

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Энергосбережение и энергоэффективность

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Повышение энергетической эффективности питательных насосов тепловой электрической станции

Обучающийся

Я.А. Антропов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., Д.А. Кретов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

Содержание

Введение	5
1 Описание типового питательного электронасоса для котельных ТЭЦ. Способы повышения тепловой экономичности питательного электронасоса. Описание участка эксплуатации Кемеровской ТЭЦ.....	8
1.1 Описание типового питательного электронасоса для котельных ТЭЦ... 8	
1.2 Способы повышения тепловой экономичности питательного электронасоса для котельных ТЭЦ	11
1.2.1 Снижение гидравлического сопротивления тракта питательных насосов.....	11
1.2.2 Применение турбопривода	12
1.2.3 Применение многоступенчатого электронасоса.....	15
1.2.4 Применение частотно-регулируемого электропривода	21
1.3 Краткое описание Кемеровской ТЭЦ и схемы подключения турбоагрегатов.....	25
1.4 Выбор способа повышения тепловой экономичности питательного электронасоса	29
2 Построение и исследование модели частотно-регулируемого электропривода питательного насоса	32
2.1 Выбор структурной схемы частотного электропривода питательного насоса	32
2.2 Описание схемы замещения асинхронного электродвигателя и расчёт параметров её элементов	35
2.3 Построение механических характеристик асинхронного электродвигателя	41
2.5 Построение математической модели частотного электропривода питательного насоса при управляющем воздействии по частотному каналу в среде MathCad.....	50

3 Выбор и описание преобразователя частоты для электродвигателя питательного насоса.....	52
3.1 Выбор, описание и основные технические характеристики преобразователя частоты	52
3.2 Описание функциональной схемы	59
4 Расчёт экономической эффективности от внедрения частотного преобразователя питательного электронасоса на Кемеровской ТЭЦ.....	62
4.1 Расчёт эксплуатационных показателей насоса при использовании преобразователя частоты	62
4.2 Расчёт капитальных вложений	64
4.3 Расчёт годовых эксплуатационных издержек на приобретение нового оборудования.....	65
4.3.1 Расчёт годовых затрат на электроэнергию	65
4.3.2 Расчёт годовых затрат на амортизационные отчисления	67
4.3.3 Расчёт годовых затрат на текущий ремонт	67
4.3.4 Расчёт годовых затрат на материалы	67
4.3.5 Расчёт годовых затрат на оплату обслуживающего персонала	68
4.3.6 Расчёт годовых социальных отчислений	68
4.3.7 Расчёт годовых эксплуатационных издержек на новое оборудование	68
4.4 Расчёт годового экономического эффекта за счёт экономии электроэнергии	69
4.5 Расчёт общего годового экономического эффекта.....	69
4.6 Расчёт срока окупаемости.....	70
5 Техника безопасности и экология	72
5.1 Электробезопасность при эксплуатации преобразователя частоты электродвигателя питательного насоса.....	72
5.2 Экологические вопросы при эксплуатации преобразователя частоты электродвигателя питательного насоса.....	78
Заключение	82

Список используемых источников.....	84
-------------------------------------	----

Введение

В связи с повышением стоимости используемого на промышленных предприятиях и генерирующих компаниях топлива, – природного газа, мазута, угля, – вопросы энергосбережения приобрели актуальное значение, в связи с чем должны разрабатываться и реализовываться мероприятия по сокращению расхода топлива и теплоты на действующем и проектируемом энергетическом и технологическом оборудовании [6].

Отечественная практика в области энергетики ранее основывалась на рекомендациях, разработанных в условиях низкой стоимости топлива. Однако в настоящее время эти рекомендации пересматриваются и адаптируются к современным условиям [15]. Поддержка данной тенденции прослеживается и на законодательном уровне. Принимаются как международные стандарты, такие как ISO 50001-2018 «Система энергетического менеджмента» [43], так и федеральные законы, например, № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [34].

Обеспечение надежной эксплуатации насосного оборудования является крайне актуальной задачей для эксплуатирующих и проектирующих организаций, поскольку данное оборудование представляет важную составляющую теплотехнического оборудования теплоэнергетических объектов [9].

В состав оборудования любой ТЭЦ входит питательный насос, предназначенный для перемещения воды в теплообменном контуре и приводимый в движение потребляющим электрическую энергию электрическим двигателем [42]. Питательный насос, наряду с котлом, паровой турбиной и конденсационной установкой, относится к основному технологическому оборудованию ТЭЦ. Для обеспечения успешной эксплуатации ТЭЦ имеют важное значение эффективность работы и надежность питательных насосов [42],[40].

Значительная часть насосов котельных ТЭЦ оснащаются нерегулируемым электроприводом. Регулирование напора продолжает осуществляться использованием задвижек или регулирующих клапанов [40]. Применение регулируемого электропривода в насосных установках обеспечивает энергосбережение и позволяет поддерживать давление или регулировать производительность.

Электродвигатель питательного насоса работает в постоянном режиме, поэтому основные энергетические характеристики потока воды, – давление и напор, – в процессе функционирования ТЭЦ круглогодично остаются неизменными. Изменение режима работы такого электродвигателя путем внедрения регулируемого электропривода приводит к изменению режима работы самой ТЭЦ, что может дать существенный экономический эффект.

Объект исследования. Система питательных насосов тепловой электрической станции.

Предмет исследования. Режим работы питательных насосов тепловых электрических станций.

Цель исследования. Повышение энергетической эффективности режима работы системы питательных насосов тепловой электрической станции.

Степень разработанности темы диссертации. Значимые результаты в области анализа и повышения эффективности работы питательных насосов отражены в работах: Богуна В.С., Демьянова В.А., Шиль Ю.; в области анализа и применения регулируемого электропривода на теплоэнергетических объектах и промышленных комплексах отражены в работах: Усик О.О., Иванова В.Р., Ледуховский Г В., В.Н. Медведев.

В выпускной квалификационной работе исследуются режимы работы питательных насосов Кемеровской ТЭЦ.

Для успешной реализации регулируемых электроприводов на основных механизмах тепловой электростанции требуется проведение технико-экономического обоснования, которое должно учитывать особенности

технологического процесса и состав оборудования объекта, подлежащего модернизации [20].

Задачи:

- Анализ конструкции и режимов работы питательных насосов тепловых электрических станций и определение путей повышения их энергетической эффективности;
- Разработка модели регулируемого электропривода питательного насоса тепловой электрической станции;
- Разработка системы регулирования подачи питательного насоса с частотно-регулируемым электрическим приводом для тепловой электрической станции;
- Определение показателей экономической и энергетической эффективности при внедрении системы частотного регулирования электропривода питательных насосов тепловой электрической станции;
- Рассмотрение вопросов техники безопасности и экологии при модернизации оборудования питательных электронасосов на ТЭЦ.

Практическая значимость состоит в возможности использования результатов выпускной квалификационной работы при разработке проектов модернизации систем питательных насосов тепловых электрических станций и оценке экономического эффекта от их внедрения на различных электрических станциях, работающих по теплофикационному циклу. Разработанная модель частотно-регулируемого электропривода питательного насоса тепловой электрической станции позволит выполнять предпроектную оценку предлагаемых решений в области повышения энергетической эффективности тепловых электрических станций.

Область применения: Теплоэнергетическая область.

1 Описание типового питательного электронасоса для котельных ТЭЦ. Способы повышения тепловой экономичности питательного электронасоса. Описание участка эксплуатации Кемеровской ТЭЦ

Опишем типовой питательный электронасос для котельных ТЭЦ, способы повышения его тепловой экономичности, кратко опишем оборудование Кемеровской ТЭЦ, выберем способ повышения тепловой экономичности питательного электронасоса.

1.1 Описание типового питательного электронасоса для котельных ТЭЦ

Общий вид питательного электронасоса (ПЭН) показан на рисунке 1 [23].



Рисунок 1 – Общий вид ПЭН

ПЭН должны соответствовать ряду специфических требований [23]:

- конструкция насоса должна иметь внешнюю и внутреннюю герметичность, при переменной температуре перекачиваемой жидкости насос должен допускать температурное расширение;
- насос питательной воды должен быть динамически устойчивым во всём диапазоне рабочих режимов;
- насос должен работать надёжно и длительно без заметного снижения параметров и замены основных деталей и узлов;
- для устойчивой работы в системе, особенно при параллельном включении в систему, насосы должны иметь стабильную форму напорной характеристики в интервале подач от 30 % до номинальной;
- для предотвращения обратного вращения и недопустимого нагрева воды при малых подачах насосы должны снабжаться обратными клапанами с линией рециркуляции.

ПЭН для котельных ТЭЦ состоит собственно из насоса, гидромуфты, повышающего редуктора и электродвигателя [23],[29].

Гидромуфта.

Гидромуфта [29] – это устройство, которое позволяет изменять число оборотов насоса, при этом не меняя число оборотов приводного электродвигателя. Гидромуфта выполняется в виде отдельного агрегата с корпусом и подшипниками. Гидромуфта состоит из трех основных компонентов: статора, ведущего и ведомого роторов.

Статор гидромуфты изготовлен из чугунного корпуса с горизонтальными пазами, в котором установлены три подшипника - два для ведущего вала и один для ведомого. Передний подшипник ведущего ротора имеет отдельную крышку, в то время как задние подшипники ведущего и ведомого роторов имеют общую крышку, которая вместе с нижней половиной корпуса образует камеру подачи масла. Из четырех подшипников три – подшипники скольжения, а один – внутренний роликовый подшипник. Передний (со стороны входного конца ведущего вала) и задний (со стороны

выходного конца ведомого вала) подшипники опорно-упорные, фиксирующие положение роторов гидромуфты [25].

Смазка этих подшипников осуществляется принудительно, вкладыши подшипников оснащены термометрами сопротивления для измерения температуры баббита. Камера корпуса гидромуфты между задним и средним подшипниками предназначена для подачи масла на питание гидромуфты. Масло из этой камеры через кольцевой зазор между ведомым и ведущим роторами попадает на лопастную систему обеих рабочих лопастей сдвоенной гидромуфты. Сдвоенная гидромуфта создана для уравнивания осевых усилий, возникающих в рабочих полостях [25].

Гидромуфта, установленная на питательных электронасосах, работает по принципу передачи энергии масла через лопатки вращающегося насосного диска на лопатки турбинного диска. При этом количество энергии, передаваемой от насосного диска к турбинному диску, зависит от количества масла, находящегося в полостях гидромуфты. С целью обеспечения надежного охлаждения внутреннего роликового подшипника гидромуфты, необходимо поддерживать температуру масла на сливе из гидромуфты не выше 75 °С и обеспечивать скольжение не более 15-18%, при этом обороты насоса должны быть не менее 6000 об/мин. Регулирование работы гидромуфты осуществляется изменением количества подводимого масла, а равенство подводимого и сливаемого масла достигается путем регулировки расхода масла через регулирующий клапан, контролируемый дополнительным автоматическим клапаном, поддерживающим постоянное давление масла перед регулирующим клапаном [24].

Редуктор.

В питательных электронасосах для передачи крутящего момента и повышения числа оборотов насоса используется зубчатый редуктор [29] с передаточным числом 2,605, который передает мощность от электродвигателя на насос. Редуктор является одноступенчатым и состоит из двух цельнокованных шевронных шестерен, что гарантирует уравнивание

осевых усилий. Скольжение гидромuffты составляет 2,5%, а числа оборотов насоса равны 2950 об/мин [29].

1.2 Способы повышения тепловой экономичности питательного электронасоса для котельных ТЭЦ

Одним из путей повышения тепловой экономичности ПЭН является оптимизация режима работы оборудования котельных ТЭЦ, в частности – снижение электроэнергии, затрачиваемой станциями на собственные нужды.

Рассмотрим четыре способа, направленные на устранение недостатков работы типового ПЭН для котельных ТЭЦ:

- путём снижения гидравлического сопротивления тракта подачи воды;
- путём применения турбопривода;
- путём применения многоступенчатого электронасоса;
- путём изменения производительности насоса за счёт изменения частоты вращения электродвигателя в зависимости от величины нагрузки.

1.2.1 Снижение гидравлического сопротивления тракта питательных насосов

Способы снижения гидравлического сопротивления трубопровода направлены на снижение шероховатости внутренних поверхностей труб, применении разнообразных синтетических и полимерных добавок, вводимых в транспортируемую жидкость, а также применения воздействий на пограничный слой жидкости и газа переменным электромагнитным полем и накладывания на стенки трубопровода или канала импульсных колебаний, направленных по нормали к поверхности соприкосновения потока со стенками трубопровода или канала [18].

В исследовании [18] для снижения гидравлического сопротивления канала предложили использовать комплексное обеспечение концентрических по диаметру трубопровода и направленных к центру потока импульсных

вибраций и/или промежуточного периферийного пристеночного винтового вихревого слоя жидкости и/или бегущей стоячей волны вдоль направления потока. При этом создаются, по крайней мере, три винтовых потока жидкости в виде вихревых шнуров, бегущая стоячая волна обеспечивается за счёт создания встречных импульсов вибраций с разной частотой, а параметры концентрических вибраций выбирают в зависимости от свойств жидкости и диаметра трубопровода.

1.2.2 Применение турбопривода

Применение турбопривода вместо ПЭН является одним из эффективных способов оптимизации режима работы оборудования котельных ТЭЦ [11],[36].

На рисунке 2 представлена схема модернизации питательной электроустановки путём замены ПЭН на турбопривод.

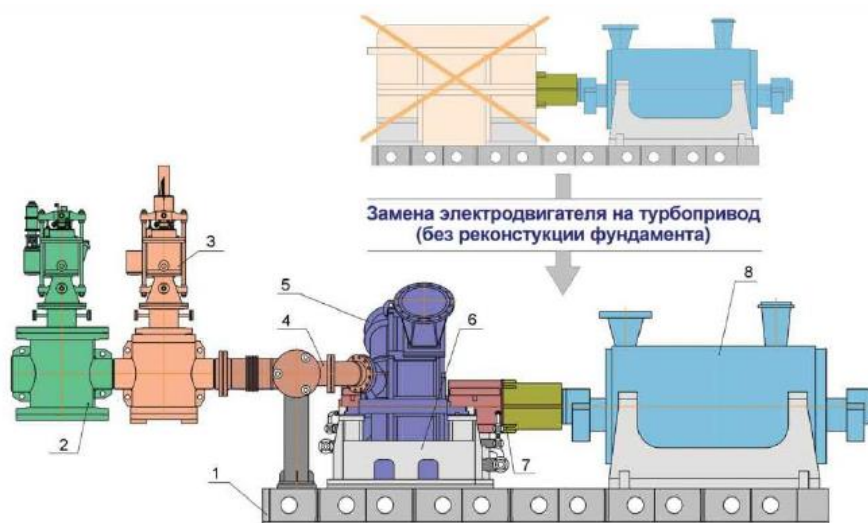


Рисунок 2 – Схема модернизации питательной электроустановки путём замены ПЭН на турбопривод: 1 – фундаментальная рама; 2 – стопорный клапан с паровым ситом; 3 – регулирующий клапан с линейным приводом; 4 – блок компенсационный; 5 – цилиндр; 6 – опорная система цилиндра; 7 – кожух муфты; 8 – питательный насос

Как видно из рисунка 2, вместо ПЭН используются стопорный клапан с паровым ситом 2, регулирующий клапан с линейным приводом 3, блок компенсационный 4, цилиндр 5, опорную систему цилиндра 6, кожух муфты 7, питательный насос 8. Такая модернизация, конечно же, усложняет установку, однако позволяет оптимизировать режим работы котельных ТЭЦ, что в целом приносит экономическую выгоду [37].

Цилиндр 5 питательной электроустановки выполнен сварным и для крепления на фундаменте имеет передние и задние лапы опорной системы 6.

В установке используется дроссельное парораспределение.

Тепловая схема турбопривода изображена на рисунке 3.

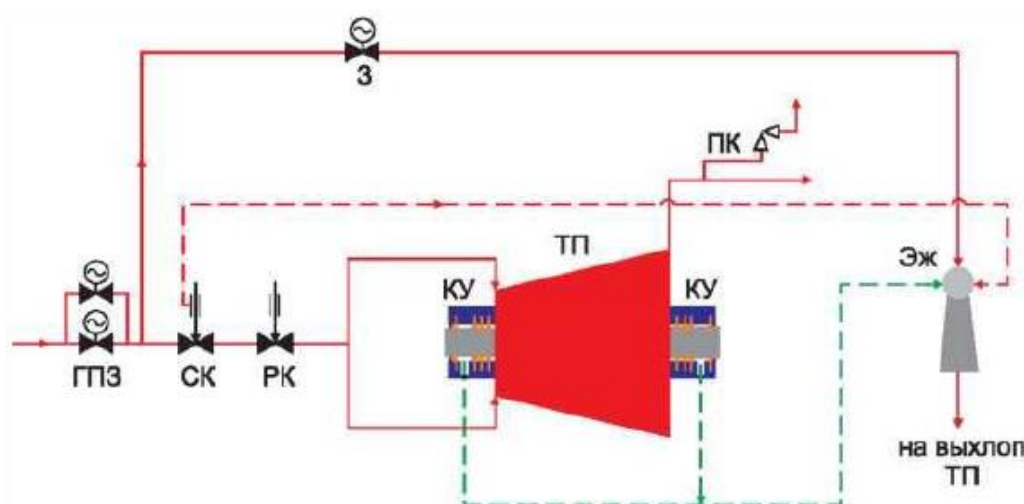


Рисунок 3 – Тепловая схема турбопривода: ГПЗ – паровая задвижка главная; СК – стопорный клапан; РК – регулирующий клапан; З – задвижка; ПК – предохранительный клапан; КУ – концевые уплотнения; Эж – эжектор

На рисунке 4 показана схема включения турбопривода для питания электронасоса.

На турбопривод ТП поступает пар, который, пройдя его проточную часть, конденсируется в теплообменном аппарате. Конденсат поступает в бак, из которого конденсаторным насосом подаётся в деаэратор и далее на

питательный насос ПН [11]. В последнем происходит повышение давления конденсата до номинальных параметров. Далее вода подаётся в подогреватель для нагрева. Нагретая таким образом вода поступает в трубы теплообменника. Пар, используемый для подогрева питательной воды, подаётся в межтрубное пространство, где конденсируется. Сконденсированный пар накапливается в нижней части корпуса и далее следует через регулирующий клапан в деаэратор [36].

