

Министерство образования и науки Российской Федерации федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический (ЭНИН)

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электропривода и электрооборудования (ЭПЭО)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование алгоритмов управления электроприводом циркуляционного насоса системы теплоснабжения

УДК 62-83-52:697.34:621.65

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Иванов Михаил Игоревич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЭПЭО	Букреев В.Г	д.т.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Дашковский А.Г.	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭПЭО	Дементьев Ю.Н.	к.т.н., доцент		

Томск – 2017 г.

Запланированные результаты обучения

Код резул ьтата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	<i>Ставить и решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	<i>Выполнять инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	<i>Проводить инновационные инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	<i>Проводить технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	<i>Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	<i>Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический (ЭНИИ)

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электропривода и электрооборудования (ЭПЭО)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ЭПЭО

Дементьев Ю.Н.

(Подпись)

(Дата)

(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5А	Иванов Михаил Игоревич

Тема работы:

Исследование алгоритмов управления электроприводом циркуляционного насоса системы теплоснабжения

Утверждена приказом директора (дата, номер)

20.02.2017г. № 1109/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

1. Регулируемый асинхронный электропривод циркуляционного насоса.
2. Режимы работы электропривода.
3. Требования к характеристикам теплоносителя в системе ГВС.
4. Данные о механических нагрузках электропривода.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов

(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).

1. Анализ решаемой задачи на основе обзора опубликованных результатов исследований и ее актуальность.
2. Анализ исходных данных и построение математической модели необходимой для исследования.
3. Разработка программы исследований.
4. Выполнение исследований согласно разработанной программе.
5. Анализ результатов исследований и выводы по предложенным решениям.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Основной общий и специальный раздел ВКР	Научный руководитель Букреев В.Г.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Н.Г.
Социальная ответственность	Дашковский А.Г.
Раздел на иностранном языке	Пташкин А.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
<i>Основная и специальная части, «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная ответственность» – русский язык</i>	
<i>На иностранном языке выполнены следующие разделы диссертации:</i>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Введение 2. Литературный обзор 3. Объект и методы исследования 4. Техническая реализация проекта автоматизации 5. Заключение 	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЭПЭО	Букреев В.Г.	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Иванов М.И.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студент:

Группа	ФИО
5ГМ5А	Иванов Михаил Игоревич

Институт	Энергетический	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника/Электропривод и системы управления электроприводом

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Итоговая стоимость затрат на НИ составила 331858 рубля
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные страховые фонды (30 %)
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Планирование процесса НИИ: структура и график проведения.	1. Планирование этапов разработки проекта.
2. Затраты на научное исследование (НИ)	2. Смета затрат на проект 3. Смета затрат на оборудование и монтажные работы
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	4. Определение экономической эффективности проекта.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Иванов М.И.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5А	Иванову Михаилу Игоревичу

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Электроприводы и системы управления электроприводов

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Характеристика объекта исследования (описание рабочего места, технологического процесса, механического оборудования)</i>	Помещение закрытого типа с естественной и искусственной вентиляцией воздуха.
<i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	1) ГОСТ Р ИСО 26000-2012. Технический регламент по социальной ответственности 2) N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" 3) N 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда"

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ вредных факторов проектируемой производственной среды</i>	Вредные факторы: 1) Шум от работы ПК 2) Освещенность 3) Микроклимат
<i>2. Анализ опасных факторов проектируемой произведённой среды</i>	Опасные факторы: 1) Поражение электрическим током;
<i>3. Охрана окружающей среды:</i>	Разработка и принятие решений по утилизации отходов
<i>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</i>	1) Пожарная опасность;
<i>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности</i>	Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства. Социальные гарантии по компенсации для работника.
Перечень графического материала:	План помещения и размещение светильников ШОД-2-40 с люминесцентными лампами. План эвакуации при пожаре и других ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Дашковский А.Г.	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Иванов М.И.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 124 с., 43 рис., 16 табл., 42 источников, 2 прил.

Ключевые слова: асинхронный электропривод циркуляционного насоса, CoDeSys, программируемый логический контроллер.

Объектом исследования является электропривод циркуляционного насоса в системе горячего водоснабжения.

Актуальность темы диссертации. Государственная энергетическая политика, принятая до 2020г., устанавливает приоритет задач по разработке и модернизации систем управления теплоснабжением на объектах промышленного и гражданского назначения, с целью повышения экономии тепловой энергии, используемой в системах горячего водоснабжения и вентиляции.

Для реализации задач государственной политики, принят федеральный закон №261-ФЗ, стимулирующий рост энергосбережения и энергетической эффективности, возможный только при использовании автоматизированных систем, в частности для объектов теплоснабжения. Одним из основных элементов данных систем является программируемый логический контроллер (ПЛК), применение которого позволяет внедрить современные методы управления и эксплуатации систем теплоснабжения.

В связи с чем, система горячего водоснабжения (ГВС), имеющая характерные режимы работы и теплоснабжения [1, 2], представляет собой интерес с точки зрения возможностей оптимизации. Большинство систем ГВС сейчас являются устаревшими, так как имеет в своем составе элементы, работающие от регулируемого электропривода постоянного тока или нерегулируемого асинхронного электропривода. В то время как широко используемые сейчас системы преобразователь частоты асинхронный двигатель позволяют добиться лучших показателей качества технологических процессов, осуществлять эффективное регулирование в широком диапазоне и

позволяют включить электропривод в систему автоматизации за счет наличия коммуникационных интерфейсов.

Цель работы – исследование и разработка научно-технических решений по оптимизации системы горячего водоснабжения с применением асинхронного электропривода и современных программно-аппаратных средств.

В процессе исследования использовались методы математического и компьютерного моделирования.

В результате исследования были предложены способы оптимизации по быстродействию системы горячего водоснабжения за счет применения циркуляционного насоса с электроприводом от системы ПЧ-АД.

Область применения: системы горячего водоснабжения жилых домов.

Экономическая эффективность: предлагаемые меры позволят повысить качество услуг горячего водоснабжения и сделать потребление более экономичным.

Апробация работы и публикации. Положения аппаратной реализации магистерской диссертации докладывалось на конференции молодых ученых «Интеллектуальные энергосистемы» 2016 год.

Перечень используемых сокращений

ГВС – горячее водоснабжение

ПЛК – программируемый логический контроллер

CFC (Continuous Flow Chart) – структурированный язык программирования в графической среде на основе блоков.

Scilab – математический программный пакет свободно распространяемый аналог MATLAB

ПИД-регулятор – регулятор, имеющий пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие

Xcos – графическая среда для пакета Scilab

ПЧ – преобразователь частоты

ПД-регулятор – имеющий пропорциональную и дифференциальную составляющие регулятор.

АД – асинхронный двигатель

CoDeSys – программный комплекс промышленной автоматизации

УУ – устройство управления

Перечень используемых обозначений

q_1 – объем воды во внешнем контуре;

q_2 – объем воды во внутреннем контуре;

h – положение штока управляемой запорно-регулирующей арматурой;

$T_{зад}$ – заданная температура теплоносителя (вода) ;

$T_{нд1}$ – температура подающего теплоносителя внешнего контура;

$T_{нд2}$ - температура подающего теплоносителя внутреннего контура;

$T_{об1}$ - температура обратного теплоносителя во внешнем контуре;

$T_{об2}$ – температура обратного теплоносителя во внутреннем контуре;

$T_{хв}$ – температура холодной воды;

U_j - фазное напряжение статора;

R_1 - активное сопротивление обмотки статора;

$X_{1\sigma}$ - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

I_1 - ток обмотки статора;

E_1 - ЭДС обмотки статора;

R_2' - активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к обмотке статора;

$X_{2\sigma}'$ - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведённое к обмотке статора;

E_m - ЭДС от главного магнитного поля машины;

E_2' - ЭДС обмотки ротора, приведённая к обмотке статора;

I_0 - ток холостого хода асинхронного двигателя;

$s = (\omega_0 - \omega)$ - скольжение;

ω - угловая скорость асинхронного двигателя;

z_p - число пар полюсов;

f_1 - значение частоты напряжения переменного тока, подводимого к обмотке статора.

Оглавление	
Введение	12
1.Литературный обзор.....	15
2.Объект и методы исследования	16
2.1. Описание системы ГВС.....	17
2.2. Система ГВС с электроприводом циркуляционного насоса	20
2.3. Выводы по главе.....	22
3.Выбор оборудования.....	23
3.1. Выбор параметров насоса	23
3.2. Выбор приводного электродвигателя	27
3.3. Расчет параметров электродвигателя.....	29
3.4. Расчет естественных характеристик электродвигателя	33
3.5. Расчет механических и электромеханических характеристик электропривода.....	36
3.6. Выбор преобразователя частоты	39
3.7. Выводы по главе.....	43
4.Математические модели и имитационное моделирование	44
4.1. Имитационные модели асинхронного электропривода со скалярным управлением.....	44
4.2. Исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением	52
4.3. Выводы по разделу 4.2	54
4.4. Математическая модель системы ГВС	54
4.5. Моделирование системы ГВС с запорно-регулирующей арматурой.....	55
4.6. Моделирование системы ГВС с асинхронным электроприводом циркуляционного насоса	57
4.7. Синтез регулятора асинхронного электропривода циркуляционного насоса.....	58
4.8. Выводы по главе.....	62
5.Техническая реализация проекта автоматизации	63

5.1. Моделирование ГВС в среде CoDesys	63
5.2. Проект автоматизации, загружаемый в контроллер	66
5.3. Аппаратная реализация программируемого логического контроллера на основе платы Raspberry Pi	68
5.4. Выводы по главе 5	71
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	73
7. Социальная ответственность	84
Заключение	100
Список литературы	101
Приложение А	105
Приложение Б	106

ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности электропривод обеспечивает работу и регулирование большого числа промышленных объектов и процессов. Тенденция развития современной техники направлена на автоматизацию и энергетическую эффективность. Автоматизация обеспечивает энергетическую эффективность за счет исключения человека из зоны обеспечения технологического процесса, заменяя его микропроцессорной техникой, работающей по специальным алгоритмам.

Продолжает оставаться актуальной и проблема замена регулируемого электропривода постоянного тока на более современный регулируемый асинхронный электропривод, как менее дорогостоящий, но обеспечивающий лучшие характеристики технологических процессов, возможность автоматизации и энергосбережение.

Система ГВС – это система по средствам насосов, трубопроводов и автоматики осуществляющая подогрев и последующее распределение горячей воды потребителям для технологических, санитарных и гигиенических целей.

Система ГВС разделяются по ряду признаков.

В зависимости от покрываемой площади и интегрированности они делятся на локальные и централизованные системы.

Локальные установки обеспечивают горячей водой небольшую площадь одного или группы потребителей и находятся в непосредственной близости от них.

В качестве примера таких установок можно привести газовые нагреватели проточного типа или емкостные автоматические водонагреватели, устанавливаемые в квартирах.

Локальные установки, как правило, применяются в случае отсутствия централизованных источников теплоснабжения, требуют постоянного контроля и технического обслуживания, затрудненного в условиях разрозненности их расположения.

Положительные свойства таких систем: автономность и, как следствие независимость от других установок, малые потери.

Развитие мощных источников теплоты привело к ситуации, когда экономически более выгодно отбирать от единого источника и поставлять распределенным потребителям. Так возникли централизованные системы ГВС, способствовавшие развитию районных систем теплоснабжения зданий.

С точки зрения потребителя централизованные системы более просты, получение горячей воды от них доступнее и они лучше обеспечивают санитарно-гигиенические нормы по сравнению с локальными системами.

К недостаткам централизованных систем относятся: наличие службы эксплуатации городского теплоснабжения и компетентное обслуживание трубопроводных систем с высоким давлением и температурой, так же транспортировка теплоносителя сопровождается значительными потерями.

Используемые источники теплоты делят централизованные системы на закрытые сети – сети ТЭЦ и открытые, в которых работают районные котельные.

Открытые сети в своем технологическом процессе используют установки, в которых нагреваемая и сетевая вода смешиваются непосредственно, с контактом теплоносителя.

Закрытые же сети используют установки, в которых теплота передается без соприкосновения теплоносителя и нагреваемой воды через поверхность теплообмена.

С точки зрения использования теплоты и стоимости энергии наиболее рациональными являются открытые системы, но возможно ухудшение качества нагреваемой воды. Такие системы достаточно редки.

Способы получения воды и обеспечения напоров так же являются основанием для различения систем горячего водоснабжения на открытые и закрытые.

Давление в закрытых системах определяется высотой промежуточных резервуаров, из которых системы, по средствам поплавковых клапанов получают воду.

В открытых системах горячего водоснабжения вода поступает из холодного водопровода, насосы которого и обеспечивают давление.

Системы ГВС разнятся так же в зависимости от наличия или отсутствия дополнительных аккумулирующих емкостей.

Аккумулирующие емкости – емкости, дополнительно устанавливаемые во внутреннем контуре для сглаживания колебаний температуры нагреваемой воды в пики потребления горячей воды.

Аккумуляция горячей воды осуществляется обычно при постоянном объеме воды за счет пополнения количества воды под напором холодного водопровода, но при переменном количестве теплоты, при этом используется принцип вытеснения горячей воды к потребителю давлением поступающей свежей, холодной воды. Возможна аккумуляция теплоты в резервуарах с постоянной температурой воды, но с переменным объемом воды.

1. Обзор литературы

Системы ГВС жилых зданий подробно рассматриваются в [2] и [3]. Решения по автоматизации систем теплоснабжения рассмотрены и предложены в источнике [4]. Основой исследования является математическая модель системы теплоснабжения, разработанная Шилиным А.А. и Букреевым В.Г. и предложенная в статье [5]. Возможности оптимизации систем теплоснабжения рассмотрены в источнике [6]. Методы оптимизация систем по быстродействию рассматриваются в источнике [7].

Установка циркуляционного насоса в системах ГВС и их автоматизация, является рекомендуемым способом обеспечения энергоэффективности последних. В связи с чем, существует большое количество решений по внедрению циркуляционных насосов для использования отработанной сетевой воды. Патенты [8] и [9] содержат решения, по установке циркуляционного насоса с регулируемым электроприводом, рассматриваемые в исследовании, однако в них не рассматривается проблема быстродействия. Решение по использованию низкопотенциальных источников тепла, хозяйственных стоков и других тепловых отходов в циркуляционном контуре есть в патенте [10], где так же для повышения эффективности и обеспечения предложенных решений предлагается использовать фильтры и дополнительное тепловое оборудование.

2. Объект и методы исследования

Теплоснабжение жилых кварталов муниципальных и промышленных объектов в России производится, централизованно закрытыми магистральными системами. Горячая вода доставляется потребителю по системе труб – магистрали, у потребителя горячая вода с помощью теплообменника нагревает воду на его стороне, таким образом, магистраль теплоцентрали и система горячего водоснабжения (ГВС) жилого здания разделены между собой. Применение пластинчатого теплообменника для передачи тепла является наиболее производительным решением. Теплообменник небольшого объёма имеет теплообменные свойства достаточные для снабжения жилых площадей многоэтажного дома, но при потреблении близком к максимальному, питающая холодная вода не успевает нагреться до нужной температуры. Проблема возникает из-за того, что задвижка, управляемая электроприводом постоянного тока и регулирующая поток из теплоцентрали, а, следовательно, и интенсивность процесса теплообмена имеет длительное время установки в новое положение. Проблема отчасти решается установкой в системе ГВС аккумулирующей ёмкости, чтобы создать запас горячей воды на период пикового потребления. Однако весь процесс в этом случае становится сильно инерционным и тяжело перестраивается на новый режим работы, при том по истощению запаса аккумулированной горячей воды, проблема недостаточного нагрева холодной воды вернется.

Существует решения обозначенных выше проблем путем оптимизации управления по быстрдействию в системе ГВС. В работе предлагается, используя современные программные среды смоделировать и исследовать процессы в системе ГВС. Автоматизировать систему, применяя программируемые логические контроллеры (ПЛК), преобразователи частоты (ПЧ) и современный комплекс промышленной автоматизации CoDeSys.

Современные теплообменники очень эффективны, но характерным свойством системы ГВС является непредсказуемое потребление теплоносителя в пиковые часы, требующие повышения подачи теплоносителя. С другой стороны, при отсутствии потребления необходимо ограничить поступление теплоносителя. Чтобы более полно использовать ресурс теплообменника и повысить качество ГВС, становится актуально рассмотреть задачу повышения быстродействия.

Научно-исследовательской задачей, таким образом, является формирование математической модели стандартной и предложенной системы ГВС и их исследование.

Цель работы – исследование и разработка научно-технических решений оптимизации по быстродействию системы горячего водоснабжения жилого здания.

Для достижения поставленной цели будут решаться следующие задачи:

1. Исследовать характеристики системы горячего водоснабжения на предмет возможности установки циркуляционного насоса;
2. Исследовать режимы работы циркуляционного насоса;
3. Исследование влияния работы циркуляционного насоса на температуру горячей воды у потребителя.
4. Техническая реализация автоматизированной системы управления горячим водоснабжением в среде CoDeSys.

2.1. Описание системы ГВС

На рисунке 1.1 приведена закрытая схема системы ГВС, которая является типовой, и применяется во многих зданиях и сооружениях, т.к. обладает простотой, надежностью и дешевизной. Основным элементом управления в данной схеме традиционно используется задвижка с управляемым положением штока. Само положение штока устанавливается приводом постоянной скорости с трехпозиционным управлением. Структурная схема такой системы

представлена на рисунке 2.1, где кроме задвижки (поз. 1) используется высокоэффективный теплообменник (поз. 2) и циркуляционные насосы (поз. 3, 4) в обоих контурах движение теплоносителя.

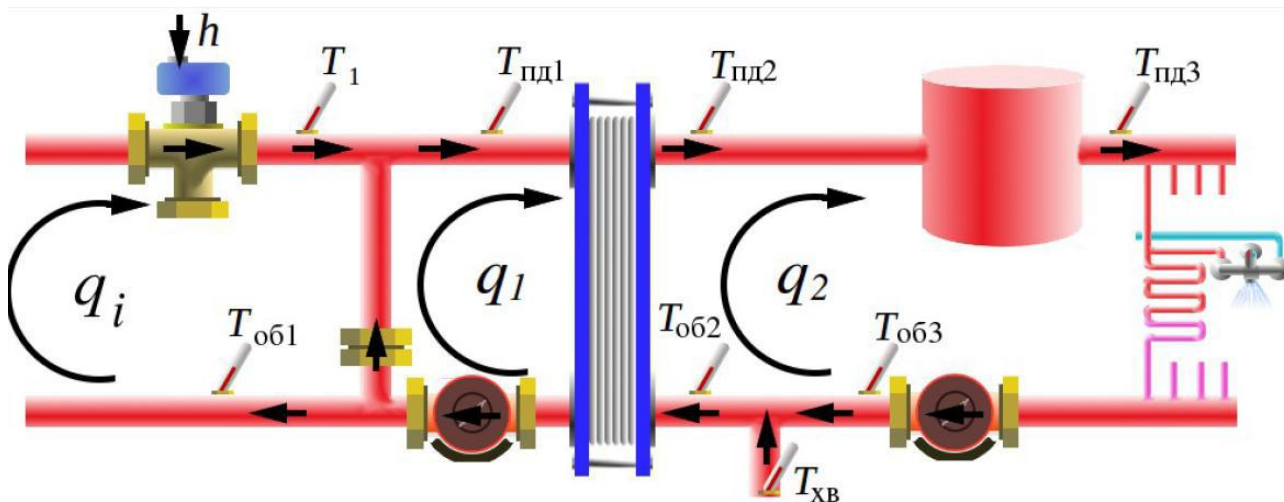


Рисунок 2.1 – Структурная схема распространенной схемы ГВС.

Система управления таких систем выполняется с применением ПЛК.

В основе управления стоит следующий принцип: температура горячей воды у потребителя $T_{нд3}$ зависит от температуры воды во внешнем контуре, которая в свою очередь зависит от отношения объема теплоносителя из магистрали q_i к объему циркулирующего теплоносителя q_1 . В свою очередь объем поступающего теплоносителя зависит от положения штока управляемой задвижки h , который устанавливается приводом (поз. 5). Для использования традиционных ПИД-регуляторов достаточно организовать два контура: один устанавливает положение задвижки, второй, включающий ПИД-регулятор, вычисляет заданное положение штока по рассогласованию между заданным $T_{зад}$ и измеренным $T_{нд2}$ значениями температуры.

Настройка клапана в такой системе осуществляется индивидуально, а управление осуществляется с использованием ШИМ с применением ПИД-регулятора. В таких системах возможно использовать готовые библиотеки производителей ПЛК на языках стандарта МЭК 61131-3 [11], которые включают в себя основные законы управления динамическими объектами, а также обладают функциями самонастройки замкнутых контуров.

Количество воды, требуемой для нагрева внутреннего контура системы ГВС, ограничено из-за того, что задвижка, управляемая приводом постоянного тока не обеспечивает достаточно малого времени полного открытия и закрытия клапана – это придает системе большую инерционность. При активном потреблении клапан не успевает перейти в нужное положение, либо открыться полностью для заполнения системы водой, а теплоноситель внутреннего контура системы не может быть нагретым до необходимой температуры. Это приводит к появлению холодной воды из крана горячей у потребителя.

Эффективности теплообменника должно быть достаточно для оптимальной работы системы. Активный теплообмен начинается только при переходе клапана запорно-регулирующей арматуры в нужный режим работы. Время на совершение перехода может достигать 40 секунд. Использование оптимально настроенного ПИД-регулятора не расширяет возможности быстрогодействия привода постоянной скорости и время наиболее быстрогодействующего клапана может составлять 20-30 секунд, из чего следует, что теплообменник не может обеспечить требуемый режим теплообмена и требуется установка накопительного бака. В диссертации рассматривается возможность применения другой структуры системы ГВС.

Активное применение в современной промышленности ПЧ для асинхронных двигателей продиктовано существенным экономическим эффектом от их использования. Регулируемый асинхронный привод с ПЧ выигрывает в стоимости у более дорого привода постоянной скорости, позволяет экономить мощность, имеет меньшие эксплуатационные издержки, включает в себя средства, для включения электропривода в многоуровневую АСУ ТП. Время перестройки системы ПЧ-АД с одной скорости на другую не превышает 0,5 секунд, что более чем в 2 раза.

2.2. Система ГВС с электроприводом циркуляционного насоса

В работе предлагается добиться снижения инерционности системы ГВС, используя частотное управление насосом первого контура, исследовать свойства замкнутой системы с контуром регулирования температуры на предмет повышения скорости реагирования на активное потребление с целью поддержания температуры внутреннего контура теплоносителя.

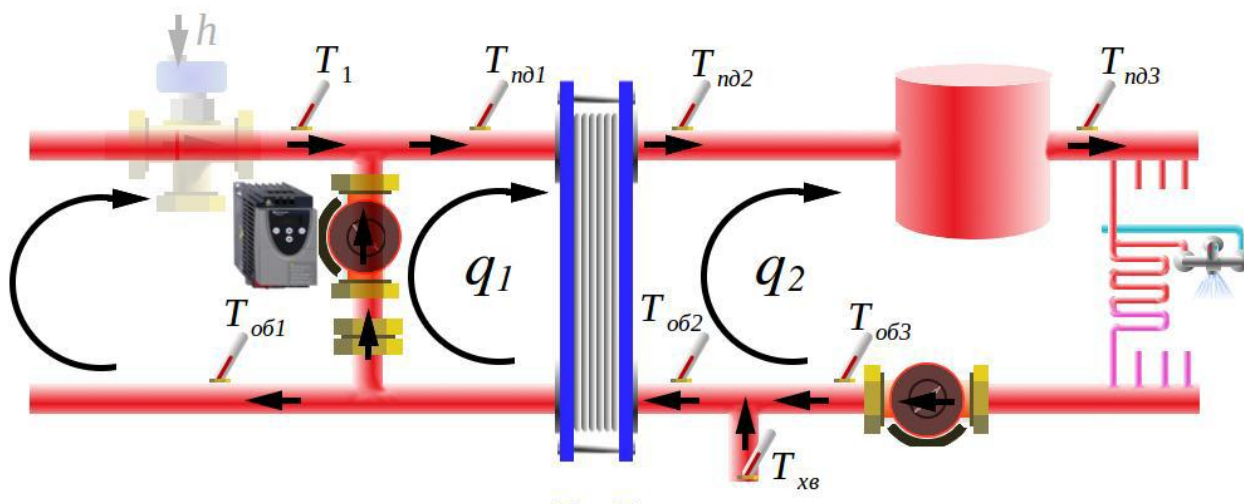


Рисунок 2.2 – Схематичное изображение системы ГВС с частотным управлением циркуляционным насосом внешнего контура.

Температуру у потребителя тепла задают в устройстве управления (УУ) вместе с ограничением по скорости вращения циркуляционного насоса, зависящей от инерционности объекта. Скорость движения теплоносителя от насоса к теплообменнику и обратно к циркуляционному насосу так же задается в УУ.

Режимы работы насоса: насос отключен или работает на минимальной скорости, воздействие которой на теплоноситель создает давление циркуляции равное давлению подачи теплоносителя из магистрали для заполнения системы водой.

При прошествии времени необходимого для заполнения системы ГВС теплоносителем и заданного в УУ, последнее дает сигнал управления (0-10В) циркуляционному насосу повысить скорость циркуляции теплоносителя во

внешнем контуре. Асинхронный электропривод, разогнавшись до максимальной частоты вращения, позволяет лопастям насоса создать поток циркуляции теплоносителя, давление которого больше давления магистрали. Теплоноситель в такой ситуации движется только от циркуляционного насоса в теплообменник и обратно, образуя замкнутый контур циркуляции.

При отсутствии необходимости регулирования подачи теплоносителя, система возвращается в исходный режим работы на заполнение теплоносителем.

Стоит отметить, что применение частотного управления позволяет избежать гидроударов в системе ГВС, обеспечивая плавный пуск насоса и делая систему надежной.

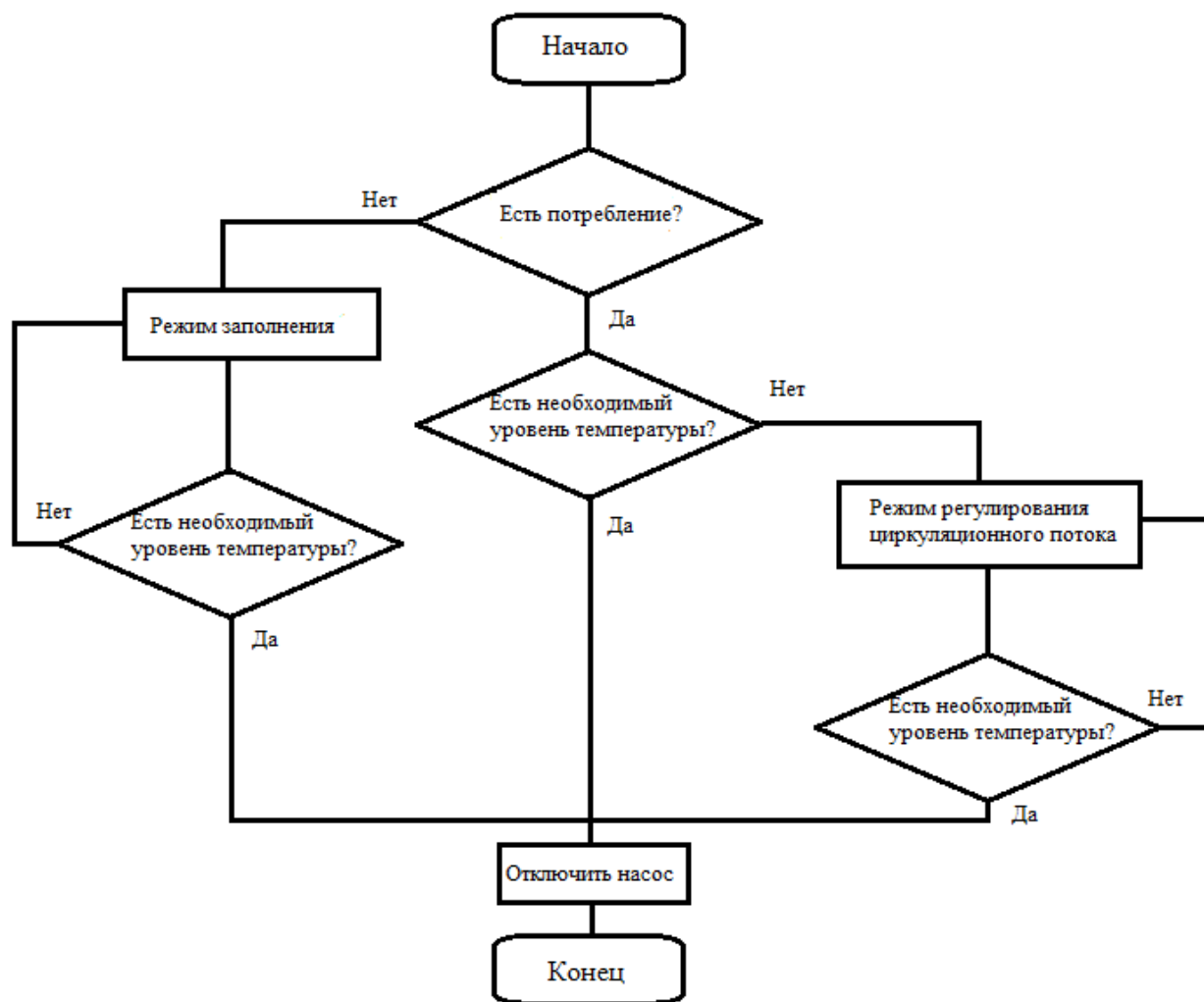


Рисунок 2.3 – Алгоритм работы системы ПЧ-АД циркуляционный насос.

