

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

Энергетический институт
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра ЭПЭО

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Частотное управление рекуператором в системе вентиляции

УДК _697.952.2–048.35_

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2А	Прохоров Сергей Валерьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин А.А.	Д.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Трофимова М.Н.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский А.Г.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
	Дементьев Ю.Н.	Ph.D., К.Т.Н.		

Оглавление

Введение	3
1. Техническая часть	6
1.1. Описание объекта модернизации	6
1.2. Литературный обзор	8
1.3. Предлагаемое техническое решение	11
1.4. Выбор электрооборудования, расчет параметров элементов и характеристик силовой цепи 14	
1.4.1. Выбор электродвигателя. Расчет параметров.....	14
1.4.2. Моделирование прямого пуска асинхронного двигателя.....	19
1.4.3. Моделирование прямого пуска электродвигателя с частотным законом управления $U/f=const$	19
1.4.4. Выбор способа управления скоростью двигателя в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД).....	21
1.4.5. Параметры преобразователя частоты.....	21
1.4.6. Выбор автоматического выключателя	22
1.4.7. Расчет и выбор типа и сечения кабеля высокого напряжения.....	22
1.5. Моделирование системы	23
1.6. Проверка устойчивости	28
1.7. Моделирование в среде CODESYS	35
1.8. Подключение к программируемому логическому контроллеру.....	40
Вывод	45
Список использованных источников	47

Введение

Электрический привод – электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса. [1]

Мельчайшие приводы в составе карманных устройств и мощнейшие промышленные электроприводы, электроприводы развлекательных аттракционов и приводы медицинских аппаратов – существует множество различных классификаций и областей применения электроприводов, так, современную жизнь крайне тяжело представить без них, поскольку повсеместное их применение тесно связано с улучшением уровня жизни человечества. Научные достижения также коснулись данную область, с развитием микропроцессорной технологий можно говорить о таком свойстве современных электроприводов, как автоматическое управление. Данное введение поможет улучшить такие показатели как точность, скорость исполнения, минимизацию человеческого ручного труда, улучшенную защиту и множество других показателей.

Также одной из главных тенденций развития современного электропривода является ресурсоэффективность и экономичность. В данной выпускной квалификационной работе будут рассмотрены рекуперативная вентиляционная система, позволяющая сэкономить множество энергетических ресурсов, а также решение некоторых проблем при ее эксплуатации.

Рекуперация тепла – это процесс возврата тепла, процесс его получения назад, т.е. поступающий воздух нагревается теплом удаляемого воздуха (Рисунок 1).

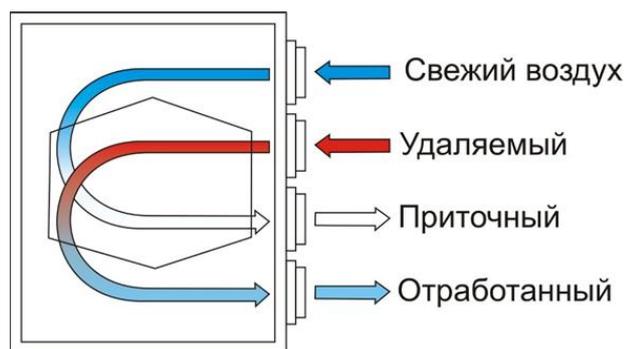


Рисунок 1 – Процесс рекуперации воздуха

Рекуперативная система – система, производящая процесс рекуперации.

В последнее время вентиляционная индустрия активно развивается и в связи с этим были разработаны следующие виды рекуперативных агрегатов:

Пластинчатые рекуператоры – самый распространенный вид рекуператоров, применяемых в системах приточно-вытяжной вентиляции. Принцип его действия заключается в пересечении воздушных потоков приточного и вытяжного воздуха. Эти потоки пересекаются, но не перемешиваются в специальном пластинчатом теплообменнике. Материалом для пластин могут служить алюминий, пластик, нержавеющая сталь, бумага. [2]

Роторные рекуператоры – второй по распространенности вид рекуператоров, применяемых в системах приточно-вытяжной вентиляции. Принцип его действия заключается в прохождении воздушных потоков приточного и вытяжного воздуха через специальный вращающийся роторный теплообменник. [2]

Камерные рекуператоры. Камера разделяется на две части заслонкой. Удаляемый воздух нагревает одну часть камеры, затем заслонка изменяет направление воздушного потока таким образом, что приточный воздух нагревается от нагретых стенок камеры. [2]

Тепловые трубы. Данный рекуператор состоит из закрытой системы трубок, заполненных фреоном, который испаряется при нагревании

удаляемым воздухом. Когда приточный воздух проходит вдоль трубок, пар конденсируется и вновь превращается в жидкость. [2]

Рекуператоры с промежуточным теплоносителем. Вода или водно-гликолевый раствор (Рисунок 2) циркулирует между двух теплообменников, один из которых расположен в вытяжном канале, а другой в приточном. Теплоноситель нагревается удаляемым воздухом, а затем передает тепло приточному воздуху. [2]



Рисунок 2 – Рекуператор с промежуточным теплоносителем.