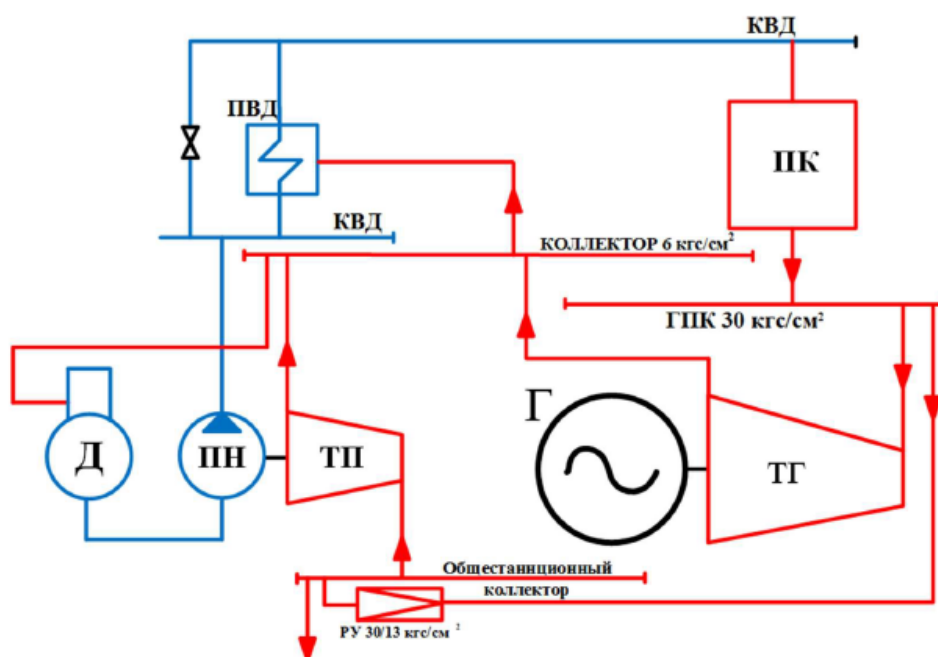


Рисунок 4 – Схема включения турбопривода для питания электронасоса: Д – двигатель; ПН – питательный насос; ТП – турбопривод; Г – генератор; ТГ – турбогенератор

Применение турбопривода типа Р-3,15-1,28/0,2П, представляющего собой одноцилиндровую турбину с противодавлением и с одной двухвенечной рабочей ступенью для питания электронасоса, показало высокую эффективность на Кемеровской ТЭЦ. В турбине используется дроссельное парораспределение, графитовые концевые уплотнения, опорные подшипники

скольжения и упорный подшипник с установочными рабочими колодками [28].

В состав питательного турбонасоса типа ПТН-500-1,28/0,2П входят:

- питательный насос ПН-500-185;
- турбопрвод типа Р-3,15-1,28/0,2П;
- обратный клапан и линия рециркуляции с быстродействующим вентилем и дросселирующим устройством;
- маслоустановки;
- система автоматического управления и регулирования и защиты, а также контрольно-измерительные приборы и автоматика.

Основные технические данные питательного насоса ПН-500-185 [10]:

- производительность $500 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$;
- напор 2030 м;
- допускаемый кавитационный запас 15 м.в.ст.;
- температура питательной воды на всасывающем конце 165 °С;
- скорость вращения $2985 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$;
- число ступеней насоса 11 шт.;
- мощность 3590 кВт;
- КПД $78 \pm 2 \%$.

В 2017 г. экономический эффект от использования турбопривода типа Р-3,15-1,28/0,2П в турбине №14 составил 641 тыс. руб.

1.2.3 Применение многоступенчатого электронасоса

Многоступенчатый центробежный насос – более совершенное оборудование, устройство которого предполагает несколько рабочих колес и ступеней, расположенных друг за другом [21].

Внешний вид многоступенчатого центробежного насоса горизонтального типа представлен на рисунке 5.

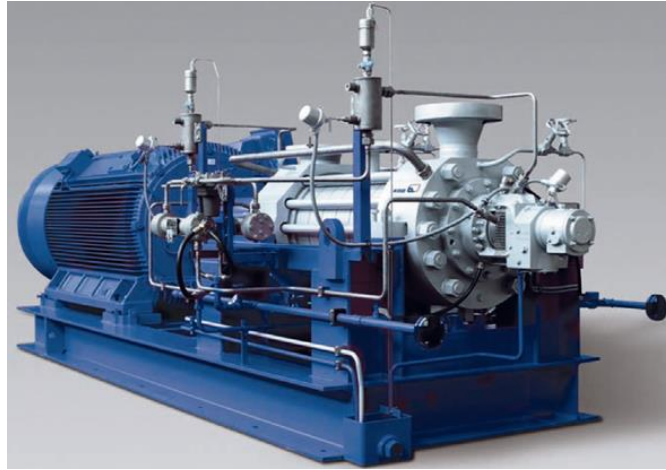


Рисунок 5 – Многоступенчатый центробежный насос горизонтального типа

Центробежный насос выполняет функцию перекачивания жидкости, которая достигается преобразованием кинетической энергии вращения в гидродинамическую энергию потока [21]. Для вращения вала насоса может использоваться электродвигатель или ДВС. Жидкость поступает на рабочее колесо, на корпусе которого расположены лопадки, необходимые для воздействия на частицы жидкости и передачи ей энергии [21].

Многоступенчатый центробежный насос представляет собой ряд одноступенчатых агрегатов, рабочие колеса которых располагаются на общем валу и включены последовательно.

Устройство многоступенчатого центробежного насоса представлено на рисунке 6.

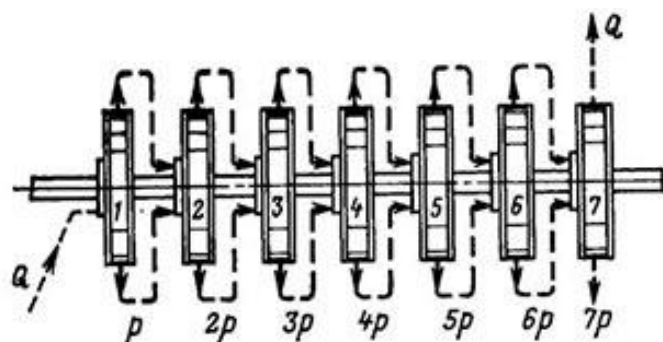
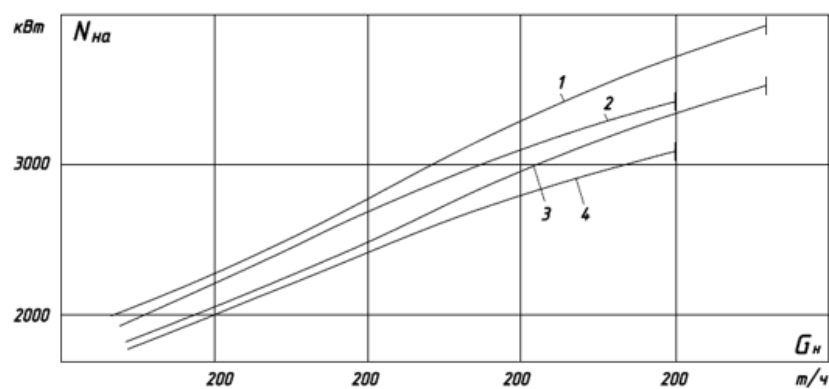


Рисунок 6 – Устройство многоступенчатого центробежного насоса: Q – жидкость; 1–7 рабочие колеса насоса; p – $7p$ направление движения жидкости

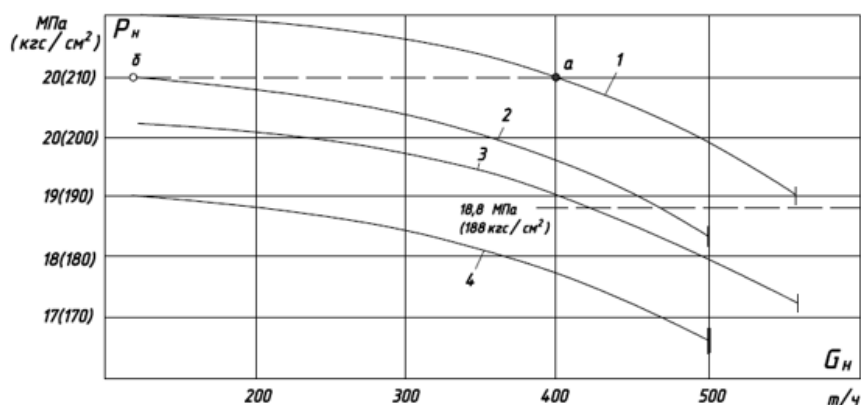
Одним из больших преимуществ такого насоса является объединение системы уравнивания осевого давления, подшипников и сальников в одном общем для всех ступеней корпусе, что придает ему компактность, уменьшает вес и снижает стоимость [27]. В многоступенчатом центробежном насосе каждая ступень представляет собой одноступенчатый агрегат с рабочим колесом, расположенным на общем валу, что позволяет легко заменять отдельные ступени при необходимости [27].

Применение многоступенчатого электронасоса связано с энергетическими характеристиками ПЭН – зависимостями давления P_H на напорной стороне и мощности N_H насоса от подачи G_H [33], [16].

На рисунке 7 показаны зависимости $P_H(G_H)$ и $N_H(G_H)$ при последовательном соединении насосов для различных типов ПЭН с различными ступенями [28, рис. 3, с. 11].



а)



б)

Рисунок 7 – Энергетические характеристики ПЭН: а – зависимость; б – зависимость; 1 – ПЭ-580-185-2 (10 ступеней); 2 – ПЭ-500-180-4 (10 ступеней); 3 – ПЭ-580 (9 ступеней); 4 – ПЭ-500 (9 ступеней)

Как видно из рисунка 7, обеспечение энергетических характеристик ПЭН в широком диапазоне при последовательном соединении насосов возможно при большом количестве ступеней. Так, изменение суммарного значения давления $P_H = (210...185) \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ сопровождается изменением суммарного значения подачи $G_H = (50...600) \frac{\text{т}}{\text{час}}$ при использовании десяти ступеней, состоящих из одинаковых ПЭН типа ПЭ-500-180-4.

Расчёт суммарного давления на выходе $(n-1)$ насоса при последовательном соединении насосов выполняется по формуле [33, с. 10]:

$$P_{n\Sigma\text{послед}} \approx P_n \frac{n-1}{n}; \quad (1)$$

где n – количество ступеней насосного агрегата;

P_n – давление одного насоса.

Аналогично, для расчёта суммарной мощности на выходе $(n-1)$ насоса используется формула:

$$N_{n-1} \approx N_n \frac{n-1}{n}. \quad (2)$$

При параллельном соединении насосов расчёт суммарных энергетических характеристик рассчитывается графически, что поясняется рисунком 8 [33].

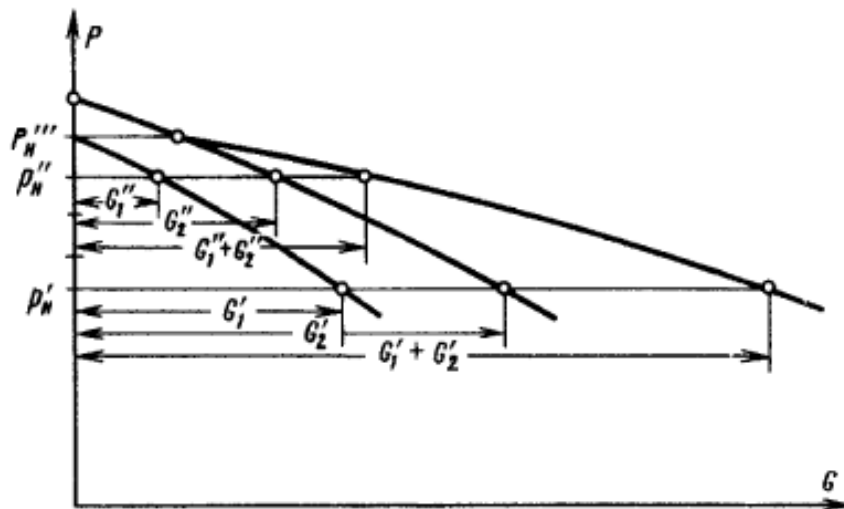


Рисунок 8 – Расчёт суммарных энергетических характеристик при параллельном соединении насосов

В этом случае давления и подачи отдельных насосов будут составлять суммарные давление $P_{n\Sigma\text{парал}}$ и подачу $G_{n\Sigma\text{парал}}$ агрегата, соответственно:

$$P_{n\Sigma\text{парал}} = \sum_{i=1}^n P_{ni}; \quad (3)$$

$$G_{n\Sigma\text{парал}} = \sum_{i=1}^n G_{ni}; \quad (4)$$

где n – количество ступеней в насосе;

P_{ni} – давление i -го насоса n -ой ступени;

G_{ni} – подача i -го насоса n -ой ступени.

Таким образом, при последовательном или параллельном соединении ПЭН возможно регулирование конечного давления и подачи воды в трубопроводе путем включения/отключения ПЭН, участвующих в формировании суммарных энергетических характеристик системы [3].

Для достижения оптимальной работы насоса необходимо учитывать соотношение давления и перепада на ступени ПЭН. Нецелесообразным является оставлять избыточное давление. В данном случае может быть использован способ снижения давления путем уменьшения наружного диаметра рабочих колес. Подрезка колес может повлиять на КПД и гидродинамические свойства ступени, поэтому ее рекомендуется проводить в размере 0,97-0,98 начального диаметра, что позволяет снизить давление на $(10...12) \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ [33].

На рисунке 9 показано, как осуществляется подрезка рабочего колеса ПЭН.

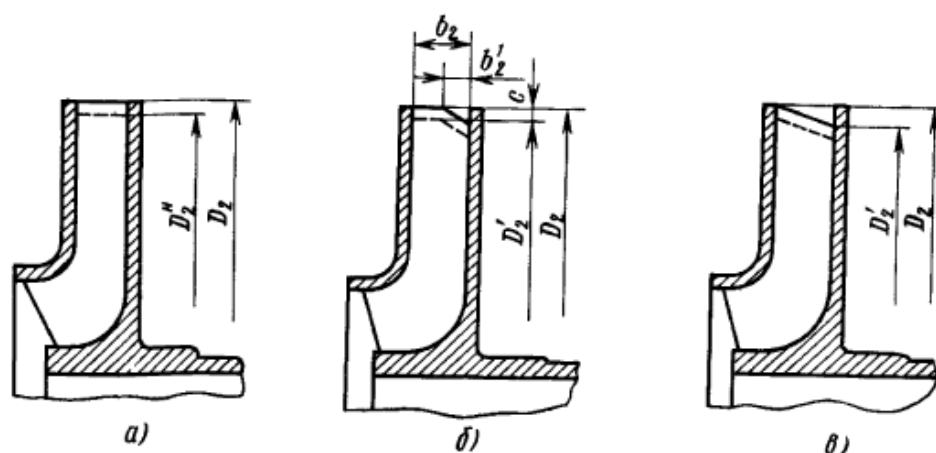


Рисунок 9 – Подрезка рабочего колеса ПЭН: а – подрезка по выходным кромкам лопаток; б, в – косая подрезка

Модификация внешнего диаметра рабочего колеса посредством подрезки приводит к увеличению промежутка между рабочим колесом и направляющим аппаратом [16]. Такое изменение обеспечивает выравнивание потока за центробежным колесом и уменьшение силового воздействия потока на рабочие органы колеса. Этот метод применяется с целью уменьшения пульсаций давления, вихрей и шума, которые возникают в насосном аппарате [16],[17]. Когда диаметр рабочего колеса уменьшается, окружная скорость также снижается. Это приводит к уменьшению напора, создаваемого центробежным рабочим колесом, и в некоторой степени его подачи. Таким образом, подрезка рабочего колеса позволяет достичь желаемого соотношения давления и подачи воды для конкретной энергетической системы [17].

1.2.4 Применение частотно-регулируемого электропривода

Эффективность работы насосных установок может быть достигнута путем непосредственного регулирования частоты вращения насоса, то есть его производительности, в зависимости от изменений в водопотреблении. Для эффективного отслеживания этих изменений необходимо использование специализированных систем автоматического регулирования и контроля работы насосных установок [3],[1].

Однако процесс регулирования усложняется несоответствием характеристик насосов и трубопроводов. При увеличении расхода воды по трубопроводу требуется увеличить напор на насосной установке, но характеристики насосных установок приводят к снижению напора при увеличении подачи воды [22]. С другой стороны, при уменьшении подачи воды требуется уменьшить напор насоса, но фактически он увеличивается. В периоды низкого водопотребления системы водоснабжения работают с избыточным напором, который компенсируется с помощью дросселирующих устройств или водоразборной арматуры у потребителя [22].

Пример компенсации избыточного напора с помощью дроссельной задвижки представлен на рисунке 10.

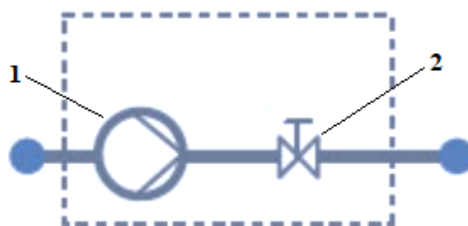


Рисунок 10 – Компенсация напора дроссельной задвижкой: 1 – насос; 2 – задвижка

Регулирование может осуществляться путем изменения характеристики трубопровода, например, частичным перекрытием задвижкой, или путем изменения характеристики насоса, например, изменением числа оборотов. Первые два способа широко применяются при эксплуатации насосных станций на водопроводах, канализационных системах и котельных ТЭЦ. Третий способ чаще используется в вентиляционных системах главного и местного проветривания [1].

