЧ в систему электропривода насоса. Если настройка ПЧ будет осуществлена правильно, помимо повышения энергоэффективности мы так же получаем хорошую окупаемость нашей модернизации системы водоснабжения. Рассмотрев состав асинхронного электродвигателя, можно выделить две основные его части, это ротор и статор. Ротор является подвижной частью электродвигателя, а статор неподвижной. Для того чтобы создать магнитное поле двигателя, на его статор подается переменное напряжение. Индукционный ток уже образуется от воздействия магнитного поля обмоток статора электродвигателя на обмотки ротора, который является подвижной частью. Из-за этого в обмотке ротора генерируется свое магнитное поле. Оно двигается в ту же сторону что магнитное поле обмоток статора, в связи, с чем двигатель начинает разгоняться.[12]

Давайте рассмотрим положительные и отрицательные стороны асинхронных двигателей. Они просты в изготовлении и имеют небольшую стоимость, у них высокий коэффициент мощности и в размерах они такие же, как синхронные двигатели. Они долговечны и редко требуют серьезного ремонта их частей. Основным минусом асинхронных двигателей (АД) является их виб-

рация. Так как они очень резко разгоняются и тормозят с выделением большого количества механической энергии, система в состав которой входит АД быстро ломается и начинает требовать ремонта. Шум выделяемый электроприводом так же обусловлен выделением механической энергии при работе двигателем. Из-за того, что очень много энергии тратится в пустую, асинхронный двигатель является низкоэффективным устройством в плане энергосбережения. Практически половина всей электроэнергии, расходуемой в коммунальных компаниях городов приходится на электроприводы. Так же механическая энергия, выделяемая асинхронным двигателем при торможении и старте, приводит к выделению большого количества тепла, которое так же негативно влияет на систему в целом. Чтобы улучшить эффективность работы такого электропривода был изобретен частотный преобразователь, над созданием которого работали техники со всей планеты.[2]

Современный технический прогресс создал устройство для контроля мощности электропривода. Возможность плавного старта и остановки двигателя снизила количество механической энергии, выделяемой во время работы. Снижился объем нагрузки, которая падала на всю систему и на ее элементы отдельно. Так же ПЧ может питать электродвигатель от слабой сети, сохраняя уровень рабочей нагрузки на нем. Так же снижает тепловыделение двигателя и увеличивает время работы двигателя без аварий.

На сегодняшний день достаточно тяжело представить себе существование без электропривода даже в повседневной жизни. Большинство электродвигателей приводят в движение огромное число различных машин и механизмов, начиная примитивными и заканчивая, сложными машинами такими как например насосы. К примеру, в простых механизмах основную функцию которых выполняет электропривод, это остановка и пуск, реже изменяет направление вращения вала. В сложных же механизмах в добавок к вышеперечисленным функциям добавляется регулирование скорости вращения вала, а также увеличение или понижение производительности двигателя.[17]

На сегодняшний день данную проблему решают самыми различными способами, чаще всего используют такие устройства как регуляторы электронные, механические вариаторы и конечно же муфты скольжения, такие способы отлично справляются с регулированием скорости вращения вала, но конечно же имеют свои минусы, плюсы и нюансы монтажа. Хочется выделить, что использование элементов, которые со временем изнашиваются механически и сильно усложняют обслуживание и эксплуатацию привода является основными минусами первых двух устройств в непростых средах обитания, таких как взрывоопасные и загрязненные. Так же еще одним минусом является тот факт, что регулирующее устройство придется собирать с двигателем и нагрузкой в один элемент, что так же сильно усложняет процесс. Все чаще и чаще в промышленности используют устройства, регулирующие работу привода в электронном режиме, в таких устройствах отсутствуют вышеперечисленные недостатки. Рассматривая состав электропривода можно выделить три основных элемента, это преобразователь частоты (ПЧ), собственно сам электродвигатель и электронная система управления. Сейчас в использовании в основном двигатели постоянного и переменного тока, в независимости от того какая это сфера, бытовая или техническая промышленность. Так как двигатели переменного тока сами по себе дороже из-за более сложной конструкции, они реже использовали для регулирования скорости вращения, более выгодное было применение двигателей постоянного тока.[17]

В таком электроприводе задачей ПЧ было только регулирование входного напряжения от источника, поэтому он был достаточно простой в устройстве и имел низкую цену. Если мы посмотрим на асинхронные двигатели, которые тоже очень распространены в самых разных технических сферах, то можно сказать что они зарекомендовали себя на рынке как очень надежные и относительно недорогие. У них хорошие характеристики эксплуатации и качества для работы, но устройства для регулирования скорости их вращения стоили достаточно долгое время слишком дорого и не имели необходимые качества для того

чтобы их можно было широко внедрить в техническую индустрию, связано это с высокой сложностью системы электронного регулирования частоты для питающего напряжения. Когда же развитие электротехники в мире поднялось на высокий уровень в связи со стремительным развитием, начали появляться преобразователи частоты, имеющие небольшую стоимость и тогда стало возможным более масштабно использовать регулировку скорости вращения вала путем применения асинхронных двигателей[12]

На рынке, для асинхронных двигателей появились совершенно новые элементы, такие как силовые модули IGBT, (транзистор биполярный, у которого был изолирован затвор), это была одна из причин такого быстрого роста в сфере преобразователей частоты. Эти модули (IGBT) отличались в основном своими силовыми характеристиками, которые позволяли им выдерживать большие показатели нагрузки и напряжения (до нескольких кВт и кА). А частота коммутации у таких модулей составляет 35кГц и больше. На данный момент самым распространенным в использовании в любой технической сфере и в промышленности является асинхронный двигатель, ротор которого короткозамкнут. Из-за сочетания в себе оптимальных характеристик. Так же хотелось бы добавить, что практически более 70% суммарно потребляемой электроэнергии в мире остается за асинхронными двигателями, которые требуют много энергии для приведения их в работу. Что составляет слишком много для нынешних цен на электроэнергию, поэтому этот вопрос очень остро встает во всех сферах промышленности. У данного двигателя имеется короткозамкнутый ротор, который является подвижным. Так же в составе имеется в статор с обмотками, образующий полюса. При создании магнитного поля статора, вращающееся вокруг него необходимо приложить на него трехфазное напряжение, подаваемое от источника на электродвигатель, к обмоткам статора и сдвинуть его на 130 градусов. Такое магнитное поле способствует появлению токов в роторе, они с свою очередь создают поле ротора, вращающееся в другую сторону относительно поля статора. Так вал двигателя приходит в движение, когда на него по-

даются механические силы и вращающий момент, образованные магнитным полем. Так же существует такое понятие как скольжение, оно заключается в разнице скорости вращения статорного поля и скорости вращения ротора, первое должно быть больше. Есть несколько способов чтобы регулировать скорость вращения вала электродвигателя, основным используемым способом является способ, при котором изменяют частоту напряжения питания, так же используют метод изменения числа пар полюсов на обмотке статора и амплитуды напряжения.[30]

Поговорим о самом широко-используемом варианте, это преобразователи частоты (ПЧ), которые являются полупроводниковыми и способны изменять частоту напряжения, которое подводится к электродвигателю от источника питания, тем самым меняя скорость вращения вала асинхронного двигателя, понижая или увеличивая его мощность и потребляемый ток из источника. Самым распространенным способом регулирования скорости вращения вала является изменение амплитуды и частоты напряжения, подаваемого от источника питания с тремя фазами, таким образом происходит частотное управление валом. Номинальную скорость вала электродвигателя можно повышать и понижать, регулируя частоту напряжения, подаваемого от источника к статору. Хотелось бы отметить что регулирование частоты меньше номинальной происходит при выборе закона частотного управления, когда магнитный поток электродвигателя не будет изменяться, а останется неизменным, для этого необходимо выбрать правильное соотношение частоты и амплитуды. При этом перегрузочная способность остается неизменной во всех диапазонах регулирования, так как максимальный момент электродвигателя не меняется, не понижается и не повышается, поэтому момент нагрузки не меняется. Регулировать частоту больше номинальной имеет возможность только преобразователь с промежуточным контуром постоянного тока, так как у него имеется режим понижения магнитного потока электродвигателя, все это происходит при неизменной амплитуде напряжения, она остается на уровне номинального значения, что еще раз под-

тверждает, что частотное регулирование не только экономит электроэнергию, но и помогает избежать поломок в двигателе и электроприводе в целом. На данный момент используются два типа преобразователей частоты, это преобразователь с промежуточным контуром постоянного тока, и преобразователь с непосредственной связью, второй формирует синусоидальную форму напряжения от синусоид, напряжения которое преобразуется, и поступает от источника питания. Во всех случаях частота напряжения от питающей сети принципиально не может равняться частоте преобразователя, которую мы получаем на выходе, по средним данным ее показатель составляет от 0 до 33 Гц, это принципиально исключено. Так же преобразователи частоты (ПЧ) оборудуются диодным выпрямителем, который в свою очередь сглаживает переменное напряжение, подаваемое от сети с помощью индуктивно ёмкостного фильтра, что делает такие преобразователи самыми распространенными на рынке ПЧ, и они получили наибольшее признание в технической сфере благодаря промежуточному контуру постоянного тока. Так же хочется отметить что очень часто в инверторах, которые исполнены в основе IGBT модулей используется метод высокочастотной ШИМ (широтно-импульсная модуляция), с его помощью ПЧ преобразует постоянный ток в переменный, при этом генерирует заданные значения частоты и напряжения, таким образом он формирует выходной сигнал.[15]

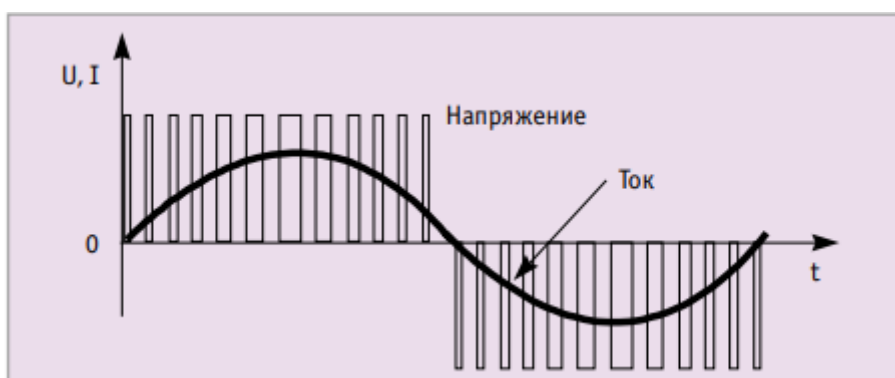


Рисунок 1 -Выходной сигнал преобразователя частоты

На рисунке 1 мы можем наблюдать как токи синусоидальной формы формируются благодаря последовательным импульсам напряжения при постоянной ам-

плитуде этого напряжения, все это происходит при индуктивной нагрузке, на обмотке статора, это все в совместимости представляет собой выходной сигнал на ПЧ. Диапазон частоты, которую возможно регулировать в данном случае составляет от 0 Гц до пары тысяч. Далее мы рассмотрим какие бывают типы нагрузок. Чтобы понять какие требования вы хотите получить от электропривода, вы должны решить какой диапазон скоростей и какие типы нагрузок вам необходимы в работе.[13]



Рис. 2. Механические характеристики типичных нагрузок

На рисунке под номером два можно увидеть, что зависимость скорости вращения и момента сопротивления отличается в зависимости от вида и типа нагрузки поэтому мы можем рассматривать разные нагрузки, которые имеют постоянный момент в разных диапазонах скорости. На примере можно рассмотреть насосы и конвейеры, а также, например, компрессоры. Существуют разные виды нагрузки, для каждого из них определяется разная механическая характеристика, при которой увеличение скорости вращения происходит с увеличением момента нагрузки.[19]

Рассмотрим уравнение квадратичной параболы, при которой скорость вращения в кубе равна потребляемой мощности от источника питания, данное уравнение действует не на всех устройствах, а лишь на некоторых. Ярким примером являются вентиляторы и центробежные насосы, для них как раз харак-

терны разные механические характеристики, которые зависят от нагрузки на электроприводе. В связи с этим мы можем сделать вывод что основным крупным преимуществом ПЧ, является значительная экономия электроэнергии, так как даже незначительное понижение скорости вращения вала ведет к большому увеличению мощности в вентиляторах и насосах. Практика показывает, что экономия электроэнергии, которую потребляет электропривод составляет 35 процентов при снижении скорости вращения вала всего на 11 процентов. Так же можем рассмотреть некоторые механизмы такие как промышленные миксеры и устройства для замеса, механическая характеристика которых очень схожа с характеристиками вентиляторов и насосов, о которых мы говорили выше. Но хотелось бы уберечь техников от неправильного выбора, сказав, что эти устройства так же имеют очень уникальные механические характеристики и нагрузки, которые не всегда могут соответствовать требованиям, подходящим для работы с ПЧ. К примеру, необходим очень высокий пусковой момент, уменьшающийся с увеличением скорости вращения вала, а потом эта характеристика становится квадратичной. Поэтому следует тщательно проанализировать нагрузки и механические характеристики устройства, которое вы хотите модернизировать с помощью ПЧ.[28]

Преобразователь частоты имеет различные режимы управления, это зависит от характера нагрузки, создавая при этом разные скорости вращения вала и разное выходное напряжение на электродвигатель. Двигатели, которые подключены параллельно и синхронные двигатели обеспечиваются постоянным моментом нагрузки благодаря ПЧ работающем в режиме линейной зависимости ($U/f = \text{const}$). Но стоит заметить, что падение максимального момента электродвигателя неизбежно при уменьшении частоты. Тут для рассмотренных выше промышленных миксеров играет большую роль функция, которая устанавливается в ПЧ и позволяет повысить начальное выходное напряжение. Таким образом возможно компенсировать момент нагрузки, делая возможным работу устройств с высоким пусковым моментом. Этот режим, при котором работает

квадратичная зависимость ($U/f^2 = \text{const}$) позволяет осуществлять работу по управлению параллельно подключенными электродвигателями так же, как и предыдущий рассмотренный режим. Это основные режимы работы ПЧ, которые применяются больше всего в технической сфере и различной промышленности. Но на этом производители ПЧ не останавливаются, и создают более развитые режимы управления, для повышения качества работы ПЧ. Были созданы еще два метода управления, это режим потокосцепления и режим бессенсорного векторного управления. (FCC и SVC). Были выпущены новые ПЧ с вычислительными устройствами, способными анализировать и адаптироваться под работу различных электродвигателей, такая система управления ПЧ делала его незаменимым на любом производстве. Режим SVC без датчика обратной связи по скорости рассмотренный выше, является самым эффективным и точным в управлении. В двигателях переменного тока только одна обмотка статора, которая формирует магнитное поле, а в двигателях постоянного тока – две (можно управлять их скоростью отдельно), задавая вращающий момент. Из-за этого и появляются трудности управления. В связи с этим управлять амплитудой, т.е. вектором тока является единственным выходом из ситуации. Но для этого нам необходимо определять положение ротора в каждый момент времени, для того чтобы регулировать магнитное поле статора в зависимости от его положения и фазу тока, что нам может позволить использование датчика положения, такой как например шифратор приращений. Таким образом электропривод постоянного тока равен приводу переменного тока по всем параметрам, если сравнивать качество регулирования. Но из-за повышения стоимости электроприводов переменного тока с добавленным в конструкцию датчика положения ротора, что очень сильно усложняет конструкцию, такие электроприводы пользуются очень малой популярностью. Но современные технологии векторного управления не стоят на месте, и уже сегодня мы имеем на рынке адаптивные модели, математически предсказывающие положение ротора в любое время. Применение в системе управления ПЧ интегральных схем (ASIC) делает возможным осуществление большого объема вычислений в минимальные сроки и сопо-

ставлять различные параметры двигателя в различных режимах работы. Моделирует точные характеристики двигателя, контролирует и измеряет выходной ток и напряжение, а также рассчитывает различные характеристики двигателя такие как например индуктивность и сопротивление. Нет возможности без обратной связи по скорости полноценно управлять моментом, при низкой скорости. Хотя такое векторное управление и дает возможность обеспечивать низкую погрешность, которая является нормальной при замкнутой обратной связи в приводе. ПЧ создает обратную связь, которая помогает достичь минимальную погрешность в регулировании, около одного процента.[19]

Но стоит заметить, что такой режим управления (векторный) не используется для синхронных машин и для двигателей, подключенных параллельно. Сюда же можно отнести двигатели с низким показателем мощности (менее $\frac{1}{2}$ мощности ПЧ) или же если наоборот превышает ее. Далее рассмотрим различные способы торможения привода. Последнее время больше стали применяться электрические способы торможения, нежели механические, независимо от того нужно замедлить или полностью остановить механизм. Главной особенностью электрического способа торможения является перевод машины в режим генератора, из режима двигателя, тем самым создавая магнитный момент против движения. Механический способ торможения заключается в отключении от питания, после чего он сам останавливается со временем. Но в таком случае мы не можем контролировать время, которое необходимо двигателю чтобы полностью остановиться или замедлиться до какого-либо конкретного значения. Такой контроль времени нам может обеспечить исключительно электрический способ, при котором двигатель переводится в генераторный режим, происходит это путем уменьшения ПЧ, частоты на выходе до нужного значения.[28]

Но также, стоит заметить, что в этом случае двигатель начинает преобразовывать кинетическую энергию в электрическую, которая в зависимости от выпрямляющего устройства накапливается в контуре ПЧ, либо же возвращается в сеть. Но если момент инерции слишком велик, то нам может потребоваться

какое-либо дополнительное тормозное сопротивление со специальной схемой, для того чтобы рассеять большое количество энергии, избегая тем самым опасного перенапряжения. Из выше сказанного делаем вывод что электрический способ дает нам ряд существенных преимуществ, таких как: плавность остановки, контролируемое время торможения и хороший тормозной момент. Но, так же, у этого способа есть недостаток – придется использовать какое либо, внешнее дополнительное сопротивление для того чтобы избежать, перегрев резистора контура тока, который встроен в систему, так как выделяется слишком много энергии в ПЧ при быстрой остановке электропривода. Для торможения в системах постоянного тока используют систему, при которой на одну фазу поступает постоянное напряжение, а с другой фазы снимают переменное напряжение, это называется динамическим торможением двигателя. Таким способом возможно добиться замедления и полной остановки ротора до неподвижного состояния.[16]

В отличии от генераторного режима здесь отпадает необходимость в использовании дополнительного тормозного сопротивления, так как система выделяет электрическую энергию в роторе. Из минусов данного режима можно выделить что время торможения снова не контролируется, так как частота ПЧ перестает контролироваться. Если продолжать сравнивать данный метод с методом генераторного торможения, можно сказать что эффективность становится ниже, и составляет около 35%. Самым эффективным способом торможения является комбинированный, который сочетает в себе преимущества двух методов о которых мы до этого говорили. При таком режиме торможение привода осуществляется без перегрева во внутреннем контуре ПЧ и за короткое время, путем накладывания переменного напряжения, на постоянную.[21]

1.5 Характеристика системы пикового теплоснабжения

Теплоснабжение различных помещений, таких как жилые и производственные, и других различных объектов в условиях рыночных отношений (как торговля продовольствием и другими товарами) становится максимально приоритетным по значению. Эффективное теплоснабжение становится на первый план, как и энергетика и является фактором безопасности страны. Многие регионы нашей страны сильно нуждаются в обновлении и модернизации системы теплоснабжения. Причины такого положения в системе энергетики нашей страны не в отсутствии средств или возможностей для модернизации, причины скорее внутренние, политические и кроются в отсутствии законов, которые могли бы регулировать отношения между потребителями электроэнергии и компаниями, которые занимаются тепло и энергоснабжением регионов.[16]

Разные изменения в магистрали водоснабжения, такие как снижение давления и температуры, отключение подачи, способны вызвать аварийные ситуации и нарушают нормальное функционирование системы. Но при всем при этом горячее водоснабжение, подаваемое от тепловой станции может быть отключено на месяц и больше, по разным причинам. При этом отключение централизованного горячего водоснабжения в большом городе приводит к огромному спаду выработки электроэнергии, но это только если выработка происходит комбинированным способом. Но наши компании обеспечивающие города водоснабжением и электроэнергией вынуждены идти на эти гигантские потери топлива. Причина таких поступков не техническая, а исключительно политическая, связано такое положение дел из-за борьбы с региональными властями, которые навязывают свои условия по теплоснабжению. Компании, занимающиеся энерго и теплоснабжением сами, устанавливают тарифы и порядок учета.