Последний вид рекуперативных установок является базовым для данной выпускной квалификационной работы.

В связи с климатическими особенностями страны, температура ниже -30°C в зимний период времени, во многих регионах, является постоянной и это может являться причиной образования наростов инея. Это происходит из-за того, что холодные стенки канала, становятся холоднее других частей системы и превращаются в своеобразную «ловушку» для влаги, благодаря хорошей работе рекуператора. В работе будет рассмотрено решение данной проблемы.

1. Техническая часть

1.1. Описание объекта модернизации

Объект, на котором будет производиться модернизация оборудования представлен на рисунке 1.1.1. Установка является рекуперативной с промежуточным теплоносителем. В качестве теплоносителя используется 60 % этиленгликоль, поскольку в условиях низких температур, данный вид жидкости обладает преимуществом относительно самого распространенного вида жидкости – воды, так как температура замерзания его раствора составляет порядка -50°C . [3]

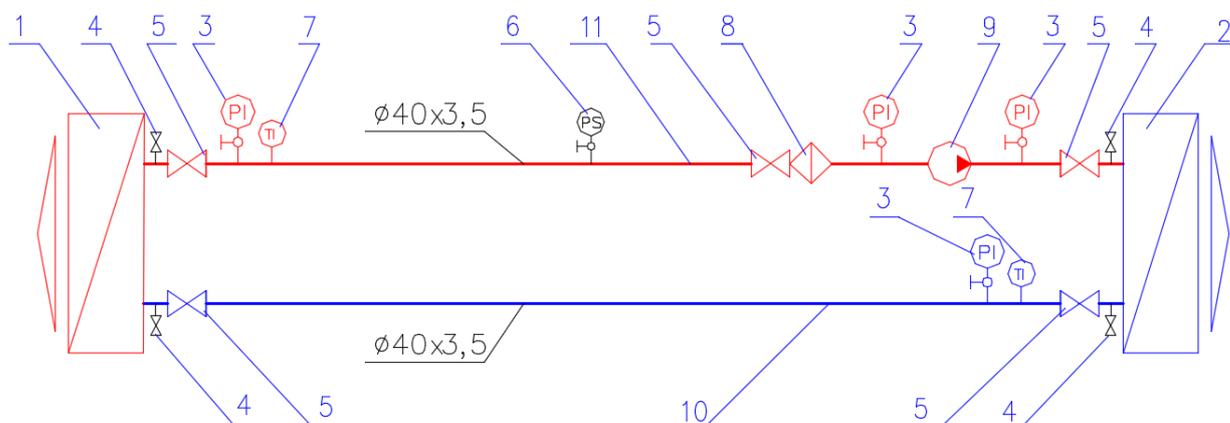


Рисунок 1.1.1 – Схема работы рекуперативной системы

На рисунке 1.1.1 представлена схема предлагаемой установки рекуперации с промежуточным теплоносителем, где теплообменники 1 нагреватель на вытяжке и 2 охладитель на притоке; приборы, показывающие состояние системы: 3 манометр, 6 реле перепада давления, 7 термометр; клапаны, для ручной регулировки потока 4,5; фильтр 8; насос 9, который прогоняет теплоноситель по трубам 10 и 11

Установка рекуперации с промежуточным теплоносителем работает следующим образом: утилизируемая теплота охлаждаемого воздуха, которая от работающего насоса 9 передается на нагрев приточного наружного воздуха, в работе схемы, при работе электродвигателей вытяжного и приточного вентиляторов и насоса 9, который по трубопроводу 10, 11 подает

в трубки теплоизвлекающего теплообменника 1 антифриз с отрицательной температурой и проходя по трубкам теплообменника 10, 11 этиленгликоль нагревается до определенной положительной температуры благодаря извлечению теплоты из вытяжного воздушного потока, при этом на пластинах теплообменника на вытяжке 2 происходит выпадение конденсата, который, при отрицательных температурах, замерзает и это приводит к известным проблемам. За состоянием системы можно следить с помощью датчиков 3, 6, 7. При необходимости, поток теплоносителя можно перекрыть вручную, с помощью клапанов 4,5.

В целом, данная система, при температурах выше температуры точки росы, с хорошей эффективностью справляется с поставленными для нее задачами.

1.2. Литературный обзор

Проблема разморозки инеевого слоя в вентиляционных рекуперативных системах является очень важной, так как наросты могут являться причиной плохой циркуляции воздушных потоков, большой загрузки двигателей вентиляторов, ухудшения теплопередачи внутри системы. Благодаря своей актуальности, решением данной проблемы занимались многие специалисты и их труды были опубликованы на различных известных ресурсах. Итак, основной задачей данного раздела является поиск данных решений и применение их к данной работе.