Несмотря на то, что представленный ранее способ регулирования напора дроссельной задвижкой решает проблему поддержания нужного давления в системе, имеет свои недостатки. Регулирование дросселированием приводит к

нерациональному расходу энергии насосом для создания избыточного напора, что способствует увеличению утечек, непроизводительному расходу воды и повышенным механическим напряжениям в стенках труб [46]. Кроме того, значительная часть напора теряется на преодоление сопротивления задвижки, что также ограничивает эффективность этого метода. Важно отметить, что использование дроссельной задвижки, установленной на всасывающей трубе, не рекомендуется из-за возможности кавитации, что приводит к снижению КПД насоса, уменьшению напора и производительности насоса [46]. К достоинствам этого метода регулирования напора можно отнести его простоту и отсутствие необходимости внедрения дополнительных устройств в насосную установку [1].

Таким образом, регулирование дросселированием является невыгодным с энергетической точки зрения, поскольку приводит к существенному снижению КПД насосного агрегата и напрасному расходованию электроэнергии [3],[1]. Это происходит из-за дополнительных потерь мощности в задвижке и снижения КПД самого насосного агрегата при увеличении степени открытия задвижки [1].

Для регулирования частоты вращения насоса и приведения его рабочих параметров в соответствие с режимом работы системы рекомендуется использовать регулируемый электропривод для изменения частоты вращения рабочих колес насосов в зависимости от водопотребления [22]. Уменьшение частоты вращения насоса снижает подачу воды и напор, а увеличение частоты – увеличивает их [22]. Такой подход обеспечивает оптимальные рабочие условия, а также снижает энергопотребление системы, используя энергию насоса более эффективно. Это может быть осуществлено при помощи системы автоматического управления (САУ) насосной установки, которая определяет необходимое значение частоты вращения насоса в конкретный момент времени [48]. САУ анализирует данные о водопотреблении и других параметрах системы и на основе этих данных определяет оптимальную частоту вращения насоса [48].

Для реализации метода изменения частоты вращения насосов существуют различные устройства, такие как механический вариатор, гидравлическая муфта, резисторы, вводимые в ротор или статор, электромеханические и статические преобразователи частоты [1]. Эти устройства позволяют регулировать частоту вращения исполнительных механизмов и обеспечивают гибкость в управлении насосной установкой. Однако первые четыре устройства не обеспечивают качественного регулирования скорости, являются неэкономичными и требуют высоких затрат в процессе монтажа и эксплуатации. В настоящее время наиболее совершенными устройствами для управления асинхронным электроприводом являются статические преобразователи частоты [1].

Таким образом, использование регулируемого электропривода и системы автоматического управления с помощью статического преобразователя частоты позволяет эффективно регулировать работу насосной установки, обеспечивая согласование режимов работы насоса и трубопровода в зависимости от изменений водопотребления и других факторов. Это позволяет достичь оптимальных рабочих условий, обеспечить эффективную подачу воды и развиваемый напор, а также снизить энергопотребление и повысить экономичность системы.

Примером такого решения могут служить работы, проводимые Оренбургским филиалом ООО «ЕЭС-Гарант». Так в декабре 2018 г. были выполнены работы по установке частотно-регулируемого электропривода на питательные электронасосы (ПЭН) №4 Сакмарской ТЭЦ с возможностью переключения на ПЭН-1 типа ПЭ-500-180 с приводным электродвигателем типа АС-4000/6000 [38].

В рамках реализации проекта были выполнены следующие мероприятия:

- выполнен комплекс работ по разработке проектно-сметной документации;

- поставлен высоковольтный преобразователь частоты для асинхронного двигателя со скалярным управлением типа ВПЧА-Т-5-06/500-УХЛ4 на напряжение 6000 В с номинальным выходным током 500 А;
- выполнены строительные-монтажные и пусконаладочные работы по подготовке объекта к вводу в эксплуатацию.

В результате проделанных мероприятий смонтированное оборудование позволило снизить потребление электроэнергии на собственные нужды, улучшить гидравлический режим и повысить надёжность работы оборудования.

Фактическая экономия электроэнергии после установки оборудования составила 8,5 млн. кВт · час или 11 млн. рублей в год за счёт экономии электроэнергии на собственные нужды электростанции (регулирование количества оборотов электродвигателя, изменение нагрузки в сети коллектора).

1.3 Краткое описание Кемеровской ТЭЦ и схемы подключения турбоагрегатов

Кемеровская ТЭЦ обеспечивает теплом и горячей водой Кировский и часть Рудничного районов г. Кемерово. Электрическая и тепловая мощности станции составляют 80 МВт и 749 Гкал/час, соответственно [13].

На рисунке 11 показано общее фото Кемеровской ТЭЦ.



Рисунок 11 – Общее фото Кемеровской ТЭЦ

Оборудование Кемеровской ТЭЦ насчитывает 8 котельных агрегатов производительностью (85 ... 220) т пара / час и 4 турбогенератора мощностью (10 ... 30) МВт. В качестве топлива используется каменный уголь, поставляемый с Кузбасского угольного бассейна.

Кемеровская ТЭЦ состоит из пяти цехов:

- котлотурбинного цеха, состоящего из котельного и турбинного отделений;
- электрического цеха;
- цеха топливоподачи;
- химического цеха;
- цеха тепловой автоматики и измерений.

Фото турбинного цеха Кемеровской ТЭЦ показано на рисунке 12.



Рисунок 12 – Фото турбинного цеха Кемеровской ТЭЦ

В котлотурбинном цехе установлены два теплофикационных турбоагрегата с противодавлением $6 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ без регулируемого отбора пара типа «Р», два теплофикационных турбоагрегата с противодавлением и с производственным и теплофикационным отбором пара $6 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ типа «ПТР», четыре РОУ 30/6 и четыре РУ 30/13.

На рисунке 13 показаны схемы подключения турбоагрегатов, используемых на Кемеровской ТЭЦ [39].

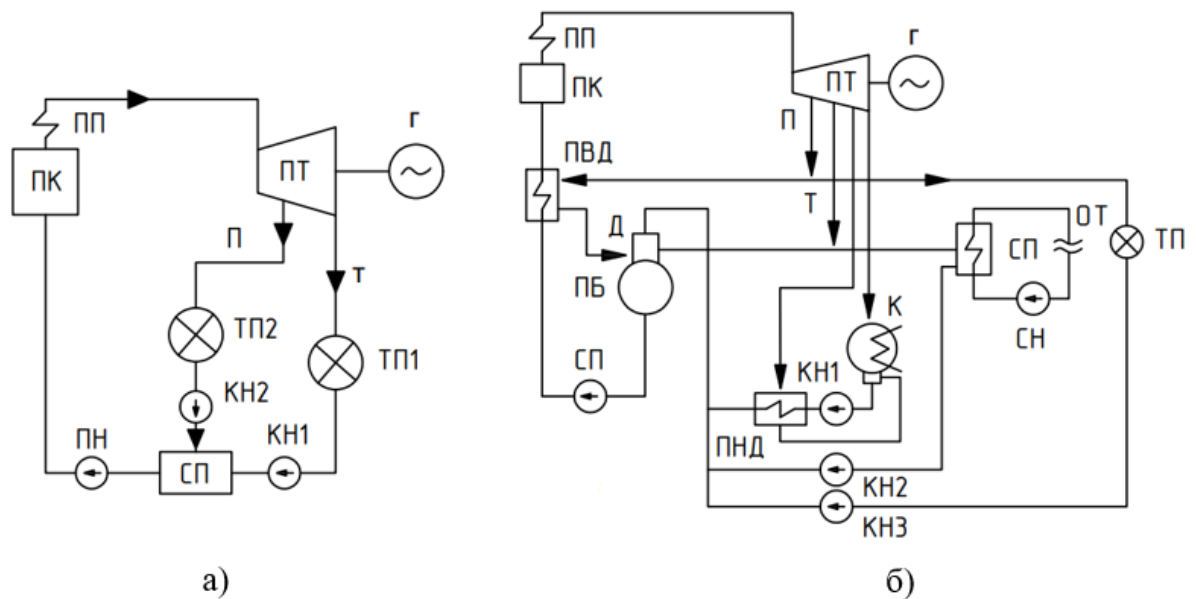


Рисунок 13 – Схемы подключения турбоагрегатов, используемых на Кемеровской ТЭЦ: а – турбоагрегат с противодавлением без регулируемого отбора пара типа «Р»; б – турбоагрегат с противодавлением и с производственным и теплофикационным отборами пара типа «ПТР»; ПК – паровой котёл; ПП – пароперегреватель; ПТ – паровая турбина; Г – электрический генератор; К – конденсатор; П – регулируемый производственный отбор пара на технологические нужды промышленности; Т – регулируемый теплофикационный отбор на отопление; ТП – тепловой потребитель; ОТ – отопительная нагрузка; КН и ПН – конденсатный и питательные насосы; ПВД и ПНД – подогреватели высокого и низкого давлений; Д – деаэрактор; ПБ – бак питательной воды; СП – сетевой подогреватель; СН – сетевой насос

Как видно из рисунка 13, в обеих схемах подключения турбогенераторов используются питательные электронасосы ПН, в которых не предусмотрена регулировка энергетических характеристик, что является общим недостатком схем, влекущих за собой существенные экономические издержки.

1.4 Выбор способа повышения тепловой экономичности питательного электронасоса

Для повышения тепловой экономичности питательного электронасоса выберем способ, основанный на регулировании частоты вращения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором за счёт применения частотного преобразователя. Данный способ, как показала практика его применения ООО «ЕЭС-Гарант» на Сакмарской ТЭЦ [38], даёт большой экономический эффект.

Использование частотного преобразователя позволяет повысить эффективность и тепловую экономичность питательного электронасоса, поскольку при его применении можно получить преимущества по сравнению с применением других регулировочных методов [44].

Рассмотрим преимущества асинхронного привода по сравнению с турбоприводом:

- Не полагается на механические компоненты;

Асинхронный привод не полагается на механические компоненты, такие как шестерни или шкивы, которые подвержены износу или требуют регулярного обслуживания [44].

- Способен более точно регулировать скорость;

Асинхронный привод также использует передовые системы управления для обеспечения точного регулирования скорости и быстрого реагирования на крутящий момент, что делает его более надежным и подходящим для управления различными механизмами.

- Имеет компактный размер;

Асинхронные приводы более компактны и легки по сравнению с традиционными аналогами, что делает их более подходящими для крупномасштабных работ на тепловых электростанциях.

- Обеспечивает более надежную и безопасную работу.

Асинхронные приводы более надежны, так как могут выдерживать большие нагрузки и менее подвержены поломкам.

Все эти факторы делают асинхронный привод лучшим выбором для тепловых электростанций по сравнению с турбоприводом.

Далее рассмотрим преимущества асинхронного двигателя по сравнению с многоступенчатым ЭПН:

- Обеспечивает эффективную передачу энергии;

Асинхронные приводы обеспечивают более эффективную передачу энергии, что означает, что они могут передавать мощность с меньшими потерями энергии

- Имеет более надёжную конструкцию;

Асинхронные приводы гораздо надежнее многоступенчатых насосов, поскольку меньше подвержены механическим поломкам из-за меньшего количества движущихся частей.

- Имеет высокую адаптивность к изменению нагрузки;

АД с ПЧ также обеспечивают широкие возможности ускорения и замедления потока жидкости, что позволяет быстро реагировать на изменение нагрузки на теплоэлектростанции.

- Простота в установке и обслуживании.

Асинхронные приводы намного проще в установке, обслуживании и ремонте по сравнению с многоступенчатыми насосами. Это объясняется тем, что они имеют меньше движущихся частей и, как правило, более простую конструкцию.

Частотный преобразователь позволяет снизить расход энергии и сократить уровень вредных выбросов в окружающую среду. Использование электропривода на электростанциях также помогает снизить шумовое загрязнение, количество углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу, а также уровень шумового загрязнения, вызванного вибрацией вращающихся механизмов [44].

Технология [18], направленная на снижение гидравлического тракта посредством химических составов и других методов на данный момент имеет недостаточную исследовательскую базу. В настоящее время проводятся комплексные исследования, направленные на экспериментальное изучение, оптимизацию технологических параметров, а также разработку конструкторской документации и подготовку производственных процессов, которые реализуют новую технологию [18]. Возможно, эта технология также найдет применение в других областях промышленности, например, в нефтегазовой отрасли для транспортировки углеводородов.

Выводы по разделу 1.

В первом разделе диссертации были представлены основные аспекты, связанные с питательным электронасосом для котельных ТЭЦ. Было описано типовое устройство питательного электронасоса, а также представлены различные способы повышения его тепловой экономичности. Эти способы включают снижение гидравлического сопротивления тракта насосов, применение турбопривода, многоступенчатого электронасоса и частотно-регулируемого электропривода.

В разделе было кратко описано оборудование Кемеровской ТЭЦ, включая схемы подключения турбоагрегатов. На основе проведенного обзора и анализа был выбран конкретный способ повышения тепловой экономичности питательного электронасоса. Способ основан на регулировании частоты вращения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором с использованием частотного преобразователя.

2 Построение и исследование модели частотно-регулируемого электропривода питательного насоса

Выберем структурную схему частотного электропривода питательного насоса, опишем схему замещения асинхронного электропривода и рассчитаем её параметры, построим механическую характеристику асинхронного электродвигателя и исследуем его модель при управляющем воздействии по частотному каналу, а также построим и исследуем математическую модель частотного электропривода питательного насоса при управляющем воздействии по частотному каналу.

2.1 Выбор структурной схемы частотного электропривода питательного насоса

Структурную схему частотного электропривода (ЧЭП) питательного насоса опишем схемой, представленной на рисунке 14.

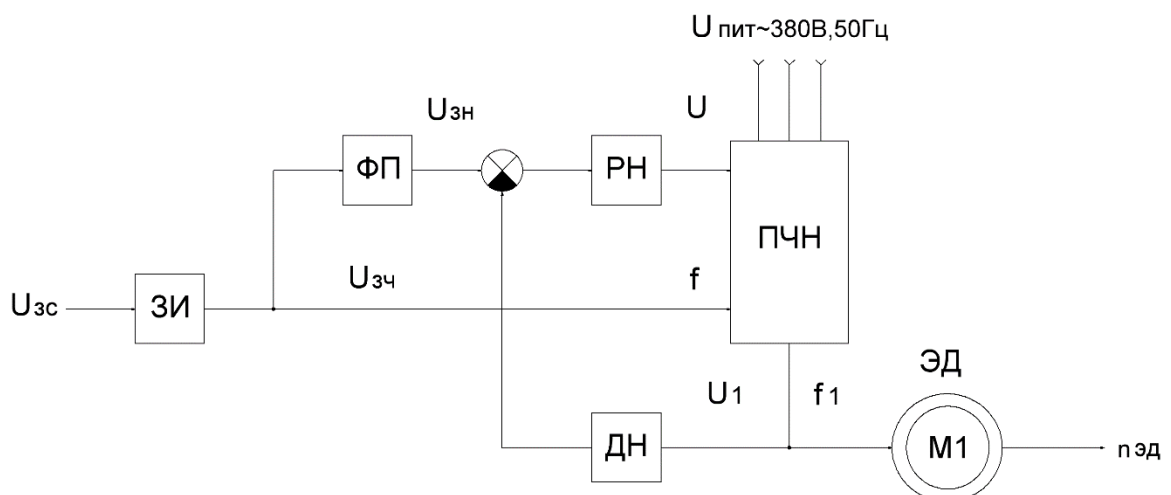


Рисунок 14 – Структурная схема частотного электропривода насоса

ЧЭП содержит:

- задатчик интенсивности ЗИ;
- функциональный преобразователь ФП;
- регулятор напряжения РН;
- датчик напряжения ДН;
- преобразователь частоты и напряжения ПЧН;
- электродвигатель ЭД.

Как видно из рисунка 14, регулирование ЧЭП осуществляется по двум каналам: каналу регулирования напряжения U и каналу регулирования частоты f .

Частота f_1 определяется величиной задания f . В канал регулирования напряжения включается функциональный преобразователь, который обеспечивает требуемое соотношение между частотой и напряжением.

Отрицательная обратная связь по выходному напряжению U_1 обеспечивает стабилизацию этого напряжения. При этом ПЧН приобретает свойства источника напряжения.

Структурная схема ПЧН показана на рисунке 15.

ПЧН содержит:

- управляемый выпрямитель УВ;
- фильтр Ф;
- автономный источник напряжения АИН.

УВ осуществляет регулирование входного напряжения U по заданному закону. Выходное напряжение $U_{ув}$ УВ следует на фильтр Ф, который осуществляет его фильтрацию. Напряжение с выхода фильтра Ф U_{ϕ} следует на АИН. На второй вход АИН поступает сигнал, пропорциональный длительности импульса Δt_1 . На выходе АИН формируется напряжение U_1 с частотой f_1 для питания ЭД.

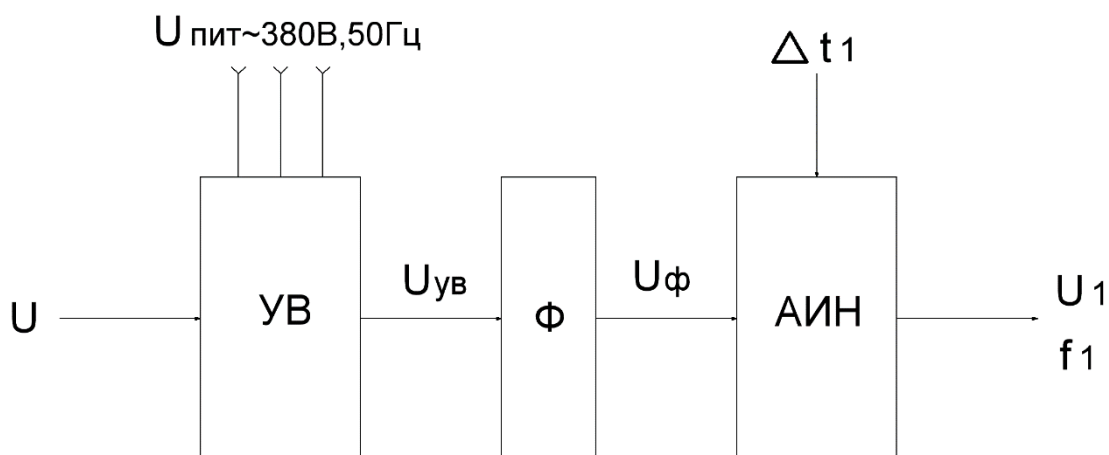


Рисунок 15 – Структурная схема преобразователя частоты и напряжения

Питание УВ осуществляется от трёхфазной сети переменного тока напряжением 380 В частоты 50 Гц.