Как бы это было не алогично, но сегодня в тепловых сетях очень часто используют так называемый «недостаточный нагрев» воды в сети. Нагрев происходит до температуры, которая соответствует температурному графику компании. Но этот способ ведет исключительно к понижению эффективности ра-

боты станций и ведет к потере баланса системы теплоснабжения. Вместо понижения расхода топлива мы видим только его увеличение на станциях теплоснабжения систем города. Водогрейные котлы являются основой систем теплоснабжения. Они являются источниками пиковой мощности в системе.[28]

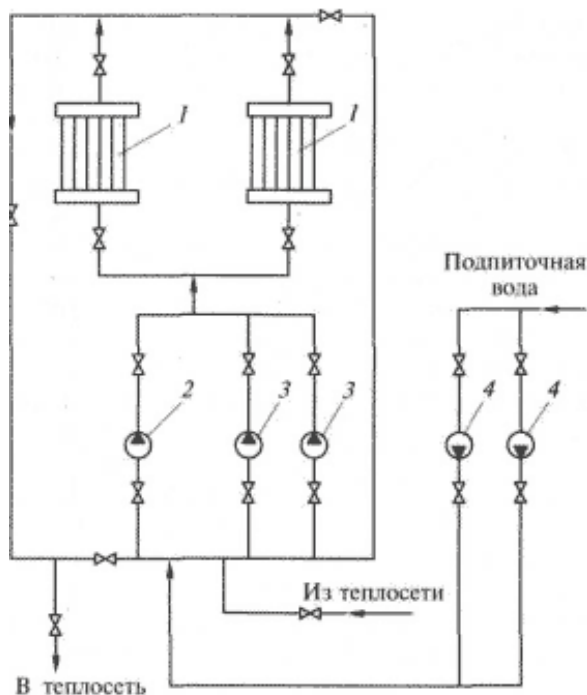


Рисунок 1.5.1-Система пикового теплоснабжения: 1-водогрейный котел; 2-резервный насос; 3-основные сетевые питательные насосы; 4-подпиточные насосы

В связи с тем, что сегодня на энергетическом рынке резко повысилась цена за топливо, стоит уделить особое внимание энергоэффективности и надежности систем тепло и водоснабжения. Стоит заново рассмотреть способы и виды обеспечения тепловой нагрузки, повысив требования.

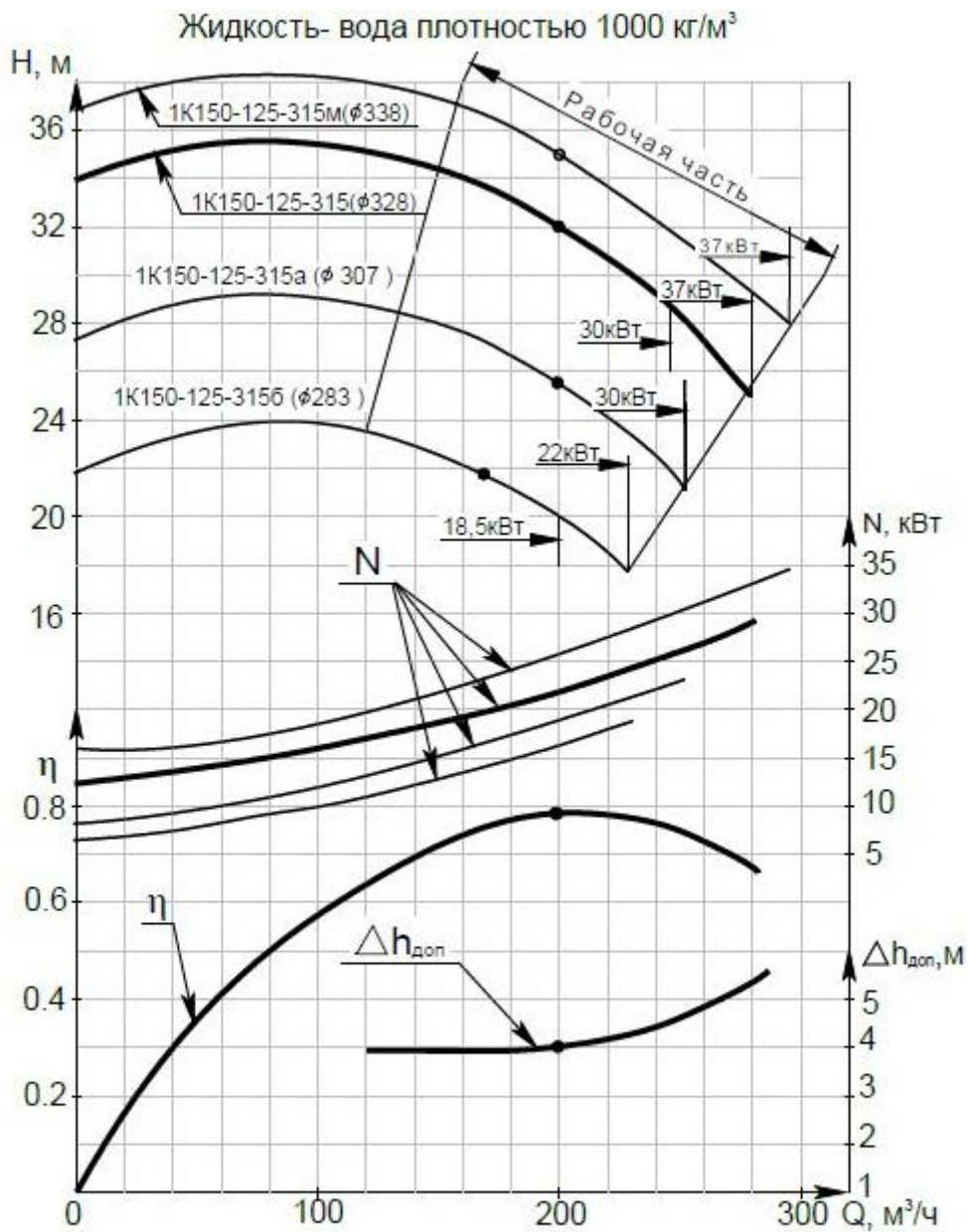
На рис. 1.5.1-приведена схема подсоединения питательных трубопроводов котельной к водогрейным котлам. Для того чтобы перемещать воду внутри котельных, которые оборудованы водонагревательными котлами, необходимо минимум два сетевых питательных насоса, которые будут работать в системе электропривода, для циркуляции по трубопроводу системы. Характеристики этих насосов подбираются так, чтобы их производительность и напор позволя-

ли обеспечивать полноценную работу системы теплоснабжения даже если один из насосов выйдет из строя(табл. 1.5.2).

Так как потребление воды и тепла в системах теплоснабжения и водоснабжения сильно зависит от различных факторов, таких как погода и время года, система теплоснабжения имеет непостоянные характеристики, сильно изменяющиеся из-за разных факторов. Из-за того, что на насосах не установлено регулирующего устройства, регулировка происходит дроссельным способом, т.е. для того чтобы регулировать напор насоса в трубопроводе используют заслонку или задвижку, которая частично или полностью перекрывает напорную линию теплоснабжения. Повышение давления, чрезмерное увеличение напора в трубопроводе, все это результаты этого способа регулирования. Это в свою очередь приводит к утечкам в магистрали, дополнительным поломкам в системе теплоснабжения и в целом негативно влияет на работу насоса.[18]

Таблица 1.5.1-Базовая характеристика сетевого насоса

Типоразмер насоса	Параметры насоса		Допуст. кавитац. запас, м, не более	Частота вращ., (об/мин)	Мощность двиг-ля, кВт
	Подача, м ³ /ч	Напор, м			
К150-125-315	290	35	4,5	1450	37



Характеристики Q - η и Q - $\Delta h_{\text{доп}}$ приведены для "основного" исполнения рабочего колеса

Рисунок 1.5.2 – Характеристика насоса К-150-125-315 при частоте вращения 1450 об/мин.

Дополнительная характеристика

Масса насоса, кг 90

КПД насоса, % 67

1.6 Расчет мощности двигателя насоса

Центробежные сетевые насосы типа К150-125-315 применяются для водоснабжения различных систем, таких теплоснабжение, водоснабжение и других установок промышленного оборудования.

Полезная гидравлическая мощность насоса в номинальном режиме определяется выражением.

$$N_Q = \kappa_3 \cdot \rho \cdot Q_H \cdot H(Q_H), \quad (1.6.1)$$

где κ_3 – коэффициент запаса (1,1 -1,4); ρ - удельный вес перекачиваемой жидкости, для воды он равен 9810 Н/м^3 ; Q_H - подача воды при номинальном режиме, $\text{м}^3/\text{с}$; $H(Q_H)$ - напор при номинальном режиме, м.

Для питательного насоса К150-125-315, при использовании характеристик насоса, имеем: $Q_H = 200 \text{ м}^3/\text{час}$ и $H(Q_H) = 32 \text{ м}$, КПД - $\eta(Q_H) = 0,78$

$$N_Q = \kappa_3 \cdot Q_H \cdot H(Q_H) \cdot \rho = \frac{1,2 \cdot 200 \cdot 32 \cdot 9810}{3600 \cdot 1000} = 25,5 \text{ кВт} \quad (1.6.2)$$

Потребляемая мощность электродвигателя в номинальном режиме

$$N = \frac{N_Q}{\eta_n \cdot \eta_\delta}, \quad (1.6.3)$$

где η_n - КПД насоса при номинальном режиме; η_δ - КПД двигателя при номинальном режиме.

Для питательного насоса КПД - $\eta_n = 0,78$

Для асинхронного двигателя предварительно принимаем $\eta_\delta = 0,9$.

$$N = \frac{N_o}{\eta_n \cdot \eta_o} = \frac{25,5}{0,78 \cdot 0,9} = 36,3 \text{ кВт} \quad (1.6.4)$$

Двигателем для нашего насоса выберем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4А200L4У3: $P_2 = 37 \text{ кВт}$, $U = 220/380 \text{ В}$, $n_n = 1475 \text{ об/мин}$, $2p = 4$; исполнение IM 1001; по способу защиты IP44; способ охлаждения IC0 141; категория размещения и климатические тип УЗ, класс устойчивости к нагреву изоляции F.[21]

Характеристики насоса и сети строятся в координатах «напор-расход», рабочей точкой называется точка в пересечении этих характеристик. Эта точка определяет энергетические параметры совместной работы насоса на сеть (рис. 1.6.1). При изменении характеристики сети или насоса рабочая точка соответственно смещается.

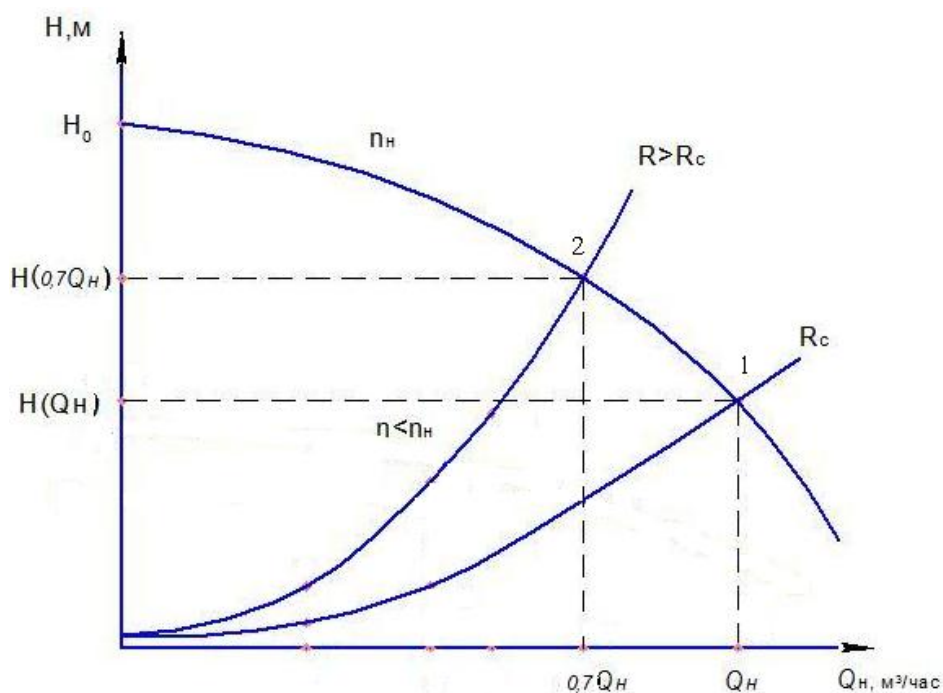


Рисунок 1.6.1 – Регулирование подачи воды с помощью задвижки (сопротивление сети)

Выделим два способа регулирования, для того чтобы менять режим водоснабжения:

1. Изменение характеристики внешней сети, т. е. регулирование гидравлического сопротивления при использовании задвижки, скорость вращения двигателя остается при этом неизменной;
2. Изменение угловой скорости вращения вала двигателя.

Давайте перейдем к первому способу регулирования, описанному выше, при уменьшении подачи на 30%. Для этого нам необходимо снизить размер проходных сечений задвижки. После этого рабочая точка 1 (рис. 1.6.1) смещается влево и занимает на графике новое положение (точка 2), а сопротивление сети при этом возрастает. В режиме номинальной мощности, полезная мощность можно определить прямоугольником $0-Q_H-1-H(Q_H)$, а при уменьшении подачи на 30% - прямоугольником $0-0,7Q_H-2-H(0,7Q_H)$.

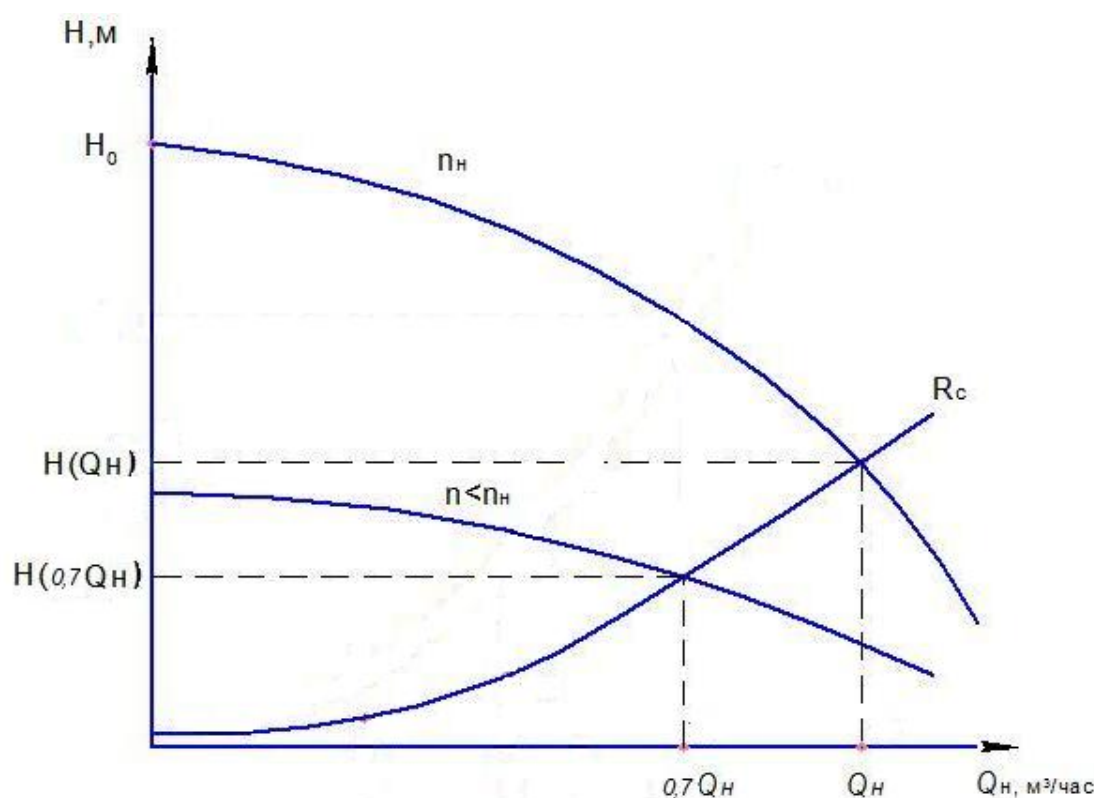


Рисунок 1.6.2 – Регулирование подачи воды изменением угловой скорости вала насоса (частотный способ)

В этом случае потребляемая двигателем мощность определяется:

$$N' = \frac{N_Q Q^* H^*}{\eta'_n \cdot \eta_\delta}, \quad (1.6.5)$$

где Q^* - относительная величина подачи ($Q^* = 1$ при номинальной подаче);

$H^* = H_0 - (H_0 - 1)(Q^*)^2$ - напор при относительной величине подачи;

$H_0 = 1,4H(Q_H)$ - напор при нулевой подаче; η'_n - КПД насоса при уменьшенном расходе.

При регулировании задвижки имеем: $Q^* = 0,7$ и $\eta'_n = 0,66$ при подаче 70% от номинальной величины.

$$N' = \frac{N_Q Q^* (H_0 - (H_0 - 1)(Q^*)^2)}{\eta'_n \cdot \eta_\delta} = \frac{25,5 \cdot 0,7 \cdot (1,4 - (1,4 - 1) \cdot 0,7^2)}{0,66 \cdot 0,9} = 36,1 \text{ кВт} \quad (1.6.6)$$

Потребляемая электродвигателем мощность при 50% подачи от номинальной мощности составляет

$$N'' = \frac{N_Q \cdot 0,5(H_0 - (H_0 - 1) \cdot 0,5^2)}{\eta_n \cdot \eta_\delta} = \frac{25,5 \cdot 0,5(1,4 - (1,4 - 1)0,5^2)}{0,66 \cdot 0,9} = 27,9$$

кВт(1.6.7)

При втором способе регулирования уменьшение угловой скорости вала насоса приводит к «опусканию» вниз его характеристики. При этом рабочая точка перемещается влево по характеристике внешней сети (рис. 2.2). Как следует из графика, полезная мощность при 70% подаче определяется прямоугольником $0-0,7Q_H-H(0,7Q_H)$.