Для начала поиска необходимо сформировать основные ключевые слова. Выбор ключевых слов является важной задачей, так как неверный их выбор может являться причиной того, что будет найдена неподходящая статья, либо материала не будет найдено вовсе. На основании обозначенной проблемы были выбраны следующие ключевые слова: «вентиляция», «иней», «рекуперация».

Основными источниками, в которых производился поиск, были российские и международные патентные базы (<http://www1.fips.ru>, <http://ru.espacenet.com/>), крупнейшая в мире база рефератов и цитирования – Scopus, политематическая реферативно-библиографическая и наукометрическая (библиометрическая) база данных – Web of Science. На основании поисковых запросов были выделены следующие, наиболее подходящие источники, которые рассматривают проблему разморозки инеевых наростов.

Одним из самых старых, ненадежных и не требующих дополнительного оборудования, является метод механической очистки. Данный метод не рассматривается в научных трудах, так как в нем не рассматриваются какие-либо технические решения. Он заключается в следующем: обслуживающий персонал освобождает подступ к проблемным местам, затем с помощью специальных средств очищает каналы вручную. Данный способ очистки

является самым распространенным, поскольку за неимением финансовых и технических средств, он является крайне дешевым. Но при использовании этого способа очистки, могут возникнуть некоторые проблемы, так в условиях, когда нельзя приблизиться к местам, которые необходимо очистить, либо при крайне плохих погодных условиях очистку произвести не удастся, также при отсутствии квалифицированного персонала, очистка может привести к поломкам.

Еще одним способом избавления от инеевых наростов, который рассматривается в научных публикациях, является метод, при котором нагреватели, внедряемые в каналы вентиляции нагревают воздух, который удаляет наросты инея. При поступлении с датчиков сигнала об уровне нароста инея выше допустимого, срабатывает автоматика, включающая нагревательные элементы. [4]



Рисунок 1.2.1 – Канальный воздушонагреватель

Этот метод не будет применен в данной работе, так как он имеет следующие недостатки:

- этот метод является довольно дорогим, поскольку при внедрении данного воздушонагревателя необходимо разработать и внедрить схему релейно-контакторной защиты и управления

- металлические нити накаливания имеют значительную инерцию, а потому электронагреватели должны быть снабжены защитой от перегрева.
- затраты на электроэнергию при использовании
- в связи с особенностью строения вентиляционной системы, внедрение подобного типа воздухонагревателя не всегда возможно.

Следующий способ основан на работе теплообменника-утилизатора с перекрестно-точными каналами [5], который избавляется от инеевого налета, путем поворота вокруг своей оси на 180° , степень заиневаания в котором определяется либо датчиками температуры, находящимися в дальнем углу установки, либо с помощью датчика перепада давления. Подробная работа и возможное конструктивное строение, описанное в патенте представлено в приложении А.

Недостатком данного метода является то, что для поворота теплообменника вокруг своей оси требуется дополнительный привод, реализующий данное перемещение. [5]

Следующий метод описывается в патенте на изобретение «Установка утилизации тепла вытяжного воздуха» [6]. Избавление от инея от инея в котором осуществляется путем нагрева антифриза. Работа данного метода описана в приложении А.2.

Следующим решением из области автоматике является метод, при котором снижается эффективность рекуператора [7]. Так при образовании инеевого налета, на систему управления рекуператором по обратной связи с датчиков поступает соответствующий сигнал, при появлении которого срабатывает система автоматике, при которой снижается скорость или совсем выключается циркулирующий насос. В результате тепло воздушных масс, которое не «забрал» теплообменник из-за падения эффективности рекуператора, плавит инеевый налет.

На основании проанализированных решений было принято решение двигаться в следующем направлении:

1. наличие инея будет определяться с помощью датчиков перепада давления;
2. избавление же от инея будет проводиться с помощью метода, при котором снижается эффективность рекуператора.

Подробное описание предложенного технического решения будет описано ниже.

1.3. Предлагаемое техническое решение

В данной работе будет реализовано техническое решение проблемы образования наросов инея, выбранное на основании проанализированной литературы, представленное на рисунке 1.3.1.