Структурная схема ЧЭП питательного насоса при управляющем воздействии по частотному каналу представлена на рисунке 16.

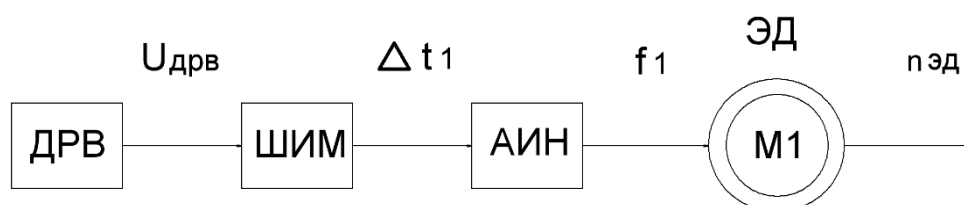


Рисунок 16 – Структурная схема частотного электропривода питательного насоса при управляющем воздействии по частотному каналу

Схема содержит:

- датчик расхода воды ДРВ;
- широтно-импульсный модулятор ШИМ;
- автономный источник напряжения АИН;

– электродвигатель ЭД.

Выходным сигналом ДРВ является сигнал $U_{дрв}$, несущим информацию о расходе воды в системе водоснабжения.

ШИМ вырабатывает импульсы с шириной Δt_1 , пропорциональной сигналу $U_{дрв}$.

АИН вырабатывает синусоидальное напряжение, пропорциональное ширине импульсов Δt_1 , т.е. пропорциональное выходному сигналу ДРВ $U_{дрв}$.

2.2 Описание схемы замещения асинхронного электродвигателя и расчёт параметров её элементов

В качестве асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (АД) используем электродвигатель серии АД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2 установленный на ПЭН-2 Кемеровской ТЭЦ, имеющий следующие параметры [26],[12]:

- мощность 315 кВт;
- частота вращения 2976 об/мин;
- напряжение статора 6000 В;
- масса 2415 кг;
- ток статора 35,7 А;
- скольжение 0,8 %;
- КПД 94,3 %;
- коэффициент мощности 0,9 о.е;
- кратность максимального вращающего момента 2,7;
- кратность пускового вращающего момента 1,0;
- кратность пускового тока 7,0.

T-образная схема замещения фазы АД с короткозамкнутым ротором, используемом в питательном насосе, показана на рисунке 17.

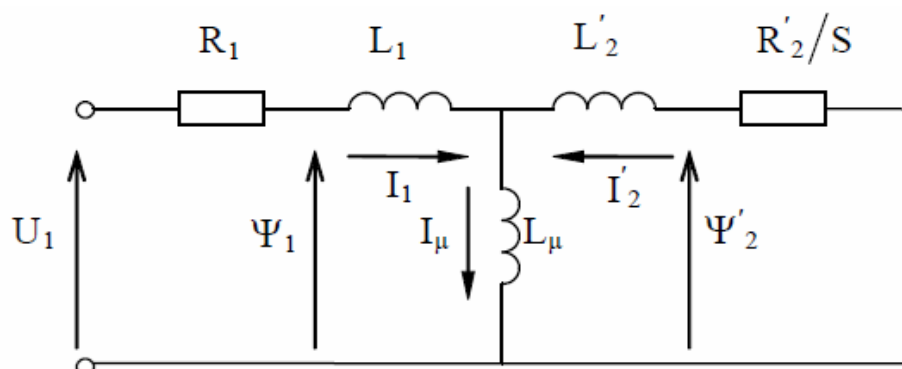


Рисунок 17 – T-образная схема замещения фазы АД

На рисунке 17 введены следующие обозначения:

U_1 – напряжение на статоре;

R_1 – активное сопротивление статора;

L_1 – индуктивность статора;

L'_2 – приведенная индуктивность ротора;

L_μ – индуктивность намагничивающего контура;

R'_2 – приведенное активное сопротивление ротора;

Ψ_1 – потокосцепление статора;

Ψ'_2 – приведенное потокосцепление ротора;

I_1 – ток статора;

I'_2 – приведенный ток ротора;

I_μ – ток намагничивания.

Номинальное значение тока статора:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H}; \quad (5)$$

где P_H – номинальная мощность;

U_H – номинальное линейное напряжение;

$\cos \varphi_H$ – коэффициент мощности в номинальном режиме;

η_H – коэффициент полезного действия в номинальном режиме.

Принимая $P_H = 315 \text{ кВт}$; $U_H = 6000 \text{ В}$; $\cos \varphi_H = 0,9$; $\eta_H = 0,943$, рассчитаем

$$I_H = \frac{315 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,9 \cdot 0,943} = 35,716 \text{ А};$$

что отвечает значению $I_H = 35,7 \text{ А}$ технических данных электродвигателя серии АД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2 [26].

Механические потери в АД

$$\Delta P_{\text{мех}} = (0,01 \dots 0,05) \cdot P_H. \quad (6)$$

Принимая $P_H = 315 \text{ кВт}$, механические потери, согласно формуле (6), составят:

$$\Delta P_{\text{мех}} = (0,01 \dots 0,05) \cdot 315 \cdot 10^3 = (3150 \dots 15750) \text{ Вт}.$$

Принимаем $\Delta P_{\text{мех}} = 9 \text{ кВт}$.

Номинальное скольжение

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} \cdot 100\%; \quad (7)$$

где n_o – синхронная скорость вращения, $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$;

n_n – номинальная скорость вращения, $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

Принимая $n_o = 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$; $n_n = 2976 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, согласно формуле (7)

$$s_n = \frac{3000 - 2976}{3000} \cdot 100 = 0,8\% ,$$

что отвечает значению $s_n = 0,8\%$ технических данных электродвигателя серии АД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2 [12].

Критическое скольжение

$$s_k = s_n \cdot \left(k_m + \sqrt{(k_m)^2 - 1} \right) \cdot 100\%; \quad (8)$$

где k_m – кратность максимального момента.

Принимая $s_n = 0,8\%$; $k_m = 2,7$; согласно формуле (8)

$$s_k = 0,008 \cdot (2,7 + \sqrt{2,7^2 - 1}) \cdot 100 = 4,166\% .$$

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\left(\frac{U_n}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot (1 - s_n)}{c_1 \cdot \left(1 + \frac{c_1}{s_k} \right) \cdot k_m \cdot (P_n + \Delta P_{\text{мех}})} ; \quad (9)$$

где $c_1 = 1,01 \dots 1,05$ – конструктивный коэффициент.

Принимая $U_H = 6000\text{В}$; $s_H = 0,8\%$; $c_1 = 1,03$; $s_K = 4,166\%$; $k_m = 2,7$;
 $P_H = 315\text{кВт}$; $\Delta P_{\text{мех}} = 9\text{кВт}$; согласно формуле (9)

$$R_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\left(\frac{6000}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot (1 - 0,008)}{1,03 \cdot \left(1 + \frac{1,03}{0,04166}\right) \cdot 2,7 \cdot (315 \cdot 10^3 + 9 \cdot 10^3)} = 0,770 \text{ Ом}.$$

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора

$$R'_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{(P_H + \Delta P_{\text{мех}}) \cdot k_H}{(1 - s_H) \cdot (k_i)^2 \cdot (I_H)^2}; \quad (10)$$

где k_H – кратность пускового момента;

k_i – кратность пускового тока.

Принимая $P_H = 315\text{кВт}$; $\Delta P_{\text{мех}} = 9\text{кВт}$; $k_H = 1$; $s_H = 0,8\%$; $k_i = 7$;
 $I_H = 35,716\text{А}$; согласно формуле (10)

$$R'_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{(315 \cdot 10^3 + 9 \cdot 10^3) \cdot 1}{(1 - 0,008) \cdot 7^2 \cdot 35,716^2} = 1,742 \text{ Ом}.$$

Индуктивность цепи намагничивания

$$L_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H} \cdot \frac{\frac{U_H}{\sqrt{3}}}{I_H \cdot [\sqrt{1 - (\cos \varphi_H)^2} - \cos \varphi_H \cdot \frac{s_H}{s_K}]}; \quad (11)$$

где f_H – номинальная частота сети.

Принимая $U_H = 6000\text{В}$; $f_H = 50\text{Гц}$; $I_H = 35,716\text{А}$; $k_i = 7$; $\cos \varphi_H = 0,9$;
 $s_H = 0,8\%$; $s_K = 4,166\%$ согласно формуле (11)

$$L_m = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \cdot \frac{6000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{35,716 \cdot (\sqrt{1-0,9^2} - 0,9 \cdot \frac{0,008}{0,04166})} = 1,174 \text{ Гн.}$$

Индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора

$$L_1 \approx L'_2 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_H} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot k_i \cdot I_H}\right)^2 - (R_1 + R'_2)^2}. \quad (12)$$

Принимая $U_H = 6000\text{В}$; $f_H = 50\text{Гц}$; $I_H = 35,716\text{А}$; $k_i = 7$; $R_1 = 0,770\text{Ом}$;
 $R'_2 = 1,742\text{Ом}$ согласно формуле (12)

$$L_1 \approx L'_2 = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 50} \cdot \sqrt{\left(\frac{6000}{7 \cdot 35,716 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 - (0,770 + 1,742)^2} = 0,0217 \text{ Гн.}$$

Расчётное значение конструктивного коэффициента

$$c_1 = 1 + \frac{L_1}{L_m}. \quad (13)$$

Принимая $L_1 = 0,0217\text{Гн}$; $L_m = 1,174\text{Гн}$ согласно формуле (13)

$$c_1 = 1 + \frac{0,0217}{1,174} = 1,0185.$$

Таким образом, расчётное значение $c_1 = 1,0185$ приблизительно совпадает с ранее принятым значением $c_1 = 1,03$ в формуле (9). Следовательно, расчёты выполнены верно.

2.3 Построение механических характеристик асинхронного электродвигателя

Для более полного использования АД по моменту согласно закону М.П. Костенко в процессе регулирования скорости используем закон изменения отношения $\frac{U_1^*}{f_1^*}$ с учётом статического момента M_c^* :

$$\frac{U_1^*}{f_1^*} = \sqrt{M_c^*}; \quad (14)$$

где U_1^* – относительное напряжение статора, определяется выражением (15);

f_1^* – относительная частота напряжения, определяется выражением (16);

M_c^* – относительный статический момент, определяется выражением (17).

Относительное напряжение статора АД:

$$U_1^* = \frac{U_1}{U_H}; \quad (15)$$

где U_1 – напряжение статора;

U_H – номинальное напряжение статора.

Относительная частота напряжения статора:

$$f_1^* = \frac{f_1}{f_H}; \quad (16)$$

где f_1 – частота напряжения статора;

f_H – номинальная частота напряжения статора.

Относительный статический момент

$$M_c^* = \frac{M_{c1}}{M_{сн}}; \quad (17)$$

где M_{c1} – статический момент;

$M_{сн}$ – номинальный статический момент.

Абсолютные напряжение статора, частота напряжения статора и статический момент определяются формулами:

$$U_1 = U_n \cdot U_1^*; \quad (18)$$

$$f_1 = f_n \cdot f_1^*; \quad (19)$$

$$M_{c1} = M_{сн} \cdot M_c^*. \quad (20)$$

Электромагнитный момент трёхфазного АД с учётом формулы (17) опишем следующей формулой:

$$M = \frac{28,6 \cdot (U_1)^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{n_0 \cdot f_1^* \cdot [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 \cdot X'_2)^2]}; \quad (21)$$

где n_0 – синхронная скорость вращения магнитного поля АД;

X_1 – реактивное сопротивление статора АД;

X'_2 – приведенное реактивное сопротивление ротора АД;

s – скольжение, определяемое формулой [14, с. 104]:

$$s = \frac{n_0 - n_1}{n_1}; \quad (22)$$

На рисунке 18 построены механические характеристики асинхронного электродвигателя серии АД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2 при вентиляторной

нагрузке для значений $R_1 = 0,770 \text{ Ом}$; $R_2' = 1,742 \text{ Ом}$; $X_1 \approx X_2' = 6,814 \text{ Ом}$;

$n_0 = 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ при следующих значениях частот и отвечающих им напряжений:

$$f_1 = f_1^* \cdot f_n = 1,0 \cdot 50 = 50 \text{ Гц}; \quad U_1 = U_1^* \cdot U_n = 1,0 \cdot 6000 = 6000 \text{ В};$$

$$f_1 = f_1^* \cdot f_n = 0,6 \cdot 50 = 30 \text{ Гц}; \quad U_1 = U_1^* \cdot U_n = 0,6 \cdot 6000 = 3600 \text{ В};$$

$$f_1 = f_1^* \cdot f_n = 0,3 \cdot 50 = 15 \text{ Гц}; \quad U_1 = U_1^* \cdot U_n = 0,3 \cdot 6000 = 1800 \text{ В};$$

при которых $\frac{U_1^*}{f_1^*} = \frac{1,0}{1,0} = \frac{0,6}{0,6} = \frac{0,3}{0,3} = 1,0 = \text{const.}$

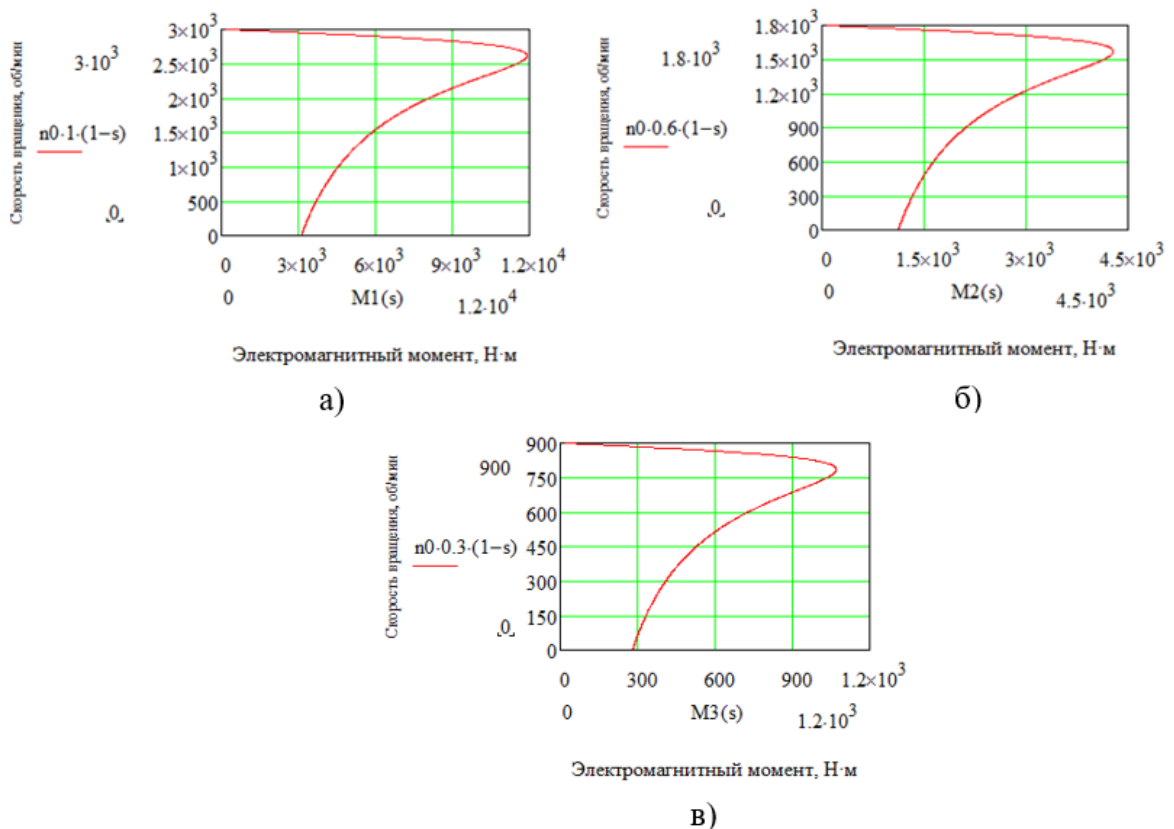


Рисунок 18 – Механические характеристики асинхронного электродвигателя

серии АД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2: а – при частоте $f_1 = 50 \text{ Гц}$;

б – при частоте $f_1 = 30 \text{ Гц}$; в – при частоте $f_1 = 15 \text{ Гц}$

Из механических характеристик рисунка 18 видно, что при питании напряжением $U_1 = U_1^* \cdot U_H = 1,0 \cdot 6000 = 6000\text{В}$ с частотой $f_1 = 50\text{Гц}$ частота вращения АД на рабочем участке составляет $n_1 = (3000 \dots 2800) \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ при изменении электромагнитного момента в диапазоне $M = (0 \dots 10000)\text{Н} \cdot \text{м}$.

При питании напряжением $U_1 = U_1^* \cdot U_H = 0,6 \cdot 6000 = 3600\text{В}$ с частотой $f_1 = 30\text{Гц}$ частота вращения АД на рабочем участке составляет $n_1 = (1800 \dots 1650) \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ при изменении электромагнитного момента в диапазоне $M = (0 \dots 3500)\text{Н} \cdot \text{м}$.

При питании напряжением $U_1 = U_1^* \cdot U_H = 0,3 \cdot 6000 = 1800\text{В}$ с частотой $f_1 = 15\text{Гц}$ частота вращения АД на рабочем участке составляет $n_1 = (900 \dots 830) \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ при изменении электромагнитного момента в диапазоне $M = (0 \dots 1000)\text{Н} \cdot \text{м}$.

На рисунке 19 показана построенная зависимость $U_1 = F(f_1)$ асинхронного электродвигателя серии АД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2.