Потребляемая электродвигателем мощность при уменьшении подачи изменением угловой скорости вала определяется как

$$N'' = \frac{N_Q (Q^*)^3}{\eta_n \cdot \eta_\delta} = \frac{25,5 \cdot 0,7^3}{0,84 \cdot 0,9} = 11,6 \text{ кВт} \quad (1.6.8)$$

Здесь величина η_n насоса изменяется незначительно, так как характеристика внешней сети и характеристика насоса до регулирования работали согласованно с наивысшим КПД. Тогда как при первом способе регулирования это согласование нарушается.[28]

Потребляемая электродвигателем мощность при 50% подачи от номинальной мощности при частотном регулировании составляет

$$N''' = \frac{N_{\varrho} \cdot 0,5^3}{\eta_n \cdot \eta_{\varrho}} = \frac{25,5 \cdot 0,5^3}{0,84 \cdot 0,9} = 4,21 \text{ кВт} \quad (1.6.9)$$

1.7 Расчет элементов преобразователя частоты

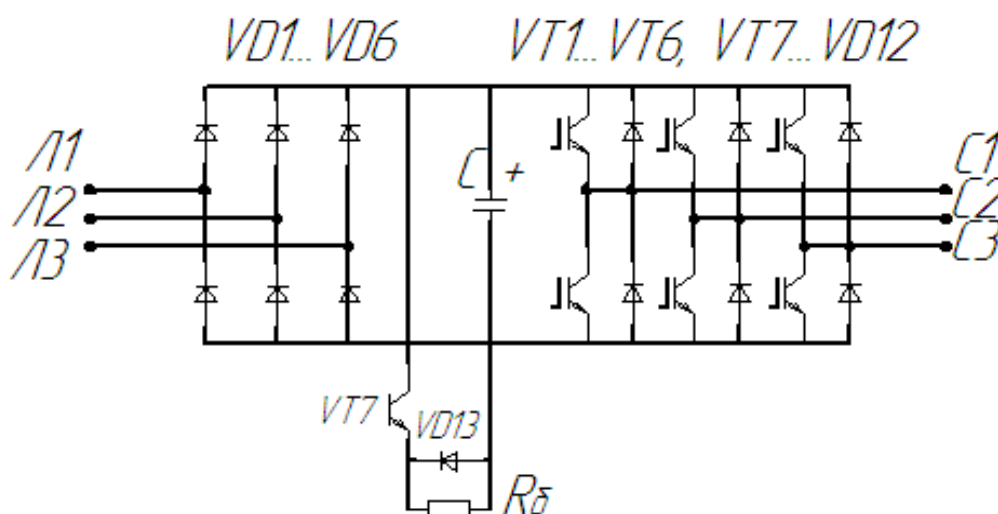


Рисунок 1.7.1 - Силовая схема преобразователя частоты (ПЧ)

Рассмотрим состав ПЧ описанный на рисунке 1.7.1. В его состав входит неуправляемый выпрямитель, конденсатор C фильтра, обратный выпрямительный мост и автономный инвертор.

Чтобы обеспечить ШИМ выходного напряжения ПЧ, транзисторы инвертора работают на частоте 5 кГц. В связи с этим кривая статорного тока вырисовывается практически синусоидальной формы.

1.7.1 Расчет и выбор ключей инвертора

1.7.1.1 Максимальный ток

$$I_{cmax} = \frac{P_n \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta \cdot \cos \varphi_n \cdot \sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{37000 \cdot 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,2}{0,91 \cdot 0,90 \cdot \sqrt{3} \cdot 380} = 151,43 \text{ A} \quad (1.7.1)$$

где $k_1 = 1,2 - 1,3$ - коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току, необходимой для того чтобы обеспечить динамику электропривода;

$k_2 = 1,1 - 1,2$ - коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока;

U_n - линейное напряжения двигателя, В.

1.7.1.2 Выбор ключей инвертора

Выбираем IGBT-ключи с номинальным током коллектора $I_c \geq I_{cmax}$, т.е. тип CM200DY-24HMITSUBISHIELECTRIK, ток $I_c = 200 A$, напряжение $V_{ce} = 1200 B$.

Основные характеристики:

$U_{ce sat} = 2,0 - 2,6 B$; $t_{c on} = 0,13 мкс$; $t_{c off} = 0,45 мкс$; $I_{rr} \cong I_{cp}$; $t_{rr} = 0,6 мкс$; $U_{ee} = 0,9 B$; $U_{ces} = 1200 B$; $R_{th c-f} = 0,045 K/Bm$; $R_{th(j-c)q} = 0,085 K Bm$; $R_{th(j-c)r} = 0,18 K Bm$.

1.7.1.3 Расчет потерь в инверторе

1.7.1.4 Потери в IGBT

$$P_{SS} = I_{cp} \cdot U_{ce} \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos \varphi \right) = 116,48 \cdot 2,2 \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{9,42} 0,90 \right) = 55,29 Bm \quad (1.7.2)$$

где $I_{cp} = I_{cmax} k_1 = 119 A$ – макс. амплитуда тока на входе инвертора;

$D = t T = 0,95$ – максимальная скважность;

U_{ce} – прямое падение напряжения на ключе при его насыщении

($U_{ce} = 2,2 B$ при $T_{ja} = 125 \text{ }^\circ\text{C}$).

1.7.1.5 Коммутационные потери IGBT

$$P_{sw} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{I_{cp} \cdot U_{cc} (t_{c on} + t_{c off}) f_{sw}}{2} = \quad (1.7.3)$$

$$= \frac{1}{4,44} \cdot \frac{116,48 \cdot 540 (0,13 + 0,45) \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3}{2} = 20,54 Bm$$

где $t_{c on}$, $t_{c off}$ – продолжительность переходных процессов по цепи коллектора на открывания и закрывания;

U_{cc} – напряжение на коллекторе ключа, В;

f_{sw} – частота коммутаций IGBT, Гц (частота ШИМ равная 5000 Гц).

1.7.1.6 Суммарные потери IGBT

$$P_Q = P_{SS} + P_{sw} = 55,29 + 20,54 = 75,83 \text{ Вт} \quad (1.7.4)$$

1.7.1.7 Потери диода FWD в проводящем состоянии

$$P_{DS} = I_{ep} \cdot U_{ee} \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos \varphi = 116,48 \cdot 0,9 \frac{1}{8} + \frac{0,95}{9,42} 0,90 = 22,61 \text{ Вт} \quad (1.7.5)$$

где $I_{ep} = I_{cp}$ - максимальная амплитуда тока через обратный диод, А;

U_{ee} - прямое падение напряжение на диоде (в в проводящем состоянии), В.

4.1.8 Потери при восстановлении запирающих свойств диода FDW

$$P_{DR} = \frac{1}{8} I_{rr} \cdot U_{cc} \cdot t_{rr} \cdot f_{sw} = \frac{1}{8} 116,48 \cdot 540 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3 = 23,58 \text{ Вт} \quad (1.7.6)$$

где I_{rr} – амплитуда обратного тока через диод, А;

t_{rr} – продолжительность импульса обратного тока, сек.

1.7.1.9 Суммарные потери диода FWD

$$P_D = P_{DS} + P_{DR} = 22,61 + 23,58 = 46,19 \text{ Вт} \quad (1.7.7)$$

i. Результирующие потери в гибридном модуле

$$P_T = P_Q + P_D = 75,83 + 46,19 = 122,02 \text{ Вт} \quad (1.7.8)$$

Найденные результирующие потери являются основой для теплового расчета инвертора, в ходе которого определяются тип и геометрия охладителя.

1.7.1.11 Тепловой расчет параметров охладителя инвертора

1.7.1.12 Максимально допустимое переходное сопротивление охладителя - окружающая среда, для гибридного модуля

$$R_{th(f-a)} = \frac{T_c - T_a}{P_T} - R_{th(c-f)} = \frac{373 - 321}{122,02} - 0,045$$

$$= 0,381 \text{ K/Wm} \quad (1.7.9)$$

где $T_c = 363 - 383 \text{ K}$ - температура теплопроводящей пластины;

$T_a = 318 - 323 \text{ K}$ - температура охлаждающего воздуха;

$R_{th(c-f)}$ - термическое переходное сопротивление корпус – поверхность теплопроводящей пластины модуля.

1.7.1.13 Температура кристалла IGBT

$$T_{ja} = T_c + P_Q R_{th(j-c)q} = 373 + 75,83 \cdot 0,085 = 379 \text{ K} \quad (1.7.10)$$

где $R_{th(j-c)q}$ - термическое переходное сопротивление кристалл – корпус для IGBT.

1.7.1.14 Температура кристалла обратного диода FWD

$$T_{jd} = T_c + P_D R_{th(j-c)r} = 373 + 46,19 \cdot 0,1 = 381 \text{ K} \quad (1.7.11)$$

где $R_{th(j-c)r}$ - термическое переходное сопротивление кристалл – корпус для IGBT.

Температура кристалла IGBT и FWD не превышает $398 \text{ K} = 125^\circ \text{C}$, теплоотдача охладителя достаточна.

1.7.2. Расчет и выбор вентиля диодного моста

1.7.2.1 Среднее выпрямленное напряжение

$$U_d = K_{cu} \cdot U_{л} = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В} \quad (1.7.12)$$

где $K_{cu} = 1,35$ - коэффициента схемы для номинальной нагрузки.

1.7.2.2 Максимальное значение среднего выпрямленного тока

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{3} \frac{I_{cmax}}{2} \cdot U_L \cdot \cos \varphi + nP_T}{U_d} = \quad (1.7.13)$$

$$= \frac{\sqrt{3} \frac{151}{2} \cdot 380 \cdot 0,90 + 3 \cdot 122,02}{513} = 124 \text{ A}$$

где n – количество пар IGBT /FWD.

1.7.2.3 Максимально рабочий ток диода

$$I_{vm} = K_{cc} \cdot I_{dm} = 1,045 \cdot 124 = 129,58 \text{ A} \quad (1.7.14)$$

где $K_{cc} = 1,045$ - коэффициент для мостовой трехфазной схемы при Γ – образном LC – фильтре, установленном на входе выпрямителя.

1.7.2.4 Максимально обратное напряжение диода

$$U_{vm} = K_{zn} \cdot \sqrt{2} \cdot U_L \cdot K_{cn} \cdot K_c + \Delta U_n = \quad (1.7.15)$$

$$= 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,35 \cdot 1,1 + 150 = 1065 \text{ B}$$

где $K_{zn} \geq 1,15$ - коэффициента запаса по напряжению;

$K_{cn} = 1,35$ - для мостовой схемы;

$K_c \geq 1,1$ - коэффициент допустимого повышения напряжения сети;

$\Delta U_n = 100 - 150 \text{ B}$ - запас на коммутационные выбросы напряжения в звене постоянного тока.

Выбираем трехфазный диодный мост в составе модуля CM150DX-24A с постоянным током 150A и максимальным обратным напряжением 1200 В.

1.7.2.5 Расчет потерь в выпрямителе

$$P_{DV} = m_V \cdot K_{cs} \cdot \Delta U_e \cdot \frac{I_{dm}}{k_1} = 6 \cdot 0,577 \cdot 1 \cdot \frac{124}{1,3} = 330,22 \text{ Bm} \quad (1.7.16)$$

где $K_{cs} = 0,577$ - для мостовой трехфазной схемы;

m_V - число полупроводниковых приборов модулей схем;

$\Delta U_6 \leq 1 B$ - падение напряжение в выпрямителе/

1.7.2.6 Тепловой расчет параметров охладителя выпрямителя

1.7.2.7 Максимально допустимое переходное сопротивление охладитель –
окружающая среда

$$R_{th(f-a)} = \frac{T_c - T_a}{P_{DV}} - R_{th(c-f)} = \frac{373 - 323}{330} - 0,045 = 0,106 K/Bm \quad (1.7.17)$$

1.7.2.8 Температура кристалла

$$T_{jDV} = T_c + \frac{P_{DV}}{n_D} R_{th(j-c)r} = 373 + \frac{330}{6} \cdot 0,18 = 383 K \quad (1.7.18)$$

где n_D - количество приборов в модуле.

Необходимое условие $T_{jDV} < 413 K$ выполняется.

1.7.2.9 Расчет параметра охладителя

1.7.2.10 Требуемое суммарное переходное тепловое сопротивление охладитель –
окружающая среда

$$R_{th(f-a)} = \frac{R_{th(f-a)выпн} \cdot R_{(f-a)инв}}{R_{th(f-a)выпн} + R_{th(f-a)инв}} = \frac{0,106 \cdot 0,381}{0,106 + 0,381} = 0,082 K Bm \quad (1.7.19)$$

1.7.2.11 Площадь охладителя

Определяется из размеров конструкции для обеспечения эффективного от-
вода тепла.

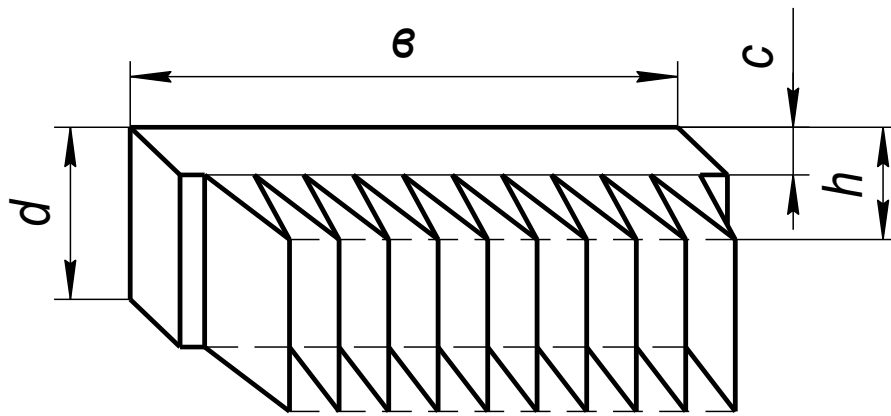


Рисунок 1.7.2 - Конструкция охладителя

$$A_{rad} = 2d b + h = 2 \cdot 0,2 \cdot 0,2 + 0,08 = 0,112 \text{ м}^2 \quad (1.7.20)$$

где $d = 0,2 \text{ м}$ – ширина охладителя;

$b = 0,2 \text{ м}$ - длина охладителя;

$h = 0,08 \text{ м}$ - высота охладителя вместе с ребрами.

1.7.2.12 Площадь охладителя, участвующая в конвекции

$$A_{conv} = 2d b + m(h - c) = 2 \cdot 0,2 \cdot 0,2 + 15(0,08 + 0,01) = 0,5 \text{ м}^2 \quad 1.7.21)$$

где $m = 15$ – число ребер охладителя;

$c = 0,01 \text{ м}$ - высота основания охладителя.

1.7.2.13 Переходное сопротивление излучению тепла

$$R_{Qrad} = \frac{\Delta T}{5,1 \cdot E \cdot A_{rad} \left(\frac{T_c}{100}^4 + \frac{T_a}{100}^4 \right)} = \quad (1.7.22)$$

$$\frac{50}{5,1 \cdot 0,8 \cdot 0,112 \left(\frac{373}{100}^4 + \frac{323}{100}^4 \right)} = 0,362$$

где $\Delta T = 50$;

$E = 0,8$.

1.7.2.14 Переходное температурное сопротивление теплопередачи конвекция

$$R_{Qconv} = \frac{1}{1,34 \cdot A_{conv} \cdot F_{rad}} \cdot \frac{d}{\Delta T}^{0,25} = \frac{1}{1,34 \cdot 0,5 \cdot 0,76} \cdot \frac{0,1}{50}^{0,25} = 0,751 \quad (1.7.23)$$

Где $F_{rad} = 0,76$ - коэффициент ухудшения теплоотдачи (конвекции).

1.7.2.15 Переходное температурное сопротивление охладителя – окружающая среда при естественном охлаждении

$$R_{th(f-a)} = \frac{R_{Qrad} \cdot R_{Qconv}}{R_{Qrad} + R_{Qconv}} = \frac{0,362 \cdot 0,751}{0,362 + 0,751} = 0,244 \text{ K Bm} \quad (1.7.24)$$

Полученное значение немного ниже требуемого суммарного значения, на основании этого можно сделать вывод, что охладитель с выбранными размерами обеспечит необходимый отвод тепла.

1.7.3 Расчет фильтра

1.7.3.1 Коэффициент пульсаций на входе фильтра

$$q_{1ex} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057 \quad (1.7.25)$$

Где $m = 6$ - пульсность схемы выпрямления.

1.7.3.2 Параметр сглаживания LC – фильтра

$$L_0 C_{01} = \frac{S+1}{2\pi m f^2} = \frac{7+1}{2\pi \cdot 6 \cdot 50^2} = 9,8 \cdot 10^{-6} \quad (1.7.26)$$

Где $S = 3 \dots 7$ – коэффициент сглаживания по первой гармонике.

1.7.3.3 Средний ток звена постоянного тока

$$I_d = \frac{I_{dm}}{k_1} = \frac{124}{1,3} = 95,3 \text{ A} \quad (1.7.27)$$

1.7.3.4 Индуктивность дросселя LC – фильтра

$$L_0 = 3L_{0min} = 3 \frac{0,013U_{л}}{2pfI_d} = 3 \frac{0,013 \cdot 380}{2p \cdot 50 \cdot 95,3} = 0,34 \cdot 10^{-3} \Gamma H \quad (1.7.28)$$

1.7.3.5 Амплитуда тока протекающего через конденсатор фильтра на частоте первой гармоника

$$I_{com} = q_{1вых} \cdot U_d \cdot 2p m f \cdot C_{01} = 0,057 \cdot 513 \cdot 2p \cdot 6 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 1,1 A \quad (1.7.29)$$

где $C_{01} = 20 \cdot 10^{-6} \Phi$ - емкость конденсаторов, необходимая для протекания реактивного тока нагрузки инвертора.

1.7.3.6 Расчет снаббера

Для ограничения напряжения коммутации требуется установка демпфирующей цепи (снаббера).

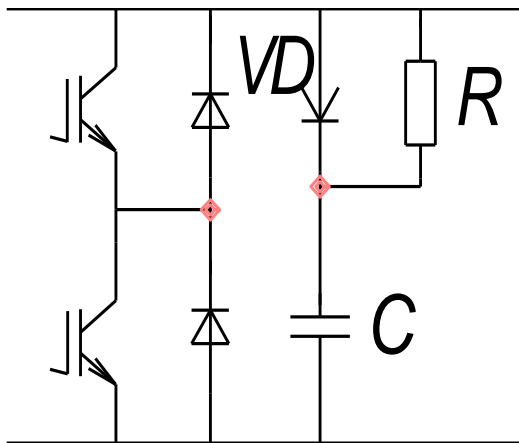


Рисунок 1.7.3 - Схема включения демпфирующей цепи (снаббера)

В качестве снаббера выбираем цепь представленную на рисунке 6. Емкость конденсатора C снаббера выбирается из расчета 1 мкф на 100 А.

Выбираем конденсатор $C = 0,12 \cdot 10^{-6} \Phi$.

4.3.7 Мощность резистора снаббера

$$P = 0,5 \cdot C \cdot \Delta U^2 \cdot f_{sw} = 0,5 \cdot 0,12 \cdot 10^{-6} \cdot 60^2 \cdot 5 \cdot 10^3 = 1,08 Bm \quad (1.7.30)$$

1.7.3.8 Сопротивление резистора, для обеспечения минимума колебаний тока

$$\text{коллектора IGBT} \quad R = 2 \frac{\overline{L_{sn}}}{C} = 2 \frac{\overline{10 \cdot 10^{-9}}}{0,12 \cdot 10^{-6}} = 0,57 \text{ Ом}$$

(1.7.31)

Где L_{sn} – индуктивность цепей снаббера, Гн (принимаяем $L_{sn} = 10 \text{ нГн}$).