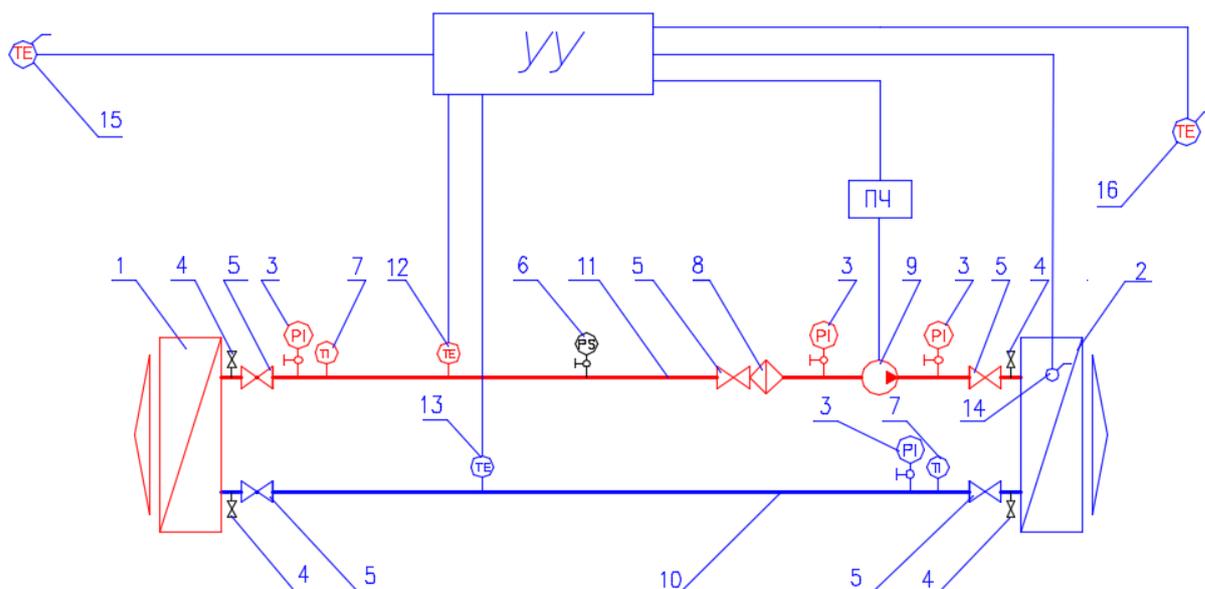


Рисунок 1.3.1 – Функциональная схема работы рекуперативной системы с защитой от заиневаания

Задачей выбора данного вида технического решения являлся выбор наиболее оптимальной реализации устройства, учитывающее недостатки и достоинства предложенных в источниках методов.

Модернизированная система состоит из следующих элементов: теплообменники – 1 нагреватель на вытяжке и 2 охладитель на притоке;

приборы, показывающие состояние системы: 3 манометр, 6 реле перепада давления, 7 термометр; клапаны, для ручной регулировки потока 4,5; фильтр 8; насос 9 и преобразователь частоты ПЧ, позволяющий управлять посредством устройства управления УУ, двигателем насоса 9, который прогоняет теплоноситель по трубам 10 и 11; для получения данных о системе к трубам прямого и обратного потоков 11 и 10 подсоединены датчики температуры 12 и 13, датчик перепада давления 14, измеряющий давление до и после теплообменного блока, а также датчики температуры наружного воздуха 16 и температуры воздуха внутри помещения 15, позволяющие получать и передавать информацию устройству управления УУ.

Данная рекуперативная установка с промежуточным теплоносителем и частотным управлением работает следующим образом: утилизация теплоты охлаждаемого воздуха, которая от работающего насоса 9 передается на нагрев приточного наружного воздуха, в работе схемы, при работе электродвигателей вытяжного и приточного вентиляторов и насоса 9, который по трубопроводу 10, 11 подает в трубки теплоизвлекающего теплообменника 1 антифриз с отрицательной температурой и проходя по трубкам теплообменника 10, 11 этиленгликоль нагревается до определенной положительной температуры благодаря извлечению теплоты из вытяжного воздушного потока, при этом на пластинах теплообменника на вытяжке 2 происходит выпадение конденсата, который, при отрицательных температурах, замерзает и образует слой инея. При достижении последнего критического значения, датчик перепада давления 14 подает сигнал на устройство управления УУ, в свою очередь устройство управления, при помощи преобразователя частоты ПЧ, посредством понижения частоты вращения двигателя насоса, снижает эффективность работы рекуперативной установки. Таким образом на теплообменнике 2 в зоне образования инеевого нароста, поддерживается температура точки росы, при которой происходит оттаивание инея. Так, после освобождения путей для прохождения воздушных потоков, датчик перепада

давления 14 сигнализирует устройству управления УУ об отсутствии инея, последний в свою очередь с помощью преобразователя частоты ПЧ выводит двигатель насоса на режим работы при котором эффективность рекуператора максимальна.

Направление развития данного проекта было выбрано на основании проанализированных литературных источников.

Так, в методе, основанном на работе теплообменника-утилизатора с перекрестно-точными каналами [5] рассматривается метод определения степени заиневаания установки посредством внедрения датчика перепада давления, измеряющего давление до теплообменного блока близ которого образуется инеевый нарост и после. Показателем степени заиневаания служит разность давлений. Данный метод определения величины нароста инея применен и в данной выпускной квалификационной работе. Однако же сам метод разморозки в данном случае является неподходящим, поскольку для его осуществления потребуется полное изменение структуры рекуперативной установки, а также внедрение дополнительного привода, с помощью которого будет осуществляться поворот рекуператора-утилизатора.