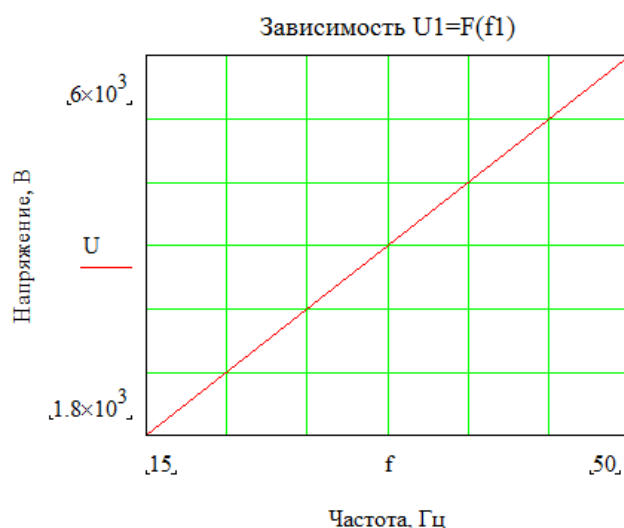


Рисунок 19 – Зависимость асинхронного электродвигателя серии АД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2

Как видно из рисунка 19, зависимость $U_1 = F(f_1)$ носит линейный характер.

2.4 Исследование модели асинхронного электродвигателя при управляющем воздействии по частотному каналу в среде Mathcad

Математическая модель АД при управляющем воздействии по частотному каналу при условии жёстких механических связей при работе на линейном участке механической характеристики при допущении, что $R_1 = 0$, представлена на рисунке 20.

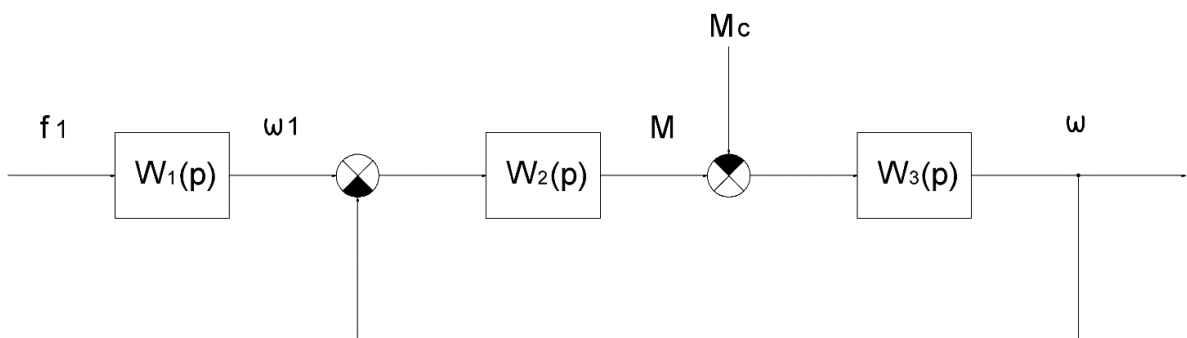


Рисунок 20 – Математическая модель асинхронного электродвигателя при управляющем воздействии по частотному каналу

На рисунке 20 введены обозначения:

$W_1(p)$ – коэффициент передачи полюсной составляющей в операторной форме;

$W_2(p)$ – коэффициент передачи электромагнитной составляющей в операторной форме;

$W_3(p)$ – коэффициент передачи электромеханической составляющей в операторной форме;

f_1 – частота напряжения на статоре;

ω_1 – круговая частота напряжения на статоре;

M – момент на валу АД;

M_c – статический момент;

ω – угловая скорость вращения вала АД.

Коэффициент передачи контура в операторной форме, состоящего из $W_2(p)$ и $W_3(p)$, рассчитывается по формуле:

$$W_{23}(p) = \frac{W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_2(p) \cdot W_3(p)}. \quad (23)$$

Коэффициент передачи электродвигателя в операторной форме

$$W_{эд}(p) = W_1(p) \cdot W_{23}(p). \quad (24)$$

Коэффициент передачи полюсной составляющей АД в операторной форме составляет:

$$W_1(p) = \frac{2 \cdot \pi}{p_n}; \quad (25)$$

где p_n – число полюсов ЭД.

Коэффициент передачи электромагнитной составляющей АД в операторной форме можно представить как

$$W_2(p) = \left(\frac{U_1^*}{f_1^*} \right)^2 \cdot \frac{\beta_{см}}{T_э \cdot p + 1}; \quad (26)$$

где $\beta_{ст}$ – статическая жёсткость механической характеристики;

$T_э$ – электромагнитная постоянная времени.

Коэффициент передачи электромеханической составляющей АД в операторной форме можно представить как

$$W_3(p) = \frac{1}{T_M \cdot p}; \quad (27)$$

где T_M – электромеханическая постоянная времени двигателя и механизма, приведенная к валу.

Статическая жёсткость механической характеристики АД

$$\beta_{cm} = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\omega_H \cdot s_k}; \quad (28)$$

где ω_H – номинальная угловая скорость вращения АД.

Для расчёта ω_H используем формулу:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{n_H}{9,55}. \quad (29)$$

Для значения $n_H = 2976 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ рассчитаем

$$\omega_H = \frac{2976}{9,55} = 311,623 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = 311,623 \frac{1}{\text{с}}.$$

Для расчёта статической жёсткости механической характеристики принимаем $\omega_H = 311,623 \frac{1}{\text{с}}$; $s_k = 4,166\%$.

Значения $M_{кр}$ определим по графикам рисунка 17 для различных значений частот f_1 :

- для значения $f_1 = 50 \text{ Гц}$ $M_{\text{кр}} = 1,2 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- для значения $f_1 = 30 \text{ Гц}$ $M_{\text{кр}} = 4,3 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- для значения $f_1 = 15 \text{ Гц}$ $M_{\text{кр}} = 1,1 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Тогда статическая жёсткость механической характеристики АД будет равна:

- для значения $f_1 = 50 \text{ Гц}$:

$$\beta_{\text{ст}} = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 10^4}{311,623 \cdot 4,166 \cdot 10^{-2}} = 0,185 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с};$$

- для значения $f_1 = 30 \text{ Гц}$:

$$\beta_{\text{ст}} = \frac{2 \cdot 4,3 \cdot 10^3}{311,623 \cdot 4,166 \cdot 10^{-2}} = 0,664 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с};$$

- для значения $f_1 = 15 \text{ Гц}$:

$$\beta_{\text{ст}} = \frac{2 \cdot 1,1 \cdot 10^3}{311,623 \cdot 4,166 \cdot 10^{-2}} = 0,170 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

Электромагнитная постоянная времени рассчитывается формуле:

$$T_э = \frac{1}{\omega_{\text{H}} \cdot s_{\text{к}}} . \quad (30)$$

Принимая $\omega_{\text{H}} = 311,623 \frac{1}{\text{с}}$; $s_{\text{к}} = 4,166\%$, рассчитаем:

$$T_э = \frac{1}{311,623 \cdot 4,166 \cdot 10^{-2}} = 0,077 \text{ с}.$$

Принимаем $T_M = 0,8с$.

На рисунке 21 показаны результаты расчёта переходного процесса АД серии АДД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2.

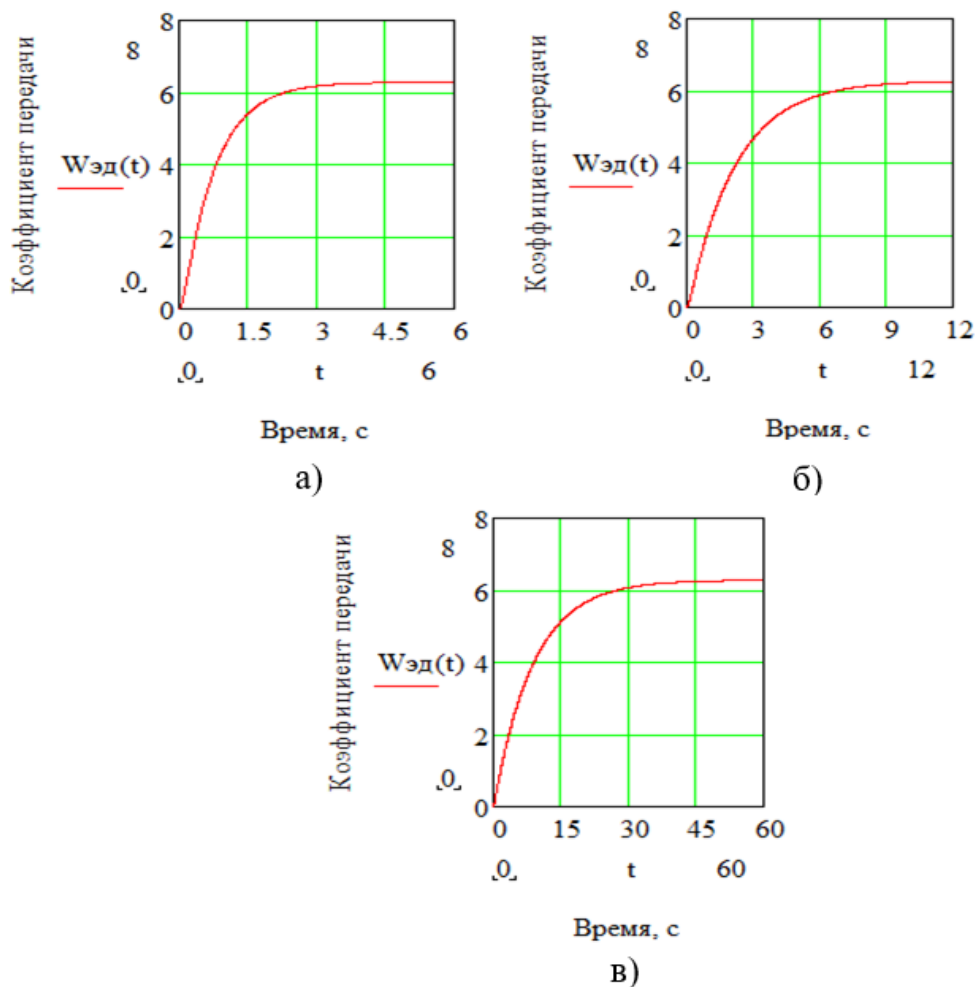


Рисунок 21 – Результаты расчёта переходного процесса асинхронного электродвигателя серии АДД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2 при управляющем воздействии по частотному каналу: а – при частоте $f_1 = 50\text{Гц}$; б – при частоте $f_1 = 30\text{Гц}$; в – при частоте $f_1 = 15\text{Гц}$

Как видно из графиков рисунка 21, время переходного процесса при частоте $f_1 = 50\text{Гц}$ составляет $t_{пер} \approx 4с$; при частоте $f_1 = 30\text{Гц}$ – $t_{пер} \approx 10с$; при частоте $f_1 = 15\text{Гц}$ – $t_{пер} \approx 40с$.

2.5 Построение математической модели частотного электропривода питательного насоса при управляющем воздействии по частотному каналу в среде MathCad

Математическая модель электропривода питательного насоса при управляющем воздействии по частотному каналу представлена на рисунке 22.

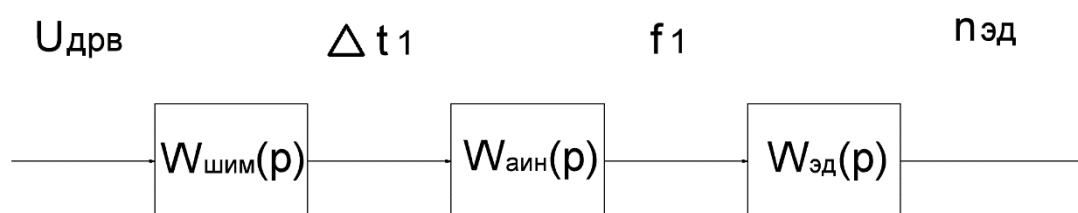


Рисунок 22 – Математическая модель электропривода питательного насоса при управляющем воздействии по частотному каналу

На рисунке 22 введены обозначения:

$W_{ШИМ}(p)$ – коэффициент передачи ШИМ в операторной форме;

$W_{аин}(p)$ – коэффициент передачи автономного источника напряжения в операторной форме;

$W_{эд}(p)$ – коэффициент передачи ЭД в операторной форме.

Переходный процесс в основном определяется передаточной функцией $W_{эд}(p)$, следовательно, переходный процесс всего электропривода будет примерно описываться графиками, изображёнными на рисунке 21.

Выводы по разделу 2.

Расчёт механических характеристик показал, что при питании напряжением с $U_H = 6000В$ частотой $f_1 = 50Гц$ частота вращения АД на

рабочем участке составляет $n_1 = (3000...2800) \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ при изменении электромагнитного момента в диапазоне $M = (0...10000) \text{Н} \cdot \text{м}$.

При питании напряжением $U_n = 3600 \text{В}$ с частотой $f_1 = 30 \text{Гц}$ частота вращения АД на рабочем участке составляет $n_1 = (1800...1650) \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ при изменении электромагнитного момента в диапазоне $M = (0...3500) \text{Н} \cdot \text{м}$.

При питании напряжением $U_n = 1800 \text{В}$ с частотой $f_1 = 15 \text{Гц}$ частота вращения АД на рабочем участке составляет $n_1 = (900...830) \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ при изменении электромагнитного момента в диапазоне $M = (0...1000) \text{Н} \cdot \text{м}$.

Время переходного процесса АД при частоте $f_1 = 50 \text{Гц}$ составляет $t_{\text{пер}} \approx 4 \text{с}$; при частоте $f_1 = 30 \text{Гц}$ – $t_{\text{пер}} \approx 10 \text{с}$; при частоте $f_1 = 15 \text{Гц}$ – $t_{\text{пер}} \approx 45 \text{с}$.

Таким образом, при изменении частоты напряжения питания АД серии АД-4 типа 4АЗМО-315-6000-2У2 при вентиляторной характеристики нагрузки изменяются как частота вращения ЭД, так и диапазон электромагнитного момента. При уменьшении частоты напряжения питания АД серии АД-4 типа 4АЗМО-315-6000-2У2 время переходной характеристик увеличивается.

Переходный процесс ЭП питательного насоса описывается в основном переходными характеристиками АД.

3 Выбор и описание преобразователя частоты для электродвигателя питательного насоса

К настоящему времени, совершенствование технического процесса производства IGBT-транзисторов привело к снижению стоимости преобразователей частоты и обеспечило их доступность для потребителя. В промышленности преобразователи частоты нашли свое применение для плавного изменения оборотов электродвигателей насосов, вентиляторов, компрессоров [1].

По данным электродвигателя, значениям частот его возбуждения выберем преобразователь частоты (ПЧ), опишем его основные технические характеристики, а также функциональную схему и конструктив.

3.1 Выбор, описание и основные технические характеристики преобразователя частоты

В качестве ПЧ выберем высоковольтный частотный преобразователь серии ПЧВМ производства ООО «Электротекс-ИН», входящего в группу компаний «ПРОТОН».

Внешний вид ПЧ серии ПЧВМ показан на рисунке 23 [41].



Рисунок 23 – Внешний вид ПЧ серии ПЧВМ

ПЧ серии ПЧВМ имеет следующие преимущества [41]:

- высокий КПД за счет исключения потерь в трансформаторах;
- обеспечение высокого качества выходных токов и напряжений с минимальным уровнем гармоник, что позволяет обойтись без применения синусных фильтров;
- возможность безударного включения на вращающийся двигатель благодаря наличию функции «подхват» – поиск скорости;
- может создавать высокие пусковые моменты и тормозить двигатель постоянным током;
- небольшая масса и габариты по сравнению с двухтрансформаторными преобразователями той же мощности;
- обладает полным набором защитных функций для обеспечения безопасной работы преобразователя, электродвигателя и приводимого механизма;
- гибкая настройка всех защитных функций и параметров работы привода;

- встроенный ПИД-регулятор, обеспечивающий регулирование технологического параметра;
- встроенные часы реального времени позволяют устройству функционировать автоматически, согласно предварительно заданному графику работы;
- встроенный набор цифровых и аналоговых входов и выходов, обеспечивающих возможность управления преобразователем с помощью внешних управляющих контроллеров;
- сетевой интерфейс RS-485 с протоколами Modbus ASCII/RTU для интеграции преобразователя в АСУТП предприятия заказчика;
- расстояние между пультом дистанционного управления и преобразователем частоты может достигать до 300 метров, обеспечивая удобство управления на расстоянии;
- удобный ввод в эксплуатацию: настройка частотного преобразователя и диагностика привода во время работы осуществляется с помощью встроенного пульта дистанционного управления с графическим дисплеем, имеющим полностью русскоязычный интуитивно понятный интерфейс, а не буквенно-цифровую кодировку параметров, как у большинства преобразователей на российском рынке, что делает его удобным в эксплуатации;
- может быть дополнен любой программной и аппаратной функциональностью по запросу заказчика.

Система управления, используемая в ПЧ серии ПЧВМ, включает в себя все необходимые функции управления, защиты и блокировок для обеспечения плавного пуска, остановки и регулирования частоты вращения высоковольтного асинхронного электродвигателя. Благодаря этой системе управления ПЧ серии ПЧВМ обладает превосходными техническими характеристиками и широким набором сервисных функций без необходимости применения каких-либо дополнительных внешних модулей.

ПЧ серии ПЧВМ позволяет осуществлять скалярное управление по характеристике $\frac{U_1}{f_1}$, задаваемой по восьми точкам. В нашем случае таких точек будет три: $\frac{U_1}{f_1} = \frac{6000}{50} = 12$; $\frac{U_1}{f_1} = \frac{3600}{30} = 12$; $\frac{U_1}{f_1} = \frac{1800}{15} = 12$.

На рисунке 24 показаны области допустимых значений характеристик $\frac{U_1}{f_1}$.

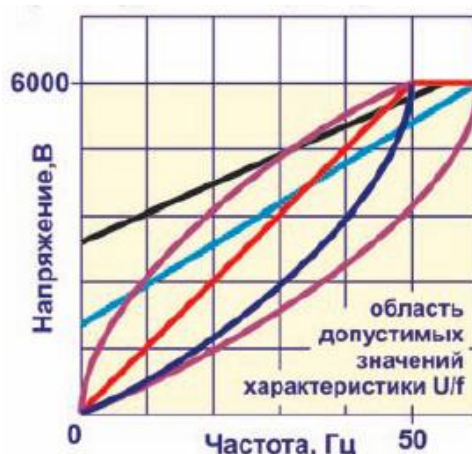


Рисунок 24 – Области допустимых значений характеристик $\frac{U_1}{f_1}$

Как видно из рисунка 24, области допустимых значений характеристик $\frac{U_1}{f_1}$ отвечают рассчитанным в разделе 2 значениям соответствующих характеристик АД серии АД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2 (см. рисунок 19).