2.3 Выводы по 2 главе

Чтобы реализовать предложенную систему управления необходимо проанализировать характеристики системы ГВС, синтезировать математическую модель процессов происходящих в системе и определить влияние на модель, предложенных в диссертации решений. Провести синтез регулятора для контура регулирования температуры, а так же численное моделирование и анализ результатов.

3.Выбор оборудования

3.1 Выбор насоса

Для корректного выбора насоса необходимо рассчитать характеристики магистрали. Известно, что статический напор в системе ГВС $H_{ст} = 6$ м, а при номинальном расходе $Q_n = 8 \frac{м^3}{ч}$ напор $H = 18$ м. Рассчитаем характеристику магистрали по двум точкам по формуле: $H(Q) = H_{ст} + R_q * Q^2$ [12]

$$R_q \text{ найдем как: } R_q = \frac{H - H_{cm}}{Q_n^2} = \frac{18 - 6}{64} = 0.188 \frac{ч^2}{м^5}$$

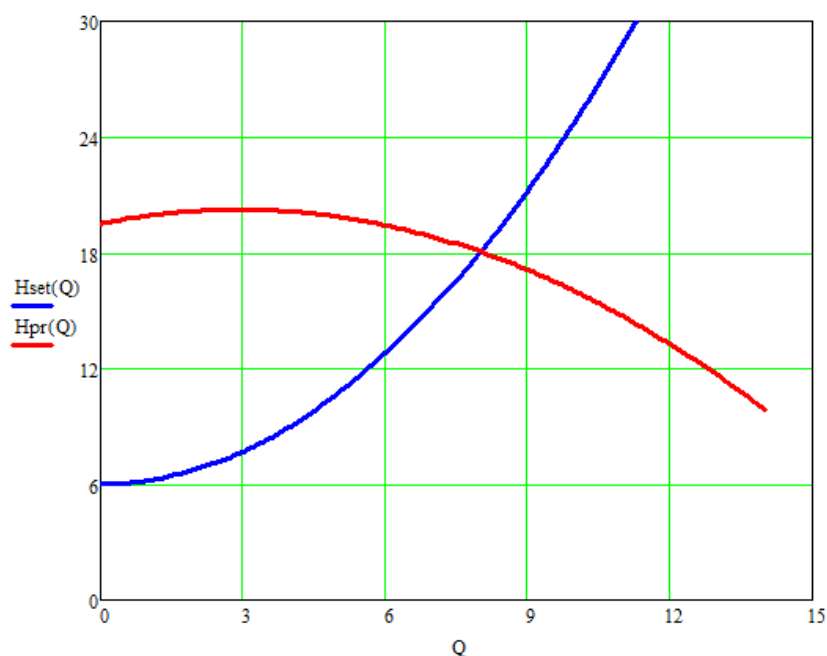


Рисунок 3.1 – Характеристики системы ГВС и насоса 1К8/18.

Требуемые параметры может обеспечить консольный центробежный насос 1К8/18.

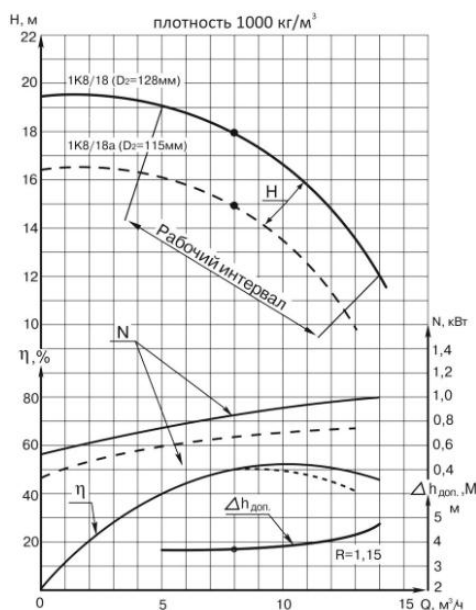


Рисунок 3.2 – Характеристики насоса 1К8/18.

По формулам $Q = Q_H \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)$, $H = H_H \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2$ рассчитаем характеристики

насоса при работе на скоростях меньше номинальной.

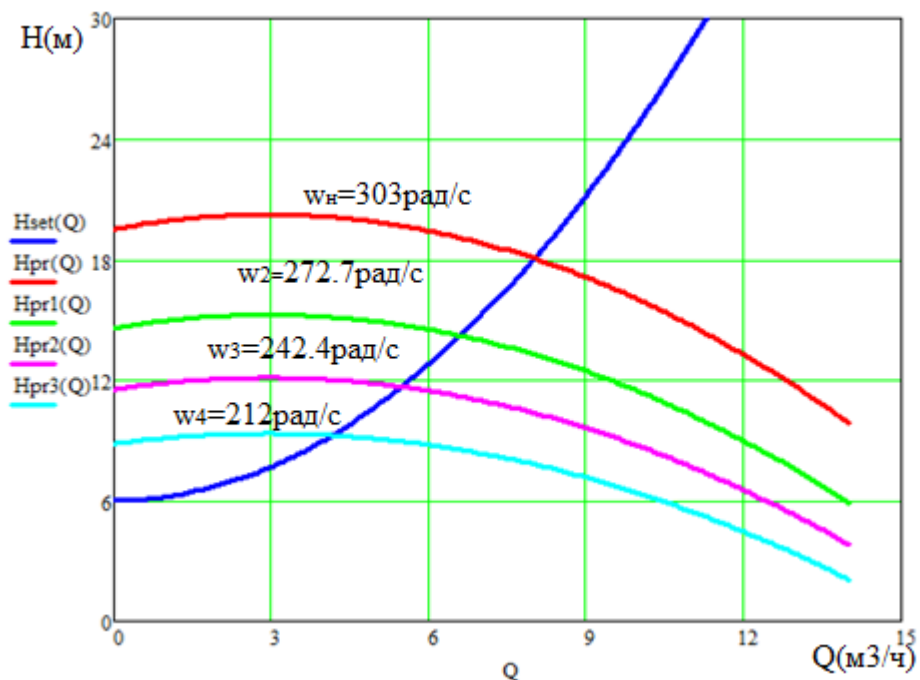


Рисунок 3.3 – Характеристики системы ГВС и насоса 1К8/18 на скоростях меньше номинальной.

Мощность приводного двигателя определяется по формуле:

$$P = \frac{\rho \cdot H_H \cdot Q_H \cdot g}{3600 \cdot \eta_H} = \frac{998 \cdot 18 \cdot 8 \cdot 9.81}{3600 \cdot 0.53} = 738.897 \text{ Вт} \quad (1.1)$$

Момент сопротивления насоса найдем по формуле:

$$M = \frac{\rho \cdot H_H \cdot Q_H \cdot g}{3600 \cdot \eta_H \cdot \omega_H} = \frac{998 \cdot 18 \cdot 8 \cdot 9.81}{3600 \cdot 0.53 \cdot 303} = 2.439 H \cdot м \quad (1.2)$$

Графически найдем и запишем в таб.1. точки пересечения характеристики сети и насоса.

Скорость	Напор	Расход	КПД
ω_H	14.3	6.67	0.48
$0.9\omega_H$	11.7	5.42	0.43
$0.8\omega_H$	9.3	4.1	0.35
$0.7\omega_H$	6.7	1.92	0.12

По формулам 1.1 и 1.2 найдем и построим механическую характеристику насоса.

$$M_1 = \frac{\rho \cdot H_1 \cdot Q_1 \cdot g}{3600 \cdot \eta_1 \cdot \omega_1} = \frac{998 \cdot 14.3 \cdot 6.67 \cdot 9.81}{3600 \cdot 0.48 \cdot 282} = 1.912 H \cdot м$$

$$M_2 = \frac{\rho \cdot H_2 \cdot Q_2 \cdot g}{3600 \cdot \eta_2 \cdot \omega_2} = \frac{998 \cdot 11.7 \cdot 5.42 \cdot 9.81}{3600 \cdot 0.43 \cdot 251} = 1.597 H \cdot м$$

$$M_3 = \frac{\rho \cdot H_3 \cdot Q_3 \cdot g}{3600 \cdot \eta_3 \cdot \omega_3} = \frac{998 \cdot 9.3 \cdot 4.1 \cdot 9.81}{3600 \cdot 0.35 \cdot 219.8} = 1.348 H \cdot м$$

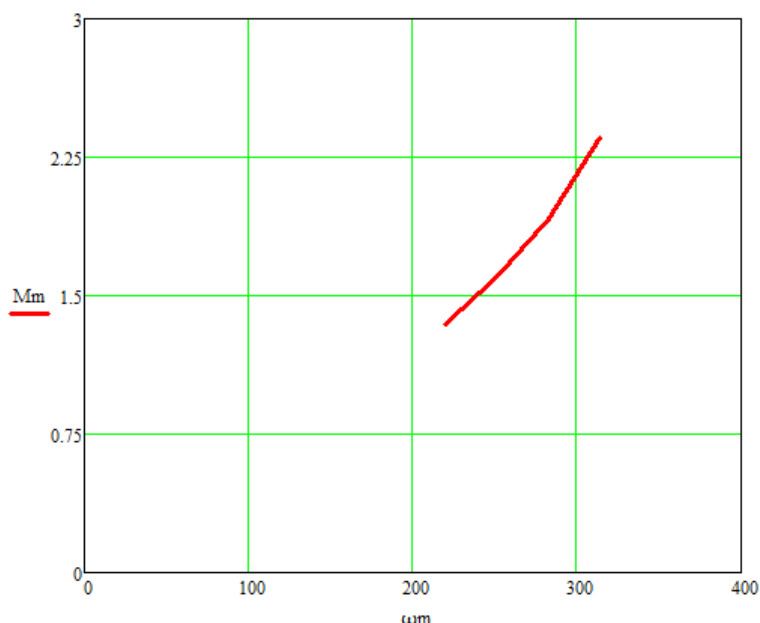


Рисунок 3.4 – Механическая характеристика насоса.

Однако этот график не дает аналитического описание момента сопротивления. Из источника [13] известно, что момент сопротивления насоса можно представить, пользуясь параболической аппроксимацией формулой:

$$M_{cm} = M_n \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^K, \text{ где } K = \left[\frac{\lg \left(\frac{Q_n \cdot H_n}{Q_2 \cdot H_2} \right)}{\lg \left(\frac{\omega_n}{\omega_2} \right)} \right] - 1.$$

Найдем коэффициент и построим график механической характеристики насоса. Нагрузочная характеристика насоса, построенная по вычисленным данным, представлена на рис.2.3.

$$K = \left[\frac{\lg \left(\frac{Q_n \cdot H_n}{Q_2 \cdot H_2} \right)}{\lg \left(\frac{\omega_n}{\omega_2} \right)} \right] - 1 = \left[\frac{\lg \left(\frac{8 \cdot 18}{11.7 \cdot 5.42} \right)}{\lg \left(\frac{314}{252} \right)} \right] - 1 = 2.675$$

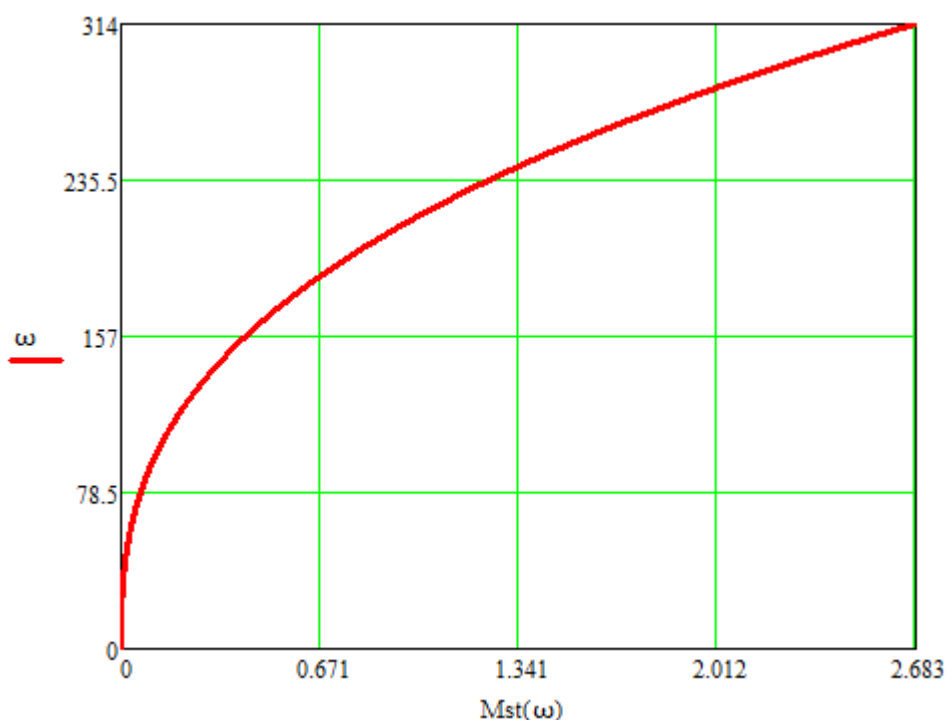


Рисунок 3.5 – Механическая характеристика насоса.

Зная мощность насоса выберем для него приводной двигатель исходя из условия $P_{н.дв} \geq P_n$. В паспорте насоса производителем рекомендуется

использовать двигатель АИР71В2, подходящий по условию мощности, выберем его в качестве приводного двигателя насоса.

Вывод: в ходе расчетов было установлена возможность частотного регулирования скорости работы насоса с диапазоном регулирования 1:3, так же аналитически представлена нагрузочная характеристика насоса.

3.2 Выбор приводного электродвигателя.

Автоматизирование производственных устройств дает возможность наиболее быстро и четко воспроизводить технологический процесс. При полной автоматизации процесса не требуется непрерывного участия человека, ему остается роль наблюдающего и корректировщика. В данный период целесообразно автоматизировать производственные установки при поддержке микропроцессорных систем, которые дают возможность сменить жесткую логику на программное управление, увеличить надежность и эластичность системы управления.

Определим главные условия к автоматизированной системе управления:

- плавный запуск насосного агрегата и разгон до установленной скорости;
- определение давление в зависимости от текущего потребления;
- стабилизация требуемого давление воды в системе при регулировании скорости вращения электродвигателя;
- автоматический разгон насосного агрегата после пропаже питания;
- защита от тепловых нагрузок приводных электродвигателей насосных агрегатов;
- периодическая смена насосного агрегата, регулирующего подачу теплоносителя в систему;
- система управления обязана обеспечивать контроль минимального, максимального и потребления.

В качестве электропривода для проектируемой установки получаем трехфазный асинхронный электропривод, построенный по системе ПЧ-АД КЗР.

Автоматизировать устройство предлагается внедрением программируемого контроллера. В функции контроллера в таком случае станут входить: выработка задания для электропривода в зависимости от температуры воды у потребителя; диагностика состояния элементов установки; выдача аварийных сигналов в операторскую службу.

В паспорте насоса рекомендуется установка электродвигателя АИР80А2 мощность 1,5 кВт, но исходя из расчета видно, что данный двигатель слишком мощный и будет работать с сильной недогрузкой, поэтому выбираем электродвигатель меньшей мощности из того же ряда АИР71В2.

Электродвигатели асинхронные трехфазные с короткозамкнутым ротором типа АИР71В2 предназначены для привода механизмов, требующих регулирования частоты вращения, а также для привода механизмов с тяжелыми условиями запуска. Двигатели подготовлены для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц напряжением 380 В.

- Климатическое исполнение – У3.
- Номинальный режим работы - продолжительный S1.
- Конструктивное исполнение двигателей - IM1001.
- Способ охлаждения двигателей - IC01A61.
- Степень защиты двигателей – IP44, коробки выводов - IP55.

Номинальная мощность приводного двигателя должна быть равна либо больше мощности на валу насоса во всех его возможных технологических режимах работы.

Таблица 2.1 – Технические характеристики электродвигателя АИР71В2.

Типоразмер	n ₀ , об/мин	U _{1H} ,В	P _{дв,н} , кВт	При номинальной нагрузке			s _k	J _{дв} , кг·м ²
				s _H ,%	cosφ _H	η _H ,%		
АИР71В2	3000	380	1,1	6,3	0,85	79,5	0,34	0,0011

Продолжение таблицы 2.1

$m_{II} = \frac{M_{пуск}}{M_H}$	$m_K = \frac{M_{макс}}{M_H}$	$m_M = \frac{M_{мин}}{M_H}$	$k_I = \frac{I_{пуск}}{I_H}$	Степень защиты
2,2	2,4	1,8	6	IP-54

3.3. Расчет параметров электродвигателя.

Синхронная угловая частота вращения двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номинальное скольжение двигателя:

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_{двн}}{\omega_0} = \frac{314,16 - 294,4}{314,16} \cdot 100 = 6,3\%$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{двн} = \frac{P_{двн} \cdot 1000}{\omega_{двн}} = \frac{1,1 \cdot 1000}{294,4} = 3,737 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для расчёта характеристик асинхронного двигателя, как правило, пользуются его математической моделью, которая в общем случае представлена различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для инженерных расчётов асинхронного двигателя является T - образная схема замещения (рис.3.5).

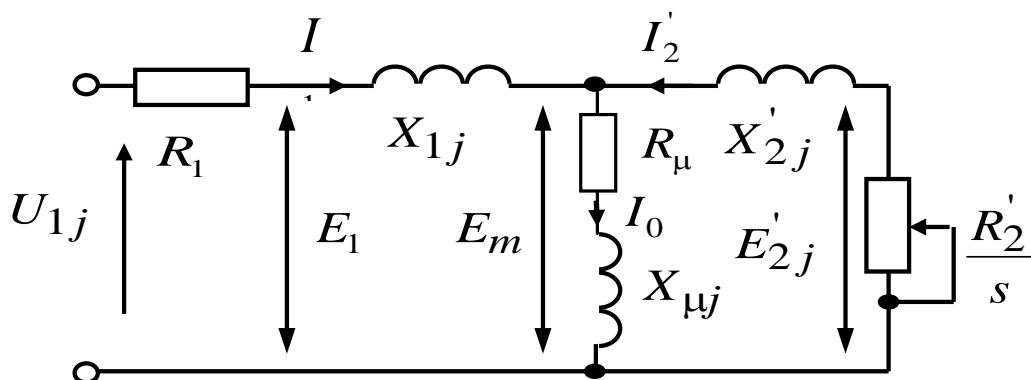


Рисунок 3.4 - Схема замещения асинхронного двигателя.

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие выбранной схеме замещения:

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_{жс} \cdot I_{1н} \cdot \frac{1-s_n}{1-p_{жс} \cdot s_n} \right)^2}{1 - \left(p_{жс} \cdot \frac{1-s_n}{1-p_{жс} \cdot s_n} \right)^2}} = 1,539 \text{ А,}$$

где $p_{жс} = 0,75$ - коэффициент загрузки двигателя;

$\eta_{нржс} = \eta_n$ - КПД при частичной нагрузке.

Номинальный ток статора:

$$I_{1н} = \frac{P_{двн} \cdot 1000}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{1,1 \cdot 1000}{3 \cdot 220 \cdot 0,8 \cdot 0,79} = 2,261 \text{ А}$$

Ток фазы статора при частичной нагрузке:

$$I_{11} = \frac{p_{жс} \cdot P_{двн}}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_{ржс} \cdot \eta_{нржс}} = \frac{0,75 \cdot 1100}{3 \cdot 220 \cdot 0,75 \cdot 0,79} = 2,194 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности при частичной нагрузке, принимаем согласно:

$$\cos \varphi_{ржс} = K \cdot \cos \varphi = 0,75$$

$K = 0,99$ – коэффициент, зависящий от мощности двигателя

Определим коэффициенты:

$$c_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1н}} = 1 + \frac{1,539}{2 \cdot 6 \cdot 2,261} = 1,049 .$$

Критическое скольжение:

$$s_k = s_n \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - (1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1))}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} = 0,354$$

где β - коэффициент, значение которого находится в диапазоне 0,6 - 2,5,
принимаяем $\beta = 1$.

Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot m_k \cdot P_{об.н} \cdot c_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_k} \right)} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,063)}{2 \cdot 2.4 \cdot 1100 \cdot 1,049^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,354} \right)} = 6,117 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по следующему выражению:

$$R_1 = c_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,049 \cdot 6,117 \cdot 1 = 6,416 \text{ Ом}.$$

Определим параметр γ , который позволит найти индуктивное сопротивление короткого замыкания X_k :

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k^2} \right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,354^2} \right) - 1^2} = 2,646,$$

тогда

$$X_{кн} = \gamma \cdot c_1 \cdot R_2' = 2,646 \cdot 1,048 \cdot 6,117 = 16,977 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1н} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 16,977 = 7,13 \text{ Ом}.$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L_{1н} = \frac{X_{1н}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{7,13}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,023 \text{ Гн}.$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведённое к статорной, может быть рассчитано:

$$X_{2н}' = \frac{0,58 \cdot X_{кн}}{c_1} = \frac{0,58 \cdot 16,977}{1,049} = 9,387 \text{ Ом}.$$

Индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L'_{2н} = \frac{X'_{2н}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{9,387}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,03 \text{ Гн.}$$

Исходя из векторной диаграммы ЭДС E_1 ветви намагничивания, наведённая в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$E_1 = \sqrt{(U_{1н} \cdot \cos \varphi_n - I_{1н} \cdot R_1)^2 + (U_{1н} \cdot \sin \varphi_n - I_{1н} \cdot X_{1н})^2} = 195,398 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_{\muн} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{195,398}{1,539} = 126,998 \text{ Ом.}$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком воздушного зазора, создаваемым суммарным действием токов статора (индуктивность контура намагничивания)

$$L_{\muн} = \frac{X_{\muн}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{126,998}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,404 \text{ Гн.}$$

Проверка адекватности расчётных параметров двигателя:

Найдем значение номинального электромагнитного момента при вычисленных параметрах $M_{\text{эм.н}}; M_{\text{эм.н}}^*$

$$M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_n \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_n \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = 4,07 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{эм.н}}^* = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_{\mu}}{(L_{\mu} + L_{2\delta})} \cdot \Psi_{2н} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1н}^2 - I_0^2} = 3,686 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где

$$\Psi_{2н} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_{\mu} = 0,88 \text{ Вб.}$$

Должны выполняться условия:

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}} \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}} \equiv 3,737 < 4,07 < 4,11 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

По результатам расчёта эти условия выполняются.

Таблица №3 - Параметры схемы замещения АИР71В2

$R_s, \text{Ом}$	$R_r, \text{Ом}$	$L_s, \text{Гн}$	$L_r, \text{Гн}$	$L_m, \text{Гн}$
6,416	6,117	0,023	0,03	0,404

3.4. Расчет естественных характеристик электродвигателя.

Рассчитаем и построим естественную электромеханическую характеристику $I_1(\omega)$ для частоты $f_{1H} = 50 \text{ Гц}$ по выражению:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(\omega) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \left[\frac{X_{1H} + X_{2H}'}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1H} + X_{2H}')^2}} \right]},$$

$I_2'(\omega)$ - значение приведённого тока ротора от скольжения.

$$I_2'(\omega) = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1H} + X_{2H}')^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_{2np}}{s \cdot X_\mu}\right)^2}}$$

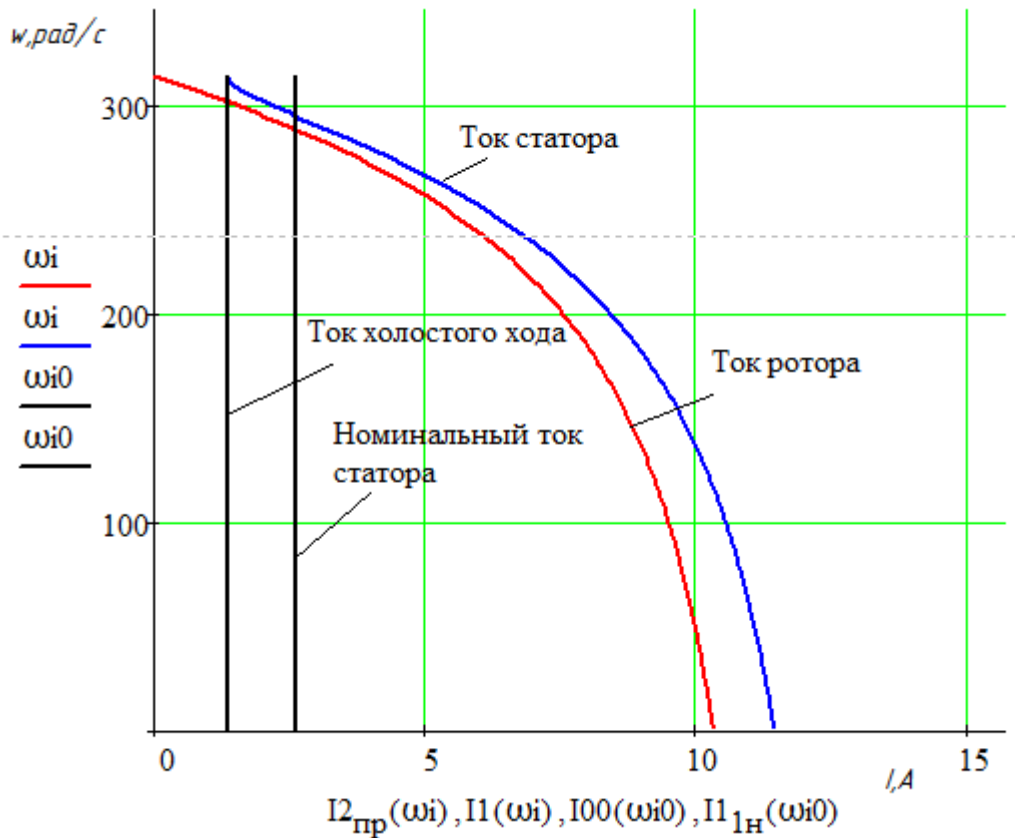


Рисунок 3.5 - График естественной электромеханической характеристики

$$I_1 = f(\omega), I_2 = f(\omega) .$$

Определим номинальный ток статора асинхронного двигателя при номинальном скольжении в соответствии с электромеханической характеристикой

Номинальный ток ротора двигателя при номинальном скольжении:

$$I_2' = \frac{U_{1н}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{кн}^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(3,231 + \frac{3,118}{0,0417}\right)^2 + 13,636^2}} = 2,778 A$$

Синус угла вектора фазного напряжения и сопряжённым вектором тока ротора:

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{кн}^2}} = \frac{13,636}{\sqrt{\left(3,231 + \frac{3,118}{0,0417}\right)^2 + 13,636^2}} = 0,1722$$

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2} = \sqrt{1,609^2 + 2,778^2 + 2 \cdot 1,609 \cdot 2,778 \cdot 0,1722} = 3,311A$$

Номинальный ток статора, найденный исходя из его электромеханической характеристики, практически совпадает со значением, рассчитанным по данным приведённым в каталоге, что говорит о корректности произведенного расчета.

Естественная механическая характеристика $M(\omega)$ электродвигателя для частоты $f_{1H} = 50 \Gammaц$ рассчитывается по выражению:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_{2np}}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}$$

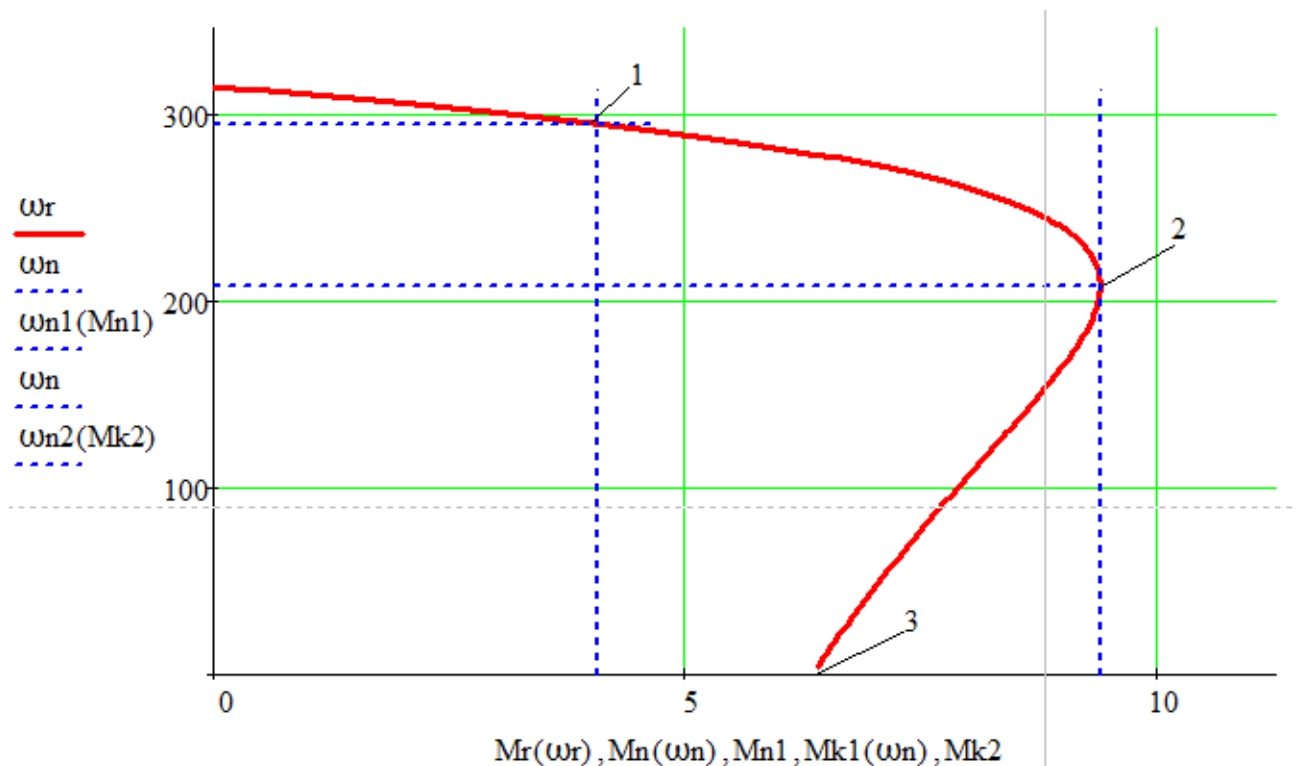


Рисунок 3.6 - Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя: 1 – момент номинальный, 2 – момент максимальный, 3 – момент пусковой.