Непосредственно же избавление от инея будет производиться на основании метода, котором снижается эффективность рекуператора [7]. В отличие то метода, применяемого в источнике, способ использованный в работе будет реализован с помощью частотного преобразователя. Это позволит обеспечить, на основании полученных данных с датчиков температуры и перепада давления, температуру точки росы, а также дальнейшее ее поддерживание в режиме разморозки инеевого нароста. Данное техническое решение позволит наиболее эффективно использовать рекуператор.

1.4. Выбор электрооборудования, расчет параметров элементов и характеристик силовой цепи

1.4.1. Выбор электродвигателя. Расчет параметров

Исходные данные к работе представлены в таблице 1.4.1.1:

Таблица 1.4.1.1 – Исходные данные к работе

Производительность, м ³ /с	Напор, м	Скорость вращения вала насоса, об/мин	КПД насоса	КПД передачи	Плотность перекачиваемой жидкости, кг/м ³	Коэффициент запаса
0,0014	29,9	2200	0,72	1,0	1110	1,3

Определение необходимой расчетной мощности, для дальнейшего выбора оборудования (насос, двигатель, ПЧ)

$$P_{\text{ог}} = K_3 \cdot P_{\text{нас}} = K_3 \cdot \frac{Q \cdot P_n}{\eta_{\text{на}} \cdot \eta_n} = K_3 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_{\text{на}} \cdot \eta_n} =$$

$$= 1,3 \cdot \frac{1110 \cdot 9,81 \cdot 0,0016 \cdot 29,9}{0,72 \cdot 1} = 822,723 \text{ Вт}$$

$$P_H \geq P_{\text{расч}} = 0,823 \text{ кВт}$$

где,

K_3 - коэффициент запаса;

$P_{\text{нас}}$ - мощность насоса (гидравлическая), кВт;

P_n - давление на напоре насоса, Па;

$Q_{\text{на}}$ - производительность насоса, м³ / с ;

H - полный напор жидкости, м;

ρ - плотность перекачиваемой жидкости, кг / м³;

g - ускорение свободного падения, м / с²;

$\eta_{\text{на}}$ - КПД насоса;

η_n - КПД передачи;

На основании расчетной мощности выбран насос датской фирмы Grundfos CM1-10 A-R-G-E-AQQE (Рисунок 1.4.1.1). Насос CM представляет собой

компактный горизонтальный многоступенчатый центробежный насос с: 3-фазным, 380/220 V, 50 Hz, монтируемым на лапах асинхронным электродвигателем мощностью 0,84 кВт и номинальной частотой вращения 2750-2810 об/м Насос с осевым всасывающим каналом и радиальным выпускным каналом, включая торцевое уплотнение вала особой конструкции в исполнении AQQE. Вал, рабочие колёса, камеры, пробки заливочных отверстий, всасывающий и нагнетательный трубопроводы выполнены из нержавеющей стали. [8]



Рисунок 1.4.1.1 – Насос Grundfos CM1-10 A-R-G-E-AQQE

Для подтверждения правильности выбора электромеханического преобразователя, будет выбран и рассчитан отечественный аналог данного электродвигателя. В качестве аналога взят двигатель трехфазный асинхронный АИР71В2 имеющий следующие параметры, представленные в таблице 1.4.1.2:

Технические характеристики выбранного двигателя АД (АИР) 71В2 [9]

Таблица 1.4.1.2 – Параметры асинхронного двигателя

$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	КПД, %	Кэф. мощности	$I_{\text{ном}}$, А	$M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$	J, кг·м ²
1,1	2810	0,795	0,8	2,6	2,2	6	2,4	0,0011

Технические данные двигателей основного исполнения, степень защиты IP 54, класс нагревостойкости изоляции «F», $2p = 2$. Режим работы продолжительный – S1.

Последующий расчет, определение остальных параметров, построение схем и характеристик представлены в приложении Б.

Расчет естественной электромеханической характеристики представлен в таблице 1.4.1.3:

Таблица 1.4.1.3

ω , рад/с	0	50	100	200	300
I , А	11,663	11,308	10,801	8,784	2,804

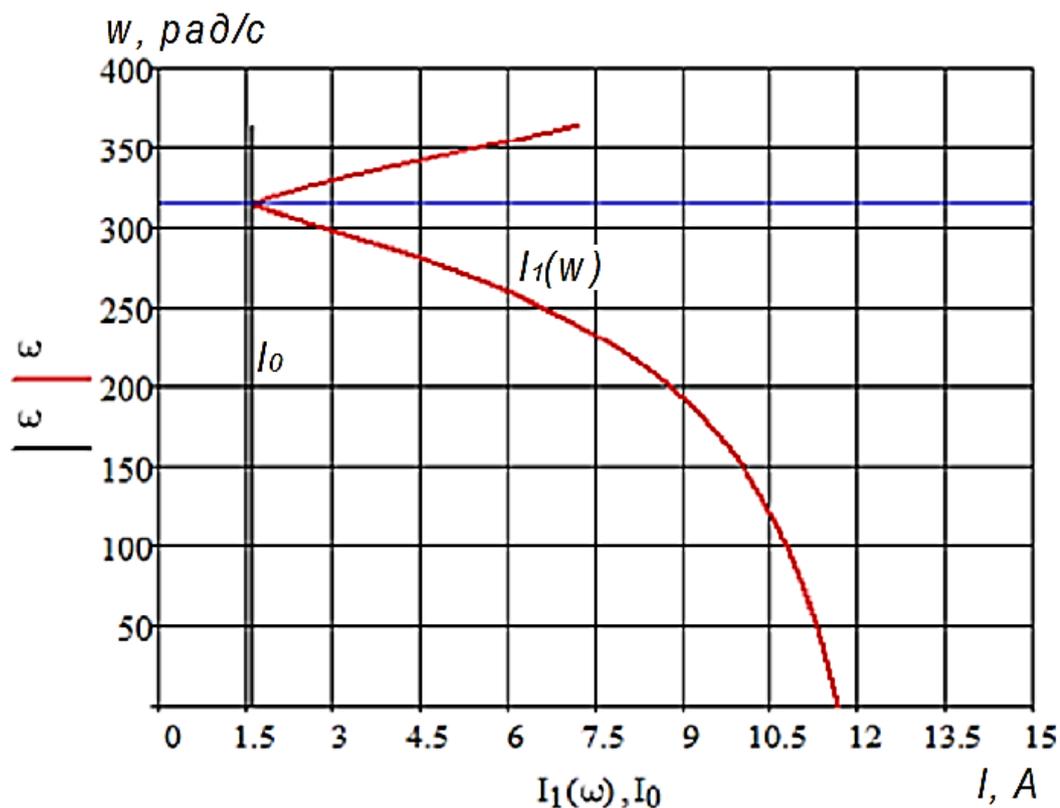


Рисунок 1.4.1.2 – Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя.

Расчет естественной механической характеристики представлен в таблице 1.4.1.4:

Таблица 1.4.1.4

ω , рад/с	0	50	100	200	300
M, Нм	6,353	7,127	8,026	9,421	5,838

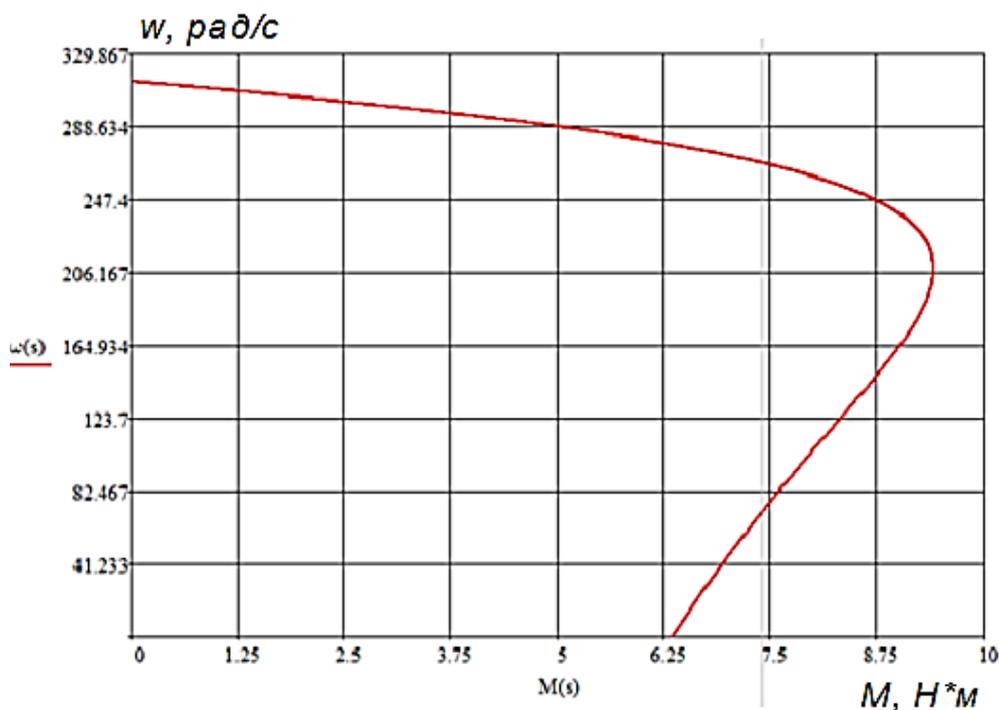


Рисунок 1.4.1.3 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

Механическая характеристика асинхронного двигателя при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется выражением [10]:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R'_2}{\omega_{0j} \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'}{s \cdot X_{\mu\text{н}} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}$$

Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя по при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется по формуле [10]:

$$I_1(s) = \sqrt{I_{0j}^2 + (I'_2(s))^2 + 2 \cdot I_{0j} \cdot I'_2(s) \cdot \sin \varphi_2(s)},$$