Режимы управления работой преобразователя, следующие [41]:

- ручное управление, основанное на командах оператора с местного пульта управления;
- автоматическое управление, основанное на предварительно заданном алгоритме с учетом установленных событий;
- управление от внешней релейно-контактной аппаратуры, используя дискретные входы типа "сухой контакт";

- внешнее управление от пульта дистанционного управления или внешних управляющих контроллеров по последовательному интерфейсу RS-485 в соответствии с протоколом Modbus ASCII/RTU.

Частота выходного напряжения преобразователя частоты может быть задана следующими способами [41]:

- С помощью кнопок на местном пульте управления;
- Через потенциометр на местном пульте управления;
- С использованием встроенных часов реального времени;
- В зависимости от состояния дискретных входов;
- Путем подачи аналогового сигнала (0...10 В или 0...20 мА) на вход задатчика;
- С помощью пульта дистанционного управления или внешних управляющих контроллеров через последовательный интерфейс RS-485 в соответствии с протоколом Modbus ASCII/RTU.

Регулирование работы нагрузки допускается как путём прямого частотного управления, так и посредством ПИД-регулятора.

Основными функциями преобразователя являются [41]:

- плавный пуск и остановка двигателя;
- автоматическое управление частотой и напряжением на выходе;
- автоматическое поддержание величины технологического параметра при ПИД-регулировании;
- автоматическое повторное включение с выходом на заданный режим после отключения, вызванного аварией питающей сети или недопустимой перегрузкой преобразователя;
- «подхват» двигателя – автоматическое повторное безударное включение преобразователя на вращающийся двигатель;
- динамическое торможение электродвигателя, обеспечиваемое путём подключения внешнего модуля тормозных резисторов;

- возможность управления включением и отключением дополнительного двигателя;
- наличие специального алгоритма управления насосами при отсутствии разбора;
- пропуск резонансных частот привода с настройкой до 4-х зон резонанса;
- режим частотного токоограничения;
- отображение и сигнализация информации о параметрах и режимах работы;
- оценка количества потребляемой электроэнергии;
- регистрация отказов, нештатных и аварийных режимов, а также их хранение в энергонезависимой памяти.

Функции защиты, реализованные в ПЧ серии ПЧВМ, включают [41]:

- максимально-токовую защиту двигателя;
- время-токовую защиту двигателя;
- защиту от межфазных коротких замыканий на выходе;
- защиту от недопустимого снижения нагрузки двигателя при обрыве ремней или поломке приводного механизма (защита от потери нагрузки);
- защиту от кратковременного повышения входного напряжения свыше 10% от номинального;
- защиту от исчезновения или недопустимого снижения питающего напряжения свыше 10% от номинального;
- защиту от дисбаланса напряжения и тока на входе и выходе, а также от обрыва фаз;
- защиту от неисправностей в системе питания цепей управления преобразователя;
- защиту от перегрева силовой части преобразователя;

– защиту от несанкционированного проникновения во внутреннее пространство шкафов.

Основные технические характеристики ПЧ типа ПЧВМ-ТТПТ-35,7-6000-50-УХЛ4 [41] представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики ПЧ типа ПЧВМ-ТТПТ-35,7-6000-50-УХЛ4

Параметр	Значение
Выходное напряжение	6±10% кВ
Частота входного напряжения	50 Гц
Напряжение питания собственных нужд	380+10%-15% В
Частота входного напряжения собственных нужд	50 Гц
Диапазон изменения выходного напряжения	(50...6000) В
Номинальная выходная активная мощность	315 кВт
Номинальный выходной ток	37 А
Коэффициент мощности преобразователя на входе	не менее 0,95
КПД	0,98
Перегрузочная способность	110 % номинального тока при продолжительности нагрузки 300 с и времени усреднения 10 минут
Интерфейс связи	RS-485 (ModBus ASCII/RTU), CAN, Ethernet
Аналоговые входы	2 входа (0...20) мА с индивидуальной гальванической развязкой
Дискретные входы	8 программируемых входов с групповой гальванической развязкой
Количество дискретных входов	4
Тип охлаждения	принудительное воздушное
Степени защиты оболочки	IP20 (стандарт); IP21, IP23, IP31, IP54 – по заказу
Климатические условия эксплуатации для исполнения УХЛ4	При эксплуатации: температура от 0 до +40 °С; относительная влажность 90 % при 20 °С (без конденсации влаги). При транспортировке: температура от -40 до +50 °С.
Среднее время восстановления работоспособного состояния	3 часа

Оборудование поставляется с гарантийным сроком эксплуатации 2 года.

3.2 Описание функциональной схемы

Функциональная схема ПЧ серии ПЧВМ представлена на рисунке 25 [41].

Схема содержит:

- входной сухой многообмоточный трансформатор;
- многоуровневый высоковольтный ПЧ;
- систему управления.

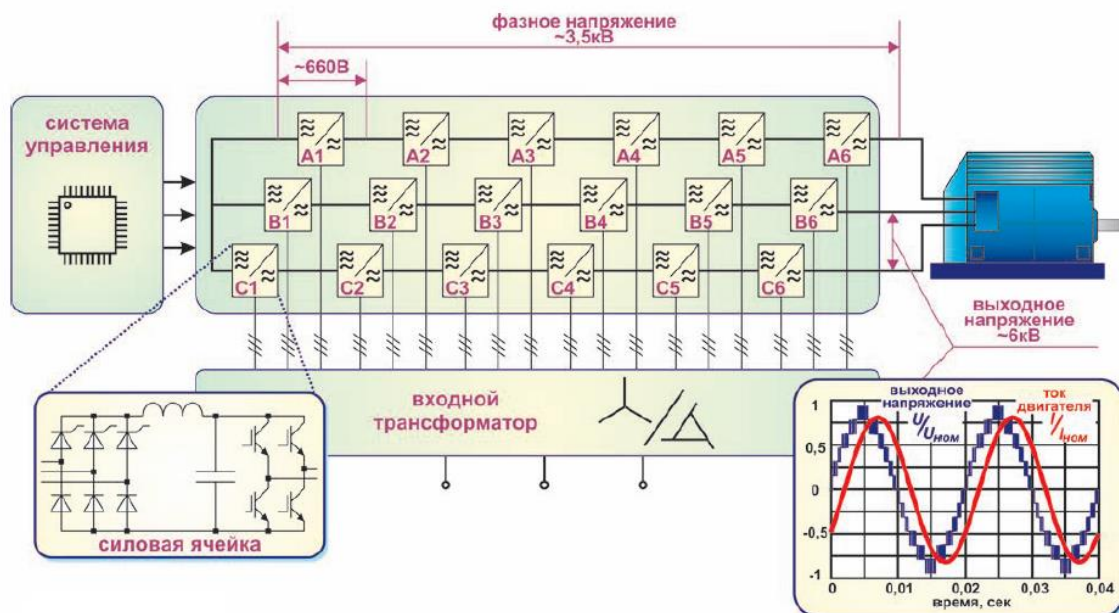


Рисунок 25 – Функциональная схема ПЧ серии ПЧВМ

Входной многообмоточный трансформатор повышает входное напряжение до значения 6 кВ.

Многоуровневый высоковольтный ПЧ состоит из одинаковых силовых ячеек и регулирует выходное напряжение по закону $\frac{U_1^*}{f_1^*} = 1,0$, а также его частоту.

Силовая ячейка включает в себя последовательно соединенные компоненты: управляемый выпрямитель на основе тиристоров, фильтр, содержащий дроссель и конденсатор, а также автономный инвертор, который построен на IGBT-транзисторах.

Управление всей схемой осуществляется системой управления.

3.3 Описание конструктива преобразователя частоты

Конструктив ПЧ типа ПЧВМ-ТТПТ-35,7-6000-50-УХЛ4 показан на рисунке 26.

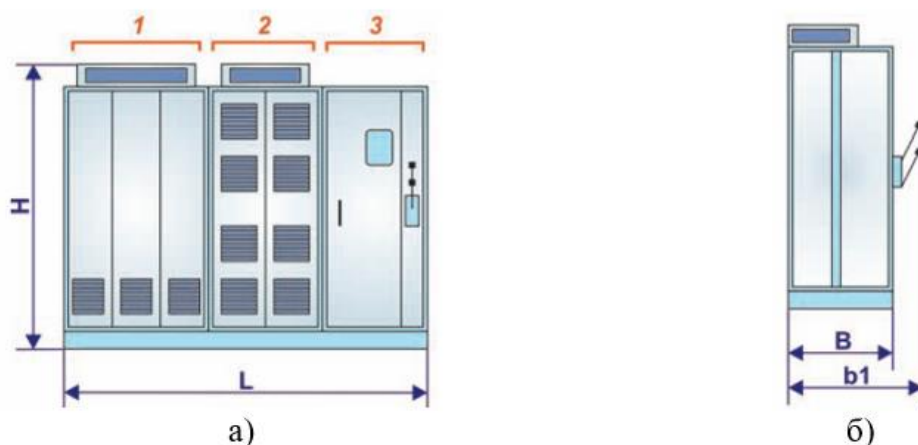


Рисунок 26 – Конструктив ПЧ типа ПЧВМ-ТТПТ-35,7-6000-50-УХЛ4:

а – вид спереди; б – вид сбоку; 1 – шкаф трансформатора; 2 – шкаф ячеек; 3 – шкаф управления

Габаритные размеры ПЧ типа ПЧВМ-ТТПТ-35,7-6000-50-УХЛ4 представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Габаритные размеры ПЧ типа ПЧВМ-ТТПТ-35,7-6000-50-УХЛ4

Длина L, мм	высота Н, мм	Глубина В, мм	Глубина b ₁ , мм
4180	2400	1200	1500

Выводы по разделу 3.

В разделе 3 по данным электродвигателя серии АД-4 типа 4А3МО-315-6000-2У2, применяемого в питательном электронасосе на Кемеровской ТЭЦ, значениям частот его возбуждения и соотношений $\frac{U_1^*}{f_1^*}$ выбран ПЧ типа ПЧВМ-ТТПТ-35,7-6000-50-УХЛ4. Описаны его основные технические характеристики, функциональная схема и конструктив. Области допустимых значений характеристик $\frac{U_1}{f_1}$ ПЧ отвечают рассчитанным в разделе 2 значениям соответствующих характеристик. Мощность, выходные напряжения и токи выбранного ПЧ отвечают требуемым характеристикам электродвигателя.

4 Расчёт экономической эффективности от внедрения частотного преобразователя питательного электронасоса на Кемеровской ТЭЦ

Выполним расчёт экономической эффективности от внедрения частотного преобразователя питательного электронасоса на Кемеровской ТЭЦ, для чего выполним расчёт эксплуатационных показателей насоса при использовании ПЧ, капитальных вложений, годовых эксплуатационных издержек на приобретение нового оборудования, годового экономического эффекта за счёт электроэнергии и общего экономического эффекта от внедрения нового оборудования [4].

Сравним результаты расчетов экономической эффективности от внедрения ЧП на ПЭН Кемеровской ТЭЦ с установленным нерегулируемым ЭП.

4.1 Расчёт эксплуатационных показателей насоса при использовании преобразователя частоты

Мощность, потребляемая электродвигателем,

$$P_2 = P_1 \cdot (k_g)^3; \quad (31)$$

где P_1 – номинальная мощность электродвигателя;

$$k_g = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{G_2}{G_1}; \quad (32)$$

где ω_1 – номинальная скорость вращения электродвигателя;

ω_2 – произвольная скорость вращения электродвигателя;

G_1 – номинальный расход воды при номинальной скорости вращения электродвигателя ω_1 ;

G_2 – расход воды при произвольной скорости вращения электродвигателя ω_2 .

Разница между мощностями потребления электродвигателя:

$$\Delta P = P_2 - P_1. \quad (33)$$

Как известно, ТЭЦ работает по тепловому графику, максимум которого приходится на зимний период года, а минимум на летнее время [47]. Ожидаемый фактический расход питательной воды насоса, связанный с уменьшением потребления воды в теплое время года и увеличением потребления в холодное время года, после внедрения ПЧ по месяцам показан в таблице 3 [4].

Таблица 3 – Эксплуатационные показатели насоса при использовании ПЧ

Месяц	k_g	$G_2, \frac{m^3}{\text{час}}$	$\omega_2, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	$P_2, \text{кВт}$	$\Delta P, \text{кВт}$
Январь	1,0	50,0	2976	315,00	0
Февраль	1,0	50,0	2976	315,00	0
Март	0,9	45,0	2678	229,64	85,36
Апрель	0,8	40,0	2381	161,28	153,72
Май	0,7	35,0	2083	108,04	206,96
Июнь	0,6	30,0	1786	68,04	246,96
Июль	0,5	25,0	1488	39,38	275,62
Август	0,6	30,0	1786	68,04	246,96
Сентябрь	0,7	35,0	2083	108,04	206,96
Октябрь	0,8	40,0	2381	161,28	153,72
Ноябрь	0,9	45,0	2678	229,64	85,36
Декабрь	1,0	50,0	2976	315,00	0
ИТОГО				2118,38	1661,62

В таблице 3 также показаны результаты расчёта G_2 по месяцам при значении $G_1 = 50 \frac{m^3}{\text{час}}$ согласно формуле (32), ω_2 при значении $\omega_1 = 2976 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$

согласно формуле (32), P_2 при значении $P_1 = 315\text{кВт}$ согласно формуле (31), ΔP согласно формуле (33).

4.2 Расчёт капитальных вложений

Капиталовложения в энергосберегающее мероприятие рассчитаем по формуле [5]:

$$K = K_{об} + K_{вспом.об} + K_{смп} + K_{пнр} + K_{проект}; \quad (34)$$

где $K_{об}$ – стоимость основного внедряемого оборудования;

$K_{вспом.об}$ – стоимость вспомогательного оборудования;

$K_{смп}$ – стоимость строительно-монтажных работ;

$K_{пнр}$ – стоимость пуско-наладочных работ;

$K_{проект}$ – стоимость проектно-изыскательских работ.

Новым оборудованием, внедряемым в производство, является преобразователь частоты (ПЧ) типа ПЧВМ-ТТПТ-35,7-6000-50-УХЛ4, для которого $K_{об} = 5800000$ руб.

В расчётах примем:

$$K_{вспом.об} = 0,15 \cdot K_{об}; \quad (35)$$

$$K_{смп} = 0,20 \cdot K_{об}; \quad (36)$$

$$K_{пнр} = 0,05 \cdot K_{об}; \quad (37)$$

$$K_{проект} = 0,10 \cdot K_{об}; \quad (38)$$

Тогда:

$$K_{вспом.об} = 870000 \text{ руб.}$$

$$K_{\text{смп}} = 1160000 \text{ руб.}$$

$$K_{\text{пнр}} = 290000 \text{ руб.}$$

$$K_{\text{проект}} = 580000 \text{ руб.}$$

Согласно формуле (34)

$$K = 5800000 + 870000 + 1160000 + 290000 + 580000 = 8700000 \text{ руб.}$$

4.3 Расчёт годовых эксплуатационных издержек на приобретение нового оборудования

Для расчёта годовых эксплуатационных издержек на приобретение нового оборудования воспользуемся формулой [5]:

$$\Delta И = \Delta И_{\text{эл.энерг}} + \Delta И_{\text{тек.рем}} + \Delta И_{\text{ам.отч}} + \Delta И_{\text{мат}} + \Delta И_{\text{зар.пл}} + \Delta И_{\text{соц.отчисл}}; \quad (39)$$

где $\Delta И_{\text{эл.энерг}}$ – годовые затраты на электроэнергию, потребляемую ПЧ;

$\Delta И_{\text{тек.рем}}$ – годовые затраты на текущий ремонт ПЧ;

$\Delta И_{\text{ам.отч}}$ – годовые затраты на амортизационные отчисления ПЧ;

$\Delta И_{\text{мат}}$ – годовые затраты на материалы ПЧ;

$\Delta И_{\text{зар.пл}}$ – годовые отчисления на оплату обслуживающего персонала ПЧ (фонд заработной платы);

$\Delta И_{\text{соц.отчисл}}$ – годовые социальные отчисления.

4.3.1 Расчёт годовых затрат на электроэнергию

Расчёт годовых затрат на электроэнергию, потребляемую ПЧ, выполним по формуле [32]:

$$\Delta И_{\text{эл.энерг}} = C_{\text{эл.энерг}} \cdot P_{\text{ср.потр.эл.двиг}} \cdot (1 - \eta_{\text{пч}}) \cdot \Delta T_{\text{пч}}; \quad (40)$$

где $C_{\text{эл.энерг}}$ – цена электроэнергии;

$P_{\text{ср.потр.эл.двиг}}$ – средняя мощность, потребляемая электродвигателем за год;

$\eta_{\text{пч}}$ – КПД ПЧ;

$\Delta T_{\text{пч}}$ – длительность эксплуатации ПЧ за год.

Для юридических лиц Кемеровской области на 2022 г. для одноставочного тарифа $C_{\text{эл.энерг}} = 3,705 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{час}}$ [35].

Среднее значение потребления электроэнергии двигателем составляет:

$$P_{\text{ср.потр.эл.двиг}} = \frac{P_{\Sigma \text{потр.эл.двиг}}}{12}; \quad (41)$$

где $P_{\Sigma \text{потр.эл.двиг}}$ – суммарная потребляемая электроэнергия двигателем за год после внедрения ПЧ.

Поскольку предполагается, что эксплуатация ПЧ будет круглогодичной, принимаем $\Delta T_{\text{пч}} = 8760 \text{ час}$.