Отношение максимума тока через диод снаббера к среднему (20-50):1. В качестве диода выбирается высокочастотный диод со временем восстановления запирающих свойств $t_{rr} = 0,3 \text{ мкс}$

2 Расчет механических характеристик при скалярном управлении

Параметры асинхронного двигателя 4А200L4У3:

Синхронная частота вращения	$n = 1500$ об/мин
Число пар полюсов	$p_n = 2$
Номинальная мощность	$P_H = 37000$ Вт
КПД	$\eta = 0,91$
Коэффициент мощности двигателя	$\cos \phi_H = 0,9$
Номинальное фазное напряжение	$U_{\phi H} = 220$ В
Число фаз обмотки статора	$m_1 = 3$
Динамический момент инерции ротора двигателя	$J = 0.368$ кг м ²
Кратность критического момента	$\lambda = 2,5$
Номинальное скольжение	$S_H = 0,017$

$x'_{\mu} = 4,4$; $x'_1 = 0,086$; $r'_1 = 0.013$; $x''_2 = 0,14$; $r''_2 = 0.018$ - параметры Г-образной схемы замещения.

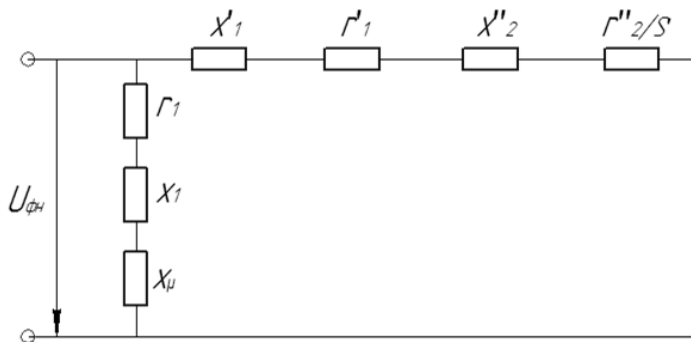


Рисунок 5.1 - Г-образная схема замещения асинхронного двигателя для номинального режима

Номинальный фазный ток статора:

$$I_{\phi H} = \frac{P_2}{m_1 \cdot U_{\phi H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{37000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,91} = 68,45 \text{ A} . \quad (5.1)$$

По формулам, приведенным в справочнике:

$$x_1 \cong \frac{2x'_1 \cdot x_\mu}{x_\mu + \sqrt{x_\mu^2 + 4x'_1 x_\mu}} = \frac{2 \cdot 0,086 \cdot 4,4}{4,4 + \sqrt{4,4^2 + 4 \cdot 0,086 \cdot 4,4}} = 0,084. \quad (5.2)$$

$$r_1 = r'_1 \cdot x_1 / x'_1 = 0,013 \cdot 0,084 / 0,086 = 0,01275. \quad (5.3)$$

Коэффициент перевода относительных единиц в физические:

$$c = \frac{U_{\phi H}}{I_{\phi H}} = \frac{220}{68,45} = 3,214. \quad (5.4)$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_s = r_1 \cdot c = 0,01275 \cdot 3,214 = 0,0409 \text{ Ом}. \quad (5.5)$$

Взаимная индуктивность фаз статора и ротора:

$$L_m = \frac{x_\mu \cdot c}{2\pi f} = \frac{4,4 \cdot 3,214}{314} = 0,04503 \text{ Гн}. \quad (5.6)$$

Параметры уточненной схемы замещения:

$$\begin{aligned} x'_1 &= c_1 \cdot x_1; & r'_1 &= c \cdot r_1; & r''_2 &= c_1 \cdot r'_2; & x''_2 &= c_1^2 \cdot x'_2, \\ c_1 &= \frac{x'_1}{x_1} = \frac{0,086}{0,084} = 1,023. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Полная индуктивность фазы статора:

$$L_s = \frac{\left(x_\mu + x'_1 / c_1 \right) c}{2\pi f} = \frac{\left(4,4 + 0,086 / 1,023 \right) 3,214}{314} = 0,0459 \text{ Гн} \quad (5.8)$$

Активное сопротивление обмотки ротора:

$$R_r = \frac{r''_2 \cdot c}{c_1^2} = \frac{0,018 \cdot 3,214}{1,023^2} = 0,0552 \text{ Ом} \quad (5.9)$$

Полная индуктивность фаз ротора:

$$L_r = \frac{(x_\mu + \frac{x_2''}{c_1^2}) \cdot c}{2\pi f} = \frac{(4,4 + \frac{0,14}{1,023^2}) \cdot 3,214}{314} = 0,0464 \text{ Гн.} \quad (5.10)$$

Коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора:

$$k_s = \frac{L_m}{L_s} = \frac{0,04503}{0,0459} = 0,9812 \quad (5.11)$$

$$k_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0,04503}{0,0464} = 0,9704 \quad (5.12)$$

Коэффициент рассеяния обмоток:

$$\sigma = 1 - k_s \cdot k_r = 1 - 0,9812 \cdot 0,9704 = 0,04777 \quad (5.13)$$

Переходные индуктивности статора и ротора:

$$L'_s = L_s \cdot \sigma = 0,0459 \cdot 0,04777 = 0,00219 \text{ Гн} \quad (5.14)$$

$$L'_r = L_r \cdot \sigma = 0,0464 \cdot 0,04777 = 0,00221 \text{ Гн} \quad (5.15)$$

Переходное активное сопротивление статора:

$$R'_s = R_s + k_r^2 \cdot R_r = 1,4 + 0,9764^2 \cdot 0,8316 = 2,1558 \text{ Ом} . \quad (5.16)$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура:

$$x_\mu = 2\pi \cdot L_m = 314 \cdot 0,04503 = 14,139 \text{ Ом} \quad (5.16)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора:

$$x'_{s\sigma} = 2\pi \cdot f (L_s - L_m) = 314 \cdot 0,00087 = 0,2733 \text{ Ом} \quad (5.17)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, приведенное к статору:

$$x'_{r\sigma} = 2\pi \cdot f (L_r - L_m) = 314 \cdot 0,00137 = 0,4302 \text{ Ом} \quad (5.18)$$

$$x'_K = x'_{s\sigma} + x'_{r\sigma} = 0,27 + 0,4302 = 0,7035 \text{ Ом.} \quad (5.19)$$

5.2 Общий подход расчета механических характеристик асинхронного двигателя при частотном скалярном управлении

Для определения момента двигателя и построения механических характеристик при частотном регулировании используют Г – образные упрощенные схемы замещения, в которых контур намагничивания вынесен на вход схемы без учета падения напряжения на активном сопротивлении и индуктивном сопротивлении рассеяния статора.

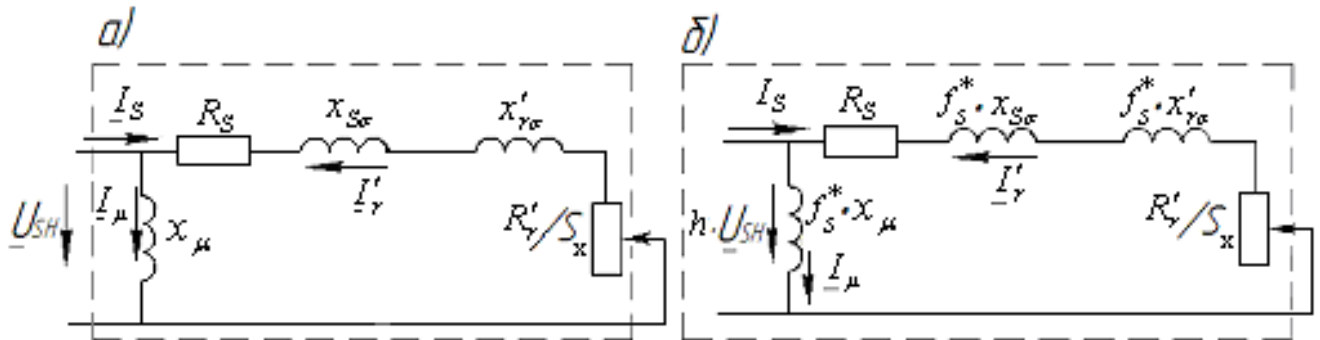


Рисунок 5.2 - Схемы замещения асинхронного двигателя при номинальных параметрах сети (а) и частотном управлении (б)

Для расчета характеристик приняты обозначения: $f_s^* = \frac{f_{SX}}{f_{SH}}$ - относи-

тельная частота питающего статор напряжения; $h = \frac{U_{SX}}{U_{SH}}$ - относительное

напряжение на статоре двигателя; $S_x = \frac{\omega_{SX} - \omega}{\omega_{SX}} = 1 - \frac{\omega}{\omega_{SH} \cdot f_s^*}$ - скольжение при

заданной частоте; $\beta = \frac{\omega_{SX} - \omega}{\omega_{SH}} = f_s^* \cdot \frac{\omega_{SX} - \omega}{\omega_{SX}} \cdot \frac{\omega_{SX}}{\omega_{SH}} = S_x \cdot f_s^*$ - абсолютное

скольжение, характеризующее наклон механической характеристики при изменении частоты питающего напряжения.

Используя схему замещения (рис.5.16,б) асинхронного двигателя при частотном регулировании, определяем ток фазы ротора:

$$I'_r = \frac{h \cdot U_{SH}}{\sqrt{R_S + R'_r / S_x + f_S^* \cdot x_k}}, \quad (5.20)$$

где $x_k = x_{S\sigma} + x'_{r\sigma}$ - индуктивное сопротивление рассеяния цепи короткого замыкания.

Электромагнитная мощность трехфазного двигателя при частотном регулировании определяется выражением

$$P_{\Delta M} = 3 \cdot I'^2_r \cdot R'_r / S_x = M_x \cdot \omega_{sx}. \quad (5.21)$$

Подставляя в выражение значение тока фазы ротора, получаем уравнение статической механической характеристики при частотном регулировании

$$M_x = \frac{3h^2 \cdot U_{SH}^2 \cdot R'_r / S_x}{f_S^* \cdot \omega_{SH} \left[R_S + R'_r / S_x + f_S^* \cdot x_k \right]} = \frac{3h^2 \cdot U_{SH}^2 \cdot R'_r \cdot S_x}{f_S^* \omega_{SH} \left[R_S \cdot S_x + R'_r + f_S^* \cdot x_k \cdot S_x \right]}. \quad (5.22)$$

Опрокидывающий момент механических характеристик

$$M_{KX} = \frac{3h^2 \cdot U_{SH}^2}{2 \cdot f_S^* \cdot \omega_{SH} \cdot \left[R_S \pm \sqrt{R_S^2 + f_S^* \cdot x_k} \right]}. \quad (5.23)$$

В приведенных выражениях знак плюс относится к двигательному режиму, а знак минус – к генераторному режиму работы.

Величина опрокидывающего момента двигателя определяется из (5.24)

$$\begin{aligned} f_S^* &= 1; \\ h &= 1. \end{aligned} \quad M_K = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot \left[0,0409 + \sqrt{0,0409^2 + 0,7135^2} \right]} = 530 \text{ Нм}. \quad (5.25)$$

Уравнение для расчета угловой скорости ротора двигателя

$$\omega = \omega_{SH} \cdot (-S_x) = 157 \cdot (-S_x) \quad (5.26)$$

Уравнение для расчета вращающего момента двигателя

$$M_x = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,055 \cdot h^2 \cdot S_x}{157 \cdot (0,0409 \cdot S_x + 0,055) + 0,7135 \cdot f_s^* \cdot S_x \cdot f_s^*} =$$

$$= \frac{50,87 \cdot h^2 \cdot S_x}{0,0409 \cdot S_x + 0,055 + 0,7135 \cdot f_s^* \cdot S_x \cdot f_s^*} \quad (5.27)$$

С использованием уравнений (1.36) и (1.34) в программе MATLAB составлен скрипт для расчета и построения семейства механических характеристик.

```
%Задание величины скольжения, относительной частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:1];f=1;h=1;
%Вычисление угловой скорости вращения ротора, принимаем Wzn=314 рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора w=y:
[y1]=157*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент M=x:
[x1]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.8 и h=0.8:
s=[0.001:0.005:1];f=0.8;h=0.8;[y2]=157*f*(1-s);
[x2]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.6 и h=0.6:
s=[0.001:0.005:1];f=0.6;h=0.6;[y3]=157*f*(1-s);
[x3]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.4 и h=0.4:
s=[0.001:0.005:1];f=0.4;h=0.4;[y4]=157*f*(1-s);
[x4]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.2 и h=0.2:
s=[0.001:0.005:1];f=0.2;h=0.2;[y5]=157*f*(1-s);
[x5]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Построение семейства механических характеристик:
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,x5,y5),grid
xlabel('x(Hm)'),ylabel('y(1/c)')
```

Рисунок 5.3 - Скрипт вычисления механических характеристик

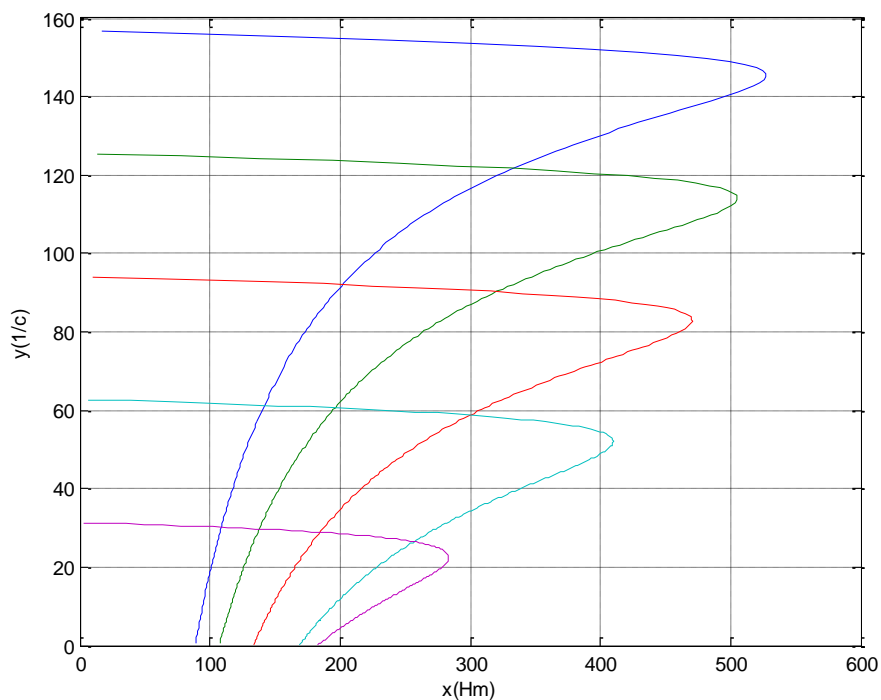


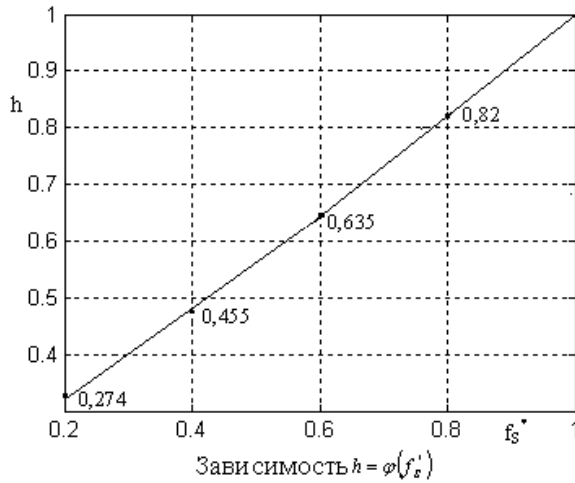
Рисунок 5.4 - Механические характеристики асинхронного двигателя

при частотном регулировании $U_s / f_s = const$

Из вышеописанных характеристик делаем вывод, что снижение частоты ведет к пропорциональному понижению критического момента и жесткости характеристик. Чтобы объяснить это явление, достаточно понимать, что из-за роста нагрузки на двигателе, сопротивление статорной переживает серьезное падение. Далее в связи с этим, происходит резкое снижение показателя магнитного потока и пропорциональному понижению электромагнитного момента. Для того, чтобы оставить опрокидывающий момент электродвигателя в постоянной величине, нужно уменьшить питающее напряжение статора, но на величину не больше уменьшения частоты.[16]

Давайте построим механические характеристики при постоянной величине критического момента, для этого вычислим величину напряжения статора электродвигателя, которая является относительной. Для этого мы воспользуемся выражением:

$$527 = \frac{3 \cdot h^2 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot f_s^* \cdot \left[0,13 + \sqrt{0,13^2 + f_s^* \cdot 0,735} \right]}. \quad (5.28)$$



В ходе расчета получаем: 1) при $f_s^* = 0.2$ величина $h = 0.276$; 2) при $f_s^* = 0.4$ величина $h = 0.455$; 3) при $f_s^* = 0.6$ величина $h = 0.635$; 4) при $f_s^* = 0.8$ величина $h = 0.82$. Приведенные результаты расчета позволяют построить функциональную зависимость $h = \varphi(f_s^*)$.

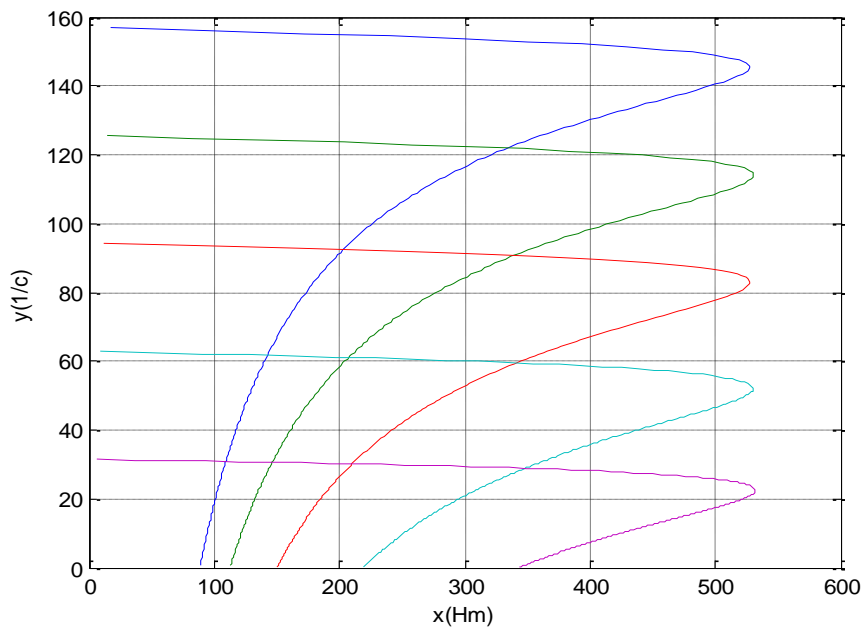


Рисунок 5.5 - Механические характеристики асинхронного двигателя с Ir компенсацией.