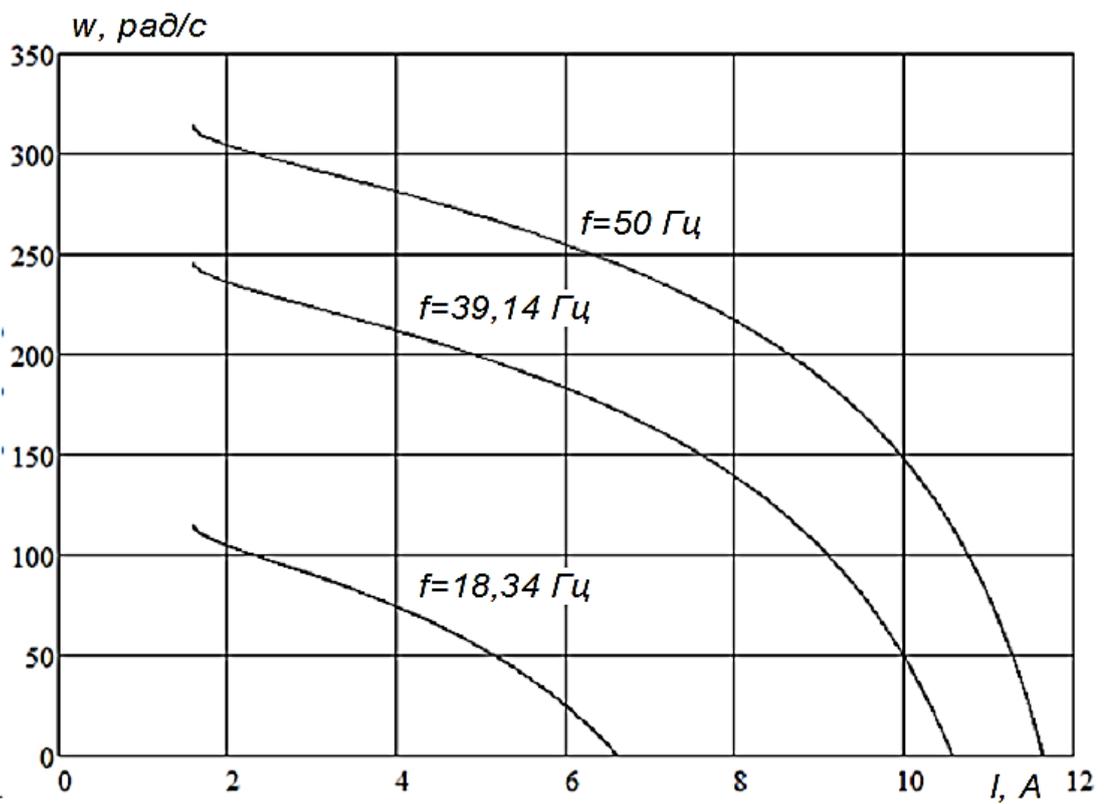


Рисунок 1.4.1.4 – Электромеханические характеристики двигателя при законе регулирования $U/f = \text{const}$