Для значения $P_{\Sigma \text{потр.эл.двиг}} = 2118,38 \text{ кВт}$ согласно формуле (41) рассчитаем:

$$P_{\text{ср.потр.эл.двиг}} = \frac{2118,38}{12} = 176,53 \text{ кВт}.$$

Для значений $C_{\text{эл.энерг}} = 3,705 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{час}}$; $P_{\text{ср.потр.эл.двиг}} = 176,53 \text{ кВт}$;
 $\eta_{\text{пч}} = 98\%$; $\Delta T_{\text{пч}} = 8760 \text{ час}$; согласно формуле (40)

$$\Delta I_{\text{эл.энерг}} = 3.705 \cdot 176.532 \cdot (1 - 0.98) \cdot 8760 = 114589.529 \text{ руб}$$

4.3.2 Расчёт годовых затрат на амортизационные отчисления

Расчёт годовых затрат на амортизационные отчисления выполним по формуле:

$$\Delta И_{ам.отч} = 0,2 \cdot K_{об}. \quad (42)$$

Для значения $K_{об} = 5800000$ руб. согласно формуле (42)

$$\Delta И_{ам.отч} = 0,2 \cdot 5800000 = 1160000 \text{ руб.}$$

4.3.3 Расчёт годовых затрат на текущий ремонт

Расчёт годовых затрат на текущий ремонт выполним по формуле:

$$\Delta И_{тек.рем} = 0,15 \cdot \Delta И_{ам.отч}. \quad (43)$$

Для значения $\Delta И_{ам.отч} = 1160000$ руб. согласно формуле (43)

$$\Delta И_{тек.рем} = 0,15 \cdot 1160000 = 174000 \text{ руб.}$$

4.3.4 Расчёт годовых затрат на материалы

Расчёт годовых затрат на материалы выполним по формуле:

$$\Delta И_{мат} = 0,02 \cdot K_{об}. \quad (44)$$

Для значения $K_{об} = 5800000$ руб. согласно формуле (44)

$$\Delta И_{мат} = 0,02 \cdot 5800000 = 116000 \text{ руб.}$$

4.3.5 Расчёт годовых затрат на оплату обслуживающего персонала

Для обслуживания ПЧ достаточно одного техника на 0,5 ставки, поскольку оборудование работает в автоматическом режиме. Тогда годовые затраты на оплату обслуживающего персонала составят:

$$\Delta I_{\text{зар.пл}} = \frac{ЗП}{2} \cdot 12; \quad (45)$$

где ЗП – заработанная плата техника.

Принимая ЗП = 35000 руб., согласно формуле (45) рассчитаем

$$\Delta I_{\text{зар.пл}} = \frac{35000}{2} \cdot 12 = 210000 \text{ руб.}$$

4.3.6 Расчёт годовых социальных отчислений

Расчёт годовых социальных отчислений выполним по формуле:

$$\Delta I_{\text{соц.отчисл}} = k_{\text{соц.отчисл}} \cdot \Delta I_{\text{зар.пл}}; \quad (46)$$

где $k_{\text{соц.отчисл}}$ – коэффициент на социальные отчисления.

Принимая $\Delta I_{\text{зар.пл}} = 210000$ руб.; $k_{\text{соц.отчисл}} = 0,3$; согласно формуле (46) рассчитаем:

$$\Delta I_{\text{соц.отчисл}} = 0,3 \cdot 210000 = 63000 \text{ руб.}$$

4.3.7 Расчёт годовых эксплуатационных издержек на новое оборудование

Для значений $\Delta I_{\text{эл.энерг}} = 114589.529$ руб.; $I_{\text{тек.рем}} = 174000$ руб.;
 $\Delta I_{\text{ам.отч}} = 1160000$ руб.; $\Delta I_{\text{мат}} = 116000$ руб.; $\Delta I_{\text{зар.пл}} = 210000$ руб.;

$\Delta I_{\text{соц.отчисл}} = 63000$ руб. годовые эксплуатационные издержки на новое оборудование согласно формуле (39) составят:

$$\begin{aligned} \Delta I &= 114589.529 + 174000 + 1160000 + 116000 + 210000 + 63000 \\ &= 1837589.529 \text{ руб.} \end{aligned}$$

4.4 Расчёт годового экономического эффекта за счёт экономии электроэнергии

Годовой экономический эффект за счёт экономии электроэнергии от внедрения нового оборудования составит:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta P \cdot \Delta C_{\text{эл.энерг}} \cdot \Delta T_{\text{пч}}. \quad (47)$$

Для значений $\Delta P = 1661,62$ кВт; $C_{\text{эл.энерг}} = 3,705 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{час}}$;

$\Delta T_{\text{пч}} = 8760$ час согласно формуле (47)

$$\Delta \mathcal{E} = 1661,62 \cdot 3,705 \cdot 8760 = 53929206.396 \text{ руб.}$$

4.5 Расчёт общего годового экономического эффекта

Общий годовой экономический эффект от внедрения нового оборудования составит:

$$\mathcal{E} = \Delta \mathcal{E} - \Delta I. \quad (48)$$

Для значений $\Delta \mathcal{E} = 53929206.396$ руб.; $\Delta I = 1837589.529$ руб. согласно формуле (48)

$$\text{Э} = 53929206.396 \text{ руб} - 1837589.529 \text{ руб.} = 52091616.867 \frac{\text{руб.}}{\text{год}}$$

4.6 Расчёт срока окупаемости

Простой срок окупаемости рассчитывается по формуле:

$$T_n = \frac{K}{\text{Э}}. \quad (49)$$

Для значений $K = 8700000$ руб., $\text{Э} = 52091616.867 \frac{\text{руб.}}{\text{год}}$ согласно формуле (49):

$$T_n = \frac{8700000}{52091616.867} = 0.161 \text{ года.}$$

Результаты расчетов экономической эффективности от внедрения частотного преобразователя на питательном электронасосе Кемеровской ТЭЦ и сравнение с установленным нерегулируемым электроприводом представлены в таблице 4 [4].

Таблица 4 – Результаты расчетов экономической эффективности от внедрения ПЧ на Кемеровской ТЭЦ

Наименование показателя	Единица измерения	Значения	
		Модернизируемый вариант	Базовый вариант
Электропривод ПЭН		Частотно-регулируемый ЭП	Нерегулируемый ЭП
1	2	3	4
Цена оборудования	Руб.	5800000	1992300
Годовое потребление эл. энергии	Мвт.	18557	33113

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
Годовые затраты на электроэнергию	Руб.	68753685	122682924
Амортизационные отчисления	Руб.	1160000	398460
Затраты на текущий ремонт	Руб.	174000	59769
Годовые затраты на материалы	Руб.	116000	39846
Годовые затраты на оплату обслуживающего персонала	Руб.	210000	420000
Годовые социальные отчисления	Руб.	63000	126000
Годовые эксплуатационные издержки	Руб.	1837590	1555254
Общие капиталовложения	Руб.	8700000	2988450
Экономия электроэнергии от внедрения нового оборудования	Руб.	53929206	
Годовой экономический эффект	Руб.	52091617	
Срок окупаемости модернизации	Год.	0.161	

Выводы по разделу 4.

На основе проведенного анализа экономической эффективности и полученных результатов рекомендуется внедрение частотно-регулируемого электропривода на питательном насосе Кемеровской ТЭЦ. Внедрение данной технологии позволит сократить энергопотребление, повысить энергетическую эффективность и достичь значительной экономии денежных средств [4]. Согласно проведенным исследованиям, применение частотно-регулируемого электропривода на питательном насосе Кемеровской ТЭЦ приведет к ежемесячной экономии 4 494 100 рублей на электроэнергии, что составит годовую экономию в размере 53 929 206 рублей [4]. Таким образом, внедрение данной технологии является перспективным и позволит достичь значительных результатов в экономическом плане.

5 Техника безопасности и экология

В настоящем разделе рассматриваются вопросы электробезопасности и экологии, связанные с эксплуатацией ПЧ электродвигателя питательного насоса на Кемеровской ТЭЦ.

5.1 Электробезопасность при эксплуатации преобразователя частоты электродвигателя питательного насоса

Существует множество потенциальных опасностей, которые могут возникнуть при работе преобразователя частоты - от перегрузки и перегрева преобразователя до короткого замыкания и электромагнитных помех. Эти опасности могут вызвать повреждение оборудования, создать значительный риск для работников и даже привести к смертельному исходу [2].

Основная цель заземляющих устройств - обеспечить проводимость цепи замыкания для активных частей электроустановки, находящихся под напряжением, на заземленный корпус или землю, чтобы гарантировать срабатывание релейной защиты [2]. Это позволяет предотвратить неприемлемое напряжение, которому может быть подвержен человек, коснувшийся заземленного корпуса электроустановки в момент замыкания фазы на корпус или землю [2],[31].

На рисунке 27 изображена схема замыкания на корпус в электрической сети с напряжением выше 1 кВ с эффективным заземлением нейтрали [8],[31].

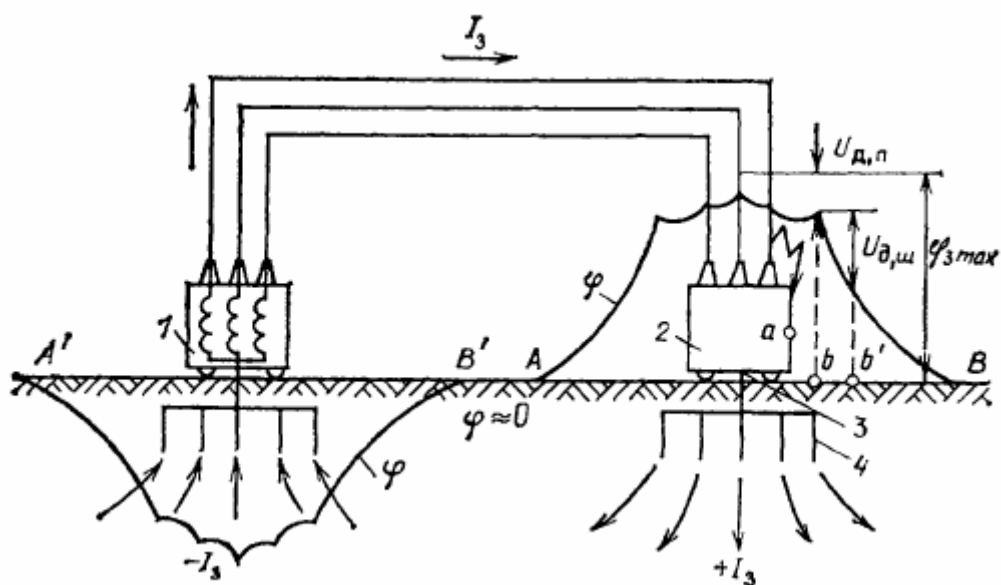


Рисунок 27 – Схема замыкания на корпус в сети напряжением свыше 1 кВ с эффективным заземлением нейтрали: 1 – питающий трансформатор; 2 – электроприёмник; 3 – заземляющий проводник; 4 – заземлитель; А – В и А' – В' – зоны растекания тока; а, b – точки возможного одновременного прикосновения человека к заземлённому корпусу и земле; b, b' – точки в зоне растекания тока, на которые человек может одновременно наступить

При замыкании на корпус электрическая цепь включает фазу питающего трансформатора, провод линии электропередачи, корпус питаемого трансформатора, его заземляющее устройство, землю, заземляющее устройство питающего трансформатора. Распределение потенциала φ на поверхности земли в зоне растекания тока соответствует условно принятому положительному направлению для тока I_3 , выходящего в землю с заземляющего устройства питаемого трансформатора. Потенциал земли имеет наибольшее положительное значение φ_{max} в точке, лежащей над одним из центральных электродов заземлителя [31].

По мере удаления от заземлителя потенциал на земле сравнительно быстро убывает, и на расстоянии, примерно равным 20 большим диагоналям контура заземляющего устройства, становится равным, менее 2 % от значения

потенциала заземлителя φ_{\max} . При таком удалении от заземлителя потенциал обычно считают равным нулю. Аналогично потенциал изменяется и вблизи заземляющего устройства питающего трансформатора. Однако в связи с принятым направлением тока его потенциал рассматривается как отрицательный [31].

Имеются две основные опасные ситуации, в которых находящийся в зоне растекания тока человек может попасть под напряжение.

Первая опасная ситуация:

Человек находится рядом с заземленными металлическими частями электроустановки, такими как корпус ПЧ, и прикасается к ним. В таком случае абсолютные значения потенциалов точек на поверхности земли в зоне распространения тока, включая максимальное значение φ_{\max} , всегда ниже, чем у заземленных металлических частей ПЧ, например, корпуса, потенциал которых, если мы пренебрегаем падением напряжения в горизонтальных электродах сложного заземлителя, равен φ_{\max} . Следовательно, когда человек находится в зоне распространения тока, например, в точке b , и не касается заземленного корпуса ПЧ, между корпусом ПЧ и точкой b существует напряжение до прикосновения $U_{д.п}$, которое можно рассматривать как напряжение холостого хода активного двухполюсника с некоторым внутренним сопротивлением, численно равным сопротивлению распространения тока через ноги человека в землю $R_{н.п}$. Если человек, находясь в точке b , прикасается к точке a , он подвергается напряжению прикосновения U_n , которое определяется согласно закону Ома, и может быть выражено следующим образом [31]:

$$U_n = I_m \cdot R_m = U_{д.п} \cdot \frac{R_m}{R_m + R_{н.п}}; \quad (50)$$

где I_m – ток, проходящий через тело человека;

R_m – сопротивление тела человека;

$U_{д.п}$ – напряжение до прикосновения;

$R_{н.п}$ – сопротивление растекания тока с двух ног человека в землю.

Первая опасная ситуация поражения человека электрическим током от корпуса ПЧ поясняется рисунком 28 [8, рис. 1.2, с. 29].

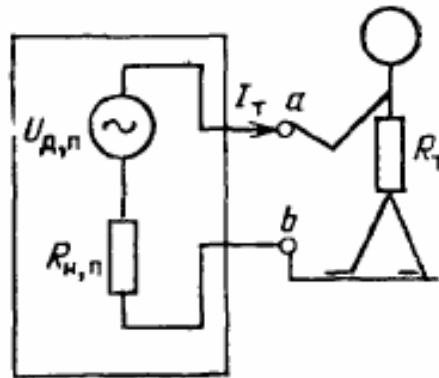


Рисунок 28 – Первая опасная ситуация, связанная с поражением человека электрическим током от корпуса ПЧ

Вторая опасная ситуация:

Вторая опасная ситуация, связанная с шаговым напряжением, возникает, когда ноги человека находятся на разных потенциалах. В этом случае корпус ПЧ может создать шаговое напряжение, которое представлено на рисунке 29 и может привести к поражению человека электрическим током.

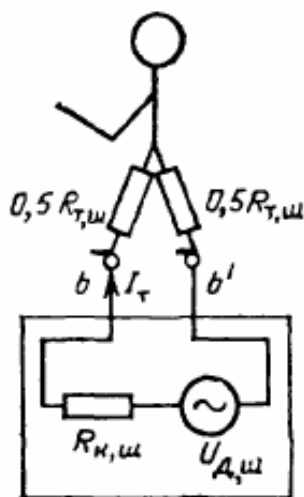


Рисунок 29 – Вторая опасная ситуация, связанная с поражением человека электрическим током шаговым напряжением, наводимым корпусом ПЧ

Из рисунка 29 видно, что ноги человека находятся в точках b и b' . При этом возникает опасное шаговое напряжение.

Для исключения первой и второй опасных для жизни человека ситуаций используем защитное заземление, состоящее из последовательно соединенных заземляющих проводников и электродов заземлителей.

Поскольку напряжение, подводимое к статору электродвигателя питательного насоса, и выходное напряжение частотного преобразователя составляют 6 кВ, для обеспечения электробезопасности при эксплуатации ПЧ используем Правила устройства электроустановок в части эксплуатации установки на напряжение свыше 1 кВ [30].

Выбор размеров сечений электродов заземлителей и заземляющих проводников выберем по условию их допустимого нагрева до 400°C при протекании по ним тока короткого замыкания (КЗ).

Формула для расчёта сечения электродов S имеет следующий вид [7]:

$$S \geq I \cdot S_{1\text{кА}} \cdot q; \quad (51)$$

где I – ток, протекающий по проводнику при КЗ, кА;

$S_{1кА}$ – допустимое сечение для тока в 1 кА при продолжительности воздействия 1 с, $\frac{мм^2}{кА}$;

q – коэффициент, учитывающий продолжительность воздействия тока КЗ, который рассчитывается по формуле:

$$q = \sqrt{t + 0,09} \text{ при } t < 1 \text{ с}; \quad (52)$$

$$q = 0,8 \cdot \sqrt{t} \text{ при } t > 1 \text{ с}. \quad (53)$$

Для значения $t = 0,5$ с согласно формуле (53)

$$q = \sqrt{0,5 + 0,09} = 0,768.$$

Рассчитаем площади сечений заземляющего проводника $S_{зп}$ и электрода $S_{зэ}$ заземлителя, используя формулы (51) – (53).

Расчёт площади сечения заземляющего проводника $S_{зп}$:

В качестве заземляющего проводника используем стальной проводник.

Для заземляющего проводника, выполненного из стали и присоединенного к ПЧ, $S_{1кА} = 16,5 \frac{мм^2}{кА}$.

Для значений $I = I_{кз} = 0,2кА$ [7, с. 231]; $S_{1кА} = 16,5 \frac{мм^2}{кА}$; $q = 0,768$ согласно формуле (51)

$$S_{зп} \geq 0,2 \cdot 16,5 \cdot 0,768 = 25,344 мм^2.$$

Выберем прямоугольный профиль сечения с поперечной площадью $S_{зп} = 75 мм^2$ и толщиной стенки $h = 3 мм$, выполненный из оцинкованной стали.

Расчёт площади сечения электрода заземлителя $S_{зз}$:

В качестве заземляющего электрода используем арматуру железобетона.

Для заземляющего электрода, выполненного из стали и присоединенного к заземляющему проводнику, $S_{1кА} = 30,3 \frac{мм^2}{кА}$.

Для значений $I = \frac{I_{кз}}{2} = \frac{0,2}{2} = 0,1кА$ [30, с. 231]; $S_{1кА} = 30,3 \frac{мм^2}{кА}$; $q = 0,768$ согласно формуле (51)

$$S_{зз} \geq 0,1 \cdot 30,3 \cdot 0,768 = 2,537 мм^2 .$$

Таким образом, арматуры железобетона с сечением $S_{1кА} = 30,3 \frac{мм^2}{кА}$ будет достаточно, для обеспечения заземления ПЧ.

5.2 Экологические вопросы при эксплуатации преобразователя частоты электродвигателя питательного насоса

Как известно [19], используемые в электрических аппаратах электрические провода, кабели и другие элементы являются источниками электромагнитного излучения, которые оказывают различное влияние на живой организм. Более того, электромагнитное излучение имеет способность взаимодействовать с другими физическими факторами, в том числе с температурой, и изменять свои воздействия на организмы. Это взаимодействие может приводить к изменениям в реакции организма на электромагнитное излучение [19].