Определим дополнительные параметры двигателя

Номинальный момент двигателя:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{1500}{301,59} = 4,97 \text{ H} \cdot \text{м}$$

Пусковой момент двигателя:

$$M_{\text{пуск}} = m_k \cdot M_n = 2,6 \cdot 4,87 = 12,922 \text{ H} \cdot \text{м}$$

Критический момент двигателя:

$$M_{\text{крит}} = \frac{3 \cdot U_{1\phi n}^2 \cdot R_{2np}}{\omega_0 \cdot s_k \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_{2np}}{s_k} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_{2np}}{s_k \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$\frac{3 \cdot 220^2 \cdot 3,118}{314 \cdot 0,231 \cdot \left(3,231^2 + \left(\frac{3,118}{0,231} \right)^2 + \left(\frac{3,231 \cdot 3,118}{0,231 \cdot 130,986} \right)^2 \right)} = 13,404 \text{ H} \cdot \text{м}$$

Вывод: Контрольные точки, найденные в соответствии с данными двигателя приведенными в каталоге, совпадают с рассчитанным графиком механической характеристики, следовательно, расчет произведен корректно.

3.5 Расчет механических и электромеханических характеристик электропривода.

Механическая характеристика асинхронного двигателя при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется следующим выражением:

$$M(\omega_{rj}) = \frac{3 \cdot (U_{j\phi n} \cdot \lambda_j + \Delta U_j)^2 \cdot R_{2np}}{\omega_{0j} \cdot \lambda_j \cdot \frac{\omega_{0j} \cdot \lambda_j - \omega_{rj}}{\omega_{0j} \cdot \lambda_j} \cdot \left[\left(X_{\text{кн}}^2 \cdot \lambda_j \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_{2np}}{\frac{\omega_{0j} \cdot \lambda_j - \omega_{rj}}{\omega_{0j} \cdot \lambda_j}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_{2np}}{\frac{\omega_{0j} \cdot \lambda_j - \omega_{rj}}{\omega_{0j} \cdot \lambda_j} \cdot X_{\mu} \cdot \lambda_j} \right)^2 \right]}$$

где $U_{j\phi n}$ - фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;

ω_{0j} - синхронная частота вращения двигателя;

$\lambda_j = \left(\frac{f_j}{f_{1n}} \right)^2$ - относительное значение частоты питающего напряжения;

Для вентиляторной нагрузки по формуле Костенко необходимо использовать $\frac{U_{1j}}{f_{1j}^2} = const$ закон регулирования.

Механические характеристики двигателя при частотном управлении приведены на рис. 3.7.

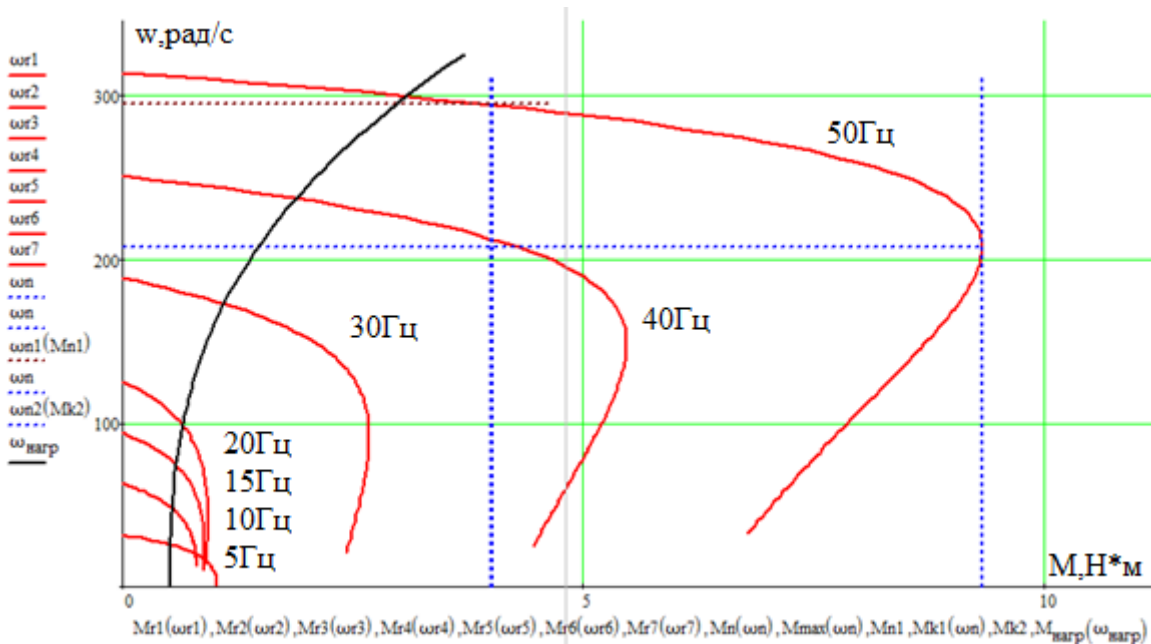


Рисунок 3.7 – Искусственные механические характеристики при частотном регулировании.

График на рис.3.7 показывает возможность работы привода на частотах ниже номинальной и возможность получить диапазон регулирования 1:7, при наличии в вольт добавок.

Электромеханические характеристики при частотном регулировании строим по выражениям:

для приведенного тока ротора

$$I'_{2j}(\omega_j) = \frac{U_{1j} \cdot \lambda_j}{\sqrt{\left[R_1 + \frac{R'_2}{\omega_{0j} \cdot \lambda_j - \omega_{rj}} \right]^2 + (X_{кн})^2 \cdot \lambda_j + \left[\frac{R_1 \cdot R_{2np}}{\omega_{0j} \cdot \lambda_j - \omega_{rj}} \cdot X_{\mu} \cdot \lambda_j \right]^2}}$$

для тока холостого хода

$$I_{0j} = \frac{U_{j\phi H} \cdot \lambda_j}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} \cdot \lambda_j + X_\mu \cdot \lambda_j)^2}}$$

для тока статора

$$I_{1j}(\omega_j) = \sqrt{I_{0j}^2 + I_{2j}^2(\omega_j) + 2 \cdot I_{0j} \cdot I_{2j}(\omega_j) \cdot \sin \varphi_j}, \text{ где}$$

$$\sin \varphi_j(\omega_j) = \frac{X_{KH} \cdot \lambda_j}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{\frac{\omega_{0j} \cdot \lambda_j - \omega_{rj}}{\omega_{0j} \cdot \lambda_j}} \right)^2 + (X_{KH} \cdot \lambda_j)^2}}$$

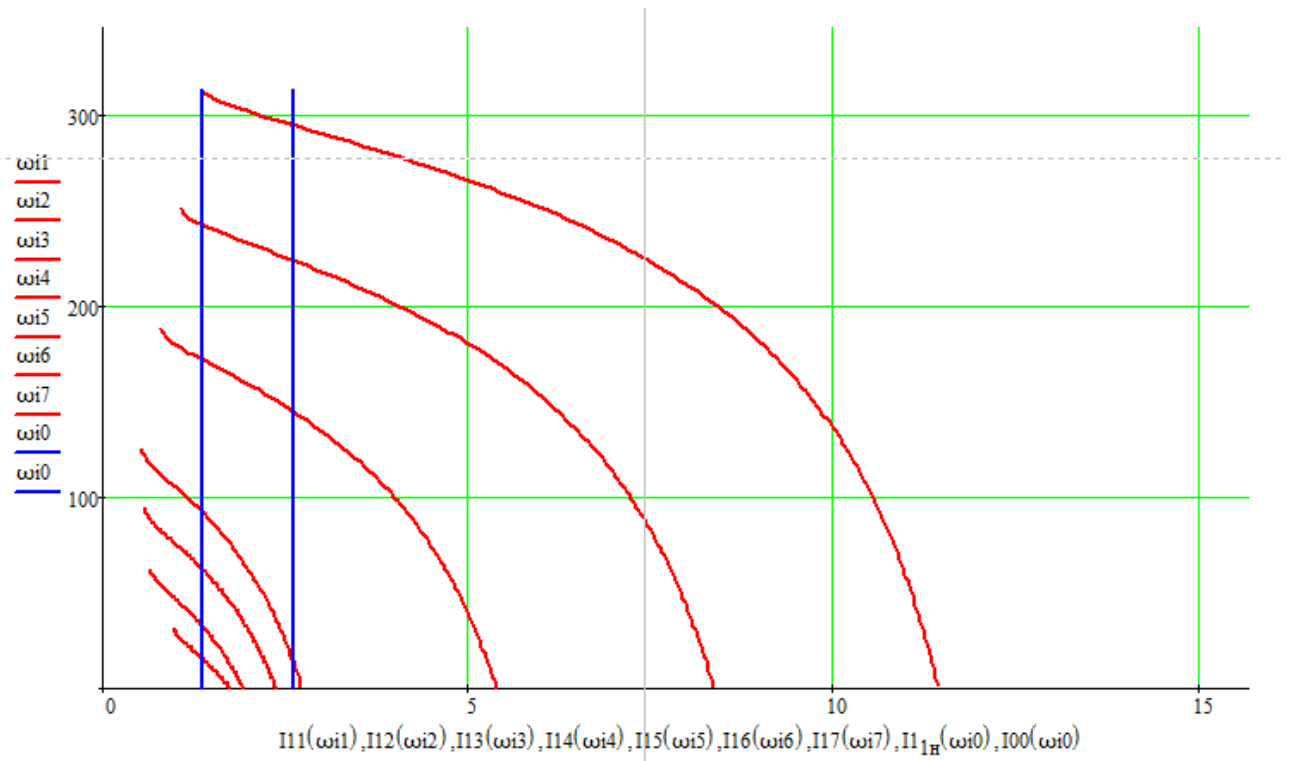


Рисунок 3.8 – Искусственные электромеханические характеристики при частотном регулировании.

Построим кривые изменения тока статора при работе с нагрузкой. Трассировкой графика узнаем точки пересечения механических характеристик нагрузки, прямой максимального момента с характеристикой двигателя.

Нагрузочная характеристика пересекает характеристики двигателя в пяти точках:

$\omega_{1хар} = 308, \text{ рад}/\text{с}$	$\omega_{2хар} = 245, \text{ рад}/\text{с}$	$\omega_{3хар} = 180, \text{ рад}/\text{с}$	$\omega_{4хар} = 113,6, \text{ рад}/\text{с}$	$\omega_{5хар} = 68,2, \text{ рад}/\text{с}$
---	---	---	---	--

Прямая максимального момента пересекает характеристики двигателя в двух точках $\omega_{1макс} = 302, \text{ рад}/\text{с}$ и $\omega_{2макс} = 229, \text{ рад}/\text{с}$.

Кривые изменения тока статора показаны на рис.3.9.

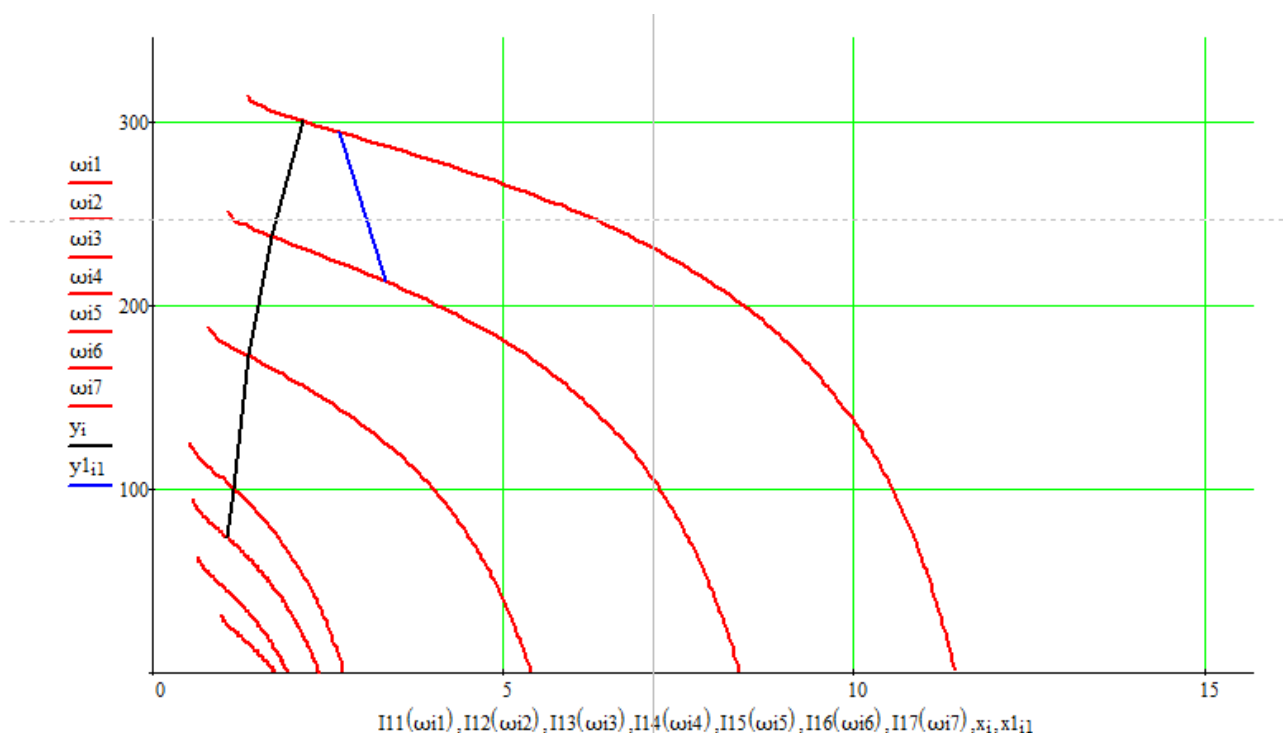


Рисунок 3.9 – Искусственные электромеханические характеристики асинхронного двигателя и кривые изменения тока.

Анализируя график можно сказать, что максимальный возможный ток статора в нормальном режиме работы не превысит $I_1 = 4, A$.

3.6 Выбор преобразователя частоты.

Условия выбора преобразователя частоты:

$$P_{ПЧ} \geq P_{двиг}; I_{ПЧ} \geq I_{макс.двиг}$$

Для двигателя мощностью $P_{\text{двиг}} = 1,5 \text{ кВт}$ и номинальным током $I_{\text{ном}} = 3,261 \text{ А}$ подбираем преобразователь частоты серии : SchE ATV312HU15N4 фирмы Schneider Electric, имеющий следующие характеристики: $P_{\text{пч}} = 1,5 \text{ кВт}$, $I_{\text{ном}} = 4 \text{ А}$. Паспортные данные преобразователя частоты приведены в таблице 2.3

Таблица 2.3 – Паспортные данные преобразователя частоты

Условное обозначение преобразователя частоты	Полная мощность преобразователя, кВА	Максимальная мощность двигателя, кВт	Перегрузка по току	Диапазон изменения частоты, Гц	Максимальный ток, А	Исполнение
ATV312HU15N4	2	1,5	150% в течении 1 мин	0,5~500	6,2 в течение 60 секунд	IP21

Продолжение таблицы 2.3

Коэффициент мощности	КПД	Частота ШИМ	Способ управления
0,89	Не менее 0,9	0,5 – 20 кГц	Скалярный

Рассчитаем длительно допустимый ток двигателя по формуле и построим на электромеханической характеристике кривую ток статора с учетом длительно допустимого тока:

$$I_{\text{дл.доп}}(\omega_j) = I_{\text{н}} \cdot \left[k + (1-k) \cdot \frac{2 \cdot \omega_j}{\omega_n} \right], \text{ где } k - \text{ коэффициент ухудшения теплоотдачи}$$

двигателя при неподвижном роторе.

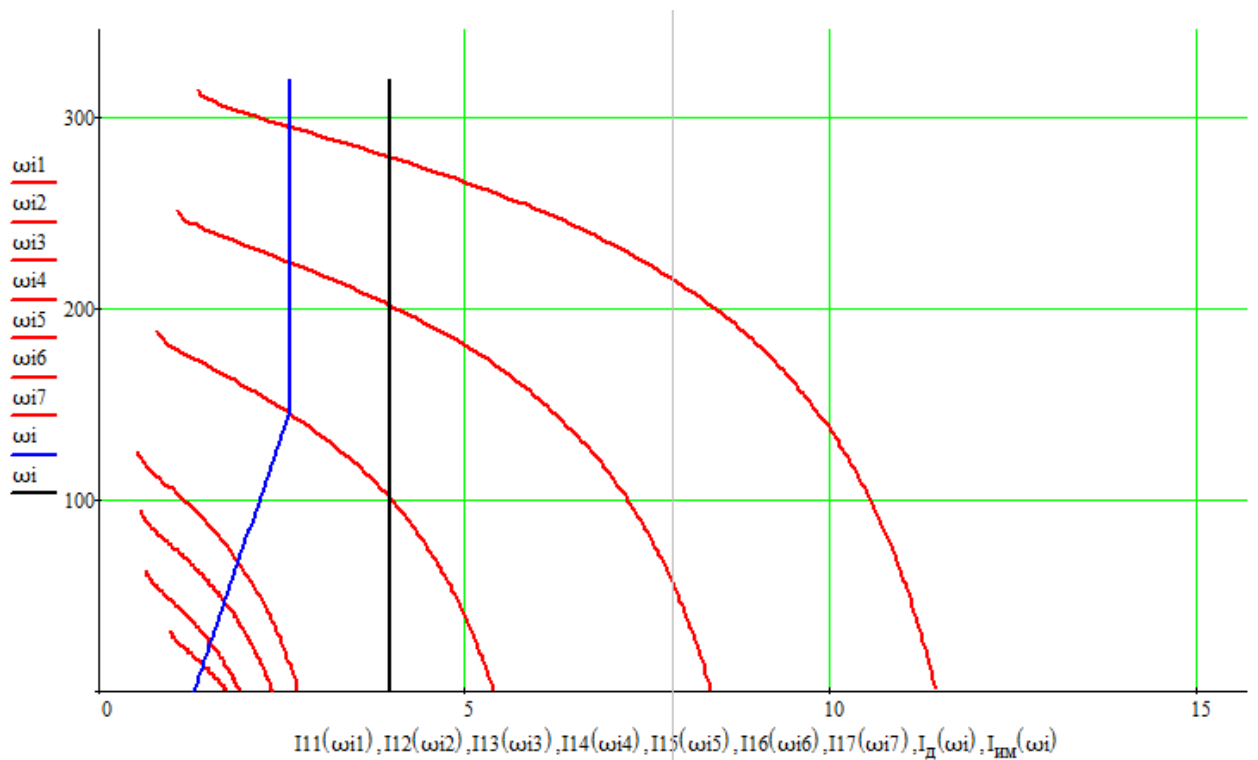


Рисунок 3.10 – Искусственные электромеханические характеристики асинхронного двигателя и кривые изменения тока.

Трассируя пересечения искусственных электромеханических характеристик с кривой длительно допустимого тока и прямой максимального тока, найдем значения скорости.

Подставив значения скоростей в уравнения механических характеристик, найдем соответствующие моменты и построим кривые на графике механических характеристик двигателя рис.3.11.

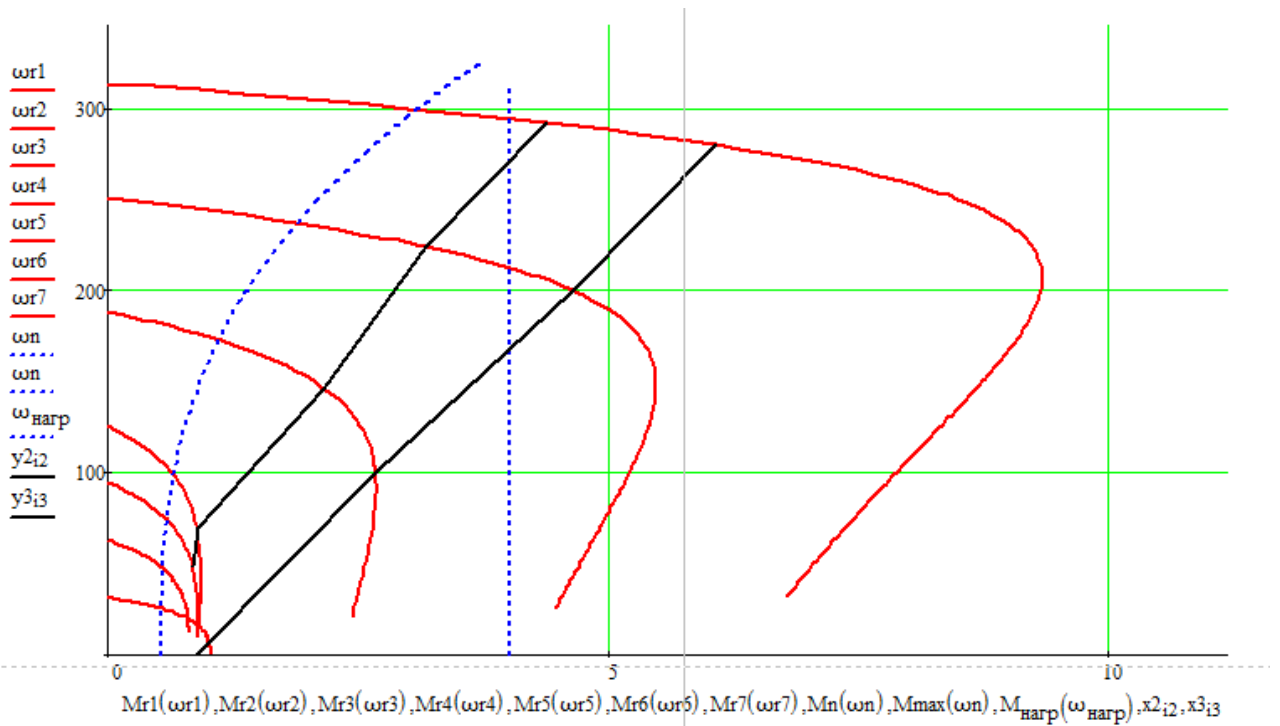
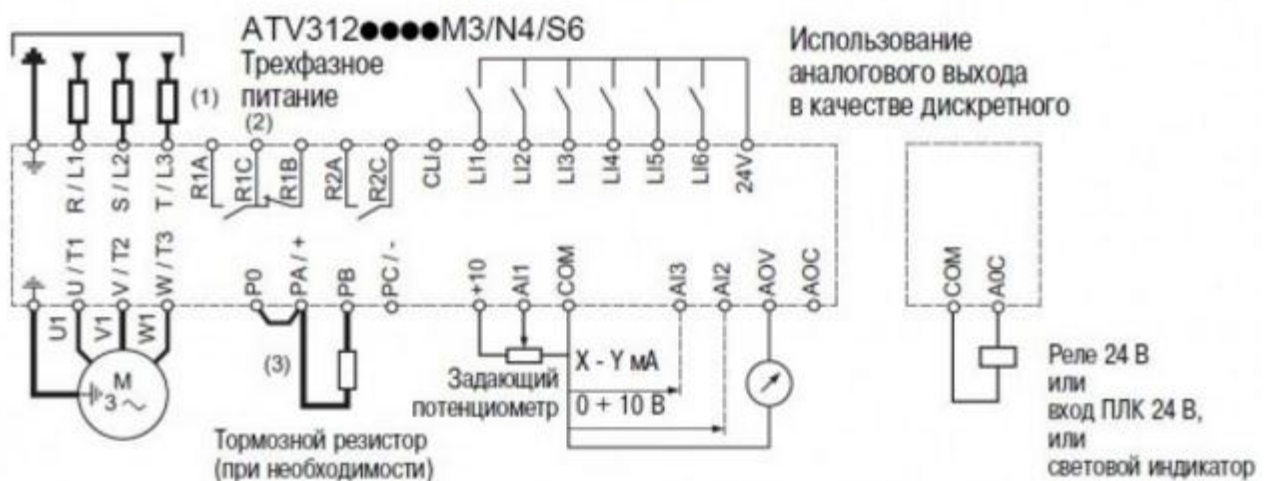


Рисунок 3.11 – Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя и кривые допустимой и максимальной нагрузки.

График показывает, что выбранная система турбомеханизм, электродвигатель, преобразователь частоты подходит под заданную нагрузку с запасом.

Основная схема подключения



(1) Сетевой дроссель по выбору (одно- или трехфазный).

Рисунок 3.13 – Основная схема подключения.

3.7.Выводы по 3 главе.

Расчеты, приведенные в главе 3, говорят о возможности реализации предлагаемых в диссертации решений и позволяют выбрать конкретное оборудование.

4. Математическое и имитационное моделирование

4.1 Имитационные модели асинхронного электропривода со скалярным управлением

Вспользуемся многофункциональной схемой реализации частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением в отсутствие измерителя скорости из источника [14]. Основными элементами регулируемого асинхронного электропривода с частотным скалярным управлением являются:

- Преобразователь частоты;
- Блок управления преобразователем, включающим в себя устройства формирования трехфазной системы управляющих напряжений и шестиканального ШИМ-сигнала, блок драйверов;
- Устройство формирования $\frac{U}{f}$ - характеристики;
- датчики линейного тока двигателя;
- Блок для расчета значения действующего тока, фактически протекающего в двигателе;
- Элемент сравнения допустимого максимального и фактического значения действующего фазного тока двигателя и регулятор ограничения тока;
- Регулятор ограничения тока и блок сравнения допустимых значений действующего фазного тока фактического и максимального двигателя;
- Блок компенсации скольжения;
- Блок, управляющий коррекцией напряжения инвертора в зависимости от фактического значения напряжения звена постоянного тока преобразователя.

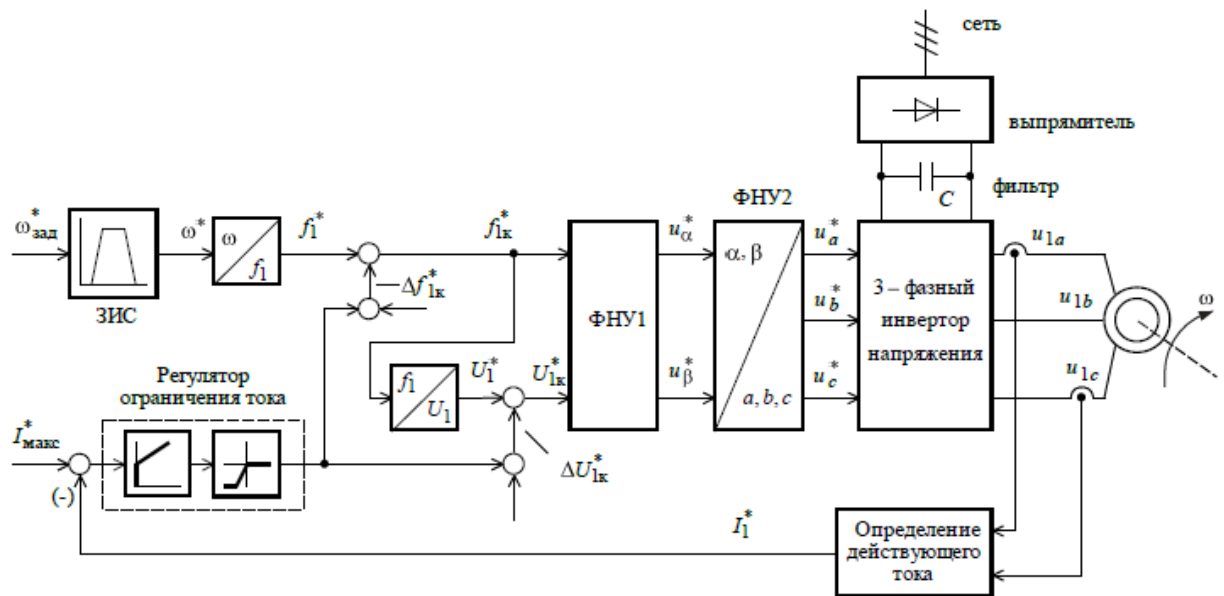


Рисунок 4.1 – Базовая функциональная схема асинхронного электропривода с частотным скалярным управлением и моделью трехфазного инвертора напряжения с ШИМ.