Как видно из механических характеристик (рис. 1.7.5.5) перегрузочная способность двигателя остается постоянной, а жесткость соответствует жесткости естественной характеристике закона частотного регулирования вида:

```

%Задание величины скольжения, относительной частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:1];f=1;h=1;
%Принимаем  $\omega_{нн}=157$  рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора  $\omega=y$ :
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при  $f=50$ Гц и  $U=220$  В :
[y1]=157*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент  $M=x$ :
[x1]=50.87*h.^2*s./((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при  $f=42,2$  Гц и  $U=158$  В:
;s=[0.001:0.005:1];f=0.85;h=0.72;
[y2]=157*f*(1-s)
[x2]=50.87*h.^2*s./((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при  $f=35$  Гц и  $U=110$  В:
s=[0.001:0.005:1];f=0.7;h=0.5;
[y3]=157*f*(1-s);
[x3]=50.87*h.^2*s./((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при  $f=25$  Гц и  $U=55$  В:
s=[0.001:0.005:1];f=0.5;h=0.25;
[y4]=157*f*(1-s);
[x4]=50.87*h.^2*s./((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Построение семейства механических характеристик:
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4),grid
xlabel('x(Hm)'),ylabel('y(1/c)')

```

Рисунок 5.6 - Скрипт вычисления механических характеристик при вентиляторной нагрузке

Питательный насос имеет вентиляторную нагрузку $M_c = c \cdot \omega^2$. При этом используется скалярный Рисунок 5.6 - Механические характеристики при пропорциональном частотном регулировании с $I \cdot r$ - компенсацией

$$\frac{U_s}{U_{SH}} = \frac{f_s^2}{f_{SH}^2} \quad \text{или} \quad \frac{U_s}{f_s^2} = const. \quad (5.29)$$

Для вычисления механических характеристик двигателя питательного насоса при вентиляторной нагрузке разработан специальный скрипт для частот $=50$ Гц, $=42,5$ Гц и $=35$ Гц. Коэффициент пропорциональности вычисляется по формуле

$$k = \frac{U_s}{f_{SH}^2} = \frac{220}{2500} = 0,088 \quad (5.29)$$

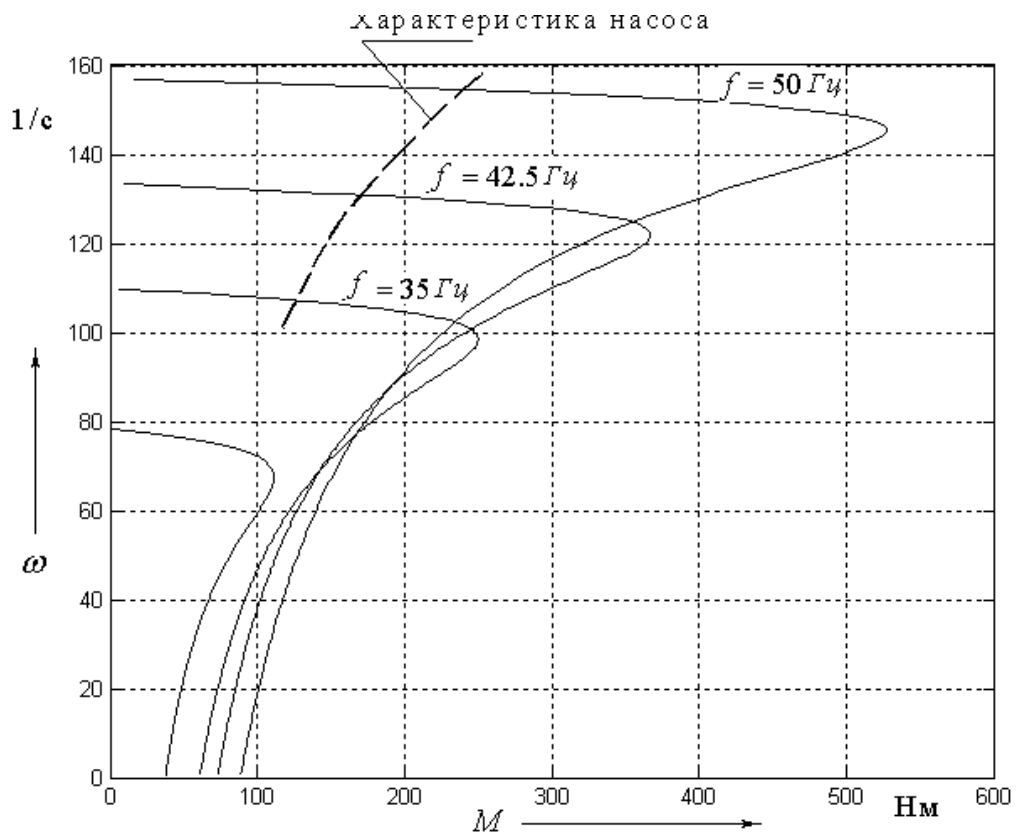


Рисунок 5.7 - Механические характеристики при вентиляторной нагрузке

2.2 Математическое моделирование системы электропривода

Составим математическую модель и уравнение асинхронного двигателя

Для того чтобы описать и математически смоделировать асинхронный электропривод, будем использовать обобщенные векторы величин асинхронного двигателя, запишем их в ортогональной системе координат α, β , неподвижной относительно статора

$$U_S = U_{S\alpha} + j \cdot U_{S\beta}; \quad i_S = i_{S\alpha} + j \cdot i_{S\beta}; \quad \psi_S = \psi_{S\alpha} + j \cdot \psi_{S\beta}; \quad \psi_r = \psi_{r\alpha} + j \cdot \psi_{r\beta}. \quad (6.1)$$

Система координат α, β оптимальна при анализе, особенно если в цепи статора машины имеется асимметрия, в частности, включены транзисторные ключи автономного инвертора, или присутствует короткое замыкание статорных цепей. Помимо этого, ось α совпадает с магнитной осью фазы реальной асинхронной машины. Из этого вытекает, что проекция тока $i_{S\alpha}$ будет равна реальному току двигателя.[29]

Запишем уравнения асинхронного двигателя, основываясь на системе уравнений. При этом полагаем, что $\omega_K = 0$ и $U_r = 0$.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{S\alpha}}{d\alpha} &= U_{S\alpha} - R_S \cdot i_{S\alpha}; & \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\alpha} &= -R_r \cdot i_{r\alpha} - p_{II} \cdot \omega \cdot \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{S\beta}}{d\alpha} &= U_{S\beta} - R_S \cdot i_{S\beta}; & \frac{d\psi_{r\beta}}{d\alpha} &= -R_r \cdot i_{r\beta} + p_{II} \cdot \omega \cdot \psi_{r\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{S\alpha} &= L_S \cdot i_{S\alpha} + L_m \cdot i_{r\alpha}; & \psi_{r\alpha} &= L_m \cdot i_{S\alpha} + L_r \cdot i_{r\alpha}; \\ \psi_{S\beta} &= L_S \cdot i_{S\beta} + L_m \cdot i_{r\beta}; & \psi_{r\beta} &= L_m \cdot i_{S\beta} + L_r \cdot i_{r\beta}. \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

Для удобства построения математической модели систему уравнений выражаем через токи:

$$\left. \begin{aligned} i_{S\alpha} &= \frac{1}{L'_S} \cdot \psi_{S\alpha} - \frac{k_r}{L'_S} \cdot \psi_{r\alpha}; & i_{r\alpha} &= -\frac{k_S}{L'_r} \cdot \psi_{S\alpha} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\alpha}; \\ i_{S\beta} &= \frac{1}{L'_S} \cdot \psi_{S\beta} - \frac{k_r}{L'_S} \cdot \psi_{r\beta}; & i_{r\beta} &= -\frac{k_S}{L'_r} \cdot \psi_{S\beta} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\beta}, \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

где $L'_S = \sigma \cdot L_S$, $L'_r = \sigma \cdot L_r$, $k_S = \frac{L_m}{L_S}$ и $k_r = \frac{L_m}{L_r}$ - соответственно коэффициенты связи статора и ротора;

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_S \cdot L_r} \right) = \left(1 - k_S \cdot k_r \right) - \text{коэффициент рассеяния.}$$

Выше мы описали выражение электромагнитного момента асинхронного двигателя, которое представляет собой векторное произведение пространственных векторов тока и потокосцеплений. Чтобы выбрать вид того или иного уравнения для электромагнитного момента, необходимо рассмотреть условия рационального построения структурной схемы математической модели.

$$M_{\text{э}} = \frac{3}{2} \cdot p_{\Pi} \cdot \left(\psi_{S\alpha} \cdot i_{S\beta} - \psi_{S\beta} \cdot i_{S\alpha} \right) \quad (6.5)$$

Уравнение движения двигателя в одномассовой системе, имеет вид:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot \left(M_{\text{э}} - M_c \right) \quad (6.6)$$

где J_{Σ} - приведенный суммарный момент инерции ротора и механизма;

M_c - статический момент нагрузки.

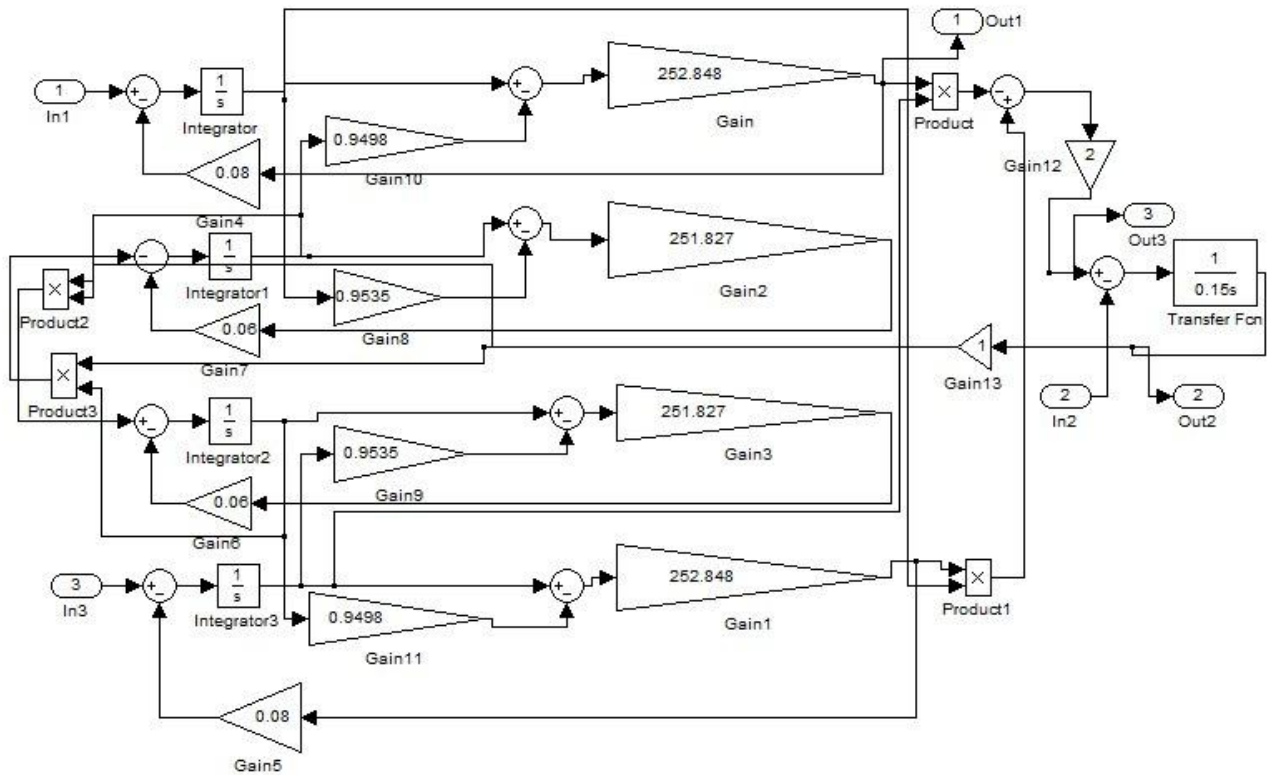


Рисунок 6.1 - Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат (α, β) .

Математическая модель асинхронного двигателя построена по уравнениям в системе координат (α, β) и приведена на рисунке 6.1.

В качестве входных напряжений $U_{s\alpha}$ и $U_{s\beta}$ подаются сигналы от источников SineWave:

$$\begin{aligned}
 U_{s\alpha} &= U_m \cdot \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cdot \cos \cdot \omega_0 t; \\
 U_{s\beta} &= U_m \cdot \sin \cdot \omega_0 t,
 \end{aligned}
 \tag{6.7}$$

где $U_m = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В}$ - амплитуда входного напряжения; $\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$ - круговая частота электромагнитного поля статора.

В окне настройки блока SineWave необходимо задать амплитуду - 310, круговую частоту - 157rad/sec и фазу колебаний - 1,57 rad, а в окне настройки блока SineWave 1 задать амплитуду - 310, круговую частоту - 157rad/sec и фазу

колебаний – 0 rad. Окно настроек SineWave активизируется после переноса источника сигнала в рабочую область моделирования. Чтобы обеспечить питание статорных цепей электродвигателя переменным напряжением, мы используем систему блоков SineWave.

А блок Stepсоздает сопротивление нагрузки на валу электродвигателя.

Чтобы изучить работу асинхронного электропривода с применением пропорционального закона скалярного частотного управления, нам нужно питать статорные обмотки преобразователя частоты (модель IGBT - Inverter). Для создания модели IGBT–Inverter, будем применять модель гармонических колебаний регулируемой частоты, которая является моделью идеального преобразователя частоты.[23]

Схема модели приведена на рисунке 6.1 в указанной схеме изменение ω_0 и U_m во времени, т. е. интенсивность частотного пуска, задается при помощи задатчика интенсивности, в который входят блоки Gain, Integrator и Saturation.

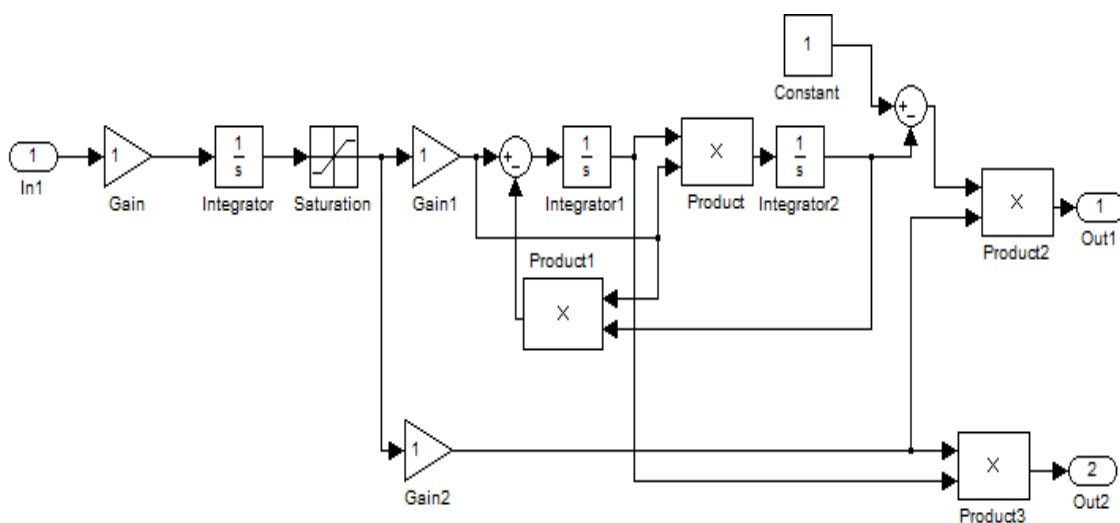


Рисунок 6.2 - Схема модели IGBT-инвертор

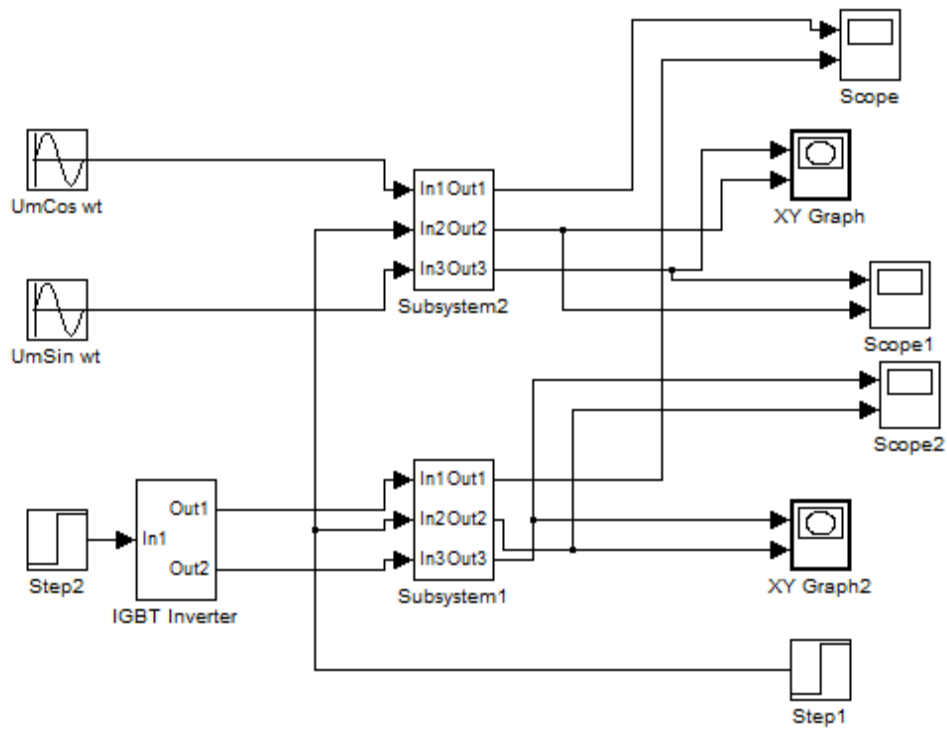


Рисунок 6.3 - Схема частотного пуска асинхронного электропривода

В состав схемы, описанной на рисунке 6.1, входит две части, благодаря этому становится возможным проводить исследования для сравнения и анализ электромеханических процессов двух электроприводов.

2.3 Динамические характеристики системы

На рисунке 7.1, приведены сравнительные осциллограммы электромагнитного момента $M_{\text{э}}$ и угловой скорости ротора ω асинхронного двигателя при прямом пуске и частотном пуске. При частотном пуске использовался пропорциональный закон частотного управления $U_s / f_s = \text{const}$.