Постоянное воздействие низкочастотных электромагнитных полей (ЭМП) на человека может вызвать различные расстройства. Симптомы, связанные с этим воздействием, включают головную боль в области висков и затылка, общую слабость, расстройства сна, ухудшение памяти, повышенную

раздражительность, апатию, боли в области сердца и нарушения сердечного ритма. Кроме того, возможны функциональные нарушения в центральной нервной и сердечно-сосудистой системах, а также изменения в составе крови [19].

Источниками ЭМП в ПЧ могут быть провода, кабели, полупроводниковые приборы, трансформаторы и другие элементы.

Кроме токов низких частот (50, 30 и 15 Гц), питающих электродвигатель питательного насоса, в ПЧ присутствуют и токи более высоких частот, являющихся кратными гармониками исходных токов вследствие использования в ПЧ управляемых выпрямителей и построенных на IGBT-транзисторах инверторов, являющихся нелинейными элементами электрических цепей. Так токи с частотой 50 Гц порождают токи кратных частот – 100, 150, 200 и т.д. частот. Токи с частотой 30 Гц порождают токи частот 60, 90, 120 и т.д. частот. А токи с частотой 15 Гц порождают токи частот 30, 45, 60 и т.д. частот. Таким образом, в проводах, кабелях, полупроводниковых приборах, трансформаторах и других элементах ПЧ образуется широкий спектр токов, оказывающих влияние на экологическую обстановку в окружающем ПЧ пространстве.

Поскольку напряжение на статоре используемого электродвигателя питательного насоса составляет 6 кВ при токе потребления 35,7 А, возможно возникновение опасных для здоровья человека напряжённостей магнитных H и электрических E полей как вокруг электродвигателя, так и вокруг ПЧ. Точный расчёт этих напряжённостей представляет собой сложную электродинамическую задачу. Однако отметим следующие нормативные данные (нормы ENV-50166, введённые в 1995 г.) [45], которые разделены на три категории:

– первая категория: $E = 6,1 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$; $H = 159 \frac{\text{А}}{\text{м}}$;

– вторая категория: $E = 12,3 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$; $H = 320 \frac{\text{А}}{\text{м}}$;

– третья категория: $E = 19,6 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$; $H = 480 \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

При превышении нормативных данных первой категории персонал, обслуживающий электроустановку, должен быть предупреждён об уровнях напряжённостей электрических и магнитных полей.

При превышении нормативных данных второй категории должны быть выполнены мероприятия по ограничению времени пребывания персонала, обслуживающего электроустановку.

При превышении нормативных данных третьей категории помимо ограничения времени пребывания персонала, обслуживающего электроустановку, должно быть выставлено предупреждение «Опасная работа».

В настоящий момент времени не существует единого мнения о допустимых значениях напряжённостей электрических и магнитных полей.

Для уменьшения или сведения на нет электрических и магнитных полей вокруг ПЧ в области низких частот (15, 30, 45, 50, 60, 75 и т.д. Гц) можно использовать принцип индуцирования электрического заряда или тока, заключающийся в экранировании объектов, излучающих электромагнитные поля. Экраном для ПЧ является по сути его корпус, на котором наводятся электрические заряды. Задача состоит в отводе этих зарядов в землю, т.е. использованию уже существующего заземления устройства.

Поэтому для защиты от электромагнитных полей, возбуждаемых ПЧ, необходимо:

- следить, чтобы все дверцы шкафов ПЧ во время работы были закрыты;
- следить за рабочим состоянием устройства заземления корпуса ПЧ.

Выводы по разделу 5.

Безопасная эксплуатация преобразователя частоты двигателя питательного насоса имеет огромное значение для обеспечения безопасности работников и окружающей среды. Опасности, связанные с электричеством,

такие как поражение электрическим током, вспышки дуги и электрические пожары, могут представлять значительный риск для работников и оборудования.

Для исключения опасных для жизни человека ситуаций, связанных с поражением электрическим током, использовано защитное заземление, состоящее из последовательно соединенных заземляющего проводника и электрода заземлителя.

В качестве заземляющего проводника выбран профиль из оцинкованной стали с поперечной площадью $S_{\text{ст}} = 75 \text{ мм}^2$ и толщиной стенки $h = 3 \text{ мм}$, а в качестве электродов заземлителя – арматура железобетона с сечением $S_{\text{1кА}} = 30,3 \frac{\text{мм}^2}{\text{кА}}$, что достаточно для обеспечения надежного заземления ПЧ.

Для защиты от электромагнитных полей, возбуждаемых ПЧ, необходимо:

- следить, чтобы все дверцы шкафов ПЧ во время работы были закрыты;
- следить за рабочим состоянием устройства заземления корпуса ПЧ.

Заключение

В первом разделе диссертации выполнен обзор способов повышения тепловой экономичности использования питательного насоса Кемеровской ТЭЦ и выбран способ, основанный на регулировании частоты вращения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором за счёт применения частотного преобразователя.

Во втором разделе диссертации выполнен расчёт механических характеристик электродвигателя, который показал численные значения моментов при изменении напряжения питания и частоты возбуждения электродвигателя, а также выполнен расчёт переходных характеристик. Последние исследования показали зависимость времен переходных процессов от частоты возбуждения электродвигателя. Исследования также показали, что при изменении частоты напряжения питания электродвигателя при вентиляторной характеристике нагрузки изменяются как частота вращения электродвигателя, так и диапазон электромагнитного момента на валу двигателя. Показано, что переходный процесс электропривода питательного насоса описывается в основном переходными характеристиками асинхронного электродвигателя.

В третьем разделе по данным электродвигателя серии АД-4 типа 4АЗМО-315-6000-2У2, применяемого в питательном электронасосе на Кемеровской ТЭЦ, значениям частот его возбуждения и соотношений $\frac{U_1^*}{f_1^*}$ выбран ПЧ типа ПЧВМ-ТТПТ-35,7-6000-50-УХЛ4. Описаны его основные технические характеристики, функциональная схема и конструктив. Области допустимых значений характеристик $\frac{U_1}{f_1}$ ПЧ отвечают рассчитанным в разделе 2 значениям соответствующих характеристик. Мощность, выходные напряжения и токи выбранного ПЧ отвечают требуемым характеристикам электродвигателя.

Экономические расчёты, выполненные в четвёртом разделе, показали, что годовой экономический эффект от использования ПЧ составил – $\mathcal{E} = 52091616.867 \frac{\text{руб.}}{\text{год}}$, а срок окупаемости затрат на его приобретение, установку и обслуживания – $T_n = 0.161$ года.

В пятом разделе рассмотрены вопросы техники безопасности и экологии. Для исключения опасных для жизни человека ситуаций, связанных с поражением электрическим током, необходимо использовать защитное заземление, состоящее из последовательно соединённых заземляющего проводника и электрода заземлителя. В качестве заземляющего проводника выбран профиль из оцинкованной стали с поперечной площадью 75мм^2 и толщиной стенки 3мм, а в качестве электродов заземлителя – арматура железобетона с сечением $30,3 \frac{\text{мм}^2}{\text{кА}}$, что достаточно для обеспечения надёжного заземления ПЧ. Отмечено, что для защиты человека от электромагнитных полей, возбуждаемых ПЧ, необходимо следить за тем, чтобы все дверцы шкафов ПЧ во время работы были закрыты, а его заземление находилось в рабочем состоянии.

Список используемых источников

1. Антропов Я.А. Анализ и сравнение способов регулирования центробежных насосов / Я.А. Антропов, Д.А. Кретов // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам LXVII Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». – № 12(62). – М., Изд. «Интернаука», 2022. DOI:10.32743/2587862X.2022.12.62.349458
2. Антропов Я.А. Электробезопасность при эксплуатации преобразователя частоты электродвигателя питательного насоса / Я.А. Антропов, Д.А. Кретов // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам LXX Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». – № 3(65). – М., Изд. «Интернаука», 2023. DOI:10.32743/2587862X.2023.3.65.353907
3. Антропов Я.А., Д.А. Кретов Особенности работы и методы регулирования питательных насосов // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам LXI Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». Изд. «Интернаука», 2022. № 6(56). С. 52-58.
4. Антропов, Я. А. Экономическая целесообразность внедрения частотно-регулируемого электропривода на питательном насосе Кемеровской ТЭЦ / Я. А. Антропов // Наука, общество, инновации: актуальные вопросы современных исследований: сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 25 мая 2023 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. – С. 66-71. – EDN ULPLEZ.
5. Баштовой В.Г. Методическое пособие для разработки раздела дипломного проекта «Экономика: обоснование инвестиций в энергосберегающие мероприятия» для специальностей 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент», 1-36 20 01

«Низкотемпературная техника» / В.Г. Баштовой, Е.А. Милаш. – Минск: БНТУ, 2012. – 102 с.

6. Бельский, А.П. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учеб. пособ. – Изд. 3-е испр. / А.П. Бельский, В.Ю. Лакомкин, С.Н. Смородин. – СПб: СПб ГТУ РП, 2012. – 136 с. SBN 978-5-91646-044-5 – Текст: непосредственный.

7. Борисов Р.К. Заземляющие устройства электроустановок (требования нормативных документов, расчёт, проектирование, конструкции, сооружение): справочник / Р.К. Борисов и др. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 360 с.

8. Бургсдорф В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургсдорф, А. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

9. Волков, А.В. Разработка методологии повышения эффективности и надежности эксплуатации теплоэнергетического насосного оборудования: специальность 05.04.13. «Гидравлические машины, гидропневмоагрегаты»: диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Волков Александр Викторович; Научный Центр «Износостойкость», кафедра Гидромеханики и гидравлических машин Московского энергетического института (Технического университета). – Москва, 2006. – 40 с.: ил. – Библиогр.: с. 35–40. – Место защиты: Национальный исследовательский университет «МЭИ». – Текст: непосредственный

10. Горунович, С.Б. Эффективность мини-турбин для привода механизмов ТЭЦ с поперечными связями / С.Б. Горунович // «Новости теплоснабжения» №04 (176) 2015 г. : электронный журнал. – URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3378 (дата обращения: 25.05.2023).

11. Елизаров Д.П. Теплоэнергетические установки электростанций: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Д.П. Елизаров. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.

12. Инструкция по эксплуатации электродвигателей ПЭН-2, СН-2 ИЭ-02(7)-013-09(2)-2013. / Г. Николаев-на-Амуре. – 13 с.
13. Кемеровская ТЭЦ [Электронный ресурс] : URL: <https://sibgenco.ru/main/company/generation/kemerovskaya-tets/> (Дата обращения: 30.09.2022)
14. Кувшинов А.А. Теория электропривода: конспект лекций: в 2 ч. / А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – Ч.1, 2009. – 197 с.
15. Ледуховский, Г. В., Горшенин, С. Д., Зиновьева, Е. В., Зиновьева, А. С. Анализ эффективности регулирования питательных насосов изменением частоты вращения ротора для электростанций различного типа // Вестник ИГЭУ. 2021. №4.
16. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. – М.–Л.: Машиностроение, 1966. – 364 с.
17. Ломакин Д.А., Коротков В.В. Корректировка характеристик центробежных насосов за счёт подрезки рабочего колеса // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. №4-3.
18. Лысенко, В.С. Технология снижения гидравлических потерь в напорных трубопроводах / В.С. Лысенко. – Современные наукоёмкие технологии, 2014, №3, с. 59 – 61
19. Малахов В.М. Инженерная экология: монография. В 3 т. Т. 2 / В.М. Малахов, А.Г. Гриценко, С.В. Дружинин. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 271 с.
20. Медведев, В. Н., Карандаев, А. С., Карандаева, О. И., Мамлеева, Ю. И., Храмшина, Е. А. Технологическая востребованность и оценка эффективности внедрения частотно-регулируемых электроприводов на объектах тепловой электростанции // Вестник ИГЭУ. 2012. №6. С. 109-114.
21. Многоступенчатый центробежный насос — как он устроен и принцип действия [Электронный ресурс] : URL: <https://nasoskm.ru/centrobezhnie-nasosi/mnogostupenchatiy-tsentrobezniy-nasos> (Дата обращения: 30.09.2022)

22. Мустафин, Н. К. Исследование рабочих характеристик центробежного насоса при регулировании производительности / Н. К. Мустафин, Ю. С. Проскуряков // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2017. – № 4(103). – С. 226-233. – EDN YLGDWT.

23. Назначение, устройство, ремонт ПЭН [Электронный ресурс] : URL: <https://kotelservice.ru/naznachenije-ustroystvo-i-remont-pen/> (Дата обращения: 30.09.2022)

24. Насосы и насосные станции : учеб. пособие / Ю.В. Аникин, Н.С. Царев, Л.И. Ушакова ; [науч. ред. В.И.Аксенов] ; М-во образования и науки Рос. Федерации; Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 138 с. ISBN 978-5-7996-2378-4

25. Насосы и насосные станции: Учеб. пособие / П. П. Якубчик; Петерб. гос. ун-т путей сообщ. - СПб. : ПГУПС, 1997. - 106,[2] с. : ил.; 20 см.; ISBN 5-7641-0017-8 : Б. ц.

26. НПО ЭЛСИБ. Каталог продукции [Электронный ресурс]: URL: <https://clck.ru/34WNqS> (Дата обращения: 25.05.2023)

27. Осевые и центробежные насосы тепловых электрических станций: учебное пособие / Г.А. Локалов, В.М. Марковский. — Екатеринбург: Изд-во

28. Паршиков М.Ю. Реконструкция питательной электроустановки с установкой турбопривода // III Всероссийская научно-практическая конференция «ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА», 13-15 декабря 2017 г., с. 154-1 – 154-5

29. Питательный насос – ПЭН [Электронный ресурс] : URL: <https://stydopedia.ru/4xd689.html> (Дата обращения: 30.09.2022)

30. Правила устройства электроустановок. 6-е и 7-е изд.

31. Рабочие и электробезопасные характеристики заземляющих устройств [Электронный ресурс]: URL:

<https://electricalschool.info/main/electrobezopasnost/1468-rabochie-i-jelektrozashhitnye.html> (Дата обращения: 25.05.2023)

32. Расчет экономической эффективности внедрения преобразователей частоты для насосных агрегатов [Электронный ресурс]: URL: <https://invk.kz/a10753-raschet-ekonomicheskoy-effektivnosti.html> (Дата обращения: 25.05.2023)

33. Рекомендации по повышению надёжности работы регулирующих питательных клапанов котлов и снижению расхода электроэнергии на привод питательных электронасосов на ТЭС с поперечными связями / Сост. А.К. Кирш. – М: СПО Союзтехэнерго, 1987. – 45 с.

34. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон № 261-ФЗ 2009 год. (последняя редакция): [принят Государственной думой 11 ноября 2009 года: одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 года]. – Москва: Кремль; "Собрание законодательства РФ", 30.11.2009, N 48, ст. 5711 – 978-5-803080-24-4. – Текст: непосредственный

35. Сведения о тарифах [Электронный ресурс] / URL: <https://skek.ru/potrebitelyam/peredacha-elektroenergii/tekhnologicheskoe-prisoedinenie/tarify-na-uslugi/> (Дата обращения: 08.11.2022)

36. Стерман Л.С. Тепловые и атомные электростанции: Учебник для вузов / Л.С. Стерман, С.А. Тевлин, А.Т. Шарков; Под ред. Л.С. Стермана. – 2-е изд., испр. и доп. – М. Энергоиздат, 1982. – 456 с.

37. Стрелов, А. Н. Применение турбоприводов питательных насосов на тепловой схеме ТЭЦ / А. Н. Стрелов // Научный электронный журнал Меридиан. – 2020. – № 8(42). – С. 333-335. – EDN SRFJHW.

38. Техническое перевооружение ПЭН с установкой ЧРП для ПАО «Т Плюс» (Сакмарская ТЭЦ) [Электронный ресурс] : URL: <https://www.ies-garant.ru/projects/tekhnicheskoe-perevooruzhenie-pen-s-ustanovkoy-chrp-dlya-pao-t-plyus-sakmarskaya-tets/> (Дата обращения: 30.09.2022)

39. Типы ТЭЦ [Электронный ресурс] : URL: <https://strojdvor.ru/elektrosnabzhenie/tets-rasshifrovka/> (Дата обращения: 30.09.2022)

40. Токарев, В. С. Эффективность парового привода вспомогательного оборудования электростанций / В. С. Токарев // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: материалы 19-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов, Магнитогорск, 22–24 мая 2018 года / Министерство образования и науки Российской Федерации, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2018. – С. 81-84. – EDN ZIUQST. Урал. ун-та, 2016. –140 с. ISBN 978-5-7996-1624-3

41. Электротекс-ИН. Каталог продукции [Электронный ресурс]: URL: <http://etx-in.ru/> (Дата обращения: 27.04.2023)

42. Fausing Olesen J., Shaker H. R. Predictive maintenance for pump systems and thermal power plants: State-of-the-art review, trends and challenges // Sensors. 2020. Vol. 20. N. 8. P. 2425.

43. ISO 50001:2011 «Системы энергетического менеджмента – Требования с руководством по использованию» ISO 50001:2011 «Energy management systems – Requirements with guidance for use» [Electronic resource]. / International Organization for Standardization. – Geneva, Switzerland, 2011.- 22 p. - Mode of access: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=51297.

44. Kaya D., Çanka Kılıç F., Öztürk H. H. Energy efficiency in pumps // Energy Management and Energy Efficiency in Industry: Practical Examples. 2021. P. 329-374.

45. Kunsch, B The European Pre-standard ENV 50166 "Human Exposure to Electromagnetic Fields" / B Kunsch. – Roma : Austrian Research Centre Seibersdorf, 1996. – 14 с. – ISBN OEFZS-Berichte.

46. Li W., Yu Z. Cavitation models with thermodynamic effect for organic fluid cavitating flows in organic Rankine cycle systems: A review // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 26. P. 101079.

47. Sayegh M. A., Jadwiszczak P., Axcell B. P. et. al. Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating // *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 166. P. 122-144.

48. Valavi M., Nysveen A. Variable-speed operation of hydropower plants: A look at the past, present, and future // *IEEE Industry Applications Magazine*. 2018. Vol. 24. N. 5. P. 18-27.