Варианты реализации моделей функциональной схемы асинхронного электропривода со скалярным управлением взяты из источника [14]:

- В приложении Б приведена имитационная форма частотно-регулируемого асинхронного электропривода циркуляционного насоса со скалярным управлением;
- На рис 4.2 приведена имитационная форма электрической части силового канала системы преобразователь частоты асинхронный электродвигатель;
- На рис.4.3 приведена имитационная форма механической части силового канала системы ПЧ-АД с вентиляторной нагрузкой;
- На рис.4.4 приведена имитационная форма электрической части двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат;
- На рис.4.5 приведена имитационная форма одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера;
- На рис.4.6 приведена имитационная форма задатчика интенсивности с S-образной характеристикой;
- Задание на силовой канал системы ПЧ-АД в виде модели представлено на рис.4.7;

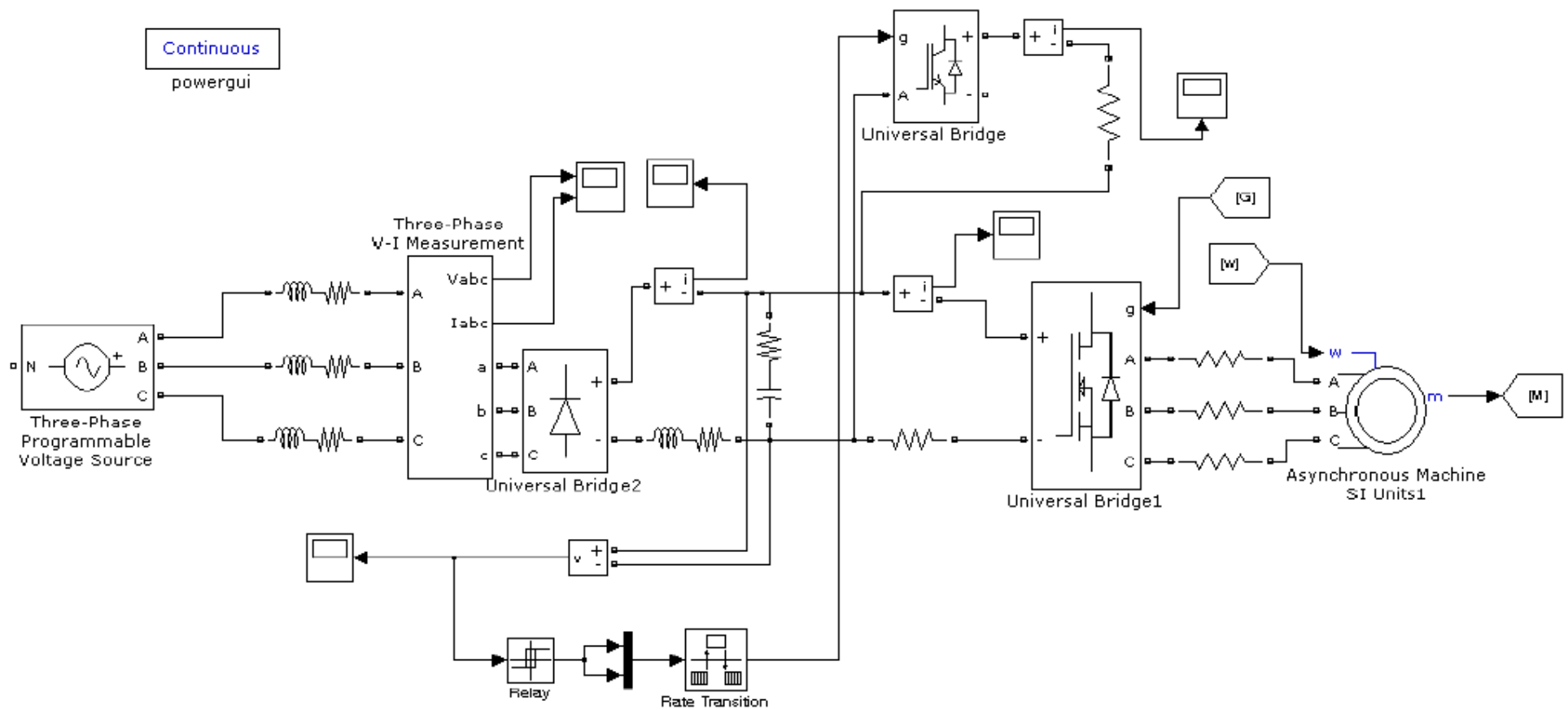


Рисунок 4.2 – Имитационная модель электрической части силового канала насоса системы преобразователь частоты асинхронного электродвигателя.

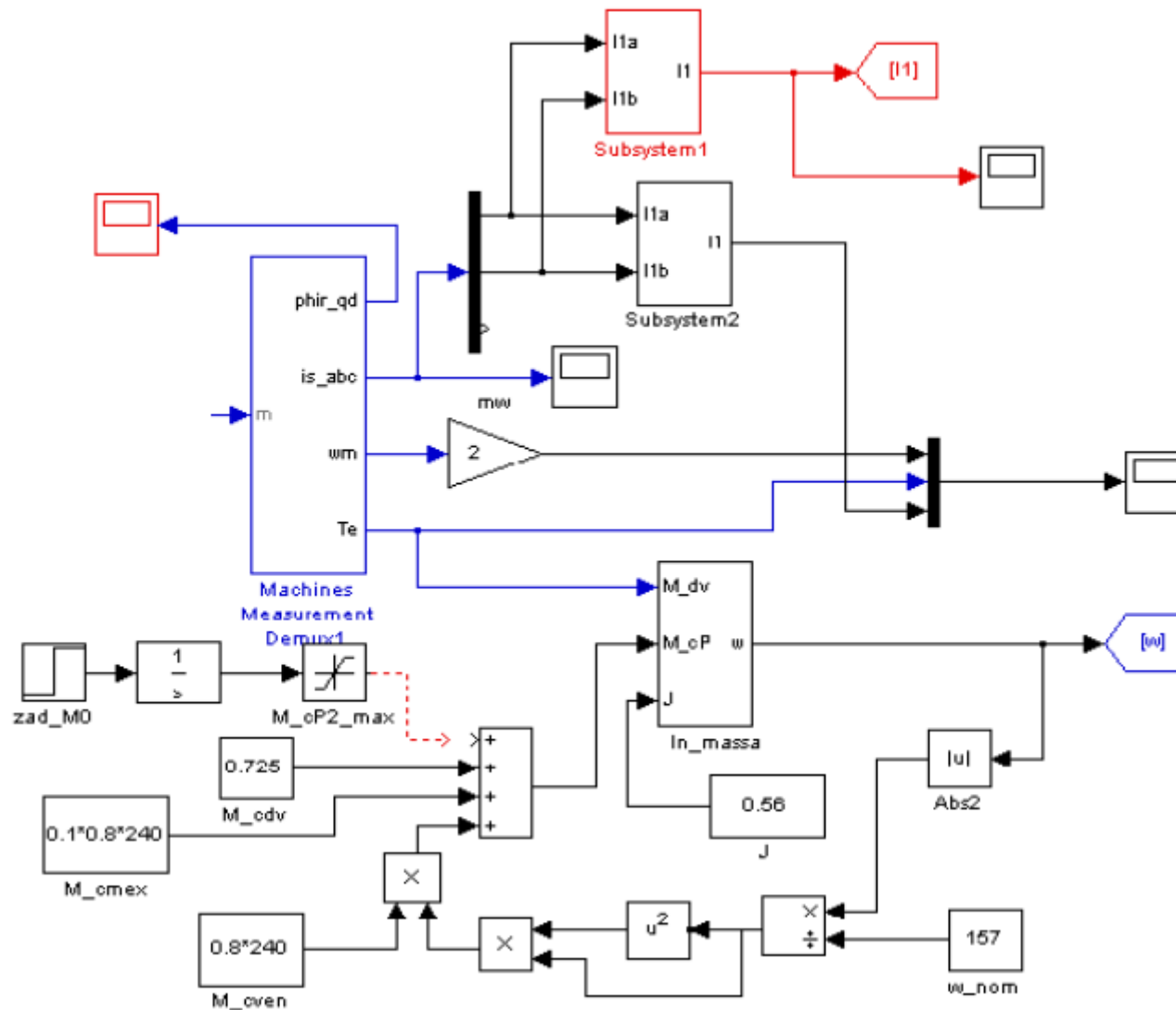


Рисунок 4.3 – Имитационная модель механической части силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель с насосной нагрузкой.

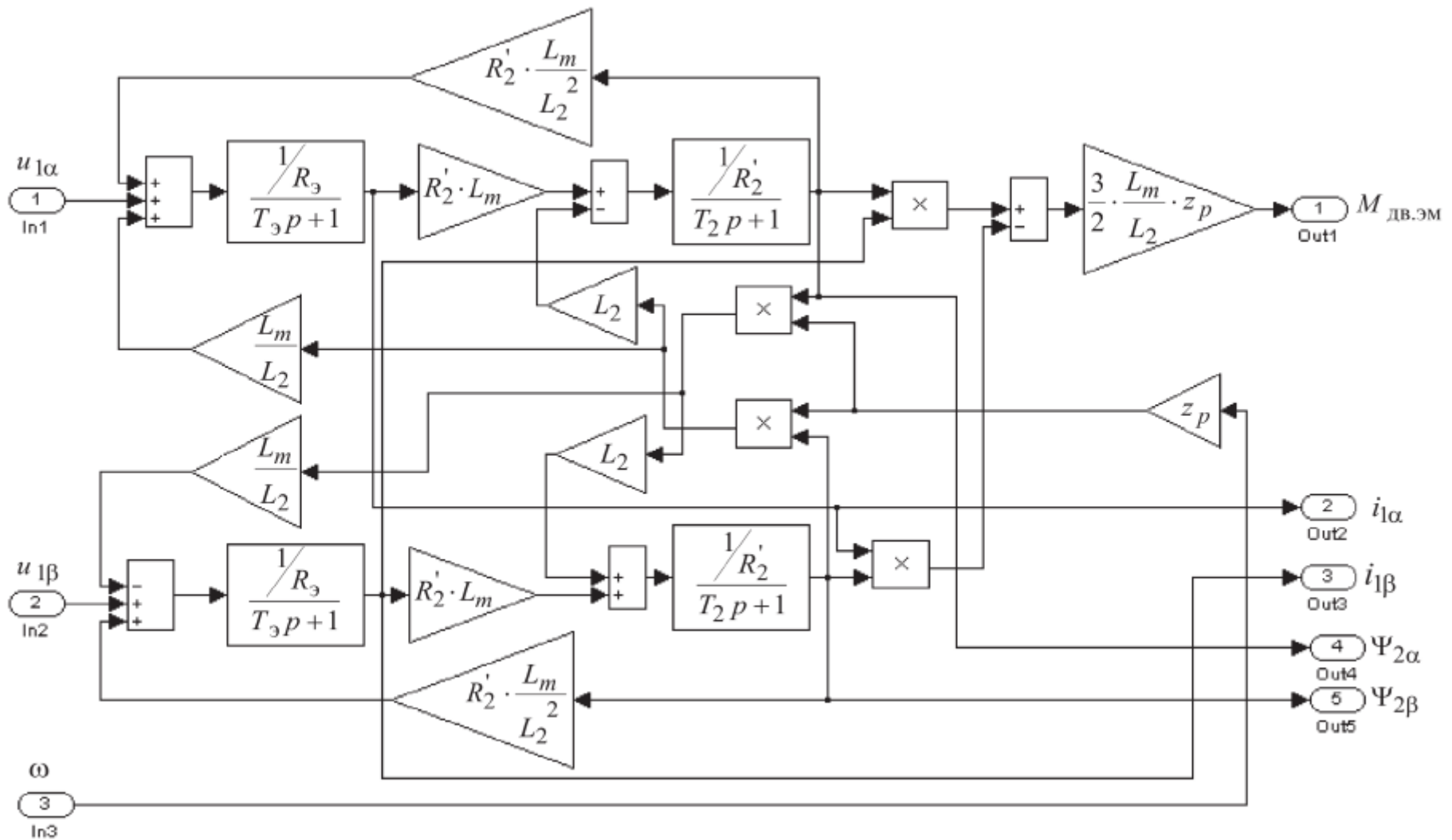


Рисунок 4.4 – Имитационная модель электрической части двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат.

Одномассовая механическая система с реактивной нагрузкой

Используемая для имитационного моделирования систем электропривода с нагрузкой реактивного характера модель, одномассовой механической системы, в виде блока представлена на рис.4.5.

На схеме рисунка 4.5 приняты следующие дополнительные обозначения:

$M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя, Н м;

$M_{ср}$ – приведенный к валу двигателя статический момент реактивного характера, Н м;

$J_{э}$ – приведенный к валу двигателя эквивалентный момент инерции движущихся масс, 2 кг м ;

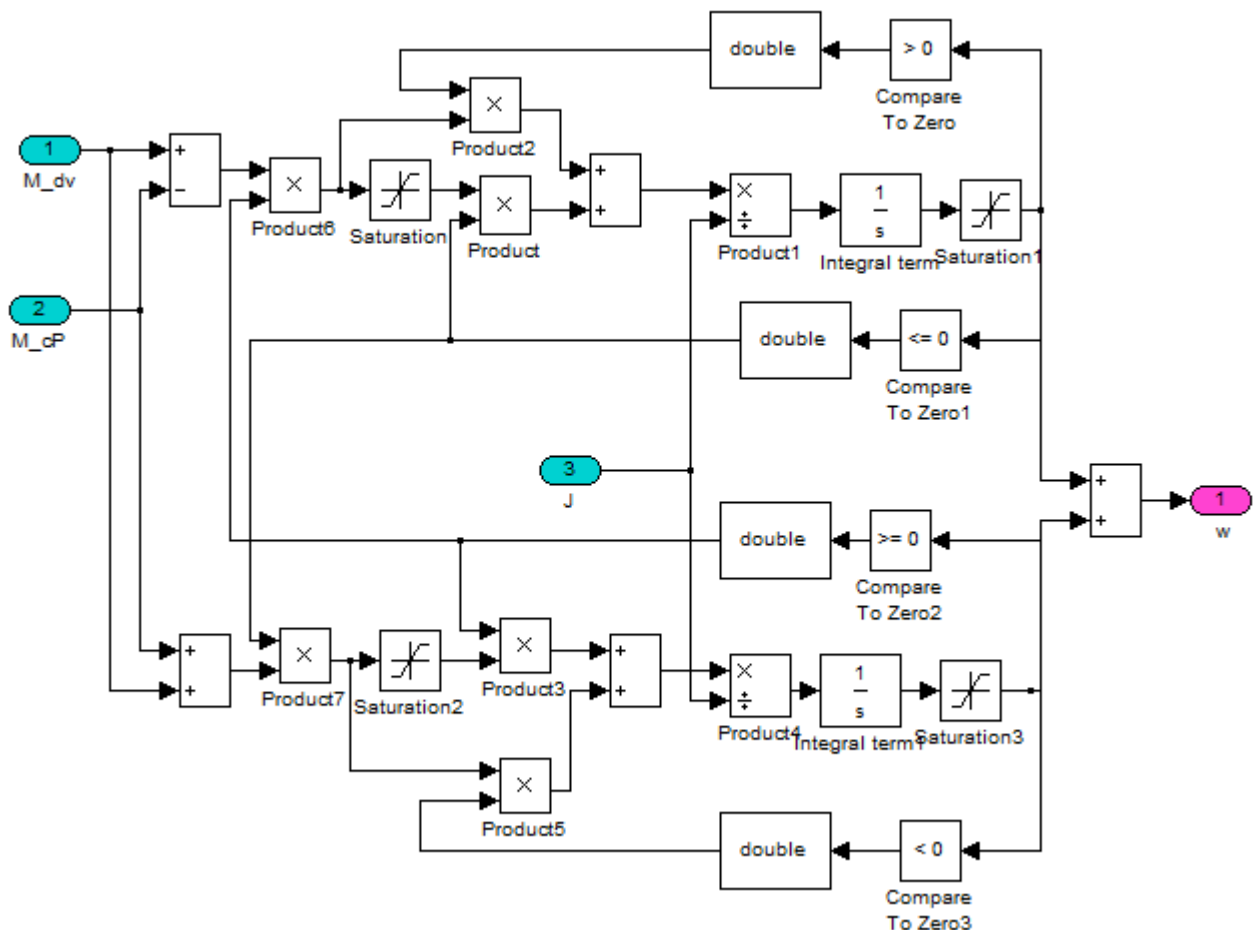


Рисунок 4.5 – Имитационная модель блока одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера.

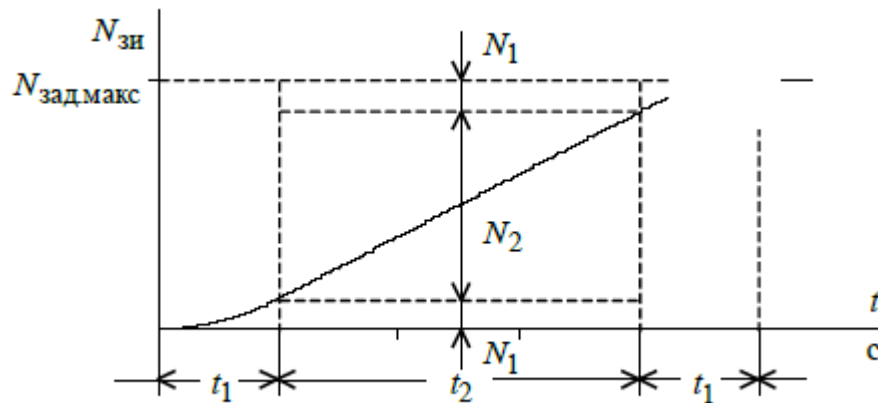
Имитационная модель задатчика интенсивности с S-образной характеристикой

Схема набора имитационной модели задатчика интенсивности с S-образной выходной характеристикой представлена на рисунке 4.6. Параметры настройки имитационной модели задатчика интенсивности с S-образной характеристикой

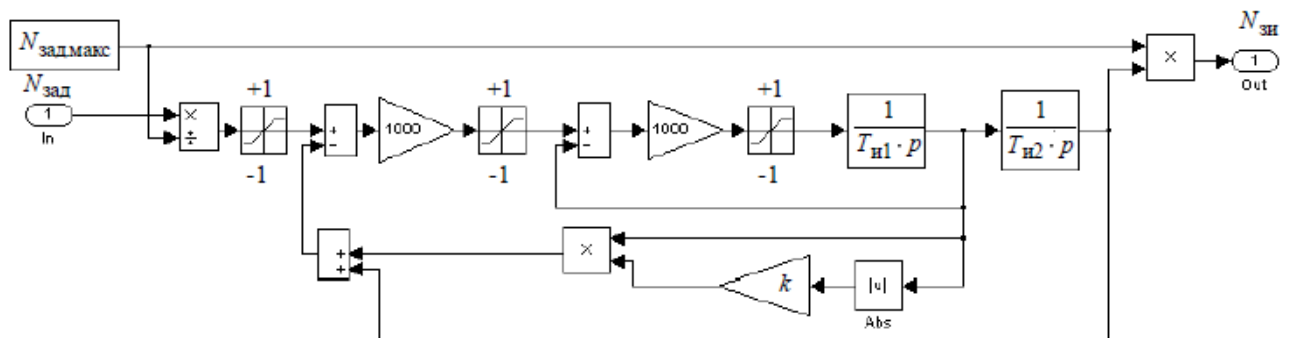
определяются по выражениям:

$$T_{u1} = t_1, c; \quad T_{u2} = t_1 + t_2, c;$$

$$k = 0,5 \cdot \frac{t_1}{t_1 + t_2};$$



а



б

Рисунок 4.6 – Задатчик скорости с S – образной характеристикой:

а – временная характеристика; б – имитационная модель.

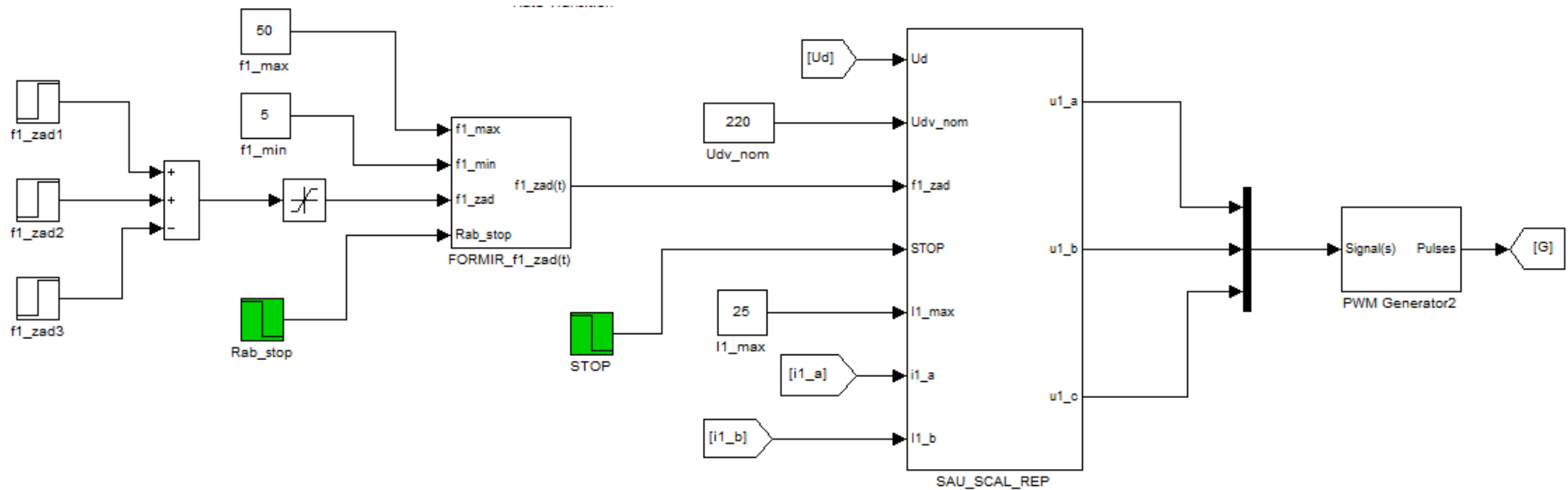


Рисунок 4.7 –Имитационная модель задание на силовой канал системы преобразователь частоты – асинхронного электродвигателя.

4.2 Исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса со скалярном управлением

Циркуляционный насос предназначен для создания внешнего циркуляционного контура, за счет создания давления превосходящего давление магистрали. Работать насос должен без реверса и преимущественно в продолжительном режиме, отключаясь лишь в часы пикового потребления. В соответствии с характеристикой насоса необходимо регулировать скорость электропривода с диапазоном 4:1.

Наиболее жесткие и противоречивые требования к электроприводу предъявляются в режиме пуска и останова насосной установки. С одной стороны, необходим плавный пуск и ограничение колебаний скорости. С другой стороны, требуется минимальное время разгона электропривода.

Ограничение рывка или третьей производной скорости обеспечивает мягкое сцепление валов приводного двигателя и насоса через соединительную муфту. Необходимо так же ограничение максимального ускорения и максимального момента в легких, с малой нагрузкой, и тяжелых, с полной нагрузкой, переходных процессах.

Программа исследования:

Исследуемые режимы работы электропривода:

- Плавный пуск до номинальной скорости
- Регулирование скорости, снижение в соответствии с диапазоном
- Стопорение насоса, останов

Модели частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса при скалярном управлении

В работе используется модель асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением с корректировкой вольт частотной характеристики;

Библиотека моделей частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса при скалярном управлении.

REP_AD_Nasos_Scal.mdl – модель асинхронного электропривода насоса с частотным скалярным управлением на базе модели электрической части силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель из пакета Simulink системы MATLAB, с датчиками токов i_{1a} , i_{1b} , коррекцией вольт-частотной характеристики $\frac{U}{f} = const$

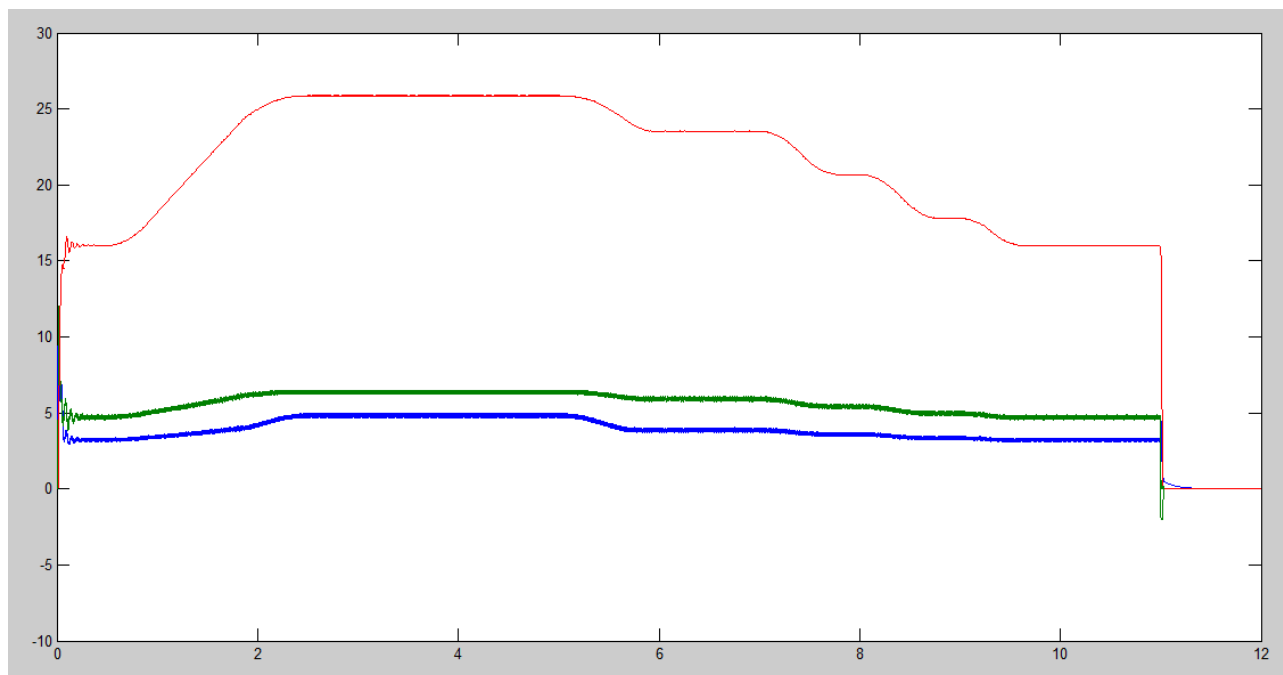


Рисунок 4.8 – Диаграммы $I(t)$, $M(t)$, $\omega(t)$ при отработке электроприводом насоса заданного цикла работы.

Результаты исследования:

При наличии задатчика интенсивности с S-образной характеристикой в электроприводе, отработывающем определенный технологический цикл, в пусковых и тормозных режимах ограничиваются значения динамического момента и тока двигателя. Однако, фактическое значение момента на валу двигателя и тока двигателя будут зависеть еще и от величины статического момента и характера нагрузки, а также от конкретного вида пуска- тормозного режима.

4.3 Вывод к разделу 4.2

Скалярное управление простейший вариант частотного управления с небольшим диапазоном регулирования и большими погрешностями скорости, обладает малым быстродействием из-за необходимости использования датчика интенсивности. Однако системы со скалярным управлением часто достаточно электроприводу, что удовлетворяют требования производственного механизма. Подобные системы имеют широкое применение в проектируемом технологическом оборудовании и в качестве замены регулируемому электроприводу постоянного тока, а так же нерегулируемому электроприводу переменного тока. Сильные пульсации в момент пуска и момент торможения предотвратить практически не возможно даже благодаря скалярному управлению.

4.4 Математическая модель системы ГВС

Воспользуемся моделью системы ГВС из источника [15].

Данная система дифференциальных уравнений описывает процесс горячего водоснабжения в системе, описанной в первом разделе.

Ключевым в системе является $K_{см}$ – коэффициент смешения, он представляет собой результат работы циркуляционного насоса, предложенный в работе для оптимизации системы по быстродействию.

Из источника [4] известна зависимость коэффициента смешения от напора развиваемого циркуляционным насосом. Известно так же, что для обеспечения этой зависимости близкой к линейной необходимо, чтобы насос развивал давление примерно втрое большее, чем давление магистрали, что согласуется с выбранным нами насосом.

$$\left\{ \begin{array}{l}
K_{cm}(t) = f(10 - u(t)) \\
\frac{dT_{nd1}^0}{dt} = \frac{((T_1^0 - T_{ob1}^0) \cdot K_{cm}) + T_{ob1}^0 - T_{nd1}^0}{T_{lob}} \\
\frac{dT_{nd2}^0}{dt} = \frac{(k_{lob} \cdot T_{nd1}^0 + (1 - k_{lob}) \cdot T_{ob}^0 - T_{nd2}^0)}{T_{lob}} \\
\frac{dT_{ob1}^0}{dt} = \frac{(k_{lob} \cdot T_{ob21}^0 + (1 - k_{lob}) \cdot T_{nd1}^0 - T_{ob1}^0)}{T_{lob}} \\
\frac{dT_{ob1}^0}{dt} = \frac{T_{nd2}^0 - T_{ob3}^0}{T_{ok}}, T_{ok} = 10c; \\
\forall i = 1..n \rightarrow \left\{ \forall j = 1..m \rightarrow \left\{ \frac{dT_{obz(i,j)}^0}{dt} = \frac{(T_{obz(i,j-1)}^0 - T_{obz(i,j)}^0)}{\tau_{z(i)}/m} \right\} \right\} \\
\frac{dT_{ob2}^0}{dt} = \frac{T_{ob3}^0 \cdot (1 - k_{xg}) + k_{xg} \cdot T_{xg}^0 - T_{ob2}^0}{T_{lob}} \\
m = 5, n = 1, T_{ok} = 12c;
\end{array} \right.$$

$u(t)$ – в системе уравнений является управляющим воздействием управляющим воздействием, значение которого зависит от регулятора в цепи обратной связи.

Реализуем систему уравнений в пакете Xcos среды моделирования Scilab.

4.5 Моделирование системы ГВС с запорно-регулирующей арматурой

Для начала смоделируем систему ГВС с задвижкой управляемой электропривода постоянного тока рис.3.1. Система управления задвижкой состоит из двигателя постоянного тока и цепи положительной связи от ПД-регулятора и представлена на схеме интегрирующим звеном изменяющим коэффициент смещения.

$$\text{Уравнение регулятора: } U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_d \cdot \left(\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right);$$

$$\text{Параметры регулятора: } K_p = 0,1; K_d = 0,3;$$

Теплообменник в модели представлен в виде четырех суперблоков коэффициентов смещения, подбираемых эмпирически. Потребители представлены цепью аperiodических звеньев объединенных в суперблок.