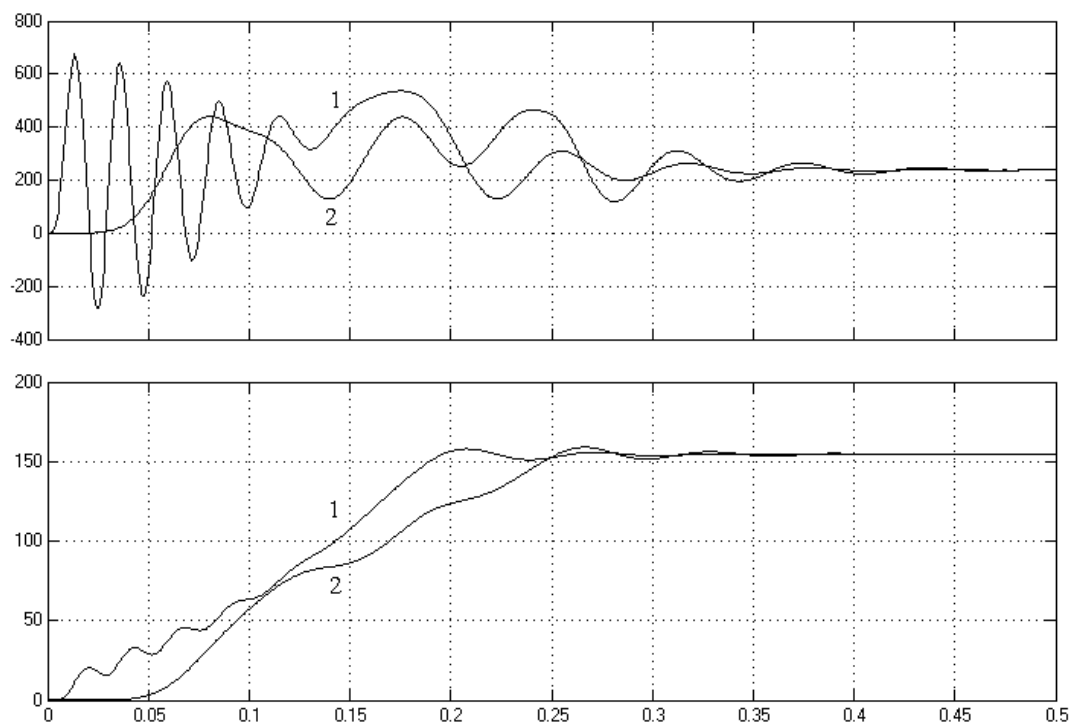


Рисунок 7.1 – сравнительные осциллограммы при прямом и частотном пусках двигателя

Сравнение динамических характеристик $\omega = f(M)$ показывает, что частотное управление пуском позволяет приблизить характеристику к кривой, обеспечивающей пуск двигателя с более постоянным моментом по сравнению с характеристикой прямого пуска асинхронного двигателя. [28]

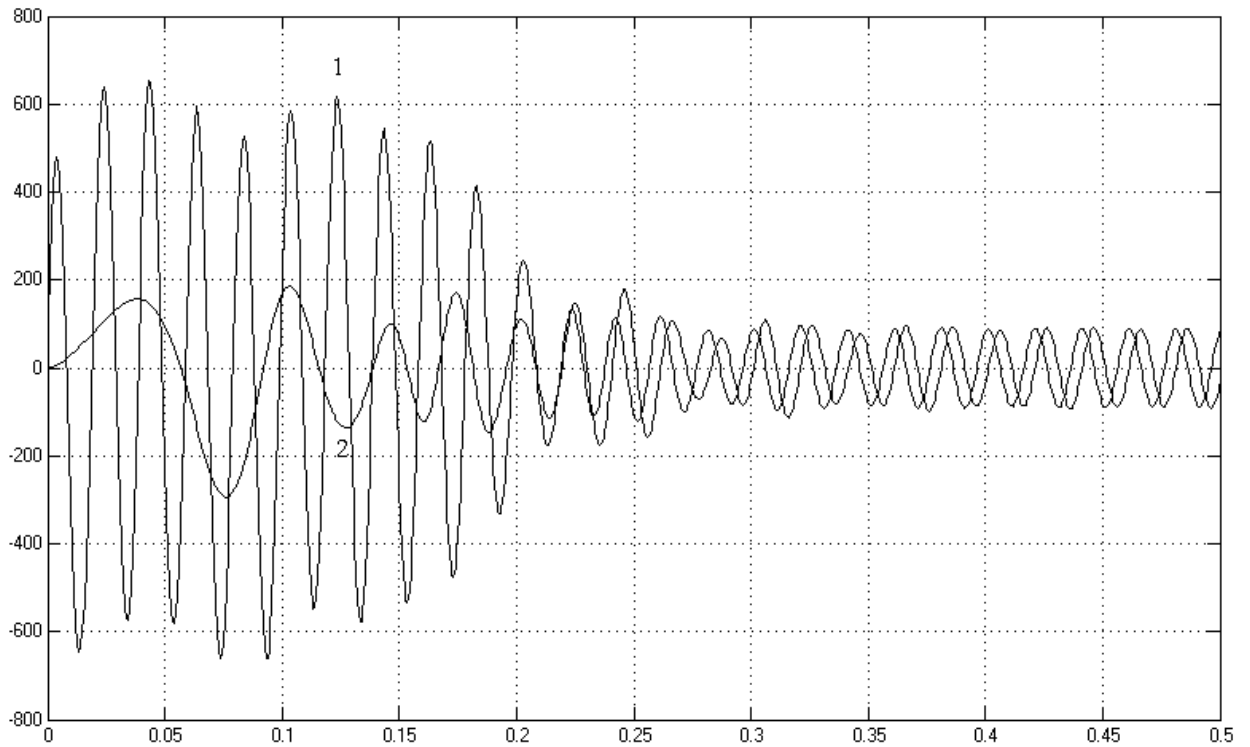


Рисунок 7.2 – сравнительные осциллограммы фазного тока статорной обмотки при прямом и частотном пусках двигателя

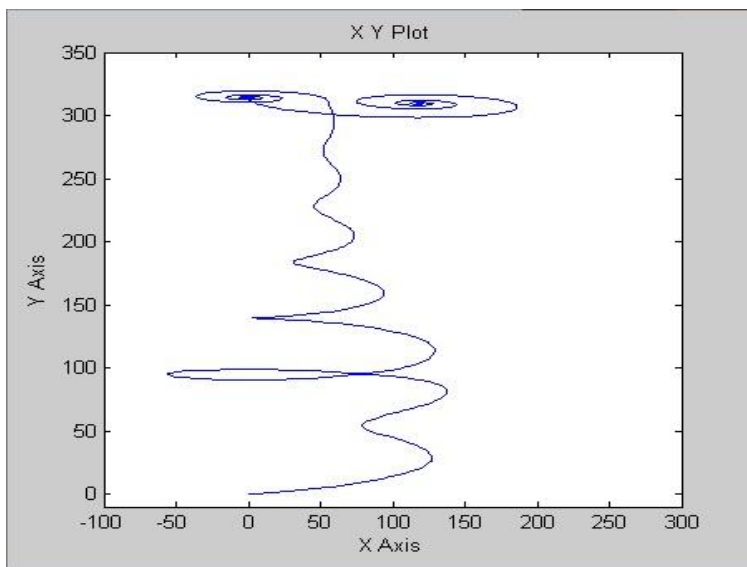


Рисунок 7.3 –Динамическая механическая характеристика при частотном пуске асинхронного двигателя

Как видно из приведенных осциллограмм (рис 7.2 и 7.3) при частотном пуске асинхронного двигателя амплитуда пускового тока в фазе А, снижается в 3.5

раза, что предотвращает механические удары при пуске насоса и позволяет настроить аппаратуру пуска.

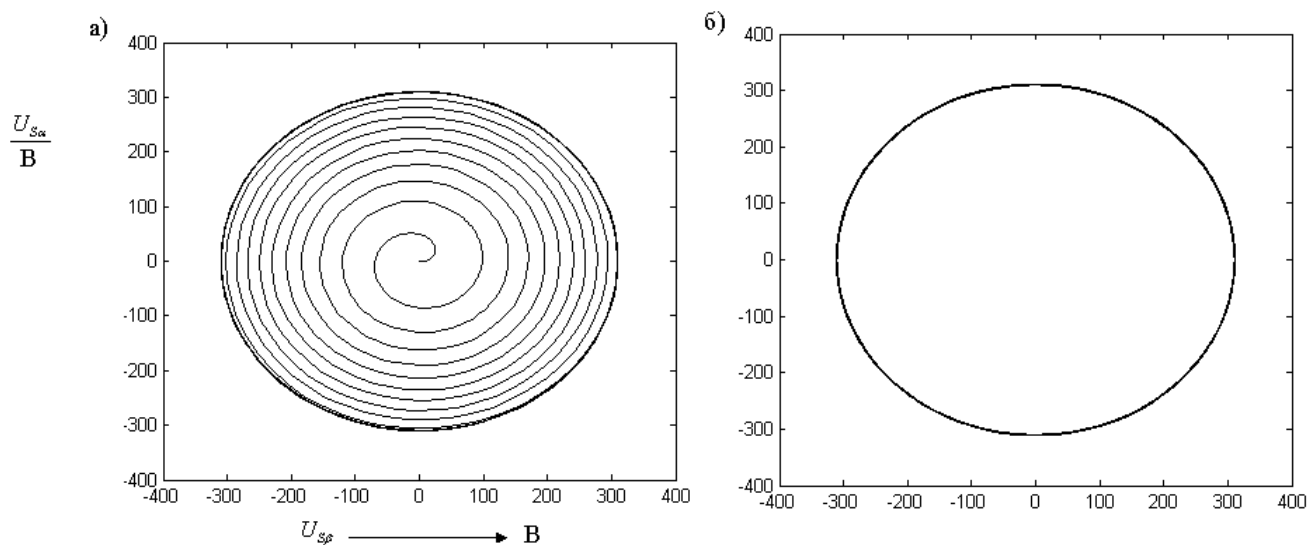


Рисунок 7.4 - Годографы вектора статорного напряжения: *а* – при пропорциональном частотном пуске; *б* – при прямом пуске

При сравнении годографов вектора статорного напряжения можно отметить, что годограф (рисунке 2) имеет вид спирали, постепенно переходящей в окружность. Это свидетельствует о том, частота и амплитуда напряжения на статоре двигателя изменяются пропорционально в процессе пуска.

Годографы вектора статорного напряжения двигателя получены при использовании блока *xyGraph*, у которого к входу *x* подключено напряжение $U_{s\alpha}$, а к входу *y* – напряжение $U_{s\beta}$. При этом в диалоговом окне блока на полях *x – min*, *x – max*, *y – min* и *y – max* должны быть введены значения 310.

3 Технология изготовления ротора асинхронного двигателя и техника безопасности при эксплуатации

3.1.1 Способы изготовления короткозамкнутых роторов асинхронного двигателя

8.1.1 Заливка роторов при использовании статического способа

Рассмотрим статический способ заливки, который как правило очень широко применяется на различных мелкосерийных производствах. Так как сам процесс заливки и оборудование достаточно просты с технической точки зрения, то высокая трудоемкость процесса окупается достаточно быстро. Так же большую роль в выгоде применения данного типа заливки играет то, что для работы нет нужды в больших рабочих площадях оборудования. Такой метод заливки используется как правило для роторов диаметром 350-900 мм.

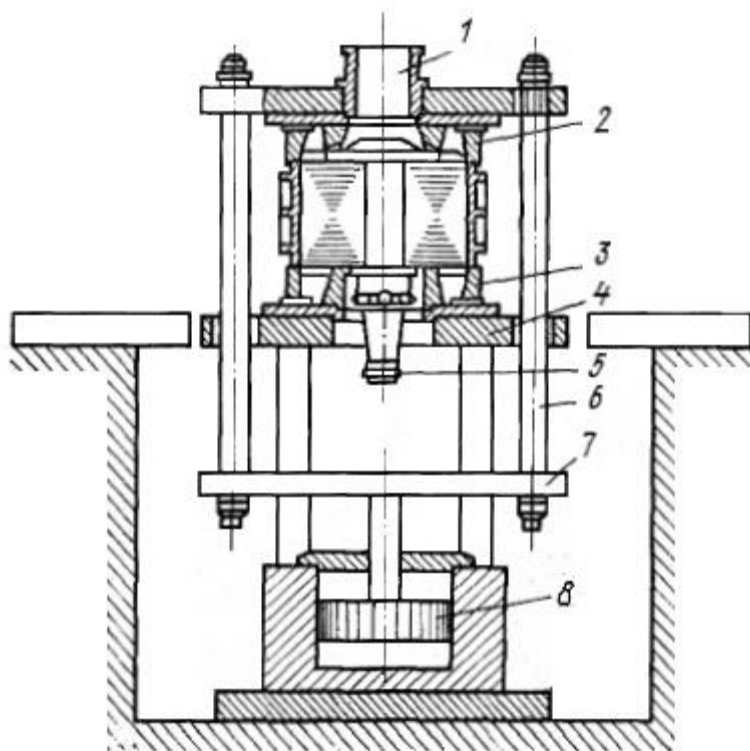


Рисунок 8.1 – Установки для заливки роторов статическим способом: 1-литниковая чаша; 2-верхняя часть кокиля; 3-нижняя часть кокиля; 4-основание; 5-нижняя часть оправки; 6-механизм движения тяг; 7-форма; 8-поршень

Так как давление в данном способе заливки сильно зависит от высоты литниковой системы, то его часто бывает недостаточно для поддержания высокого качества изделий производства. В процессе работы при таком способе заливки выявляется большое количество дефектов на изделиях. Основными из них являются некачественным спаи и недоливы в изделии, так же снижается размер сечения стержней по сравнению с пазами. Основной причиной разрывов стержней и спаев является оксидная пленка, появляющаяся на алюминии, образование которой обуславливается низким давлением. Из вышесказанного можно сделать вывод что данный способ заливки является низкоэффективным и ведет к низкому качеству отливаемых изделий.

8.1.2 Вибрационный и центробежный способы заливки

В сравнении со статическим способом заливки, эти способы дают возможность производить изделия гораздо более качественной заливки. Из названия становится ясным, что колебательные движения в кокиле во время кристаллизации металла и его заливке являются основной особенностью вибрационного способа заливки. Такие механические движения поступают самыми различными способами, не будем их рассматривать по соображениям целесообразности полемики в данной ситуации. Вибрация позволяет избавиться от большого количества браков и низкокачественных изделий. Благодаря вибрациям в кокиле, из изделия выходят газы и неметаллические соединения. Так же благодаря вибрации металл изделия получается более однородным, а его структура более мелкой. Широкое применение такого способа осуществляется как правило при заливке роторов с низким сечением пазов.

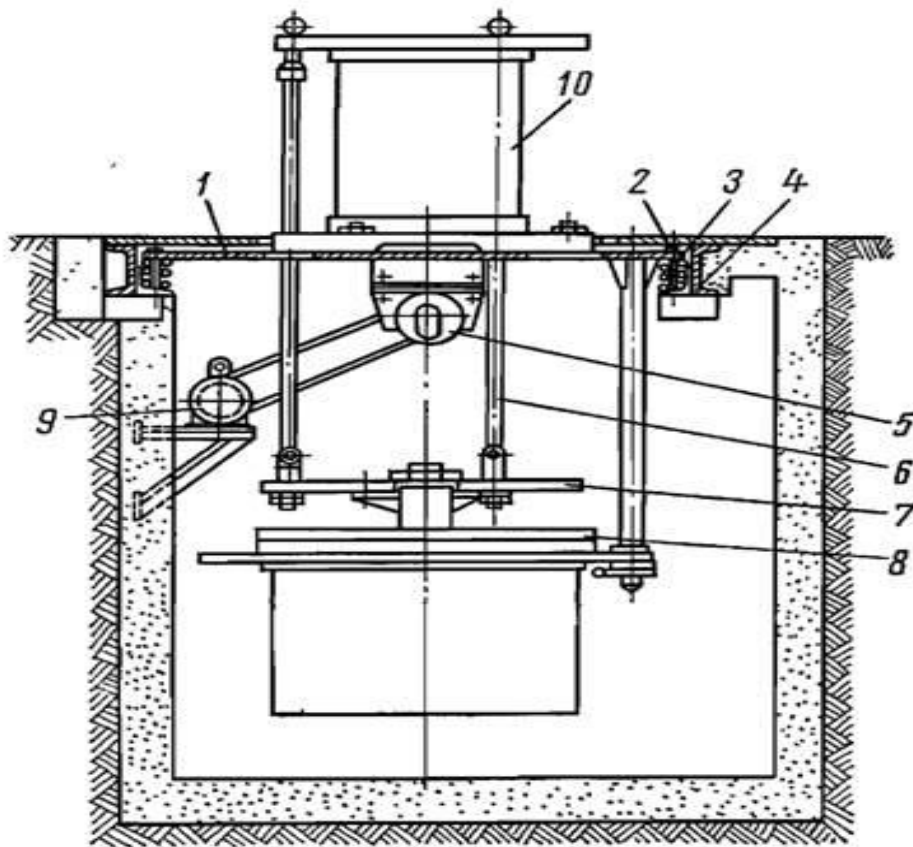


Рисунок 8.2 - Установка для вибрационной заливки роторов: 1-стол; 2-технологическая оправка; 3-литниковая чаша; 4-верхняя половина формы; 5-разъемная рубашка; 6-сердечник; 7-нижняя часть формы; 8-тяга; 9-подвижная плита; 10-поршень

Рассмотрим нюансы и особенности следующего способа заливки. Основным отличием центробежного способа является процесс заливки. Заливка центробежным способом происходит путем вращения кокиля вокруг оси, с частотой вращения около 140 оборотов в минуту. В это время через центральное отверстие подается жидкий алюминий.

8.1.3 Заливка роторов под низким давлением

Выше мы рассмотрели способы изготовления роторов, главной особенностью которых является заливка сверху в низ, по этой причине в форме постоянно образуются газовые раковины, что приводит к серьезным дефектам изделий и их низкого качества. Отличительной чертой заливки ротора под низким давлением является то, что расплавленный металл вливается в форму

именно снизу, напрямую из печи, при этом удаляя воздух из формы. Такой способ не образует окислов.

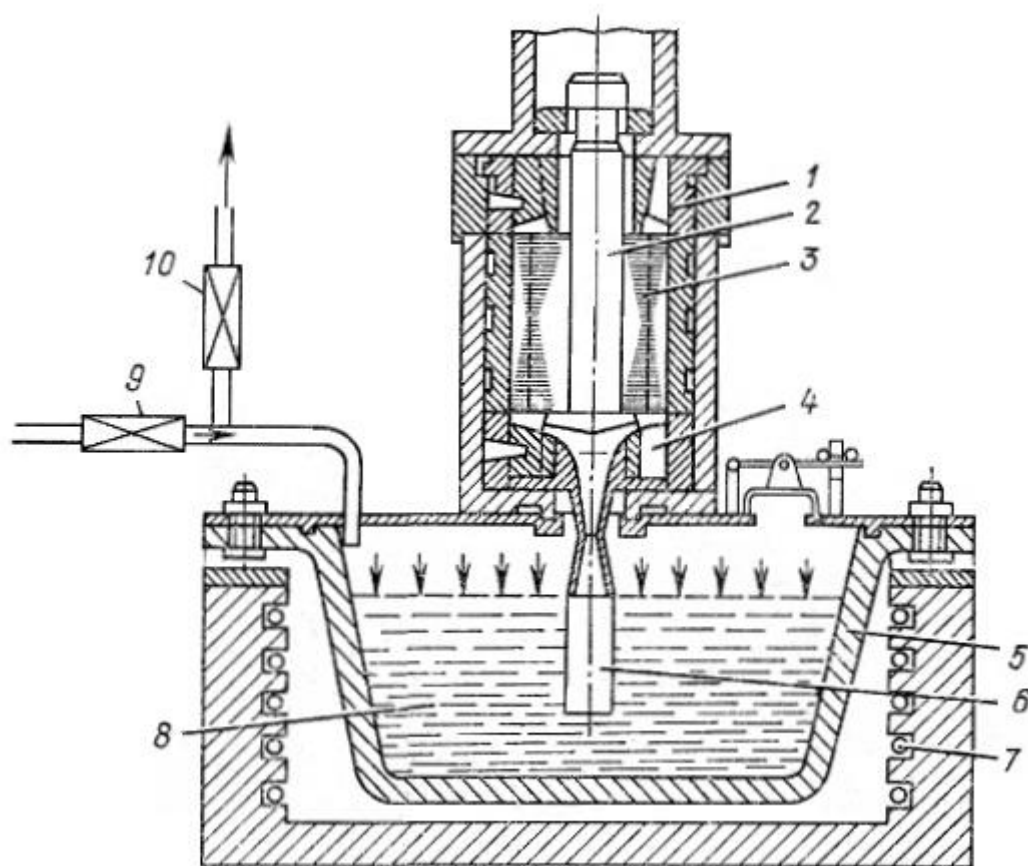


Рисунок 8.3 – Схема заливки роторов под низким давлением: 2-подвижная часть формы; 3-пакет ротора; 4-неподвижная часть формы; 5-тигель; 6-металлопровод; 7-печь; 8-воздухопровод

8.1.4 Заливка роторов под высоким давлением

Исключительной особенностью этого способа является то, что такой тип заливки роторов возможен только при использовании специального литейного оборудования. Главной отличительной чертой этого метода является то, что прежде чем залить металл в форму, не греют сердечники. Это объясняется тем что металл под высоким давлением моментально заполняет форму, при этом не успевая остыть. Это приводит к большой оптимизации технологического цикла, что делает его более эффективным и простым по сравнению с другими способами заливки. При данном способе заливки ротора, возможно, как механиз-

рованное производство, так и полностью автоматизированное. Что делает этот способ заливки самым эффективным с точки зрения целесообразности и стоимости производства и оборудования.