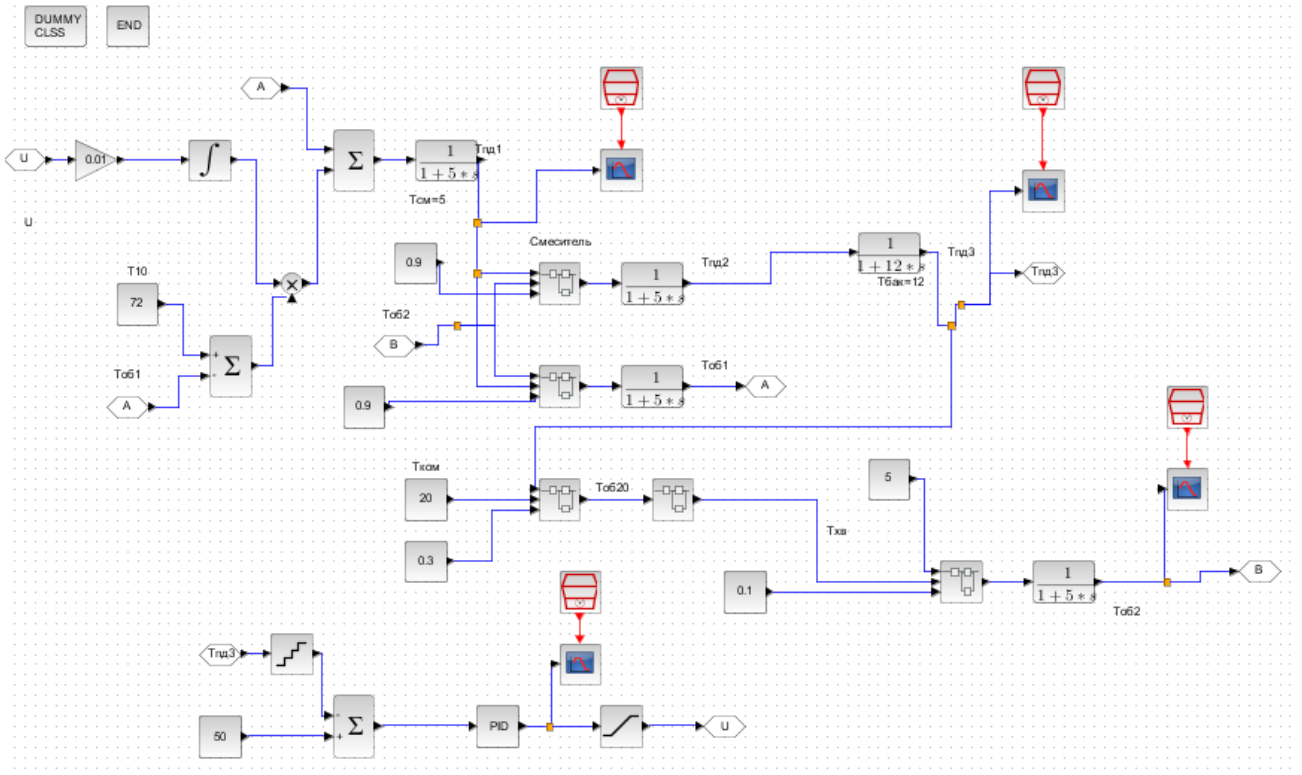


Рисунок 4.9 – Модель системы ГВС с задвижкой в пакете Xcos.

В результате моделирования получаем следующий график переходного процесса рис.4.10.

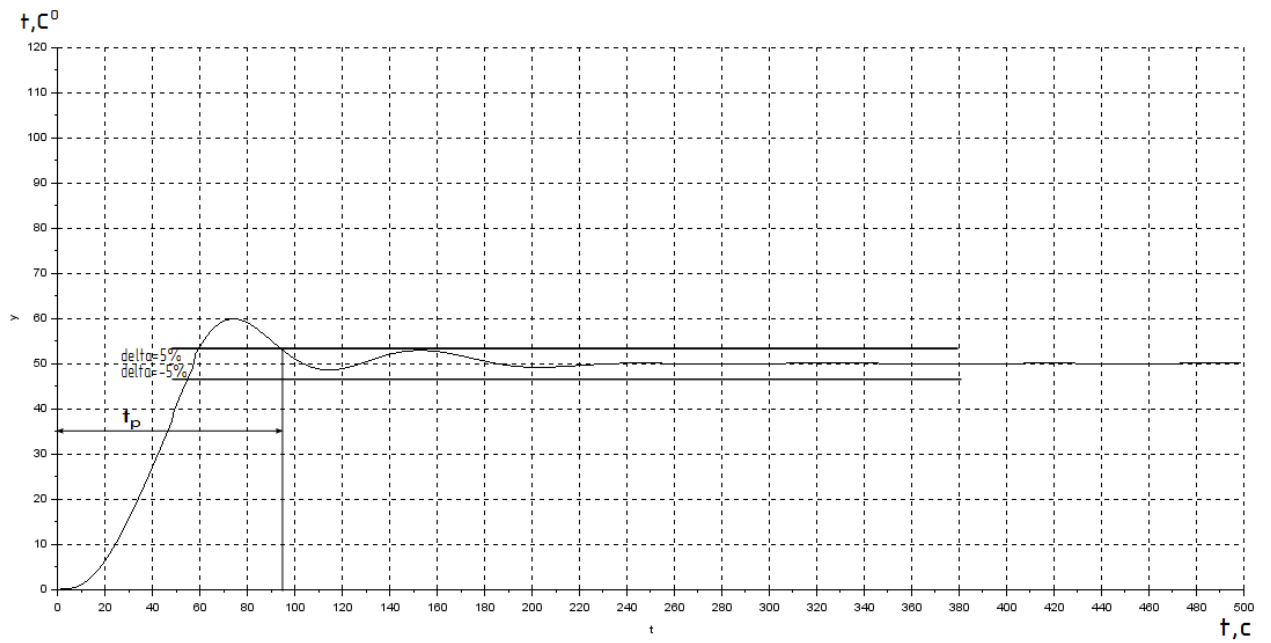


Рисунок 4.10 – Переходный процесс в системе с задвижкой.

Из графика видно, что система имеет большое время переходного процесса $t_p=97\text{с}$ и работает с большим перерегулированием.

$$\sigma_{\max} = \frac{x_{\max} - x_{\infty}}{x_{\infty}} \cdot 100\% = \frac{60 - 50}{50} \cdot 100\% = 20\%$$

Таким образом, система ГВС с задвижкой не является оптимальной и требует усовершенствования.

4.5 Моделирование системы ГВС с асинхронным электроприводом циркуляционного насоса

Модель ГВС с циркуляционным насосом построена по тому же принципу, что и модель с задвижкой, только в данном случае коэффициент смешения представлен иначе.

В модели с насосом логика работы следующая: чем большей скоростью работает двигатель и, следовательно, больший напор создает насос, тем меньшее количество воды поступает из магистрали и большее обратной воды из теплообменника. Поэтому при отключенном насосе смешения нет, вода поступает только из магистрали. При работающем же насосе появившееся смешение обратной воды и воды из магистрали зависит от режима работы асинхронного электропривода насоса, управляющее воздействие на который формируется регулятором исходя из разницы заданного и измеренного технологического параметра – температуры воды у потребителя.

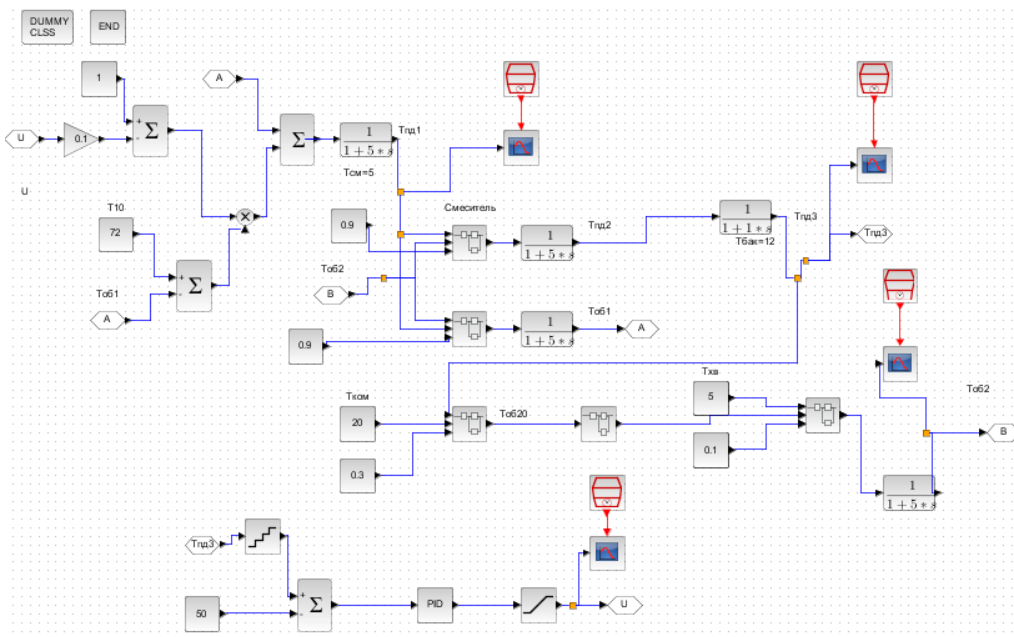


Рисунок 4.11 – Модель системы ГВС с циркуляционным насосом в пакете Xcos.

4.6 Синтез регулятора асинхронного электропривода циркуляционного насоса

Найдем передаточную функцию объекта управления, воспользовавшись методикой подобной методу Зиглера-Никольса описанной в [17], для чего проанализируем график переходного процесса модели при ступенчатом изменении коэффициента смещения с 0,4 до 0,9 рис.4.12.

Как и характерные системы с запаздыванием объект управления имеет S-образную переходную характеристику. Постоянную времени системы T_0 можно рассматривать как сумму постоянных времени трех аperiodических звеньев.

Анализируя график, находим следующие параметры:

$$T_{01} = T_{02} = \frac{\tau}{2} = 1, c; \quad T_{03} = \frac{T_0}{3} = 4,67;$$

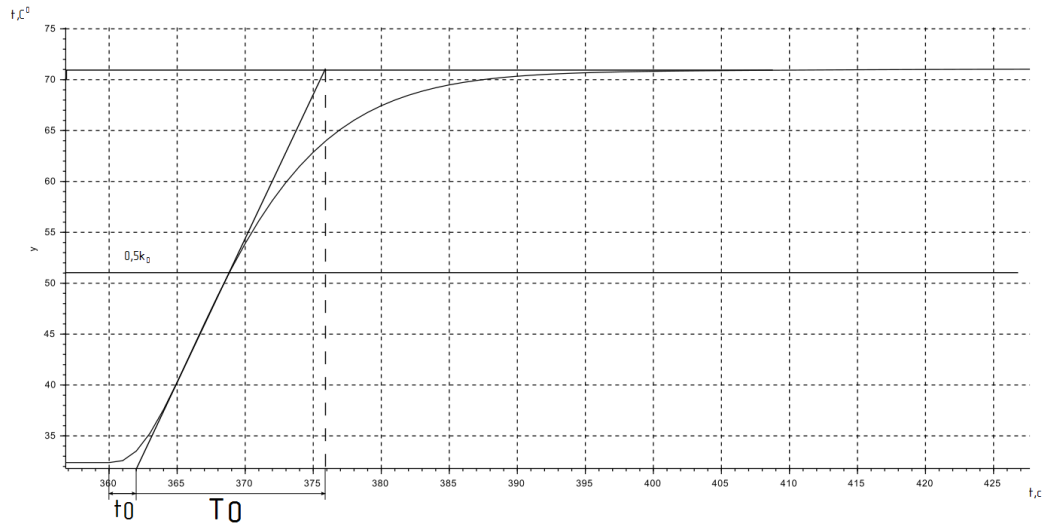


Рисунок 4.12 – График переходного процесса реакции на ступенчатое воздействие.

Из переходного процесса на рисунке 4.12 можно получить параметры линейной математической модели объекта третьего порядка в виде передаточной функции:

$$W_0(s) = \frac{k_0}{(T_{01}s + 1)(T_{02}s + 1)(T_{03}s + 1)}, \text{ где } T_{01} \leq T_{02} < T_{03}$$

Получим следующую систему рис.4.13.

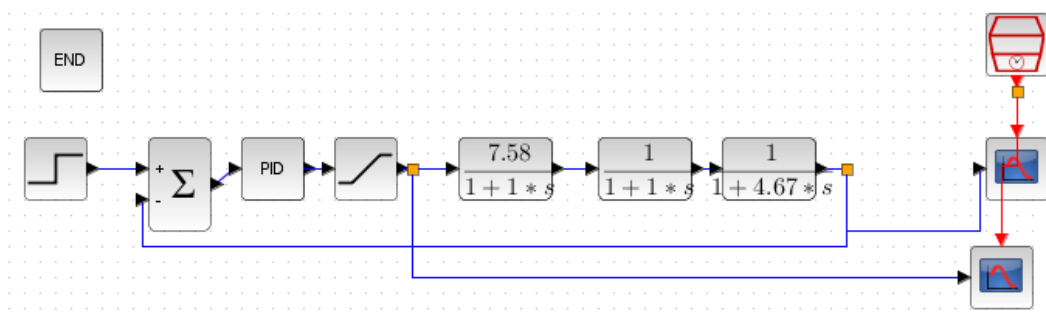


Рисунок 4.13 – Структурное представление системы ГВС.

Определим параметры ПИД-регулятора исходя из данных таблицы 3.

Таблица 3 – Зависимости применения критериев от порядка и соотношения постоянных времени

Передаточная функция объекта $W_o(p)$	Условия применения	Критерий	Параметры регулятора		
			κ_p	T_u	T_d
из формулы (8) $\frac{k_0}{(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)}$ $(T_{01} < T_{02})$	$T_{02} \leq 4T_{01}$	МО	$\frac{T_{02}}{2k_0 T_{01}}$	T_{02}	–
	$T_{02} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{02}}{2k_0 T_{01}}$	$4T_{01}$	–
из формулы (9) $\frac{k_0}{p(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)}$	$T_{02} \ll T_{01}$	СО	$\frac{1}{2k_0 T_{01}}$	$4T_{01}$	–
	$T_{01} < T_{02}$	СО	$\frac{1}{2k_0 T_{01}}$	$4T_{01}$	T_{02}
из формулы (10) $\frac{k_0}{(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)(T_{03}p+1)}$ $(T_{01} < T_{02} < T_{03})$	$T_{03} \leq 4T_{01}$	МО	$\frac{T_{03}}{2k_0 T_{01}}$	T_{03}	T_{02}
	$T_{03} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{03}}{2k_0 T_{01}}$	$4T_{01}$	T_{02}
	$T_{02} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{02} T_{03}}{8k_0 T_{01}^2}$	T_{02}	$4T_{03}$

Для постоянных времени выполняется условие $T_{03} \geq 4T_{01}$, следовательно, систему можно настроить на симметричный оптимум со следующими параметрами ПИД регулятора: $T_i=4T_{01}=4$, $T_d=T_{02}=1$, $K_p = \frac{T_{03}}{2 \cdot k_0 \cdot T_{01}} = \frac{4,67}{2 \cdot 7,58} = 0,308$

Проведем моделирование получившейся системы на рис.4.13.

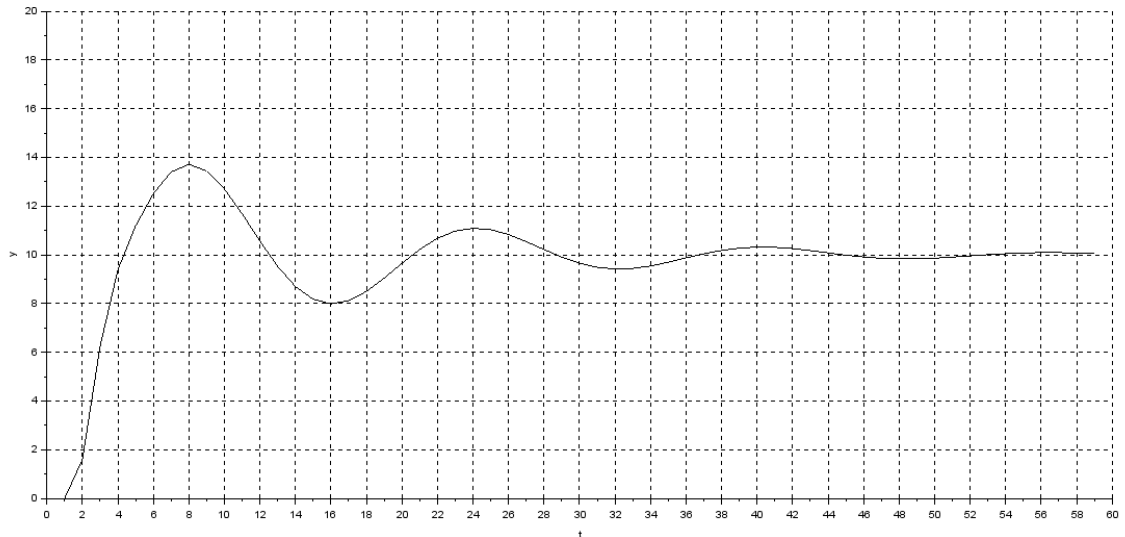


Рисунок 4.14 – Переходный процесс системы настроенной на симметричный оптимум.

Подобный метод настройки удобен так, как имеются эмпирические таблицы коэффициентов регулятора, но симметричный оптимум не является точным аналитически доказанным оптимумом.

Не требуется проводить анализ графика на рис.4.14, чтобы сказать, что система не настроена оптимальным образом, но изменяя параметры регулятора в ручную, исходя из логики этих параметров, ориентируясь на вычисленные выше, удалось получить следующий переходный процесс рис.4.15.

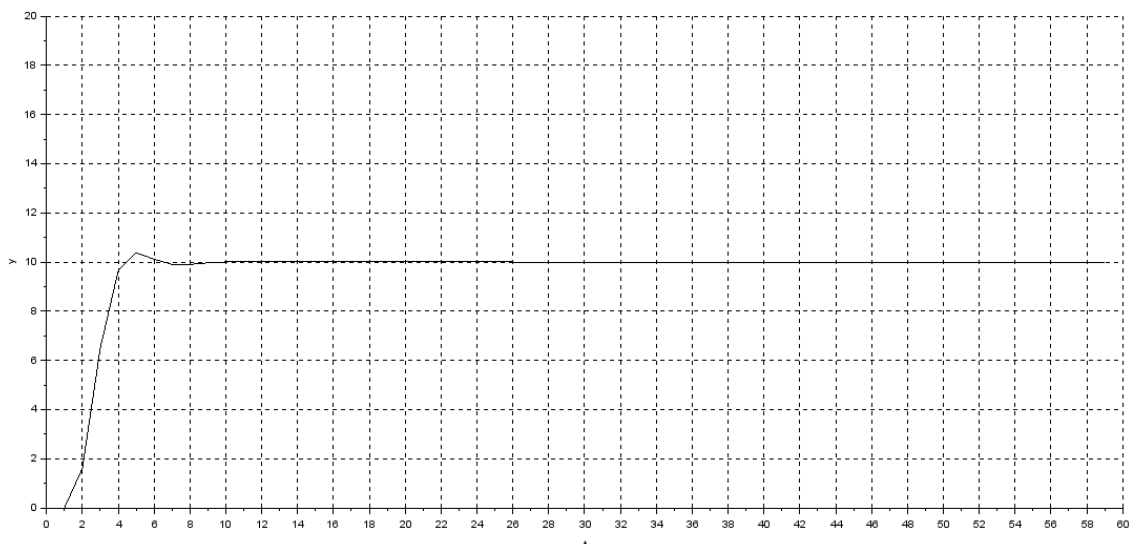


Рисунок 4.15 – Переходный процесс системы настроенной вручную.

4.7 Выводы по главе 4

В главе 4 были сформированы и исследованы модели системы ГВС с запорно-регулирующей арматуры и циркуляционным насосом. Проведен синтез регулятора для контура регулирования температуры. Исследования показали преимущества по быстродействию предложенной системы с использованием циркуляционного насоса.

5. Техническая реализация автоматизированной системы управления асинхронным электроприводом циркуляционного насоса в CoDeSys.

5.1 Моделирование системы ГВС в среде CoDesys.

CoDeSys – это программный комплекс промышленной автоматизации позволяющие создавать проекты автоматизации и визуализацию процессов и операции в системе автоматизации.

Программирование в CoDeSys осуществляется с помощью языков стандарта МЭК – 61131-3, таких как структурированный текст (ST), функциональную блок схему (FBD) и непрерывная функциональная диаграмма (CFC). Языки стандарта МЭК – 61131-3 базируются на следующих принципах:

- Надежность создаваемого программного обеспечения. Надежность обеспечивается использованием специальной среды разработки, содержащей все необходимые средства для написания и отладки программ с помощью эмуляторов и реальных ПЛК, а так же множества готов фрагментов программного кода;
- Возможность простой модификации программы и наращиванию её функциональности;
- Переносимость проекта с одного ПЛК на другой;
- Возможность повторного использования отработанных фрагментов программы;
- Простота языка – блок – схемы заменяют страницы текста в текстовых языках;
- Простота программирования аналоговых и булевых выражений;

Использование языка функциональных блоков можно сравнить с интегральными схемами (ПЛИС), требующих глубоких знаний схемотехники и специальных средств разработки.

Отладка программ в CoDeSys так же проще за счет наглядности и четкой прослеживаемой последовательности операций, передача данных из одной

подпрограммы в другую не требует специальных переменных за счет того, что провода, соединяющие разные блоки, автоматически инкапсулируют и передают данные.

Создание визуализации для проектов автоматизации возможно за счет наличия в CoDeSys интегрированной системы визуализации. Оператору предлагается воспользоваться набором готовых решений или создать, с помощью графических примитивов и стандартизированных элементов, собственную визуализацию.

Для написания проекта автоматизации будет использоваться язык CFC, являющимся языком следующего поколения и развитием языка FBD. В стандартном FBD CoDeSys выполняет максимум автоматизации: автоматическое размещение, автотрассировка и четкий порядок выполнения диаграмм. Диаграмма разбита на множество цепей неочевидно взаимосвязанных. Это напоминает текстовый язык, в котором вместо строк инструкций нарисовали строки с "картинками". В итоге мы имеем удобный при программировании инструмент, но порой не достаточно выразительный. CFC это FBD без ограничений. Здесь можно свободно размещать элементы, использовать обратные связи, произвольно задавать порядок исполнения и рисовать связные схемы. Схемы на CFC напоминают принципиальную схему электронного устройства на микросхемах. Если программист имеет достаточный опыт и четко понимает, что он действительно делает, язык CFC дает ему соответствующую свободу для быстрого и красивого выражения своих замыслов.

Управление системой ГВС можно построить на основе виртуальной модели. В качестве виртуальной модели воспользуемся моделью реализованной в предыдущем разделе, для чего реализуем её в CoDeSys.

В комплексе CoDeSys нет готовых блоков апериодического звена реализуем его используя формулу:

$$Y_l = Y_l + (X - Y_c) \cdot k; \quad k = \frac{T}{\tau + T}, \quad \text{где}$$

T- время цикла микроконтроллера, τ -постоянная времени инерционного звена. Звено реализованное на языке CFC представлено на рис.4.1.

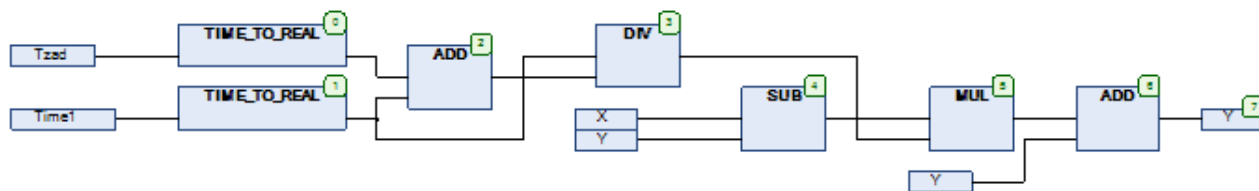


Рисунок 5.1 - Звено реализованное на языке CFC.

Теплообменник достаточно просто реализовать с применением арифметических операторов, как суперблок.

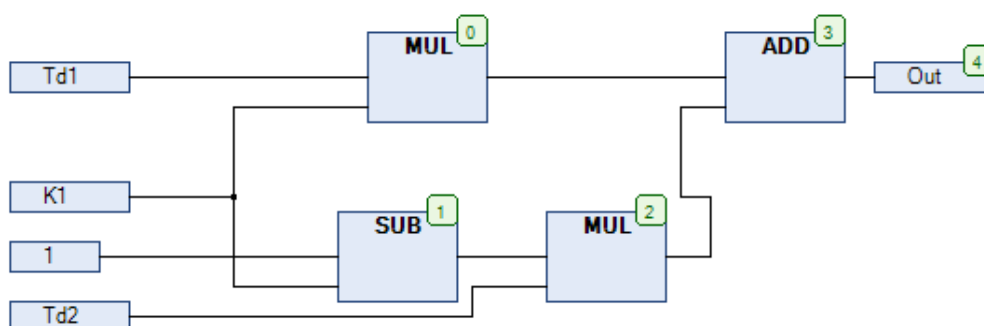


Рисунок 5.2 - Теплообменник, реализованный на языке CFC.

Получившаяся модель системы ГВС, реализованная в CoDeSys представлена на рис.5.3.

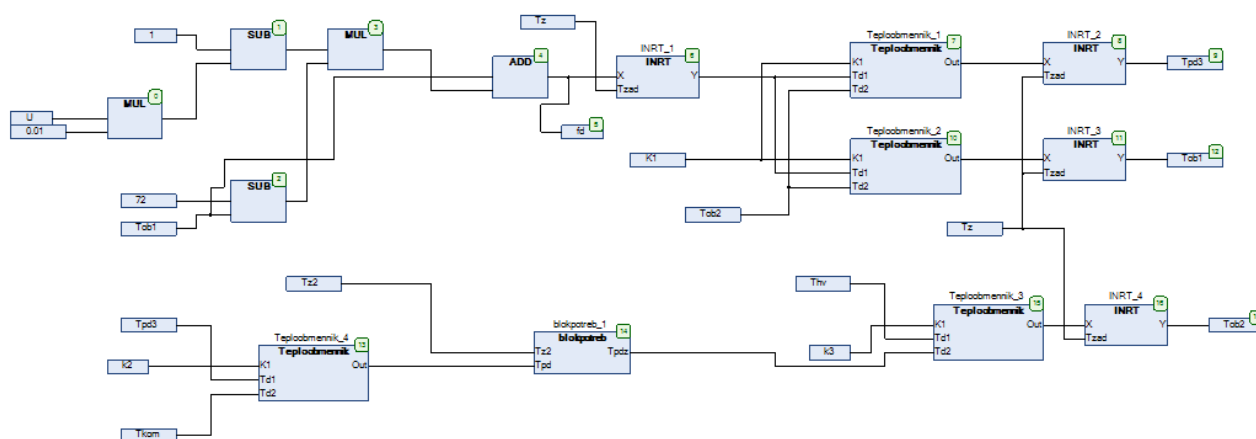


Рисунок 5.3 – Модель системы ГВС, реализованный на языке CFC.

Регулятор так же реализуем на языке CFC, используя формулу:

$$Y_i = \frac{1}{K_p} \left(E_i + T_d \cdot \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{uzm}} + \frac{1}{T_i} \cdot \sum_{i=0}^n E_i \cdot \Delta t_{uzm} \right) \cdot 100\% ,$$

где K_p – коэффициент пропорциональной составляющей, E_i – рассогласование, T_d – время дифференцирования, T_i – время интегрирования.

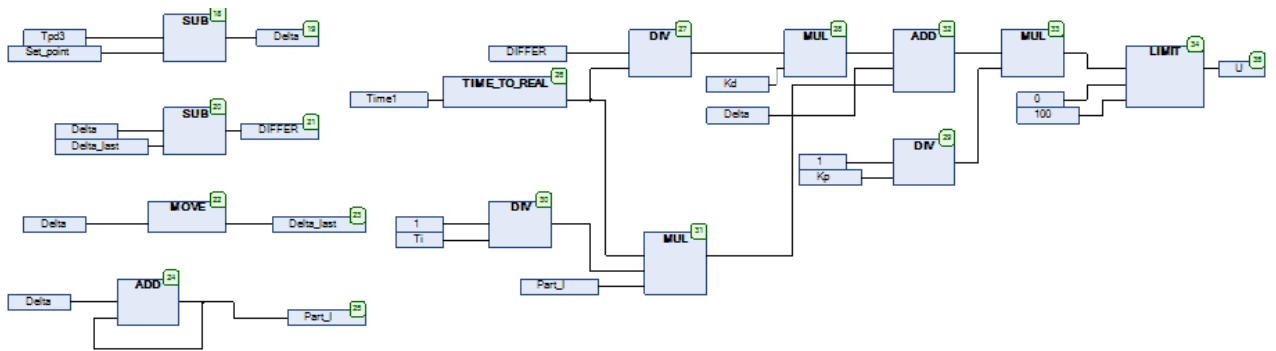


Рисунок 5.3 – ПИД – регулятор, реализованный на языке CFC.

5.2 Проект автоматизации, загружаемый в контроллер.

Модель, приведенная выше, замкнутая и работает сама на себя, если отключить все константы и на их место поставить переменные, в которые записываются данные с датчиков температуры, получится автоматизированная система управления. В качестве регулятора используем дискретный регулятор, заменив в уравнении дифференциальную составляющую конечной разностью, а интегрирующую конечной суммой. Преобразованный таким образом регулятор представлен в Приложении Б.

Блок начала работы, представленный на рис.5.4 выполняет функцию запуска и генератора импульсов.

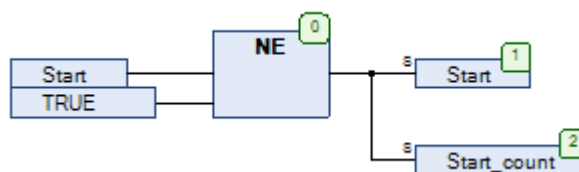


Рисунок 5.4 – Блок начала работы, реализованный на языке CFC.

С помощью блоков триггера заднего и переднего фронта создан счетчик импульсов, а блок присвоения реализуется запись и перезапись предыдущего значения.

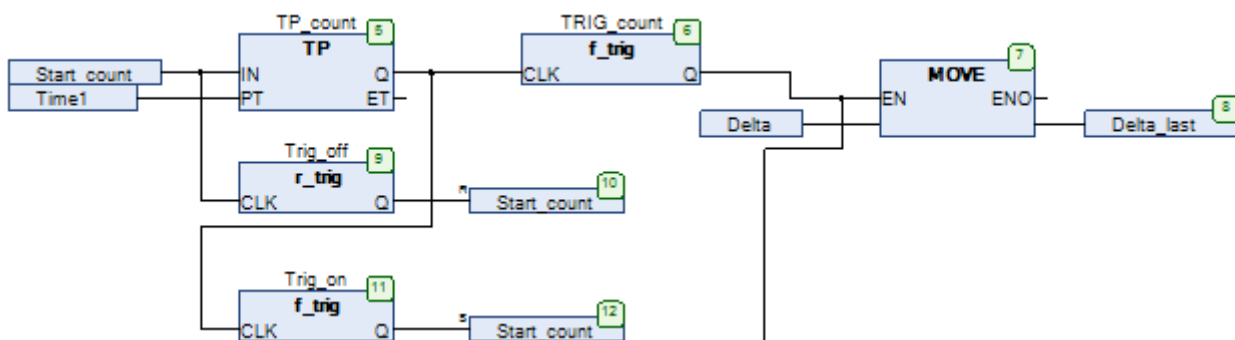


Рисунок 5.5 – Счетчик и блок присвоения.

Цепь блоков, представленная на рис.5.6 служит для предотвращения насыщения интегрирующей составляющей, не давая ей неограниченно, накапливаться и предоставляет возможность её отключения.

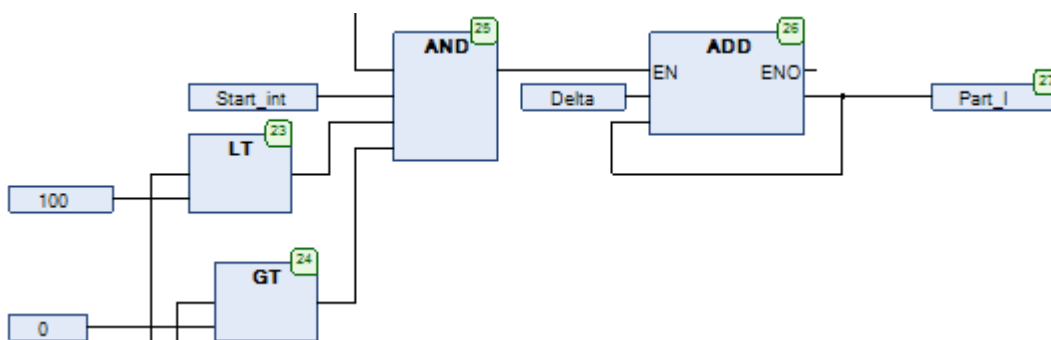


Рисунок 5.6 – Цепь управления интегрирующей составляющей.

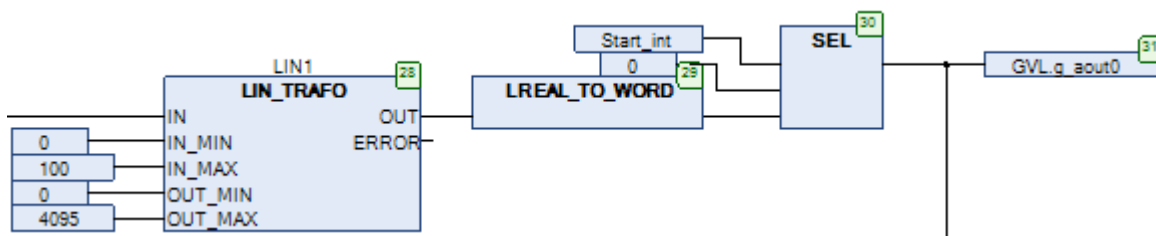


Рисунок 5.7 – Цепь управления интегрирующей составляющей.

В качестве аналогового выхода используется выход с ШИМ поэтому сигнал управления пропорционально преобразуется с 0..100 до 0..4095 типа WORD.

5.3. Аппаратная реализация программируемого логического контроллера на основе платы Raspberry Pi.

Отладка программной части проекта автоматизации требует наличия ПЛК, так как использование только режима эмуляция не позволяет создать полностью рабочую программную часть.

На данный момент на рынке представлено более пятисот наименований ПЛК, цены на которые отличаются в достаточно широком диапазоне. Стоимость самых недорогих из них, например, фирмы ОВЕН начинается от пятнадцати тысяч рублей. Между тем, существует ряд разрозненных аппаратных решений, которые в совокупности представляют собой ПЛК не уступающий в функциональности дорогим контроллерам. Интерес представляет одноплатный компьютер Raspberry Pi [18], на котором возможно реализовать ПЛК и инструментальный программный комплекс промышленной автоматизации CoDeSys [19]. С помощью данного комплекса можно быстро формировать мнемосхемы и визуализировать процессы автоматизации, что поможет в освоении SCADA систем.

При создании проекта CoDeSys совместимого и полнофункционального ПЛК на плате Raspberry Pi возникает ряд препятствий. Совместимость операционной системы (ОС) Raspberry Pi и комплекса CoDeSys обеспечивается пакетом управления [20]. Плата Raspberry Pi имеет разъемы интерфейсов SPI и I2C, которые можно использовать для создания аналоговых выходов. При этом аналоговые входы находятся на отдельной плате, обеспечивающей совместимость и защиту. Задача аналого-цифрового преобразования решается с помощью интегральной схемы MCP3008 [21] подключенной к плате через интерфейс SPI.

Организация дискретных входов и выходов так же осуществлена с созданием отдельных плат. Для дискретных выходов была выбрана и реализована схема с открытым коллектором с добавлением световой индикации (Рис.5.10 а).

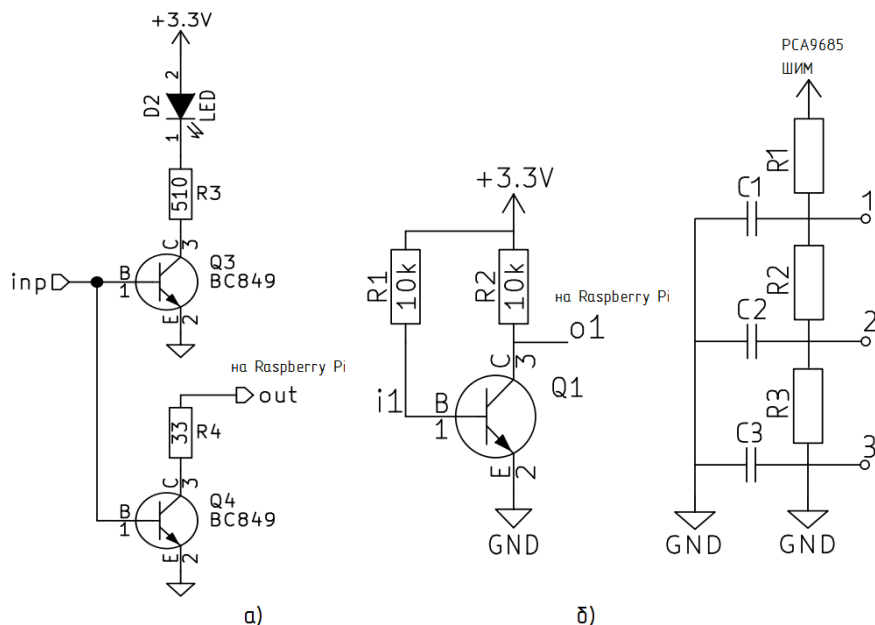


Рисунок 5.10 - Принципиальные схемы: а) открытый коллектор; б) ключ; в) RC-цепь.

Дискретные входы требуют защиты от статического напряжения и выполняются с применением ключа (рис.5,10 б).

Рассмотрим работу контроллера на примере управления внешней RC-цепью (рис.5.10 в). Сигнал с ШИМ поступает на RC – цепь, с выходов которой можно получить процессы с разными постоянными времени. Таким образом, имитируются самые распространенные объекты динамического управления - инерционные элементы от первого до третьего порядка.

После RC – цепи с помощью аналого-цифрового преобразователя MCP3008 сигнал поступает на SPI интерфейс платы Raspberry PI. В среде CoDeSys создается ПИД-регулятор и мнемосхема алгоритма, позволяющая наблюдать переходный процесс и работу элементов системы.

Выводы по главе 5

В главе пять был рассмотрены методы создания проекта автоматизации в среде CoDeSys, для отладки проекта был собран ПЛК контроллер на базе платы Raspberry Pi. Проект автоматизации реализован с использованием контроллера и RC – цепи.

ГЛАВА 6. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.

Выбор темы обусловлен необходимостью модернизации системы горячего водоснабжения и повышению качества услуг снабжения горячей водой для потребителя. Существуют проблемы недостаточного быстродействия в системах ГВС многоквартирных домов, в связи с тем, что устаревшие устройства регулирования не успевают перестроиться при пиках потребления.

Применение в системе ГВС современных автоматизированных систем управления технологическими процессами АСУТП, реализуемых на программируемы логических контроллерах, позволяют значительно упростить настройку системы, повысив качество эксплуатации.

6.1 Планирование научно-исследовательских работ.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- распределение работ участников по видам работ.
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Структура составляется в рамках проведения научного исследования

Таблица 6.Перечень работ и оценка времени на их выполнение.

№	Наименование работ	Количество исполнителей	Продолжительность дней
1.	Выдача и получение задания	Инженер 10р Научный руководитель 16р	1
2.	Выбор элементной базы	Инженер 10р Научный руководитель 16р	1
3.	Реализация устройства	Инженер 10р	15
4.	Установка программного обеспечения и наладка устройства	Инженер 10р	15
5.	Разработка математической модели	Инженер 10р Научный руководитель 16р	2
6.	Разработка имитационной модели	Инженер 10р	11
7.	Исследование модели	Инженер 10р Научный руководитель 16р	1
8.	Создание проекта автоматизации	Инженер 10р	11
9.	Отладка проекта автоматизации	Инженер 10р Научный руководитель 16р	2
10.	Создание графического интерфейса	Инженер 10р	11

Всего 71 дн., НР 7дн. НР участвует в проекте 9.8%.

Таблица 7 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Продолжительность выполнения работ														
			март		апрель			май			июнь			июль			
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Выдача и получение задания	Научный руководитель и инженер	■														
2	Выбор элементной базы	Научный руководитель и инженер	■														
3	Реализация устройства	Инженер		■	■												
4	Установка программного обеспечения и наладка устройства	Инженер			■	■	■										
5	Разработка математической модели	Научный руководитель и инженер					■	■									
6	Разработка имитационной модели	Инженер					■	■	■								
7	Исследование модели	Научный руководитель и инженер							■	■							
8	Создание проекта автоматизации	Инженер							■	■							
9	Отладка проекта автоматизации	Научный руководитель и инженер									■	■					
10	Создание графического интерфейса	Инженер										■	■				

6.2 Смета затрат на проект.

Смета затрат на проект (K_{np}) определяется как:

$$K_{np} = K_{mat} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл},$$

где K_{mat} - материальные затраты;

$K_{ам}$ – амортизация;

$K_{з/пл}$ – затраты на заработную плату;

$K_{с.о.}$ – затраты на социальные нужды;

$K_{пр}$ – прочие затраты;

$K_{накл}$ – накладные затраты.

6.2.1 Материальные затраты.

Материальные затраты (K_{mat}) – принимаем в размере 1000 рублей на канцелярские товары.

6.2.2 Амортизация.

Амортизация ($K_{ам}$) – амортизация, это процесс переноса стоимости основных средств на стоимость произведенной и проданной конечной продукции по мере их износа, как материального, так и морального.

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}, \quad (31)$$

где $T_{исп.кт}$ – время использования компьютерной техники (71 дней)

$T_{кал}$ – календарное время (365 дней)

$Ц_{кт}$ – цена компьютерной техники (28000 руб)

$T_{сл}$ – срок службы компьютерной техники (5 лет)

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}} = \frac{71}{365} \cdot 28000 \cdot \frac{1}{5} = 1074 \text{ руб}$$

6.2.3 Затраты на заработную плату.

Вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные и стимулирующие выплаты, затраты на заработную плату (для инженера и НР) рассчитываем по формуле:

$$K_{з / пл} = ФЗП = ЗПф_{инж} + ЗПф_{нр} \quad (32)$$

где $ФЗП$ – фонд заработной платы;

$ЗПф$ – фактическая заработная плата.

Фактическая заработная плата рассчитывается для научного руководителя и инженера, по формуле:

$$ЗПф = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n, \quad (33)$$

где 21 – число рабочих дней в месяц

n – фактическое число дней в проекте.

Определяем месячную заработную плату по следующей формуле:

$$ЗП_{мес} = ЗПо \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2, \quad (34)$$

где κ_1 – коэффициент, учитывающий отпуск (1,1=10%)

κ_2 – районный коэффициент (1,3=30%)

$ЗПо$ – месячный отклад (для ИР = 30 т.р., для Инженера = 17 т.р.);

Для инженера:

$$ЗП_{мес} = ЗПо \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.},$$

$$ЗПф = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n = \frac{24310}{21} \cdot 71 = 81030 \text{ руб.}$$

Для научного руководителя:

$$ЗП_{мес} = ЗПо \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 30000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 42900 \text{ руб.},$$

$$ЗПо = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n = \frac{42900}{21} \cdot 7 = 14354 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату для инженера и научного руководителя составляют:

$$Кз / пл = ФЗП = ЗПф_{инж} + ЗПф_{нр} = 81030 + 14300 = 95330 \text{ руб.}$$

6.2.4 Затраты на социальные нужды.

Затраты на социальные нужды $Кс.о.$ – затраты организации по обязательным и добровольным взносам в органы государственного страхования, пенсионного фонда, фонда медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, занятых в производстве продукции, работ, услуг в непромышленной сфере в соответствии с порядком, установленным законодательством. Затраты на социальные нужды (отчисления) берем 30% от $Кз/пл$.

$$Кс.о. = \frac{Кз / пл \cdot 30\%}{100\%} = \frac{95330 \cdot 30}{100} = 31776 \text{ руб.}$$

6.2.5 Прочие затраты

Прочие затраты $K_{пр}$, принимаются в размере 10% от ($K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о}$)

$$K_{пр} = \frac{(K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о}) \cdot 10\%}{100\%} = \frac{(1000 + 1074 + 95330 + 31776) \cdot 10}{100} = 12918 \text{ руб.}$$

6.2.6 Накладные затраты.

Накладные затраты $K_{накл}$ – затраты, не связанные прямо с производством отдельного изделия или вида работы и относимые на весь выпуск продукции. К ним относятся: расходы на содержание, эксплуатацию и текущий ремонт зданий, сооружений и оборудования; отчисления на социальное страхование и другие обязательные платежи; содержание и заработную плату административно-управленческого персонала; расходы, связанные с потерями от брака и простоев и др. Накладные расходы, принимаются в размере 200% от $K_{з/пл}$.

$$K_{накл} = \frac{K_{з/пл} \cdot 200\%}{100\%} = \frac{95330 \cdot 200}{100} = 190660 \text{ руб.}$$

Смета затрат на проект ($K_{пр}$):

$$K_{пр} = K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл} = \\ = 1000 + 1074 + 95339 + 31776 + 12918 + 190660 = 331858 \text{ руб}$$

Полная смета затрат на проект приведена в таблице 8.

Таблица 8. Смета затрат на проект.

№	Условное обозначение	Описание	Стоимость, р.
1	$K_{\text{мат}}$	Затраты на канцелярские принадлежности	1000
2	$K_{\text{ам}}$	Амортизация компьютерной техники	1074
3	$K_{\text{з/п}}$	Затраты на заработную плату	95330
4	$K_{\text{соц.н}}$	Затраты на социальные нужды принимаются 30% от $K_{\text{з/п}}$	31776
5	$K_{\text{пр}}$	Затраты на прочие нужды	12918
6	$K_{\text{накл}}$	Накладные расходы принимаются 200% от $K_{\text{з/п}}$	190660
Итого:			331858

6.3 Смета затрат на оборудование и монтажные работы

Расчет затрат на оборудование для научных (экспериментальных) работ включает все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации. Расчеты необходимо проводить в трех исполнениях для сравнительного анализа экономической эффективности проекта в различных исполнениях. В каждом исполнении подобрано различное оборудование для нахождения наиболее экономически эффективного исполнения. Результаты приведены в таблице 9.

Таблица 9 - Смета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования			Общая стоимость оборудования, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	Raspberry Pi	Stmf4	Banana Pi	3400	2460	2090
2.	PCA9686	PCA9686	PCA9686	260	260	260
3.	MCP3008	MCP3008	MCP3008	290	290	290
4.	Прочие			500	500	500
Итого:				4450	3510	3140

Чтобы посчитать монтажные работы ($M_{раб}$), берем 20% от стоимости оборудования.

$$M_{раб_1} = \frac{C_o \cdot 20\%}{100\%} = \frac{4450 \cdot 20}{100} = 890 \text{ руб.},$$

$$M_{раб_2} = \frac{C_o \cdot 20\%}{100\%} = \frac{3510 \cdot 20}{100} = 702 \text{ руб.},$$

$$M_{раб_3} = \frac{C_o \cdot 20\%}{100\%} = \frac{3140 \cdot 20}{100} = 328 \text{ руб.},$$

где C_o – общая стоимость оборудования.

6.4 Экономическая эффективность проекта

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (34)$$

где $I_{финр}^{исп.i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Расчёт интегрального финансового показателя приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Интегральный финансовый показатель

Исполнение №	$I_{финр}^{исп.i}$
1	1
2	0,79
3	0,71

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта приведена в таблице 11.

Таблица 11 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Повышение производительности труда пользователя	0,05	5	4	5
Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	5	5	5
Надежность	0,05	4	5	5
Безопасность	0,1	3	5	4
Простота эксплуатации	0,1	5	3	3
Конкурентоспособность продукта	0,1	4	5	5
Уровень проникновения на рынок	0,2	5	5	3
Финансирование научной разработки	0,1	5	3	3
Наличие сертификации разработки	0,2	5	5	5
ИТОГО	1	41	40	38

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы 12

Таблица 12 – показатели ресурсоэффективности

Исполнение №	I_{pi}
1	4,65
2	4,55
3	3,35

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}}, I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр}}, I_{исп.3} = \frac{I_{p-исп3}}{I_{финр}}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных.

Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp1} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.(2,3)}}; \mathcal{E}_{cp2} = \frac{I_{исп.2}}{I_{исп.(1,3)}}; \mathcal{E}_{cp3} = \frac{I_{исп.3}}{I_{исп.(1,2)}}$$

В таблице 13 приведена сравнительная эффективность разработки

Таблица 13 -Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп. 1		Исп.2		Исп.3	
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1		0,79		0,71	
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65		4,55		3,35	
3	Интегральный показатель эффективности	4,65		5,76		4,71	
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	По отношению к исп.2	По отношению к исп.3	По отношению к исп. 1	По отношению к исп.3	По отношению к исп. 1	По отношению к исп.2
		0,8	0,987	1,24	1,22	1,01	0,817

Заключение:

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Наиболее эффективным оказался вариант 1 т.к. у него самый наименьший интегральный показатель.

7. Социальная ответственность

Введение

Темой ВКР является: «Исследование алгоритмов управления электроприводом циркуляционного насоса системы теплоснабжения». Исследование основано на методе математического моделирования и проводится на специализированном программно-техническом комплексе, что предполагает использование персонального компьютера (ПК) на всех этапах выполнения работы.

Работа с программой представляет собой проведение расчётов, экспериментов, а также составление итоговых графиков. Работа выполняется в закрытом помещении (кабинет, аудитория) на персональном компьютере, с помощью которого обрабатывается вся информация.

В работе рассматривается помещение инженерного отдела организации НПО ВЭСТ. В данном помещении расположены 5 персональных компьютеров, которые имеют ЖК мониторы. Габариты помещения следующие: 15x12x4м.

Выполняя работу в помещении инженерного отдела, на студента воздействуют следующие опасные факторы: повышенный уровень статического электричества, повышенный уровень шума на рабочем месте, воздействие электромагнитных полей и излучений, также влияние оказывают условия окружающей среды.

Исследование такого рода непосредственно связано с компьютером, а соответственно с дополнительными вредными воздействиями целой группы факторов. Работа характеризуется значительным умственным напряжением и нервно-эмоциональной нагрузкой исполнителя, высокой напряжённостью зрительной работы, высокой концентрацией внимания и особой ответственностью за выполняемое задание. Большое значение имеет рациональная конструкция и расположение элементов рабочего места, что важно для поддержания оптимальной рабочей позы человека – оператора.

7.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов

Компьютерные технологии, являясь прогрессивным достижением человечества, имеют отрицательные последствия для здоровья людей. Основная задача – снизить вред здоровью человека от использования им персонального компьютера в работе.

Условия труда пользователя, работающего с ПК, определяются особенностями организации рабочего места, условиями производственной среды (освещение, микроклимат, шум, электромагнитные и электростатические поля, визуально эргономические параметры дисплея), а также характеристиками информационного взаимодействия человека и ПК.

Системный блок генерирует излучение вследствие того, что внутренняя аппаратная логика работает на высоких частотах (гигагерцы) и практически не экранирована. Поражение электрическим током возможно в случае нарушения заземления компьютера, повреждения соединительных проводов, защитных корпусов.

Работа на ПК сопровождается постоянным и значительным напряжением функций зрительного анализатора. При работе на ПК оператор считывает текст, почти не наклоняя голову, глаза смотрят прямо или почти прямо вперед, текст (источник — люминесцирующее вещество экрана) формируется по другую сторону экрана, поэтому пользователь не считывает отраженный текст, а смотрит непосредственно на источник света, что вынуждает глаза и орган зрения в целом работать в несвойственном ему стрессовом режиме длительное время. Характерной особенностью труда за компьютером является необходимость выполнения точных зрительных работ на светящемся экране в условиях перепада яркостей в поле зрения, наличии мельканий, неустойчивости и нечёткости изображения. Приходится часто переводить взгляд в направлениях экран – клавиатура – документация. Частая адаптация глаза к различным яркостям и расстояниям является одним из главных негативных факторов при работе с дисплеями.

7.2. Производственная санитария

Микроклимат

Параметры микроклимата являются оптимальными, если они при систематическом и длительном воздействии на человека гарантируют сохранение адекватного функционирования и теплового состояния организма, создают условия теплового оптимума и являются основой для высокого уровня работоспособности. Допустимые и оптимальные значения параметров микроклимата устанавливаются в соответствии с [23, 24], исходя из категории тяжести выполняемой работы, величины избытков явного тепла и периода года.

На условия работы в помещении влияют такие параметры как температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Нормы параметров микроклимата для помещения без избытка выделения тепла для работ второй категории тяжести приведены в таблице 15:

Таблица 15 – Характеристика помещения

Наименование параметров и единицы измерения	В холодное время	В теплон время
Температура, °С	20 - 22	22 - 25
Относительная влажность, %	30 - 60	30 - 60
Скорость движения воздуха, м/с	Не более 0,2	Не более 0,5
Интенсивность теплового облучения, Вт/м ²	Не более 100	Не более 100

В нашем помещении температура: зимой $t=20-22$ °С - обеспечивается регулируемыми обогревателями и центральным отоплением; летом $t=22-25$ °С – обеспечивается естественной и искусственной системой кондиционирования

(регулируемые оконные рамы, кондиционеры). Влажность (55%), скорость движения воздуха (0.2 м/с) и интенсивность теплового облучения соответствуют нормам.

Освещенность

Немаловажную роль имеет освещенность рабочего места. От степени освещенности напрямую зависит не только здоровье глаз и работоспособность человека, но еще и его физическое и психоэмоциональное состояние.

Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормативных условий работы в помещениях и проводится в соответствии с [25]. Норма освещенности для лаборатории в высшем учебном заведении составляет 400 Лк. Естественное освещение обеспечивается светом солнца; искусственное освещение обеспечивается люминесцентными лампами. В помещении инженерного отдела освещенность в пределах нормы [26].

Расчет системы общего искусственного люминесцентного освещения помещения

В помещении выполняются работа, требующая освещенности 250 лк. Высота рабочей поверхности h_p . Коэффициент отражения стен ρ_c , потолка – ρ_n . Коэффициент запаса K , коэффициент равномерности освещения - Z .

Таблица 16 - Исходные данные

A (м)	B (м)	H (м)	h_p (м)	ρ_c (%)	ρ_n (%)	K	Z
10	8	4	0,9	50	50	1,3	1

В данном расчетном задании для всех помещений рассчитывается общее равномерное освещение. Для общего освещения применяются люминесцентные лампы.

Выбор светильников и их размещение

Учитывая малую запылённость помещения и наименьшую высоту подвеса над полом, выбираем двухламповые светильники типа ШОД-2-40 (длина 1228 мм, ширина 284 мм), предназначенные для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен.

Размещение светильников в помещении определяется следующими размерами:

- Высота помещения: $H = 4 \text{ м}$;
- Расстояние светильников от перекрытия: $h_c = 0,1 \text{ м}$;
- Высота светильника над полом: $h_n = H - h_c = 4 - 0,1 = 3,9 \text{ м}$;
- Высота рабочей поверхности над полом: $h_p = 0,9 \text{ м}$;
- Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_p = 3,9 - 0,9 = 3 \text{ м}.$$

Для того, чтобы создать благоприятные условия на рабочем месте, а также для борьбы со слепящим действием источников света введены требования ограничения наименьшей высоты светильников над полом. Для двухламповых светильников типа ШОД это расстояние составляет 2,5 м. Расчетная высота для нашего помещения укладывается в это ограничение.

Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным $L/3$, где L – расстояние между соседними светильниками или рядами.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина $\lambda = L/h$, уменьшение которой удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. Значение величины λ определяем согласно методическим указаниям.

Расстояние между светильниками L определяется как:

$$L = \lambda \cdot h;$$

$$\lambda = 1,2;$$

$$L = 1,2 \cdot 3 = 3,6 \text{ м};$$

$$l = \frac{L}{3} = \frac{3,6}{3} = 1,2 \text{ м};$$

Размещаем 5 светильников в 1 ряд (рис. 1). Расстояние между светильниками равно 0,4 м. Учитывая, что каждый светильник имеет две лампы, общее число ламп в помещении равно $n = 20$.

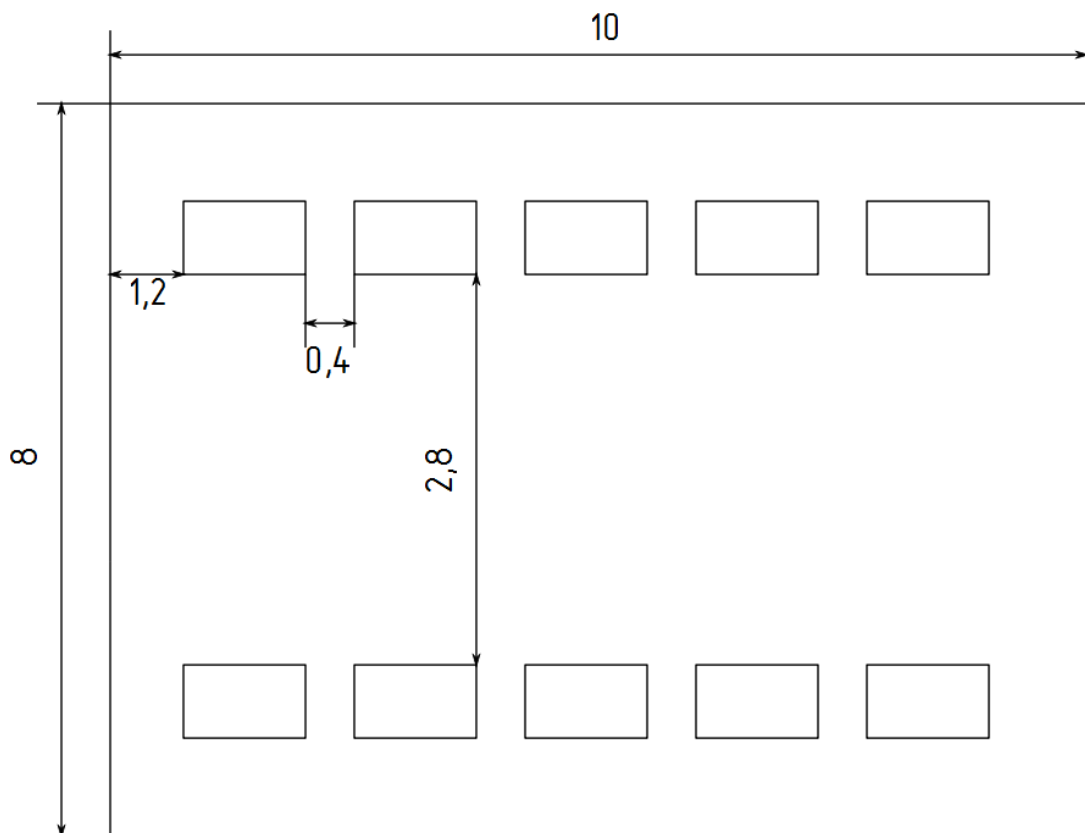


Рисунок 7.1 - План помещения и размещения светильников ШОД-2-40 с люминесцентными лампами.

Выбор нормируемой освещенности

Основные требования и значения нормируемой освещенности рабочих поверхностей изложены в [27]. Освещенность при системе общего освещения является заданной и равна 250 лк.

Расчет общего равномерного освещения

Расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отраженный от потолка и стен. Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка ρ_n .