3.2 Безопасность и экологичность электродвигателя с преобразователем частоты

Самым главным и основополагающим аспектом любого производства является его безопасность. Охрана труда всегда является главным критерием для серьезного и законопослушного работодателя, особенно при внедрении нового оборудования или процесса на производстве.

Охрана труда на производстве регламентирует множество различных вопросов. Главная задача этой сферы заключается в мониторинге условий работы сотрудников, и обеспечение безопасных и комфортных условий труда. При этом самое главное это обеспечить эффективность и безопасность на одном уровне. Так же специалист по охране труда обязан следить и влиять на количества профессиональных заболеваний и травматизм полученных во время производства.

При различных рабочих действиях, направленных на изготовление, строительство или вводе в работу каких-либо новых устройств или механизмов, обязательно необходимо разработать план действия по обеспечению безопасности труда на производстве. Особенно это касается различных новых объектов и механизмов, вводимых в эксплуатацию впервые.

3.2.1 Описание оборудования и рабочего места сотрудника

Оператор электропривода находится фронтально к питательному насосу К150-125-315, который расположен на базе асинхронного двигателя, регулируемого преобразователем частоты. Слева от оператора регулируемого электропривода находятся внешние окна производственного помещения.

8.2.2 Определение особо опасных и вредных факторов на промышленном производстве

На каждом производстве есть специалист по охране труда, который проводит различные мероприятия по обеспечению безопасных условий труда у ра-

ботников. Следит за тем чтобы сотрудники во время различных технических процессов были защищены от различных опасных для здоровья и вредных производственных факторов, которые всегда возникают во время работы. Рассмотрим детально различные опасные и вредные факторы асинхронного электропривода с частотным регулированием на базе питательного насоса:

- относительно высокое напряжение в цепи и источнике, которые питает оборудование.

- высокий уровень шума, выделяемый во время работы насоса на базе асинхронного двигателя (уровень шума варьируется от 50 до 95Дб);

- низкая освещенность рабочего помещения и рабочей зоны.

В таблице 8.2 описаны вредные и опасные факторы производства, влияющие на сотрудников. Различаются по виду работ и операций.

Таблица 8.2–вредные и опасные факторы на промышленном производстве

№ п/п	Вредные и опасные факторы на промышленном производстве	Виды оборудования, процессов и операций, производимых на них
1	относительно высокое напряжение в цепи и источнике, которые питает оборудование.	Работа на оборудовании под напряжением и подключение электроизмерительных приборов.
2	Высокий уровень шума	Работа различных механизмов, таких как насосы, двигатели, вентиляторы и внешняя среда
3	Низкий показатель освещенности рабочего помещения	Диспетчеризация показаний, снятие и фиксация измерительных приборов и оборудования.

8.2.3 Виды воздействий различных промышленных факторов на организм работников

Существуют различные виды негативно складывающихся на организме сотрудника факторы. В основном широко распространенным фактором является шум. Что такое шум с научной точки зрения? Это абсолютно беспорядочный набор самых разных по частоте звуков. Шум очень негативно сказывается на внимательности и концентрации работника, что во время технологического процесса очень важно. Шумовые колебания способны создавать большую нагрузку на нервную систему человека. Так же этот фактор затрагивает сердечно – сосудистую и дыхательную системы. В связи с этим, очень важно осуществление мер по уменьшению уровня шума в рабочих зонах и помещениях. Существуют так называемые профессиональные заболевания, связанные с воздействием шума на организм, такие как например тугоухость и шумовая болезнь.

Низкая освещенность рабочего помещения или вовсе отсутствие качественного освещения, так же, как и излишне повышенное яркое освещение, способны вызвать стабильное зрительное напряжение. При долгом воздействии на организм повышенного или пониженного освещения наблюдается падение зрения и уровня концентрации.

8.2.4 Мероприятия, направленные на создание безопасных условий труда, во время сборки и монтажа преобразователя частоты на базе асинхронного двигателя

Во время наладки и монтажа преобразователя частоты на базе асинхронного двигателя может появиться опасность. Так как при работе работник может случайно дотронуться до находящихся под напряжением частей по которым течет ток. Главным образом опасность этого фактора зависит от величины электрического тока и напряжения, которое проводится через механизм или устройство, на котором проводятся технические работы.

Электропривод питается от сети с тремя фазами и частотой 50 Гц. Напряжение на источнике составляет 380 В.

Разобрав различные случаи поражения током сотрудников во время работы, можно прийти к выводу, что одного осуществления организационных мер недостаточно для безопасности. На производстве обязательны технические меры, для защиты, например, защитное заземление, или обязательное отключение стенда с неисправной проводкой или отдельными элементами.

Основным защитным средством при работе с механизмами и устройствами питающихся от трехфазной сети переменного тока с напряжением до 1000 В, является заземление. В таком случае защита работников происходит благодаря защитному заземлению. Выглядит это очень просто. Металлические части стенда или механизма до которых имеет доступ человек, специально соединяются с помощью электрода с внешней средой. Стоит отметить что существует несколько видов заземления, основными являются горизонтальное по площади, и вертикальное в глубину. Заземление в глубину выводит ток в землю, объем зависит от глубины, на которой находится стальной проводник заземления. Горизонтальное заземление зависит от площади, на которой построен контур заземления. Чем больше площадь заземляющего контура, тем большие показатели тока уходят от оборудования, защищая работника.

Для горизонтального заземления технического элемента как правило используют сталь с сечением от 4×15 мм. Так же для горизонтального заземления используется сталь круглого сечения, с диаметром от 7 мм.

При этом внешнее сопротивление заземления в электроустановках напряжением до 1 кВт, обязательно должно превышать 5 Ом.

Но стоит отметить что качественная организация работ на электроустановках имеет самое значительное влияние на снижение электротравматизма при работах на производстве. Качественная организация работ на действующих, подключенных к источнику питания электроустановках, при монтаже и различных работах, способна спасти жизни работников и избежать серьезных травм и аварий. В первую очередь, необходимо правильно выполнить ряд мероприятий по организации и технических процессов, прописанных в «Межотраслевые правила по охране труда (Правила безопасности при эксплуатации

электроустановок) (ПОТ Р М-016-2001 РД 153-34.0-03.150-00). Это в первую очередь установка ограждения, для защиты от напряжения и удара током. Снабжение всех работников, имеющих доступ к работе с напряжением диэлектрическими перчатками, резиновым ковриком. Так же важно чтобы все работы под напряжением выполнялись двумя и более работниками в целях безопасности, с применением инструмента с изолированными рукоятками.

Существуют определенные требования, по которым работники обслуживающие различные виды электроустановок должны подходить под ряд требований. Запрещено работать на электроустановках лицам, которым нет 18и лет и лицам у которых имеются какие-либо серьезные заболевания или травмы, которые могут негативно повлиять на работу. Так же для допуска работ на электроустановках сотрудникам обязательны к прохождению курсы по теории электротехники и электробезопасности. Практический вводный курс тоже обязателен для прохождения перед допуском к работе. После чего работники проходят тестирование на знание пройденного материала, по результатам которого они получают разрешение приступить к работам или нет. Помимо этого, сотрудники должны иметь определенное удостоверение, с уровнем допуска не ниже третьего разряда. Такие удостоверения выдаются в зависимости от отработанного времени в должности, после экзаменов на знания по электротехнике и электробезопасности.

8.2.5 Пожарная безопасность на рабочем участке работника

В каждом рабочем помещении на участке обязательно должна быть информация о номерах телефонов пожарной службы и диспетчера пожарной охраны. Очень важно присутствие на видном месте плана эвакуации при пожаре, который разрабатывается ответственным за пожарную безопасность сотрудником. Должно быть установлено и размещено расписание уборки помещения, должен быть разработан план по обесточиванию оборудования, при опасных чрезвычайных ситуациях (пожар, угрозы терроризма, аварий и т.д.). В обязательном порядке должны быть составлены методические указания по различным действиям персонала различных ситуациях. Весь персонал должен

быть ознакомлен с этими указаниями. По закону обязательно наличие систем противопожарной безопасности, системы оповещения и автоматического тушения. Датчики дыма и разбрызгиватели.

Главным критерием безопасности все же остается соблюдение работниками мер предосторожности. Все сотрудники предприятия обязаны соблюдать требования пожарной безопасности, быть аккуратными при работе с легковоспламеняющимися жидкостями и при различных работах, которые могут повлечь за собой опасную ситуацию, в том числе пожар. При обнаружении очага возгорания или задымления, необходимо как можно быстрее сообщить об этом в соответствующие органы и предупредить остальных сотрудников.

При обнаружении очага возгорания или задымления, а также при обнаружении открытого огня сотрудник немедленно обязан сообщить об этом по телефону в пожарную охрану. Так же при возможности должен предпринять какие-либо действия по скорейшему тушению очага возгорания, эвакуации людей или спасения каких-либо ценностей.

Ответственный сотрудник по прибытию на место происшествия обязан продублировать сообщение о возникновении пожара диспетчеру пожарной части, подтвердить или опровергнуть информацию о возникновении чрезвычайной ситуации на объекте. При наличии угрозы для жизни людей, обязан незамедлительно организовать мероприятия и принять меры по их спасению. Так же сотрудник обязан отключить от источника питания все электрические установки и механические элементы. Изолировать всех сотрудников подальше от источника пожара, ограничить доступ к опасной зоне всех лиц, не участвующих в ликвидации очага возгорания. Первичными задачами является спасение людей, вторичными являются задачи по эвакуации различных ценностей. Так же при встрече сотрудников пожарной безопасности необходимо оказать помощь в выборе эффективного способа тушения и кратчайшего пути для подъезда или подхода к очагу возгорания. Рабочее место каждого сотрудника должно быть оборудовано огнетушителями и средствами личной защиты.

На сегодняшний день практически нереально предположить жизнь без электропривода. Большинство электродвигателей приводят в движение огромное число различных машин и механизмов, начиная от примитивных и заканчивая, сложными машинами такими как например насосы. К примеру, в простых механизмах основную функцию которую выполняет электропривод — это остановка и пуск, реже изменяет направление вращения вала. В сложных же механизмах в добавок к вышеперечисленным функциям добавляется регулирование скорости вращения вала, а также увеличение или понижение производительности двигателя. На сегодняшний день данную проблему решают самыми различными способами, чаще всего используют такие устройства как регуляторы электронные, механические вариаторы и конечно же муфты скольжения, такие способы отлично справляются с регулированием скорости вращения вала, но конечно же имеют свои минусы, плюсы и нюансы монтажа. Главным недостатком двух первых типов устройств - применение механически изнашиваемых элементов, которые делают сложной эксплуатацию и обслуживание электроприводов, главным образом в загрязненных и взрывоопасных средах, а также необходимость сборки регулирующего устройства в один агрегат вместе с двигателем и нагрузкой. Устройства электронного регулирования не имеют таких недостатков и в связи с этим их применяют все более и более широко во всех технических сферах. Электропривод состоит из основных элементов: электрический двигатель, преобразователь частоты (ПЧ) и система электронного управления. В промышленной сфере и для бытовых процессов используются двигатели переменного и постоянного тока. Из-за разных факторов, обусловленных в первую очередь ценой, для регулирования скорости вращения чаще использовались двигатели постоянного тока. ПЧ в этом случае регулировал исключительно напряжение, отличался простотой использования и был относительно дешев. Если рассматривать асинхронные двигатели, то они очень надежные, распространенные и имеют сравнительно невысокую стоимость. У них хорошие характеристики эксплуатации и качества для работы, но устройства для регулирования скорости их вращения стоили достаточно долгое время

слишком дорого и не имели необходимые качества для того чтобы их можно было широко внедрить в техническую индустрию, связано это с высокой сложностью системы электронного регулирования частоты для питающего напряжения. Когда же развитие электротехники в мире поднялось на высокий уровень в связи со стремительным развитием, появились недорогие преобразователи частоты, и тогда стало возможным более масштабно использовать асинхронные двигатели как способ регулирования скорости вращения вала. Такой бурный рост в сфере ПЧ под асинхронные двигатели в первую очередь стал реальным благодаря появлению новых силовых модулей IGBT, (биполярный транзистор с изолированным затвором). Такие силовые модули рассчитаны на нагрузки до нескольких килоампер, и на напряжение до нескольких киловольт. Они имеют частоту коммутации 30 кГц и больше. Хотелось бы напомнить, что асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором – это устройство которое практически во всех технических сферах применяется как основной тип электродвигателя, это поможет больше понять принципы, создающие основу систем электротехники. Так же хотелось бы добавить, что практически более 70% суммарно потребляемой электроэнергии в мире остается за асинхронными двигателями, которые требуют много энергии для приведения их в работу. Что составляет слишком много для нынешних цен на электроэнергию, поэтому этот вопрос очень остро встает во всех сферах промышленности. У данного двигателя имеется короткозамкнутый ротор, который является подвижным, и статор с обмотками, который образует полюса. Чтобы создать магнитное поле, которое вращается вокруг статора необходимо приложить трехфазное напряжение, подаваемое от источника на электродвигатель, к обмоткам статора и сдвинуть его на 130 градусов. Такое магнитное поле способствует появлению токов в роторе, они с свою очередь создают поле ротора, вращающееся в другую сторону относительно поля статора. Таким образом вал двигателя приходит в движение, когда на него подаются механические силы и вращающий момент, образованные магнитным полем. Так же существует такое понятие как скольжение, оно заключается в разнице скорости вращения статорного поля и скорости вращения

ротора, первое должно быть больше. Есть несколько способов чтобы регулировать скорость вращения вала электродвигателя, основным используемым способом является изменение частоты напряжения питания, так же используют изменение амплитуды напряжения и изменяют число пар полюсов на обмотке статора. Поговорим о самом широко-используемом варианте, это преобразователи частоты (ПЧ), которые являются полупроводниковыми и способны изменять частоты напряжения, которое подводится к электродвигателю от источника питания, тем самым меняя скорость вращения вала асинхронного двигателя, понижая или увеличивая его мощность и потребляемый ток из источника. Самым распространенным способом регулирования скорости вращения вала является изменение амплитуды и частоты напряжения, подаваемого от источника питания с тремя фазами, таким образом происходит частотное управление валом. Номинальную скорость вала электродвигателя можно повышать и понижать, регулируя частоту напряжения, подаваемого от источника к статору. Хотелось бы отметить что регулирование частоты меньше номинальной происходит при выборе закона частотного управления, когда магнитный поток электродвигателя не будет изменяться, а останется неизменным, для этого необходимо выбрать правильное соотношение частоты и амплитуды. При этом перегрузочная способность остается неизменной во всех диапазонах регулирования, так как максимальный момент электродвигателя не меняется, не понижается и не повышается, поэтому момент нагрузки не меняется. Регулировать частоту больше номинальной имеет возможность только преобразователь с промежуточным контуром постоянного тока, так как у него имеется режим понижения магнитного потока электродвигателя, все это происходит при неизменной амплитуде напряжения, она остается на уровне номинального значения, что еще раз подтверждает, что частотное регулирование не только экономит электроэнергию, но и помогает избежать поломок в двигателе и электроприводе в целом. На данный момент используются два типа преобразователей частоты, это преобразователь с промежуточным контуром постоянного тока, и преобразователь с непосредственной связью, второй формирует синусоидальную форму

напряжение от синусоид, напряжения которое преобразуется, и поступает от источника питания. Как правило на выходе частоты преобразователя в среднем составляет диапазон от 0 до 33 Гц, и оно никак не может равняться частоте питающей сети, это принципиально исключено. Так же преобразователи частоты (ПЧ) оборудуются диодным выпрямителем, который в свою очередь сглаживает переменное напряжение, подаваемое от сети с помощью индуктивноемкостного фильтра, что делает такие преобразователи самыми распространенными на рынке ПЧ, и они получили наибольшее признание в технической сфере благодаря промежуточному контуру постоянного тока. Так же хочется отметить что очень часто в инверторах, которые исполнены в основе IGBT модулей используется метод высокочастотной ШИМ (широтно импульсная модуляция), с его помощью ПЧ преобразует постоянный ток в переменный, при этом генерирует заданные значения частоты и напряжения, таким образом он формирует выходной сигнал.

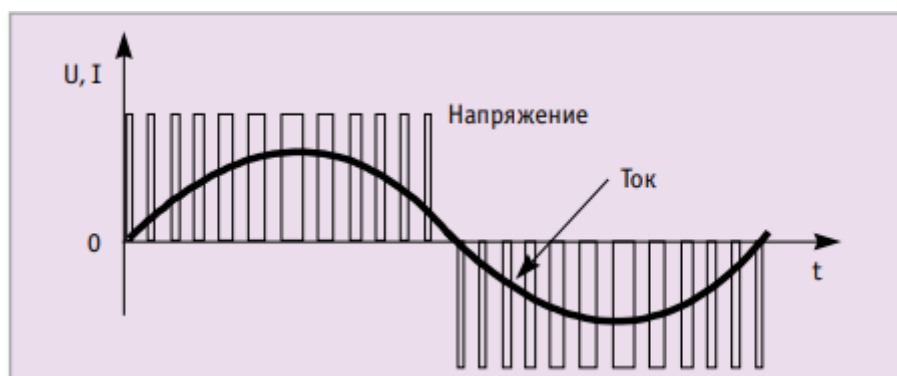


Рисунок 1 - Выходной сигнал преобразователя частоты

На рисунке 1 можем наблюдать как токи синусоидальной формы формируются благодаря последовательным импульсам напряжения при постоянной амплитуде этого напряжения, все это происходит при индуктивной нагрузке, на обмотке статора, это все в совместимости представляет собой выходной сигнал на ПЧ. Диапазон частоты, которую возможно регулировать в данной случае составляет от 0 до тысяч Гц. Далее мы рассмотрим какие бывают типы нагрузок. Чтобы понять какие требования вы хотите получить от электропривода, вы

должны решить какой диапазон скоростей и какие типы нагрузок вам необходимы в работе.



Рис. 2. Механические характеристики типичных нагрузок

На рисунке под номером два можно увидеть, что для нагрузок разных типов неодинакова зависимость скорости вращения вала электродвигателя и момента сопротивления, поэтому мы можем рассматривать разные нагрузки, которые имеют постоянный момент в разных диапазонах скорости. На примере можно рассмотреть насосы и конвейеры, а также, например, компрессоры. Существуют разные виды нагрузки, для каждого из них определяется разная механическая характеристика, при которой увеличение скорости вращения происходит с увеличением момента нагрузки. Рассмотрим уравнение квадратичной параболы, при которой скорость вращения в кубе равна потребляемой мощности от источника питания, данное уравнение действует не на всех устройствах, а лишь на некоторых. Ярким примером являются вентиляторы и центробежные насосы, для них как раз характерны разные механические характеристики, которые зависят от нагрузки на электроприводе. В связи с этим мы можем сделать вывод что основным крупным преимуществом ПЧ, является значительная экономия электроэнергии, так как даже незначительное понижение скорости вращения вала ведет к большому увеличению мощности в вентиляторах и насосах. Практика показывает, что экономия электроэнергии, которую потребляет элект-

тропривод составляет 35 процентов при снижении скорости вращения вала всего на 11 процентов. Так же можем рассмотреть некоторые механизмы такие как промышленные миксеры и устройства для замеса, механическая характеристика которых очень схожа с характеристиками вентиляторов и насосов, о которых мы говорили выше. Но хотелось бы уберечь техников от неправильного выбора, сказав, что эти устройства так же имеют очень уникальные механические характеристики и нагрузки, которые не всегда могут соответствовать требованиям, подходящим для работы с ПЧ. К примеру, необходим очень высокий пусковой момент, уменьшающийся с увеличением скорости вращения вала, а потом эта характеристика становится квадратичной. Поэтому следует тщательно проанализировать нагрузки и механические характеристики устройства, которое вы хотите модернизировать с помощью ПЧ. Преобразователь частоты имеет различные режимы управления, это зависит от характера нагрузки, создавая при этом разные скорости вращения вала и разное выходное напряжение на электродвигатель. Двигатели, которые подключены параллельно и синхронные двигатели обеспечиваются постоянным моментом нагрузки благодаря ПЧ работающем в режиме линейной зависимости ($U/f = \text{const}$). Но стоит заметить, что падение максимального момента электродвигателя неизбежно при уменьшении частоты. Тут для рассмотренных выше промышленных миксеров играет большую роль функция, которая устанавливается в ПЧ и позволяет повысить начальное выходное напряжение. Таким образом возможно компенсировать момент нагрузки, делая возможным работу устройств с высоким пусковым моментом. Этот режим, при котором работает квадратичная зависимость ($U/f^2 = \text{const}$) позволяет осуществлять работу по управлению параллельно подключенными электродвигателями так же, как и предыдущий рассмотренный режим. Это основные режимы работы ПЧ, которые применяются больше всего в технической сфере и различной промышленности. Но на этом производители ПЧ не останавливаются, и создают более развитые режимы управления, для повышения качества работы ПЧ. Были созданы еще два метода управления, это режим потокосцепления и режим бессенсорного векторного управления. (FCC и SVC).