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{10 \cdot 8}{3 \cdot (10 + 8)} = 1,48;$$

Определяем коэффициент использования светового потока, принимая, что стены свежей побелки с окнами, закрытыми шторами $\rho_c = 50\%$ и потолок помещения – чистый бетонный $\rho_n = 50\%$, $\eta = 48\%$.

Световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{n \cdot \eta};$$

где $E = 250$ лк;

S – площадь освещаемого помещения, м²;

$K_z = 1,3$ – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника;

$Z = 1$ – коэффициент неравномерности освещения для люминесцентных ламп;

n – число светильников;

η – коэффициент использования светового потока.

$$\Phi = \frac{250 \cdot 80 \cdot 1,3 \cdot 1}{10 \cdot 0,48} = 5416 \text{ лм};$$

Выбираем стандартную лампу – 2 х ЛД 40 Вт с потоком 2600 лм.

Выполняем проверку условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\% ;$$

$$-10\% \leq \frac{5416 - 2 \cdot 2600}{5416} \cdot 100\% \leq +20\%$$

Получаем: $-10\% \leq -3,98\% \leq +20\%$

Значение светового потока каждого светильника достаточно для обеспечения минимальной освещённости помещения. В установке дополнительных источников освещения нет необходимости.

Производственный шум

Шум является одним из наиболее распространенных в производстве факторов. Он создается работающим оборудованием, преобразователями напряжения, работающими осветительными приборами дневного света, а также проникает извне. Шум является одним из часто встречающихся факторов внешней среды, которые пагубно воздействуют на организм человека. Действие шума разнообразно: от затруднения разборчивости речи, провоцирования снижения работоспособности, повышения утомляемости, до вызова необратимых изменений в органах слуха человека. Кроме органов слуха, шум оказывает свое воздействие на весь организм человека. Люди, работающие при постоянных шумовых эффектах, жалуются на головную боль, быструю утомляемость, бессонницу и сонливость, ослабляется внимание, ухудшается память.

Нормативным документом, регламентирующим уровни шума для различных рабочих мест, является [28, 29].

Шум на рабочих местах создается внутренними источниками – вентиляторы в охлаждения ЭВМ, и внешними источниками – периферийное оборудование, шум с улицы.

Нормы для проведения исследовательской работы с использованием ЭВМ – 50 дБ.

7.3 Техника безопасности

Любой компьютер является электроприбором и представляет собой потенциальную угрозу. Поэтому при работе с компьютером необходимо соблюдать требования безопасности.

Перед началом работы следует убедиться в исправности электропроводки, выключателей, штепсельных розеток, при помощи которых оборудование включается в сеть, наличии заземления компьютера и его работоспособности.

Во время работы во избежание повреждения изоляции проводов и возникновения коротких замыканий не разрешается: вешать что-либо на провода, закрашивать и белить шнуры и провода, закладывать провода и шнуры за газовые и водопроводные трубы, за батареи отопительной системы, выдергивать штепсельную вилку из розетки за шнур, усилие должно быть приложено к корпусу вилки.

Для исключения поражения электрическим током запрещается: часто включать и выключать компьютер без необходимости, прикасаться к экрану и к тыльной стороне блоков компьютера, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании мокрыми руками, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании, имеющих нарушения целостности корпуса, нарушения изоляции проводов, неисправную индикацию включения питания, с признаками электрического напряжения на корпусе, класть на средства вычислительной техники и периферийное оборудование посторонние предметы.

Запрещается под напряжением очищать от пыли и загрязнения электрооборудование.

Запрещается проверять работоспособность электрооборудования в непригодных для эксплуатации помещениях с токопроводящими полами, сырых, не позволяющих заземлить доступные металлические части.

Недопустимо под напряжением проводить ремонт средств вычислительной техники и периферийного оборудования. Ремонт электроаппаратуры производится только специалистами-техниками с соблюдением необходимых технических требований.

При обнаружении неисправности немедленно обесточить электрооборудование. Продолжение работы возможно только после устранения неисправности.

При обнаружении оборвавшегося провода необходимо немедленно принять меры по исключению контакта с ним людей. Прикосновение к проводу опасно для жизни. Во всех случаях поражения человека электрическим током немедленно вызывают врача. До прибытия врача нужно, не теряя времени, приступить к оказанию первой помощи пострадавшему.

После окончания работы необходимо обесточить все средства вычислительной техники и периферийное оборудование. В случае непрерывного производственного процесса необходимо оставить включенными только необходимое оборудование.

Длительная работа с компьютером может приводить к расстройствам состояния здоровья. Кратковременная работа с компьютером, установленным с грубыми нарушениям гигиенических норм и правил, приводит к повышенному утомлению. Вредное воздействие компьютерной системы на организм человека является комплексным. Параметры монитора оказывают влияние на органы зрения. Оборудование рабочего места влияет на органы опорно-двигательной системы.

Продолжительность работы при вводе данных, редактировании программ; чтении информации с экрана не должна превышать 4 часа при восьмичасовом рабочем дне.

Режим труда и отдыха операторов, работающих с ПК, должен быть следующим: через каждый час интенсивной работы необходимо устраивать десятиминутный перерыв, при менее интенсивной - через каждые два часа.

Электробезопасность

В процессе использования электроприборов и электрооборудования может возникнуть опасность поражения электрическим током. Согласно [30], по опасности поражения током лаборатория относится к помещениям без повышенной опасности. Чтобы исключить опасность поражения необходимо соблюдать следующие правила электробезопасности [31]:

- перед включением прибора в сеть должна быть визуально проверена его электропроводка на отсутствие возможных видимых нарушений изоляции, а также на отсутствие замыкания токопроводящих частей на корпус;

- при появлении признаков замыкания необходимо немедленно отключить от электрической сети устройство и устранить неисправность;

- запрещается при включенном устройстве одновременно прикасаться к приборам, имеющим естественное заземление (например, радиаторы отопления)

- запрещается эксплуатация оборудования в помещениях с повышенной опасностью;

- запрещается включать и выключать устройство при помощи штепсельной вилки. Штепсельную вилку включать и выключать из розетки можно только при выключенном устройстве.

Существуют следующие способы защиты от поражения электрическим током:

- предохранительные устройства (быстродействие);

- защитное заземление (сопротивление);

- применение устройств защитного отключения (УЗО) (быстродействие);

- зануление.

Самый распространенный способ защиты от поражения током при эксплуатации измерительных приборов и устройств - защитное заземление, которое предназначено для превращения "замыкания электричества на корпус" в "замыкание тока на землю" для уменьшения напряжения прикосновения и напряжения шага до безопасных величин (выравнивание потенциала).

7.4 Экологическая безопасность

При использовании персональных компьютеров, требуют решения такие важные вопросы, как переработка отходов (платы, микросхемы с содержанием цветных металлов). При переработке устаревших компьютеров происходит их разборка на шесть составляющих компонентов: металлы, пластмассы, штекеры, провода, батареи, стекло. Для повторной эксплуатации нельзя использовать ни одну из отработанных деталей, так как нет гарантии ее надежности, но в форме вторичного сырья они используются при изготовлении новых компьютеров или каких-либо других устройств. Так же компоненты ПК содержат драгоценные металлы, которые извлекаются при вторичной переработке. Переработку компонентов с целью утилизации драг металлов регламентирует «Методика проведения работ по комплексной утилизации вторичных драгоценных металлов из отработанных средств вычислительной техники».

При эксплуатации ПК расходуются такие ресурсы, как электроэнергия (обеспечение питания компьютера), бумага, используемая для принтера при выводе информации, картриджи. Для того, чтобы добиться наиболее рациональных затрат электроэнергии не следует оставлять включенным персональный компьютер и оргтехнику, когда они не эксплуатируются в настоящее время, печать осуществлять с двух сторон, при этом затраты на бумагу вряд ли удастся сократить хотя бы вдвое, но экономия будет ощутимой. Проблему с утилизацией бумаги может решить вторичная переработка отходов.

7.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией в помещениях общественного назначения, где находится рабочее место оператора, может явиться пожар.

Пожар – это вышедший из-под контроля процесс горения, уничтожающий материальные ценности и создающий угрозу жизни и здоровью людей. Основными причинами пожара являются: неисправности в электрических сетях, нарушение технологического режима и мер пожарной безопасности (курение, разведение открытого огня, применение неисправного оборудования и т.п.). Основными опасными факторами пожара являются тепловое излучение, высокая температура, отравляющее действие дыма (продуктов сгорания: окиси углерода и др.) и снижение видимости при задымлении. Критическими значениями параметров для человека, при длительном воздействии указанных значений опасных факторов пожара, являются: температура – 70° С; плотность теплового излучения – 1,26 кВт/м²; концентрация окиси углерода – 0,1% объема; видимость в зоне задымления – 6-12 м.

В число предупредительных мероприятий могут быть включены мероприятия, направленные на устранение причин, которые могут вызвать пожар, на ограничение (локализацию) распространения пожаров, создание условий для эвакуации людей и имущества при пожаре, своевременное обнаружение пожара и оповещение о нем, тушение пожара, поддержание сил ликвидации пожаров в постоянной готовности. Содержание оборудования, особенно энергетических сетей, в исправном состоянии позволяет, в большинстве случаев, исключить причину возгорания. Своевременное обнаружение пожара может достигаться оснащением производственных и бытовых помещений системами автоматической пожарной сигнализации или, в отдельных случаях, с помощью организационных мер. Первоначальное тушение пожара (до прибытия вызванных сил) успешно проводится на тех объектах, которые оснащены автоматическими установками тушения пожара.

При обнаружении возгорания действовать необходимо быстро, используя все доступные способы для тушения огня. Если потушить огонь в

кратчайшее время невозможно, вызовите пожарную охрану организации (при её наличии) или города.

При эвакуации горящие помещения и задымленные места проходить следует быстро, задержав дыхание, защитив нос и рот влажной плотной тканью. В сильно задымленном помещении передвигаться следует ползком или пригнувшись.

Проведя анализ вредных и опасных производственных факторов на рабочем месте в учебной аудитории № 244 учебного корпуса ТПУ №8, можно сделать вывод о том, что в данном помещении соблюдаются все требования нормативно-правовых документов, что является подтверждением безопасности данного места работы. Явных нарушений производственной и экологической безопасности при рассмотрении вредных и опасных факторов производства на рабочем месте не выявлено, угрозы для жизни и здоровья людей не наблюдается.

Пожарная безопасность

В соответствии с положениями [32] термин пожарная безопасность обозначает такое состояние объекта, при котором с определенной вероятностью исключается вероятность возникновения и развития бесконтрольного пламени и воздействия на людей опасных критериев пожара, и обеспечение сохранности материальных ценностей.

Пожарная безопасность объектов народного хозяйства, в том числе электрических установок, регламентируется [33] «Общие требования», а также строительными нормами и правилами, межотраслевыми Типовыми правилами пожарной безопасности на отдельных объектах.

Здание, в котором находится лаборатория, воздвигнуто из устойчивого к воздействию пожара материала, а именно кирпича, и относится к зданиям второй степени огнестойкости.

Согласно ФЗ РФ №123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22 июля 2008 г., статья 32 о классификации зданий,

сооружений и пожарных отсеков по функциональной пожарной опасности, учебная аудитория относится к классу Ф4.2 – здания образовательных организаций высшего образования, организаций дополнительного профессионального образования. В качестве возможных причин пожаров можно указать следующие:

- короткое замыкание;
- опасна перегрузка сетей, влекущая за собой сильный нагрев токоведущих частей и возгорание изоляции;

- возможность возгорания при пуске оборудования после ремонта.

Для предупреждения пожаров от короткого замыкания, перегрузок, необходимы правильный выбор, монтаж и соблюдение требуемого режима эксплуатации электросетей, дисплеев и других электрических средств автоматизации.

Мероприятия, необходимые для предупреждения пожаров:

- проведение противопожарного инструктажа;
- соблюдение норм, правил при установке оборудования, освещения, направленных на предупреждение возникновения пожара;

- эксплуатация оборудования в соответствии с техническим паспортом;

- рациональное размещение оборудования на рабочем месте;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования;

- запрещение курения в неустановленном месте.

Для тушения пожаров используются воздушно-механическая пена, углекислый газ, а также галогидрированные углеводороды.

На этаже имеются порошковые огнетушители ОП-4 и углекислотные огнетушители ОУ-5.

7.6 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

При приёме на работу, работник должен пройти инструктажи для своей же безопасности: вводный, первичный на рабочем месте, повторный, внеплановый, текущий.

Первичный инструктаж на рабочем месте проводится непосредственным руководителем работ перед допуском к работе, и должен сопровождаться показом безопасных приемов работ.

Повторный инструктаж на рабочем месте проводят с работниками независимо от их квалификации, стажа и оплаты работы не реже чем раз в шесть месяцев. Цель этого инструктажа - восстановить в памяти рабочего инструкции по охране труда, а также разобрать конкретные нарушения из практики предприятия.

Внеплановый инструктаж на рабочем месте проводится при изменении правил по охране труда, технологического процесса, нарушении работниками правил техники безопасности, перерывах в работах, к которым предъявляются дополнительные требования безопасности труда, - более чем на 30 календарных дней, для остальных работ – 60 дней.

Текущий инструктаж проводится для работников, которым оформляется наряд-допуск на определенные виды работ.

При компоновке рабочего места должны быть в указанном порядке выполнены следующие технические мероприятия:

1. Произведены необходимые отключения и приняты меры, препятствующие подаче напряжения на место работы вследствие ошибочного или самопроизвольного включения коммутационных аппаратов;
2. На приводах ручного и на ключах дистанционного управления коммутационных аппаратов должны быть вывешены запрещающие плакаты;
3. Проверено отсутствие напряжения на токоведущих частях, которые должны быть заземлены для защиты людей от поражения электрическим током;

4. Наложено заземление (включены заземляющие ножи, а там, где они отсутствуют, установлены переносные заземления);

Вывешены указательные плакаты «Заземлено», ограждены при необходимости рабочие места и оставшиеся под напряжением токоведущие части, вывешены предупреждающие и предписывающие плакаты.

Заключение

В работе были рассмотрен способ оптимизации системы ГВС по быстродействию, путем установки циркуляционного насоса с асинхронным частотно-регулируемым приводом взамен запорно-регулирующей арматуры с приводом постоянного тока.

Показана возможность установки циркуляционного насоса и продемонстрирована методика выбора конкретного оборудования.

На основе имеющейся математической модели создана и исследована модель системы ГВС, имеющая существенное преимущество в быстродействии и экономии.

Продемонстрированы ряд решений при создании проекта автоматизации в среде CoDeSys с последующей технической реализации на самостоятельно сделанном контроллере. Показана методика создания ПЛК на основе разрозненных элементов и платы Raspberry Pi.

Список использованных источников:

1. Чистович С.А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович. – Л.: Стройиздат, 1975. – 236 с.
2. Мухин О.А. Автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции / О.А. Мухин. – Минск: Высшая школа, 1986. – 304 с.
3. Т.С. Бакрунова Системы теплоснабжения :Учеб. пособие // СамГТУ – 2011г. – 73с.
4. Чистович С.А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович. – Л.: Стройиздат, 1975. – 236 с.
5. Шилин А.А. Методы, алгоритмы и элементы релейного управления системами теплопотребления с запаздыванием / А.А. Шилин, В.Г. Букреев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 280 с.
6. Новиков С.И. Оптимизация автоматических систем регулирования тепло-энергетического оборудования. Ч. 2: Аналоговые регулирующие устройства и реализация АСР: учеб. пособие / С.И. Новиков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 84 с.
7. Клюев А.С. Оптимизация автоматических систем управления по быстродействию / А.С. Клюев, А.А. Колесников. – М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.
8. Патент РФ №2008145234/03 17.09.2010. Способ снижения расхода тепловой и электрической энергии в циркуляционной системе горячего водоснабжения // Патент России №2008145234/03 2008г. Авторы: Ремезов А.Н, Сорокин А.В., Кочанов Ю.И., [и др.]

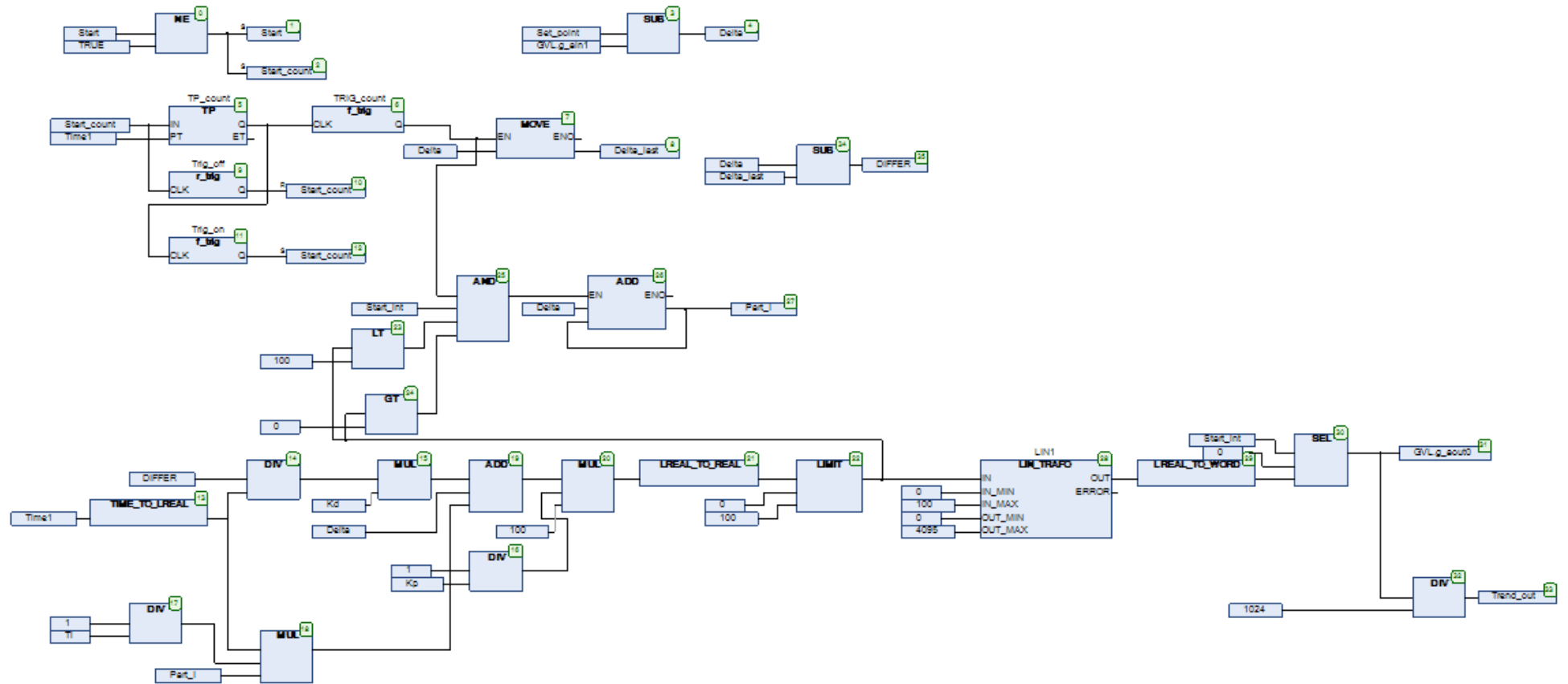
9. Патент РФ №2561846 27.08.2014. Система автоматического регулирования отопления здания // Патент России №№2561846 2013г. Кобылкин М.И. Батухтин С.Г. Батухтин А.Г.,
10. Патент РФ № 2561908 12.10.2011. Способ работы закрытой системы теплоснабжения // Патент России №2549082 2008г. Авторы: Орлов М.Е., Ротов П.В., Шарапов В.И., Сивухин,
11. ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016 Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования
12. Электропривод турбомеханизмов: Г.Б.Онищенко, М.Г.Юньков– Москва.: Энергия, 1972. – 240с.
13. Электропривод и автоматизация промышленных механизмов: В.И.Ключев, В.М.Терехов – Москва.: Энергия, 1979. – 353с
14. О.П. Мальцева, Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 476 с.
15. Шилин А.А. Нелинейная математическая модель теплопотребления с учетом характеристик элементов теплового узла / А.А. Шилин, В.Г. Букреев // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 2(47). – С. 107–114.
17. Зайцев А.П., Митаенко А.Д., Образцов К.В. Теория автоматического управления. Лабораторный практикум: учебное пособие ч.2 Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 86с.
18. Raspberry Pi Foundation [Электронный ресурс] // <https://www.raspberrypi.org/products/> (дата обращения 20.06.16)
19. CoDeSys The complete Software Suite for Automation Technology [Электронный ресурс] / CoDeSys. – Режим доступа: <http://www.codesys.com/>, (свободный, дата обращения: 10.10.2015).

- 20.Пакет управления CoDeSys для Raspberry Pi [Электронный ресурс] \\ <http://store.codesys.com/codesys-control-for-raspberry-pi-sl.html> (дата обращения 20.06.16)
- 21.MCP3008 Datasheet [Электронный ресурс] \\ <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MCP3008.pdf>
- 22.PCA9685 Datasheet [Электронный ресурс] \\ <https://cdnshop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf>
- 23.ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
- 24.СанПиН 2.2.4.548–96. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 25.СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.
- 26.ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. Правила устройства электроустановок. 7-е издание.
- 27.ГОСТ 12.1.033-81 ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения.
- 28.ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
- 29.Федеральный закон 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
- 30.ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
- 31.ГОСТ 12.0.003–74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- 32.ГОСТ 12.1.019 -79 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
- 33.ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
- 34.СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

- 35.ГОСТ 12.1.006–84.ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
36. Петров И.В., Вагнер Р., Долл В., «Отладка прикладных ПЛК в Codesys»/[Электронный ресурс] / Центр информ. Технологий. - Режим доступа: <http://prolog-plc.ru/pb1> , свободный.
37. Шилин А.А., Букреев В.Г., Койков К.И. Математическая модель нелинейной теплообменной системы с запаздыванием// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – №6. – С. 15-22.
38. Компания ОВЕН /[Электронный ресурс] / Центр информ. Технологий. - Режим доступа: <http://www.owen.ru>, свободный.
39. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование ОУ и электроустановок промышленных механизмов. – М.: ФОРУМ, 2010. – 352 с.: ил.
40. Scilab Open source software for numerical computation [Электронный ресурс] / Sources. – Режим доступа: <http://www.scilab.org/development/sources/stable>, (свободный дата обращения: 10.10.2014).
41. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / В.Я. Ротач. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 295 с.
42. Положение о выпускных квалификационных работах бакалавра, специалиста и магистра в ТПУ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://tpu.ru/f/2039/vkr.pdf>, (свободный дата обращения: 10.03.2016).

Приложение А.

Дискретный ПИД - регулятор.



Приложение Б

Разделы (5)

Research of control algorithms of the electric drive of the circulation pump

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Иванов Михаил Игоревич		

Консультант кафедры ЭПЭО :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Краснов И.Ю.	к.т.н		

Консультант – лингвист кафедры иностраннных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Пташкин А.С.	к.ф.н		

Introduction

Electric drive provides operation and control of many industrial facilities and processes in modern industry. Development trends of modern technology are aimed at automation and energy efficiency improvement. Eliminating man from the process area and replacing him with microprocessor equipment utilizes special algorithms and automation guarantees energy efficiency increase.

The issue of replacing adjustable DC electric drive with modern induction motor based variable-frequency drive, as the less expensive, providing better characteristic, possibility of automation and energy efficiency, and remains relevant.

Hot water supply system is a system that heats and distributes hot water to consumers for their technological, sanitary and hygienic needs by means of pumps, pipelines and automation.

Hot water supply systems are classified according to a number of characteristics.

Depending on covered area and integration they are divided into local and centralized ones.

Local installations provide a small area of one or several consumers with hot water and are located near them.

As examples of these installations utilized in apartments gas in-line or capacitive automatic heaters can be used.

The local units are usually used in cases of central heat source missing. They require constant monitoring and maintenance, which is hardened due to units being located in different places.

The positive impact of such systems lies in self-sufficiency, which means any system is independent from other ones and possesses low losses.

The development of high capacity heat sources achieves an extent when taking heat from one source and distributing to different consumers becomes more beneficial. That is the way centralized hot water supply system turned out to be useful in district buildings heating networks.

From the consumer's point of view, centralized systems are more accessible because getting hot water from them is easier and the systems themselves maintain higher sanitary and hygienic standards in comparison with local systems.

As for the disadvantages of centralized systems, they require operational teams for regular and competent maintenance of high-pressure high-temperature pipelines. In addition, transportation of heat medium is associated with significant losses.

Centralized systems are divided by means of heat sources into closed or open heat networks, in which district heating stations operate.

Open systems utilize units, which mix delivery water with water subjected to heating, while contacting directly with the heat medium.

In closed-type networks installations transmit heat energy from the surface of heater avoiding direct contact.

Open systems are more rational in terms of heat usage and energy cheapness, but the water quality may suffer. Therefore, open networks are not common.

By means of water obtaining and pressure assurance, heat systems are subject to division into open and close ones.

By method of receiving water and providing pressure there are also two types of systems open and closed.

The pressure inside a closed system is determined by the height of intermediate storages, from which systems receive water, by means of ball float valves.

In an open supply system water comes from a cold water pipeline, pumps of which provide the pressure.

In addition, hot water supplies are divided by means of presence or absence of additional storage tanks.

Additional storage tank is an accumulating vessel needed to smoothen fluctuations of hot water consumption in nonequilibrium conditions. They guarantee heaters smooth operation and eliminate harsh temperature alterations.

Accumulation of hot water is usually carried out at constant volume of water, due to refilling the pipeline with pressurized cold water, but with variable amount of heat energy, provided that heated water is pushed out to consumer by fresh cold water.

Keywords: response optimization for hot water supply system, circulating pump induction motor drive, CoDeSys, programmable logic controller, automated industrial process control system.

The Subject of research is commonly used hot water supply system.

Dissertation urgency. The government's energy policy accepted until 2020, prioritizes development and modernization of industrial and civil heat consumption control systems to reduce heat energy usage in hot water supply systems and ventilations.

For the purpose of government policy fulfilling, the federal act №261 has been adopted, which is now supposed to stimulate energy saving and efficiency measures, possible only if automated control systems are used, in particular heat consumption control systems. One of the major components of such systems is programmable logic controller (PLC) utilizing which we gain access to modern control and exploitation algorithms of heat consumption systems. Therefore, hot water supply systems operating in various conditions are of an interest.

Dissertation goal is to research and develop scientific-and-technological solutions for hot water supply systems optimization by virtue of modern hardware and software.

Computer and mathematic simulation are used in this work.

As a result, hot water supply systems response optimization means are proposed.

Application area: hot water supply systems of apartment buildings.

Economic efficiency: the proposed measures allow improvement of hot water supply quality and reduction of energy consumption.

Work approval and publication. The statements about hardware were discussed at the “Smart grid systems” conference in 2016.

1. Literature survey

Hot water supply systems of apartment buildings are considered in [1] and [2]. Solutions for heat supply automation are covered in [3]. The study basis is mathematical model of heat-supply system, suggested by A. Shilin and V. Bukreev in the article [4]. Optimization opportunities are considered in [5]. System response optimization methods are set down in [6].

Installation of circulating pumps into hot water supply systems and their automation is commended as the mean of efficiency improvement. In light of this, there are a lot of circulating pump inoculations to operate over used-on water. Patents [5] and [6] contain installation solutions for circulating pump controlled by electric drive, but the problem of response time is not considered there. Solution for utilizing the low grade heat sources, domestic wastewater and other heat exhausts in circulating pump is given in patent [7], where filters and additional equipment are proposed to utilize.

2. Object and methods of research

The supply of municipal and industrial apartment quarters is maintained in Russia by means of closed centralized pipelines. Hot water is delivered to consumers through a pipe system. Heating is done in consumer facility with the help of heat exchanger, thus the pipeline and the dwelling hot water supply system are separated. Utilizing a plate heat exchanger makes for the system efficiency. A heat exchanger of moderate volume possesses the properties sufficient to supply a multistoried apartment building, but if the consumption is close to its maximum, incoming cold water does not heat enough to reach desirable temperature. The problem arises due to shutter, controlled by DC drive, being slow to adjust the water flow from the pipeline, thus making transient processes last longer. The problem is partially solved if an accumulating tank is installed in hot water supply system for the purpose of building up an extra volume of hot water in case of peak consumption. However, the whole process becomes highly inert and hard to adjust to a new operation state. Which is more, extra volume being used up, the problem of cold water returns back.

There are solutions for given problems in a way of response control adjustment in hot water supply system. In this paper simulation and study of processes in a hot water supply system are proposed, using up-to-date software. In addition, system automation, utilizing programmable logic controllers, frequency transformers and modern automation unit CoDeSys, is suggested.

Modern heat exchangers are pretty efficient, but the distinction of hot water supply systems lies in their unpredictable heat medium consumption at peak load, which requires the increase of heat medium transition. From the other hand, if consumption is absent, the heat medium transition should be terminated. For the sake of efficient heat exchanger use and hot water supply quality the issue of response becomes relevant.

Thus, the scientific goal of this work is in mathematical simulation of hot water supply systems of conventional and proposed designs.

The purpose of this study is the development of scientific-and-technical optimization solutions for hot water supply system response adjustment.

For the purpose of achieving the major goal of the study the following tasks are carried out:

1. Hot water supply system parameters assessment with a view to possible circulating pump installation;
2. Circulating pump operation states analysis;
3. Study of circulating pump impact on water temperature near the consumer.
4. Implementation of automated controls over hot water supply system, utilizing CoDeSys software.

2.1 Common hot water supply and distribution system

A scheme for a closed hot water supply system, which is typical and used in many buildings and structures due to its simplicity, reliability and cheapness, is given in Fig. 1.1. The main control component is conventionally a latch with controllable stock position. The stock position is maintained by a constant speed drive with three-step controls. A scheme of such a system is given in Fig. B.1.1, where beside the latch (1) a highly-efficient heat exchanger (2) and circulating pumps (3, 4) are used in both heat medium carrier contours.

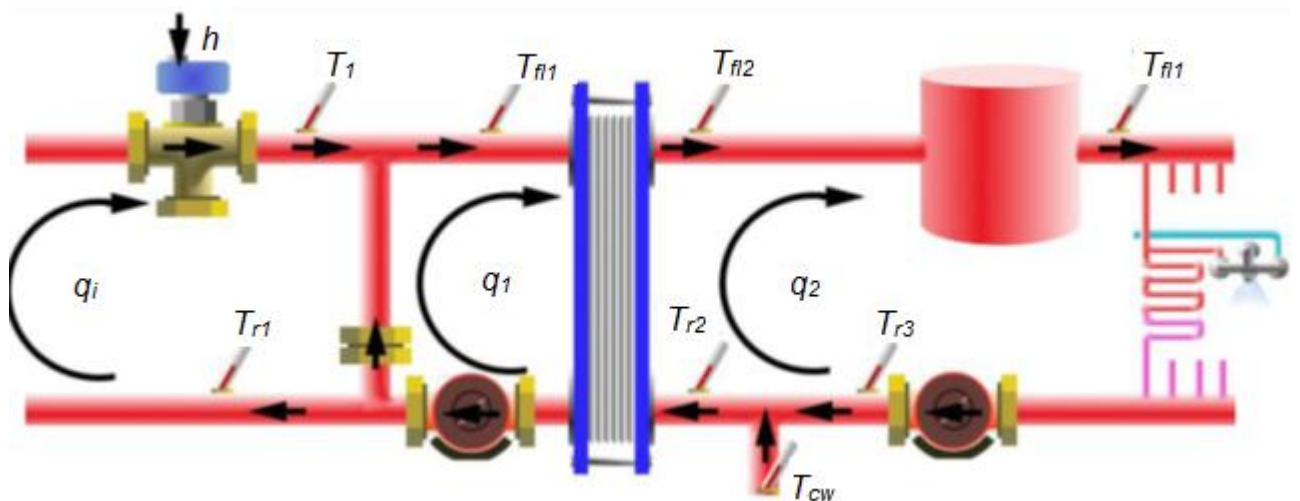


Fig B.2.1 – Conventional hot water supply system scheme

Control of such systems is done with the help of PLC. Control principle is as follows: water temperature T_{fl3} depends on water temperature in the first contour, which in turn depends on relation between volume q_i of heat medium, to volume q_l in the first contour. At this point the volume of heat medium depends on the stock position h controlled by the drive (5). For the use of conventional PID-controllers organization of two contours is enough: one sets up the latch position, the second, enabling the PID-controller calculates the stock position in accordance with preset T_{set} and measured T_{fl2} temperature values.

In case of such a system the individual valve adjustment is done, provided that valve control is carried out by pulse-width modulator according to independent proportional-integral-differential adjustment laws. For such systems the manufacturers of PLC with FBD-blocks [8] include presets, where the major control laws over dynamic objects and self-adjustment rules are given.

A latch controlled by DC drive adds to the system inertia in terms of water quantity, necessary for internal contour heating, is limited by the valve open/close speed. The valve does not catch up the necessary position or does not open fully to let the water inside in case of intense consumption, and the heat medium of internal contour cannot get heated enough. It leads to cold water running from a hot sink at consumer side.

The efficiency of a heat exchanger should be enough for optimal operation of the system. Intense heat extraction begins only when the valve of locking-adjustment armature shifts to the state required. Transient time may reach 40 seconds. Utilizing relevantly adjusted PID-controller does not increase the constant-speed drive response and the most responsive valve may reach 20-30 seconds delay, thus the heat exchanger cannot provide the necessary heat-exchange regime and an extra tank installation is required. In this work an opportunity for another hot water supply system scheme is considered.

Intense use of induction motors and frequency transformers in modern industry complies with a considerable economical positive effect. Adjustable induction motor

based drive with FT excels in terms of price. It allows capacity saving, requires less maintenance charge, contains equipment necessary for integration into an automated multilevel control system. The transient time when changing speed is no more than 0.5 seconds, which is 2 times faster than that of the conventional one.

2.2 Frequency controlled system

In this work inertia decrease is suggested by means of frequency controls usage in a hot water supply system. Study of closed system with attempts to speed up control over temperature for the purpose of internal contour temperature stability.

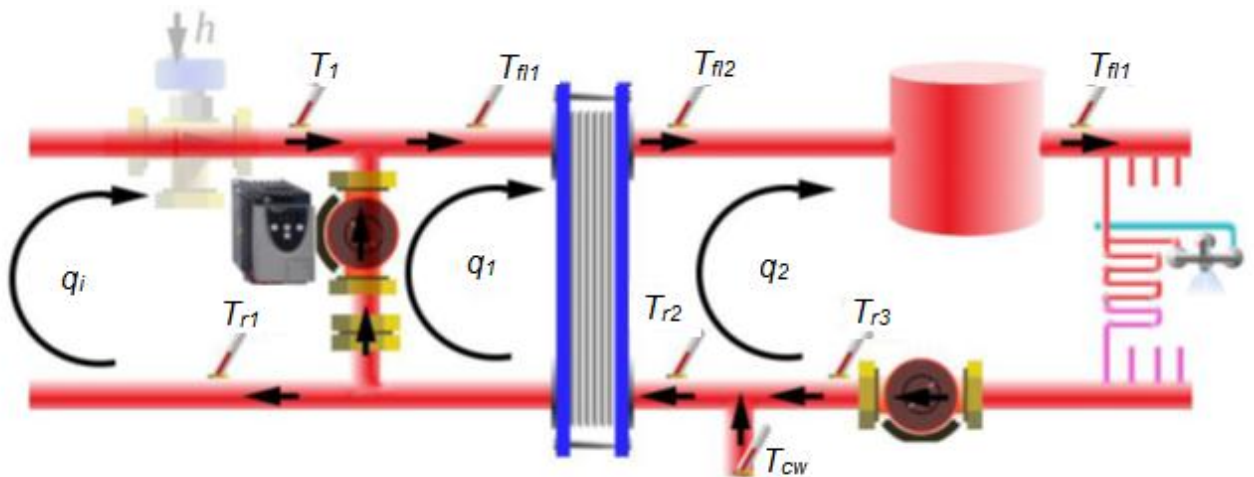


Fig B.2.2 – Scheme of hot water supply system with frequency controlled circulating pump in external contour.

The water temperature at consumer is imputed into a control unit (CU), as well as the rotation speed limit for circulating pump in accordance to object inertness. The speed of heat medium transition is also preset into CU.

The circulating pump operating states are as follows: the pump is shut down or operates at minimum speed, impact of which on heat medium creates circulate pressure equal to heat medium intake pressure.

As time period of hot water supply system filling up with the heat medium expires, the control unit sends a signal (0-10 V) to the circulating pump to increase the speed of heat medium circulation inside the external contour. Induction motor

based drive at reaching maximum speed allows the pump blades to create a heat medium flow, the pressure of which is higher than that of the pipeline. The heat medium is this sace moves only from circulating pump to heat exchanger and then returns creating effectively a loop.

If there is no need in heat medium flow adjustment, the system returns to initial state of filling the contours with heat medium.

It is worth mentioning, that utilizing frequency control allows avoiding unwanted hydraulic impacts in a hot water supply system.

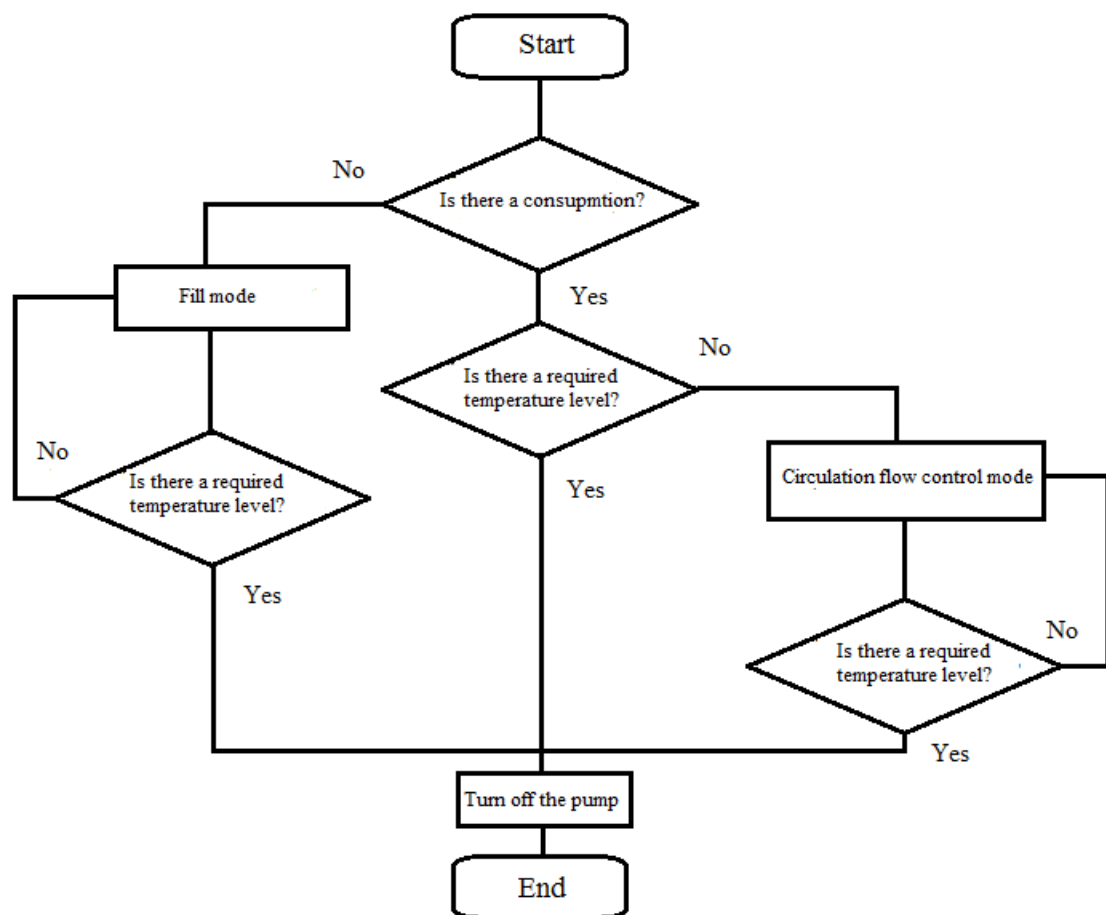


Fig B.2.3 – Control algorithm of FC-AD of circulation pump.

2.3 Summary on 2nd chapter

To be able to implement the proposed control system it is necessary to analyze the hot water supply system parameters; synthesize a mathematical model of processes occurring in the system and assess the impact of solutions on the model; synthesize a controller for temperature adjustment circuit; mathematical simulation and results analysis.

5. Technical implementation of automated control system in CoDeSys

5.1 Hot water supply system simulation in CoDeSys

CoDeSys is a software product intended for industrial automation and visualization of processes occurring in an automation system.

Programming in CoDeSys is executed with the help of standard languages (IEC– 61131-3), such as structured text (ST), functional block-diagram (FBD) and continuous function chart (CFC). The IEC–61131-3 languages are based on the following principles:

- Reliability of products and software. Reliability is guaranteed by means of using a special programming environment, containing all the tools needed for writing and fixing a program with the help of simulation and actual PLC. In addition, there is a bunch of code presets. Simple modification and functionality growth of a program.
- Portability from one PC to another;
- Reusage of used in parts of the code;
- Language simplicity; block-schemes replace text in textual languages.;
- Programming simplicity for analogous and Boolean equations.

The use of functional blocks language may be compared to integrated circuits (FPGA).

Program fixing is also easy in CoDeSys due to demonstrativeness and operations succession. Data transfer does not require special variables, because the wires connecting different blocks automatically encapsulate and send the data.

Visualization of automation projects is possible due to visualization system being integrated in CoDeSys software. Operator is offered with a set of ready solutions to work with or to create his own visualization from standard components..

CFC language is used to write automation project. The language is a successor of FBD language and represents the next generation of it. In standard FBD CoDeSys runs at maximum automation: placement, trace routing, sequential

execution are the features of this operation mode. A diagram is split into several circuits connected unobviously. It resembles a textual language, which contains picture entries instead of instruction strings. As a result we have a handy tool for programming, but sometimes not enough expressive. CFC is like FBD, but with no restrictions. We may feel free to place components anywhere, use backtracks, force execution sequence and draw schemes. The CFC schemes give a resemblance of chips electrical circuits. If a programmer is experienced enough and has a clear understanding of his actions, then CFC language opens up a corresponding freedom for fast and attractive expression of his intentions.

A hot water supply system may be built on a virtual model of itself. As a virtual model we use the previously utilized one, in which purpose we implement it in CoDeSys.

We see no built in aperiodic units in CoDeSys software, so we have to utilize the following equation:

$$Y_l = Y_l + (X - Y_c) \cdot k ; k = \frac{T}{\tau + T} , \text{ where}$$

T is the cycle duration, τ is the time constant of inert unit. The resulting unit is shown in Fig. 5.1

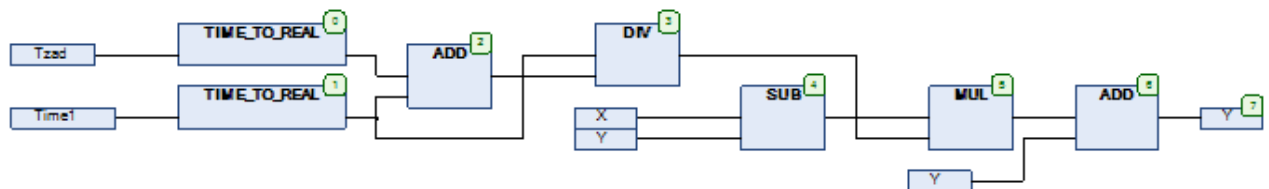


Fig. B.5.1 – CFC based unit.

A heat exchanger is quite simple to implement using arithmetical operators as superblocks.

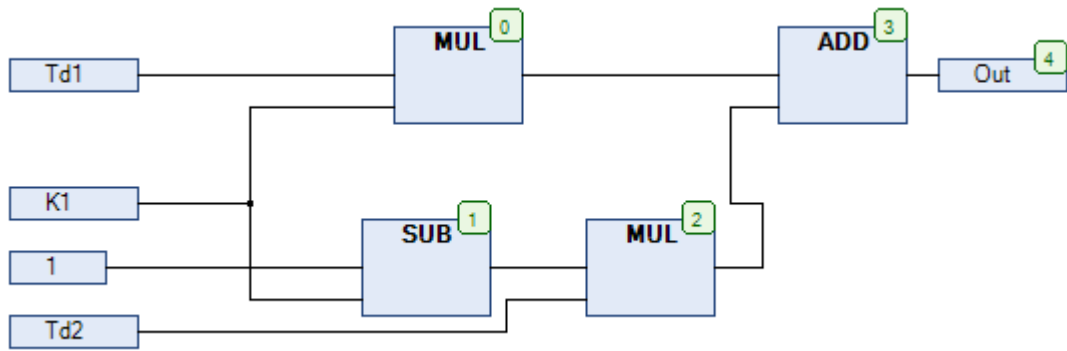


Fig B.5.2 – Heat exchanger in CFC environment

The resulting model of hot water supply system, implemented in CoDeSys is given in Fig B.5.3.

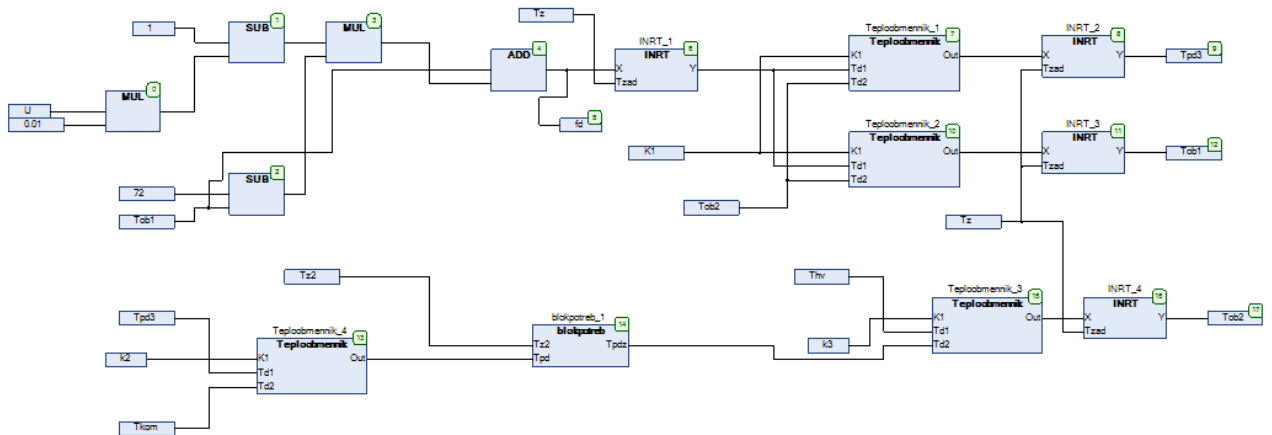


Fig. B.5.3 – Hot water supply system model.

Utilizing the following formula we get a controller:

$$Y_i = \frac{1}{K_{puk3M}} \left(E_i + T_d \cdot \frac{\Delta E_i}{\Delta t} + \frac{1}{T_i} \cdot \sum_{i=0}^n E_i \cdot \Delta t_{u3M} \right) \cdot 100\%$$

where K_p is the proportional component coefficient, E_i is the mistuning, T_d is the derivation duration, T_i is the integration duration.

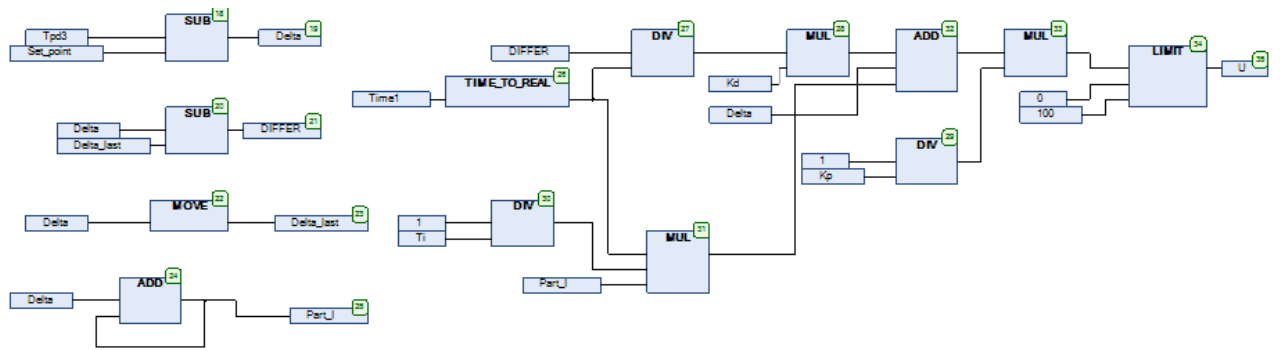


Fig B.5.4 – PID – controller in CFC environment,.

5.2 Automation project uploading to a controller

The above given model is closed and operates on its own. If we disable all the constants and replace them with variables from pickup units, we get an automated control system. As a controller we use discrete controller, having replaced the derivative component with an end difference and the integration component with a sum. Transformed this way controller, shown in Supplement B.

The block shown in Fig B.5.5 operates as a pulse generator and a starter.

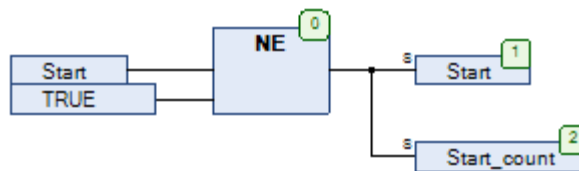


Fig B.5.5 – CFC-based startup block

A pulse counter is implemented and an assignment block records and writes over the previous values with the help of blocks triggering back and front lines.

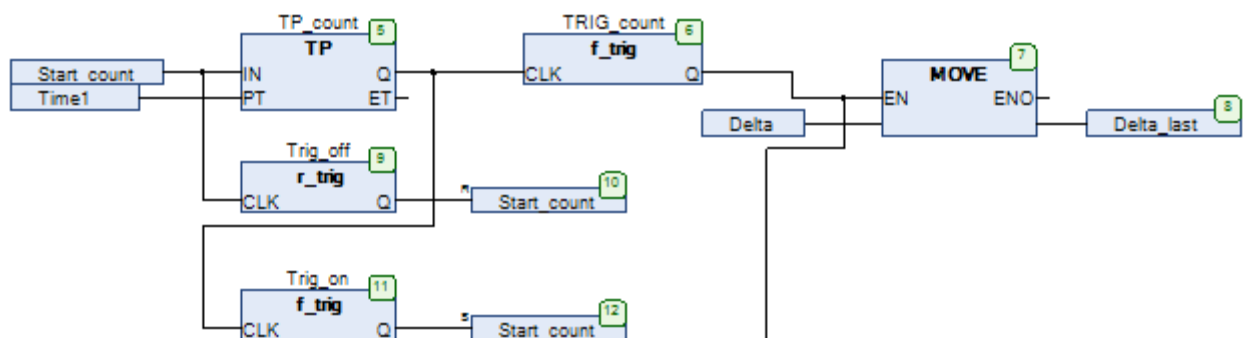


Fig B.5.6 – Counter and assignment blocks.

The block chain shown in Fig. B.5.7 is used for prevention of integrating unit oversaturation, which in essence allows its turning off.

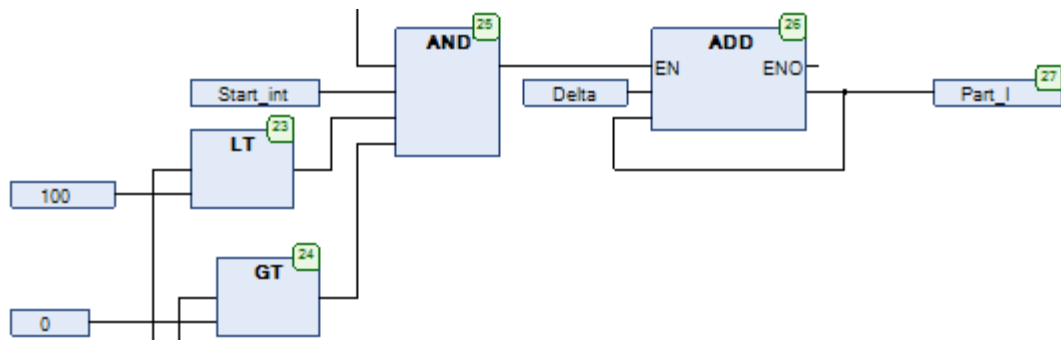


Fig B.5.7 – Control chain over the integrating unit

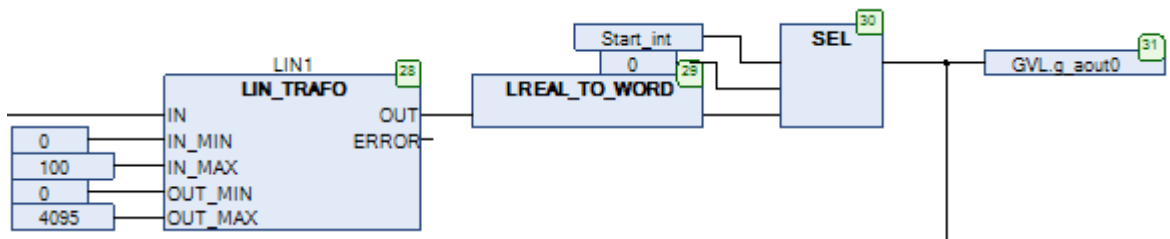


Fig B.5.8 – Control chain over the integrating unit

As an analogous output a PWM output is used, thus the control signal is converted from 0..100 to 0..4095 of WORD type.

5.3 Apparatus implementation of programmable controller based on Raspberry Pi board

The adjustment of programmable part of the project requires a PLC to carry out, due to emulation-only mode does not provide us with the necessary programmable content.

There are more than five hundred of PLC designs and modifications for sale, the prices of which vary widely. The price for one of the cheapest boards starts from fifteen thousand rubles for an OWEN board. Meanwhile there is a variety of scattered apparatus solutions, which being assembled provide us with a decent PLC, able to compete with expensive controllers. A monoboard computer called Raspberry

Pi is of a special interest, due to it being able to implement the previously mentioned PLC and CoDeSys software [2]. With the help of given complex we may quickly assemble mnemonic schemes and visualize automation processes, which helps with SCADA systems mastering.

While creating a CoDeSys-based PLC project compatible with Raspberry Pi, a few hardships arise. Compatibility of Raspberry Pi operating system with CoDeSys complex is provided by third-side software. [3]. The Raspberry Pi has SPI and I2C connectors, which are allowed to use for analogous output assembly.. In addition, the analogous inputs are placed on a separate board, providing all the safeties and compatibility.. The issue of DA converter is solved with the help of integral board MCP3008 [4] connected to the board through the SPI interface.

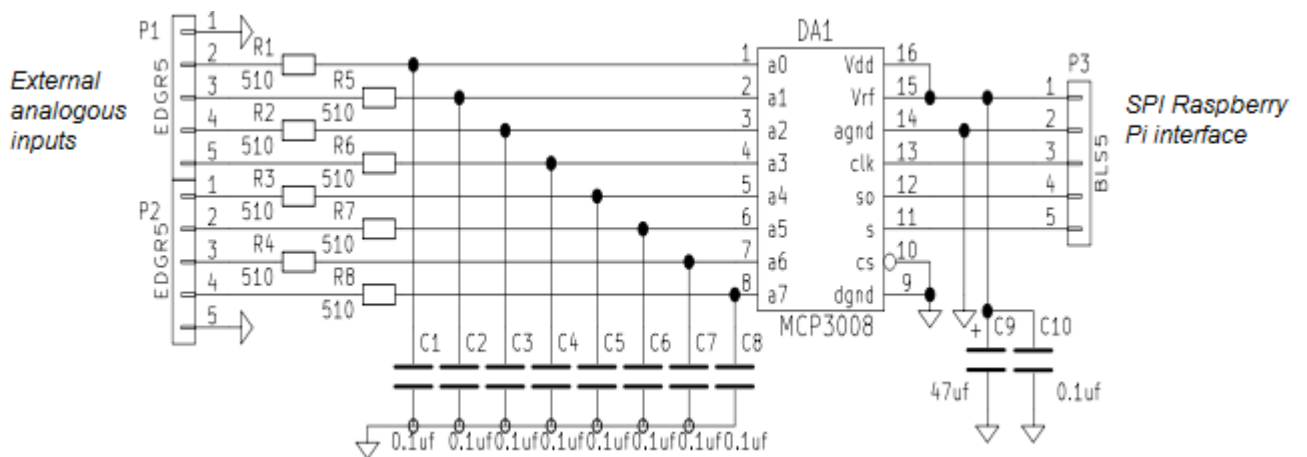


Fig B.5.9 – Schematic diagram of board analog outputs.

The I2C interface does not have any compatibility issues with both Raspberry Pi and PCA 9685 controller [5] in terms of analogous outputs implementation. The PCA controller generates a pulse-width modulation, parameters of which we may alter in CoDeSys software. It is reasonable to utilize PWM to power up the drives with corresponding low-frequency filters and DC amplifiers. The necessity of such a decision is caused by input voltage for electric drives being equal to 0..10 V. In the process of PLC implementation a significant obstruction may be the need of separate above mentioned interfaces switching. Having entered the OS by «-sudo rasp-config» we may see an options menu, where by means of selecting proper preferences it is necessary to enable listed interfaces..

from the outputs of which we may access the processes possessing various time constants. In such a way, the most common dynamic control objects are simulated – the inert units of 1st to 3rd order.

After the RC –circuit the signal is received by the SPI interface of Raspberry Pi with the help of AD converter (MCP3008). In the CoDeSys environment a PID controller and a mnemonic scheme are assembled allowing us to observe the transient and operation of all the components. With the help of given CFC program we may study modern [6] and well known [7] PID-controller adjustment methods.

Conclusion

A hot water supply system optimization in terms of response is considered in this paperwork. A DC drive was replaced by means of circulating pump installation in junction with an induction motor based variable-frequency drive. A suggestion is made for circulating pump installation in accordance with equipment selection.

A hot water supply system simulation was carried out based on the existing mathematical model. Given model possesses a significant advantage over conventional systems in a way of improved response and efficiency.

A set of suggestions is made while developing the automation project in CoDeSys followed by actual apparatus implementation of custom controller. A method of PLC creation is shown on a basis of scattered components and the Raspberry Pi board.

REFERENCES

1. CoDeSys The complete Software Suite for Automation Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.codesys.com> (дата обращения: 25.05.2017).
2. Design of plumbing systems for multi-storey buildings [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.who.int/water_sanitation_health/hygiene/plumbing14.pdf (дата обращения: 24.05.2017).
3. Scilab Open source software for numerical computation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.scilab.org/development/sources/stable> (дата обращения: 23.05.2017).
4. Raspberry Pi Foundation [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.raspberrypi.org/products/> (дата обращения: 20.05.2017).
5. 3S-Smart Software Solutions GmbH [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.codesys.com/> (дата обращения: 18.05.2017).
6. CoDeSys control for Raspberry Pi [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://store.codesys.com/codesys-control-for-raspberry-pi-sl.html> (дата обращения: 17.05.2017).
7. MCP3008 Datasheet [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MCP3008.pdf> (дата обращения: 15.05.2017).
8. PCA9685 Datasheet [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://cdnshop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf> (дата обращения: 14.05.2017).
9. Shen J.-C., Chiang H.-K.. PID tuning rules for second order systems // 5th Asian Control Conference. - 2004. - vol. 1. - pp. 472 – 477.
10. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. - 1942. - vol. 64. - p. 759–768.