Были выпущены новые ПЧ с вычислительными устройствами, способными анализировать и адаптироваться под работу различных электродвигателей, такая система управления ПЧ делала его незаменимым на любом производстве. Режим SVC без датчика обратной связи по скорости рассмотренный выше, является самым эффективным и точным в управлении. В двигателях переменного тока только одна обмотка статора, которая формирует магнитное поле, а в двигателях постоянного тока – две (можно управлять их скоростью отдельно), задавая вращающий момент. Из-за этого и появляются трудности управления. В связи с этим управлять амплитудой, т.е. вектором тока является единственным выходом из ситуации. Но для этого нам необходимо определять положение ротора в каждый момент времени, для того чтобы регулировать магнитное поле статора в зависимости от его положения и фазу тока, что нам может позволить использование датчика положения, такой как например шифратор приращений. Таким образом электропривод постоянного тока равен приводу переменного тока по всем параметрам, если сравнивать качество регулирования. Но из-за повышения стоимости электроприводов переменного тока с добавленным в конструкцию датчика положения ротора, что очень сильно усложняет конструкцию, такие электроприводы пользуются очень малой популярностью. Но современные технологии векторного управления не стоят на месте, и уже сегодня мы имеем на рынке адаптивные модели, математически предсказывающие положение ротора в любое время. Применение в системе управления ПЧ интегральных схем (ASIC) делает возможным осуществление большого объема вычислений в минимальные сроки и сопоставлять различные параметры двигателя в различных режимах работы. Моделирует точные характеристики двигателя, контролирует и измеряет выходной ток и напряжение, а также рассчитывает различные характеристики двигателя такие как например индуктивность и сопротивление. Нет возможности без обратной связи по скорости полноценно управлять моментом, при низкой скорости. Хоть такое векторное управление и дает возможность обеспечивать низкую погрешность, которая является нормальной при замкнутой обратной связи в приводе. ПЧ создает обратную связь,

которая помогает достичь минимальную погрешность в регулировании, около одного процента. Но стоит заметить, что такой режим управления (векторный) не используется для синхронных машин и для двигателей, подключенных параллельно. Сюда же можно отнести двигатели с низким показателем мощности (менее $\frac{1}{2}$ мощности ПЧ) или же если наоборот превышает ее. Далее рассмотрим различные способы торможения привода. Последнее время больше стали применяться электрические способы торможения, нежели механические, независимо от того нужно замедлить или полностью остановить механизм. Главной особенностью электрического способа торможения является перевод машины в режим генератора, из режима двигателя, тем самым создавая магнитный момент против движения. Механический способ торможения заключается в отключении от питания, после чего он сам останавливается со временем. Но в таком случае мы не можем контролировать время, которое необходимо двигателю чтобы полностью остановиться или замедлиться до какого-либо конкретного значения. Такой контроль времени нам может обеспечить исключительно электрический способ, при котором двигатель переводится в генераторный режим, происходит это путем уменьшения ПЧ, частоты на выходе до нужного значения. Но также стоит заметить, что в этом случае двигатель начинает преобразовывать кинетическую энергию в электрическую, которая в зависимости от выпрямляющего устройства накапливается в контуре ПЧ, либо же возвращается в сеть. Но если момент инерции слишком велик, то нам может потребоваться какое-либо дополнительное тормозное сопротивление со специальной схемой, для того чтобы рассеять большое количество энергии, избегая тем самым опасного перенапряжения. Из выше сказанного делаем вывод что электрический способ дает нам ряд существенных преимуществ, таких как: плавность остановки, контролируемое время торможения и хороший тормозной момент. Но также у этого способа есть недостаток – придется использовать какое-либо внешнее дополнительное сопротивление для того чтобы избежать, перегрев резистора контура тока, который встроен в систему, так как выделяется слишком много энергии в ПЧ при быстрой остановке электропривода. Для торможения в

системах постоянного тока используют систему, при которой на одну фазу поступает постоянное напряжение, а с другой фазы снимают переменное напряжение, это называется динамическим торможением двигателя. Таким способом возможно добиться замедления и полной остановки ротора до неподвижного состояния. В отличие от генераторного режима здесь отпадает необходимость в использовании дополнительного тормозного сопротивления, так как система выделяет электрическую энергию в роторе. Из минусов данного режима можно выделить что время торможения снова не контролируется, так как частота ПЧ перестает контролироваться. Если продолжать сравнивать данный метод с методом генераторного торможения, можно сказать что эффективность становится ниже, и составляет около 35%. Самым эффективным способом торможения является комбинированный, который сочетает в себе преимущества двух методов о которых мы до этого говорили. При таком режиме торможение привода осуществляется без перегрева в ПЧ и за короткое время, путем накладывания переменного напряжения, на постоянную.

3.3 Экономическое обоснование модернизации проекта

В данном разделе мы рассмотрим сроки окупаемости модернизации электропривода и дадим экономическое обоснование внедрению частотного преобразователя в систему питательного насоса K150-125-315, который осуществляет регулирование подачи воды внутри системы промышленного тепло и водоснабжения, и отдельных частей его оборудования. Окупаемость нового метода регулирования частотным способом, будем просчитывать в сравнении с изначальным вариантом регулирования – дроссельным способом, или с помощью регулирования объема подачи воды способом применения задвижки. При этом во время регулирования меняется только сопротивление внешней сети, а скорость вращения вала на насосе останется неизменной. В таблице 9.1 мы можем наблюдать, как и какие именно характеристики меняются во время работы питательного насоса K150-125-315 при различных ситуациях. 1) максимальная нагрузка в промежутке 1/5 всего рабочего времени; 2) 70% процентная нагрузка в течении половины всего времени работы, 3) Половину от максимальной нагрузки в течении 30% рабочего времени. Примерное рабочее время насоса под нагрузкой в течении года составляет около 8500 часов.

Можно выделить основные задачи данного раздела: 1) определить показатели которые изменяются во время работы; 2) рассчитать экономическое обоснование модернизации данного проекта.

Возьмем для сравнения изначальный вариант и вариант модернизированного проекта, и проведём анализ показателей, которые меняются во время работы. Результаты нашего сравнения показаны в табл. 9.1.

Таблица 9.1 - Исследования изменяющихся показателей в работе

Основные влияющие изменения		Основные показатели, меняющиеся при работе
Изначальный вариант	Вариант проекта после модернизации	
1	2	3
Основой системы электро-	Основой системы элек-	Снижается потребля-

привода является асинхронный двигатель, на базе питательного снабжающего насоса. Подача воды, напор и давление в магистрали водопроводящей системы производится путем регулирования задвижкой или дросселем.	тропривода является асинхронный двигатель, на базе питательного снабжающего насоса. Подача воды, напор и давление в магистрали водопроводящей системы производится путем регулирования частоты скорости вращения вала, с помощью преобразователя частоты.	емое электроприводом количество электроэнергии из источника трехфазного питания.
--	---	--

Продолжение таблицы 9.1

1	2	3
2. Промежуток времени при остановке работы из-за при аварии 4 часа	Промежуток времени при остановке работы из-за при аварии 2 час	Значительно уменьшается количество требуемого времени для того чтобы диагностировать аппарат или настраивать его при ремонте
3. Около 10и аварийных ситуаций в год, приводящих к выходу из строя электропривода	Около 5и аварийных ситуаций в год, приводящих к выходу из строя электропривода	Значительное увеличение показателя надёжности электропривода и его отдельных компонентов

9.2 Проведем анализ, разберем по пунктам и рассчитаем, экономический эффект от модернизации проекта. Так же в целом оценим эффективность мо-

дернизации электропривода с частотным регулированием на базе питательного насоса K150-125-315.

Основные значительные материальные затраты ложатся на приобретение преобразователя частоты MICROMASTER (ф. SIEMENS) 6SE32 – 22-4DS45 - 119870 руб. Приблизительные расходы по статическим данным на транспортировку до места монтажа и сама установка электропривода – 3757руб.

Теперь проведем анализ стоимости электроэнергии потребляемой электроприводом от источника питания при работе регулированием подачи воды с помощью заслонки, или дросселем, кВт*ч.

$$Z_{dr} = c \sum P_i \cdot T = 5.04 * (0.2 * 36.3 + 0.3 * 27.9 + 0.5 * 36.1) * 8060 = 999046 \text{ рублей.}$$

где $c = 5.04$ руб. – средняя стоимость 1 кВт*ч электроэнергии в регионах России, в частности в Московской области ; P_i - потребляемая мощность электроприводом, при установкережима работы насоса; $T = 8060$ - приблизительно рассчитанное количество часов, работающего электропривода в год.

Рассчитаем приблизительную стоимость затрат на энергопотребление электропривода при работе с регулированием частоты вращения вала с помощью преобразователя частоты, кВт*ч

$$Z_{chr} = c \sum P_i \cdot T = 5.04 * (0.2 * 36.3 + 0.3 * 4.21 + 0.5 * 11.6) * 8060 = 468044 \text{ рублей.}$$

Экономия потерь электроэнергии при модернизации электропривода питательного насоса составляет: $Z_{dr} - Z_{chr} = 999046 - 468044 = 531\ 002$ рублей.

Заключение

В данной магистерской диссертации были проанализированы и подробно рассмотрены различные вопросы и нюансы касательно модернизации асинхронного электропривода при частотном регулировании, применительно к питательному насосу K150-125-315 для работы водогрейного котла. Так же были затронуты для рассмотрения вопросы обеспечения регулирования водоснабжения при помощи асинхронного электропривода с частотным регулированием давления и подачи воды в системе водопроводящей магистрали, программе: 1) максимальная нагрузка в промежутке 1/5 всего рабочего времени; 2) 70и процентная нагрузка в течении половины всего времени работы; 3) Половину от максимальной нагрузки в течении 30% рабочего времени. Был разработан и сформулирован главный приоритет в направлении касательно скорого развития электроприводов с частотным регулированием скорости вращения вала. При анализе и проведении различных расчетов и подбору более эффективного способа регулирования скорости вращения, было выявлено, что на сегодняшний день очень сильно вырос спрос на асинхронные двигатели с частотным регулированием. Такой показательный спрос обуславливается тем, что частотно-регулируемые электропривода обеспечивают высокие показатели энергоэффективности, высокую электромагнитную совместимость при осуществлении различных видов работ при различных условиях внешней среды.

Был выполнен экономический расчет мощности электродвигателя. Так же был произведен выбор типа электропривода для обеспечения хорошей совместимости при работе с питательным насосом K150-125-315. При выбранной совместимости система электропривода дает возможность эффективного регулирования подачи в магистрали систем водоснабжения. Был произведен расчет мощности электродвигателя и преобразователя частоты отдельно, для того чтобы выявить оптимальные параметры работы, которые определяют уровень энергоэффективности системы и экономию электроэнергии.

В процессе расчета параметров и показателей механических характеристик двигателя, при использовании скалярного закона управления, были определены скорости и моменты, обеспечивающие стабильную работу системы электродвигатель – питательный насос.

В работе было произведено моделирование математической системы электропривода. Так же в программе MATLAB была произведена разработка математической модели асинхронного двигателя, включая виртуальную модель электропривода при управлении скоростью вращения частотным преобразователем. Данные математические модели оптимизируют процесс анализа и исследования смоделированных нами режимов частотного пуска электропривода. Были приведены доказательства о том, что использование частотного управления в системе электропривода во время пуска и регулирования скорости вращения вала, приводит к существенному понижению энергетических и материальных потерь в целом, при сравнении с начальным способом регулирования (дрессель, заслонка).

Были проанализированы способы изготовления роторов для асинхронного двигателя, и были рассмотрены технологические особенности этого процесса. Были рассмотрены вопросы и нюансы проведения мероприятий по повышению безопасности сотрудников при технологическом процессе. Так же определены и проанализированы меры по предотвращению различных чрезвычайных ситуаций на производстве, на котором используются электроприводы с частотным регулированием. Была произведена идентификация различных производственных факторов, которые негативно влияют на организм работников (опасные и вредные факторы). И особенное внимание было уделено мерам по обеспечению пожарной безопасности в рабочих помещениях и на участках.

Математически рассчитан экономический эффект предложенной модернизации и обосновано решение, что улучшенный электропривод с частотным регулированием серьезно снижает годовые расходы на электроснабжение систем электроприводов и позволяет ежегодно экономить значительные суммы на электричестве.

Список использованных источников

1. Шарапов, В.И. Пиковые источники теплоты систем централизованного теплоснабжения / В.И. Шарапов, М.Е.Орлов.-Ульяновск: УЛГТУ, 2007.- 204 с.
2. Терехов, В.М. Системы управления электроприводами: Учебник для вузов / В.М. Терехов. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 304 с.
3. Герасимова, В.Г. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 4: / В.Г. Герасимова.- 8-е изд., испр. и доп. - М. : Изд-во МЭИ, 2006. - 696 с.
4. Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: Учебное пособие для вузов /И.И. Алиев.– 2-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 2007. – 255с., ил.
5. Полтев, М.К. Охрана труда в машиностроении: учебник./ М.К. Полтев. – М.: Высш. школа, 2008. – 294 с., ил.
6. Ермаков В.В., Ежов Д.Д. Частотное регулирование электропривода насоса водогрейного котла// Перспективы развития науки и общества в условиях инновационного развития: Сборник статей международной научно-практической конференции (21.03.18). Ч.3/-Уфа: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2018. – 304 с. Стр. 34-36.
7. Ермаков В.В., Ежов Д.Д. Состояние перспективы электроприводов с частотным регулированием//Современные концепции развития науки: Сборник статей международной научно-практической конференции (16.03.18) В ч. 1. Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2018 – 201 с. Стр. 33-34.
8. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power Systems и Simulink, Спб.: Питер, 2013. – 318 с.
9. H.Z.Azazi, E.E. EL-Kholy, S.A.Mahmoud and S.S.Shokralla, «Review of Passive and Active Circuit for Power Factor Correction in Single Phase, Low Power AC-DC Converters» 2013 г., King Abdulaziz University, Faculty of Engineering, Electrical Engineering Department, Saudi Arabia .[Электронный

- ресурс]/ URL <http://www.sdaengineering.com/mepcon10/papers/154.pdf> (дата обращения 20.05.2017.)
10. J. M. Bourgeois, «CIRCUITS FOR POWER FACTOR CORRECTION WITH REGARDS TO MAINS FILTERING» 2013 г., STMicroelectronics, Italy .[Электронный ресурс]/ URL http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/fc/ba/b1/89/1f/52/49/7e/CD00003915.pdf/files/CD00003915.pdf/jcr:content/translations/en.CD00003915.pdf (дата обращения 20.04.2018.)
11. S. B. Mehta, Dr. J. A. Makwana, « Power factor improvement of SMPS using PFC Boost converter» 2014 г., International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, India .[Электронный ресурс]/ URL <http://www.ijaiem.org/volume3issue4/IJAIEM-2014-04-30-095.pdf> (дата обращения 25.11.2017.)
12. Neetha John, Mohandas R., Suja C Rajappan, «Energy Saving Mechanism Using Variable Frequency Drives» 2013 г., International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, India .[Электронный ресурс]/ URL http://www.ijetae.com/files/Volume3Issue3/IJETAE_0313_133.pdf (дата обращения 26.12.2017.)
13. Москаленко, В. В. Электрический привод: Учебник / В.В Москаленко. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 400 с.
14. Денисов, В.А., Третьякова М.Н., Теория и переходные процессы электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей энергии. – Тольятти: Кассандра, 2017. – 108с.
15. Васильев, Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропровода: учеб. для вузов / Б.Ю. Васильев – Москва: Солон-Пресс, 2015. – 267 с.
16. Грузов, Л. Н. Методы математического исследования электрических машин. - Москва: Госэнергоиздат, 2013. – 264 с.
17. Зиновьев, Г. С. Силовая электроника : учеб. пособие для акад. бакалавриата. В 2 ч. Ч. 1 / Г. С. Зиновьев ; НГТУ. - 5-е изд., испр. и доп.; Гриф УМО. - Москва :Юрайт, 2016. – 390 с.

18. Паршин, А. М. Источники питания электротехнологических установок [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. М. Паршин, В. Н. Тимофеев, М. В. Первухин ; Сибирский федеральный университет. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 108 с.
19. Решмин, Б. И. Имитационное моделирование и системы управления [Электронный ресурс] : учеб.-практ. пособие / Б. И. Решмин. - Москва : Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. – 74 с.
20. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2017. - 464 с.
21. Дьяконов, В. П. MATLAB [Электронный ресурс] : Полный самоучитель : электронное издание / В. П. Дьяконов. - Саратов : Профобразование, 2017. - 768 с.
22. Кудинов, Ю. И. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB — SIMULINK) [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пащенко. - Санкт-Петербург : Лань, 2016. - 256 с.
23. Денисов, В.А. Нагрузочное устройство для настройки электроприводов с вентильным двигателем / В.А. Денисов, Р.Г. Мазитов // В сб. тр-ов (ПЭЭЭ-2017): Проблемы электротехники, электроэнергетики, электро-технологии, V Всероссийская научно-техническая конференция, Голыятти, 1-2 ноября 2017 г. - С. 486 – 491.
24. Ощепков, А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB / А.Ю. Ощепков. – СПб.: Лань. – 2013. – 208 с.
25. Осина, А.В. Синтез систем модального управления с идентификаторами / А.В. Осина, Т.В. Ягодкина // Вестник Московского энергетического института. – 2013. – № 2. – С. 109–114.
26. Шабад, В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах, учебное пособие для студенческих учреждений

- высшего профессионального образования./ Шабад, В.К Академия, 2013.
— 194 с.
27. Масленников, В.В Основная элементная база электронных устройств,
Импульсные источники питания от А до Z., . Учебное пособие/ Маслен-
ников, В.В - Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2014. – 148 с.
28. Мальц, Э.М. Электротехника и электрические машины / Мальц, Э.М. -
Корона век 2013 г. - 304 с.
29. Давыдов, М.В. Моделирование, компьютерное проектирование и техно-
логия производства электронных средств. / Давыдов, М.В Издательство:
Минск БГУИР 2013г., 281 с.
30. Allen, J.P.C., “Starting Now: A review of reduced voltage ac motor starters,”
Proc. IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference
Charlotte, NC, May 2014, pp. 1-10.