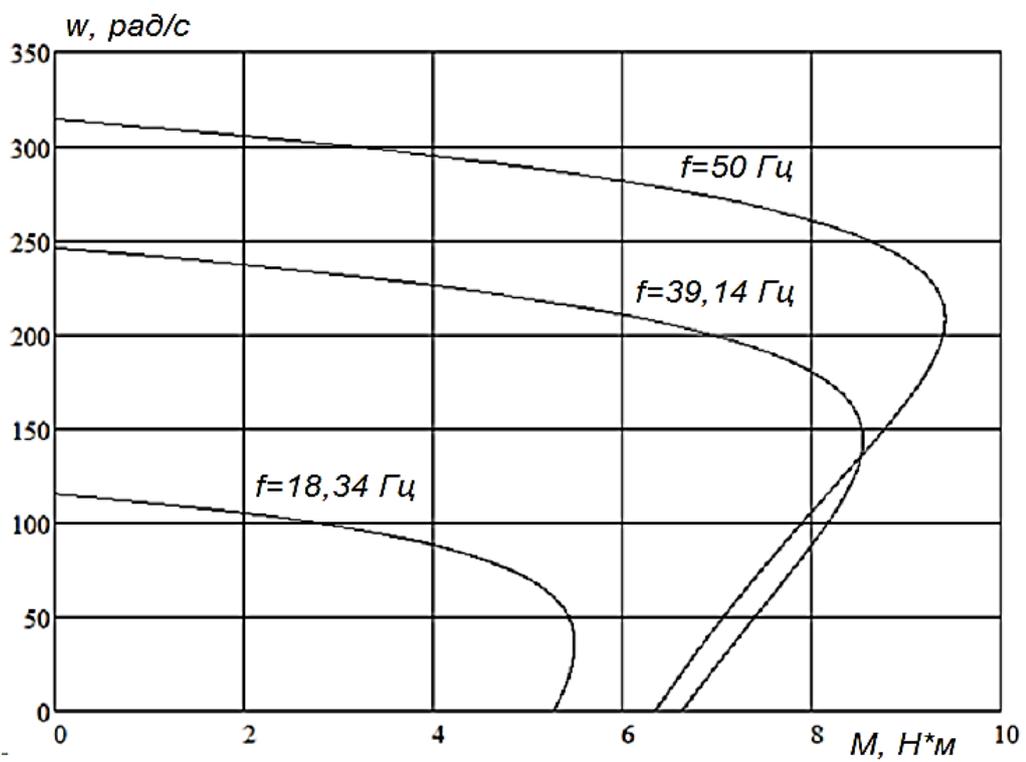


Рисунок 1.4.1.5 – Механические характеристики двигателя при законе регулирования $U/f = \text{const}$

1.4.2. Моделирование прямого пуска асинхронного двигателя

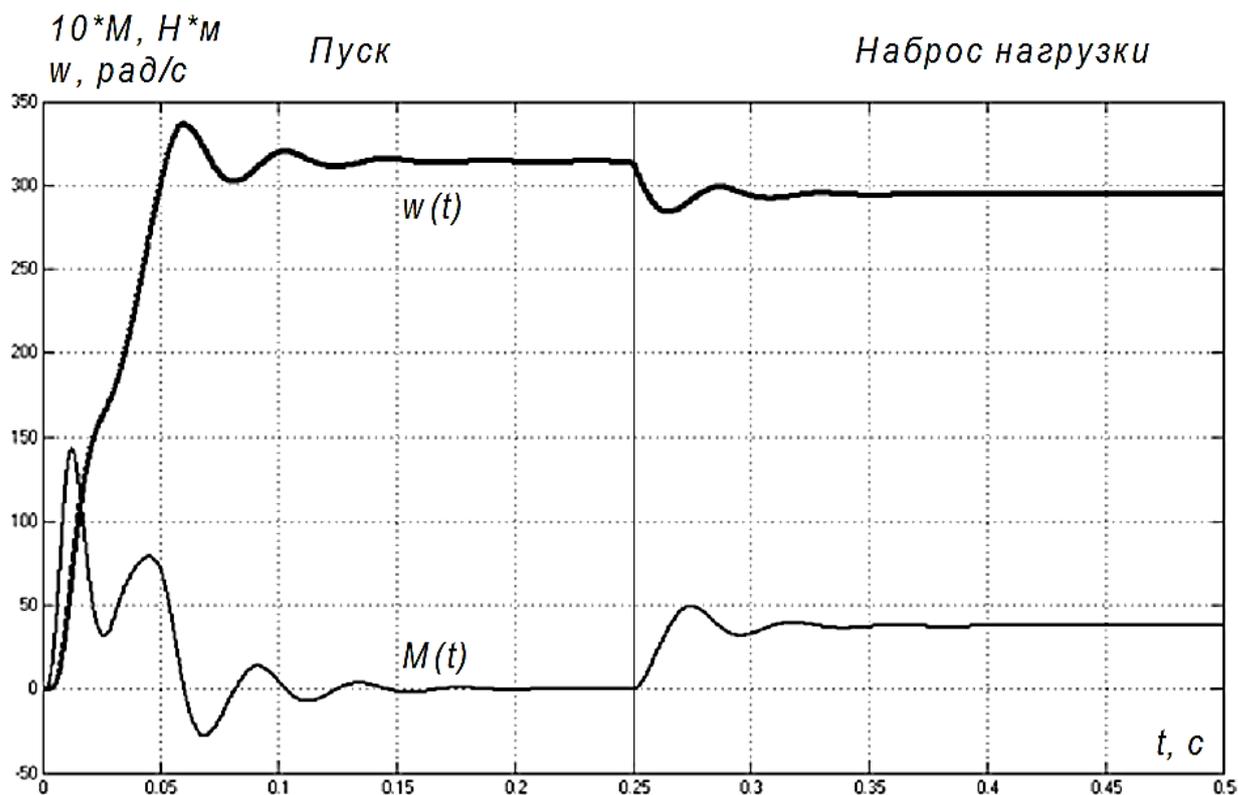


Рисунок 1.4.2.1 – Переходные процессы в АД при прямом пуске и набросе номинальной нагрузки

Получившийся переходный процесс будет определять динамические свойства асинхронного двигателя при моделировании полного процесса разморозки.

1.4.3. Моделирование прямого пуска электродвигателя с частотным законом управления $U/f = \text{const}$

Результаты имитационных исследований прямого пуска электродвигателя при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$ и значений частоты $f_{11} = 39,14$ Гц и $f_{12} = 18,34$ Гц приведены, соответственно, на рисунках 1.4.4.4 и 1.4.4.5

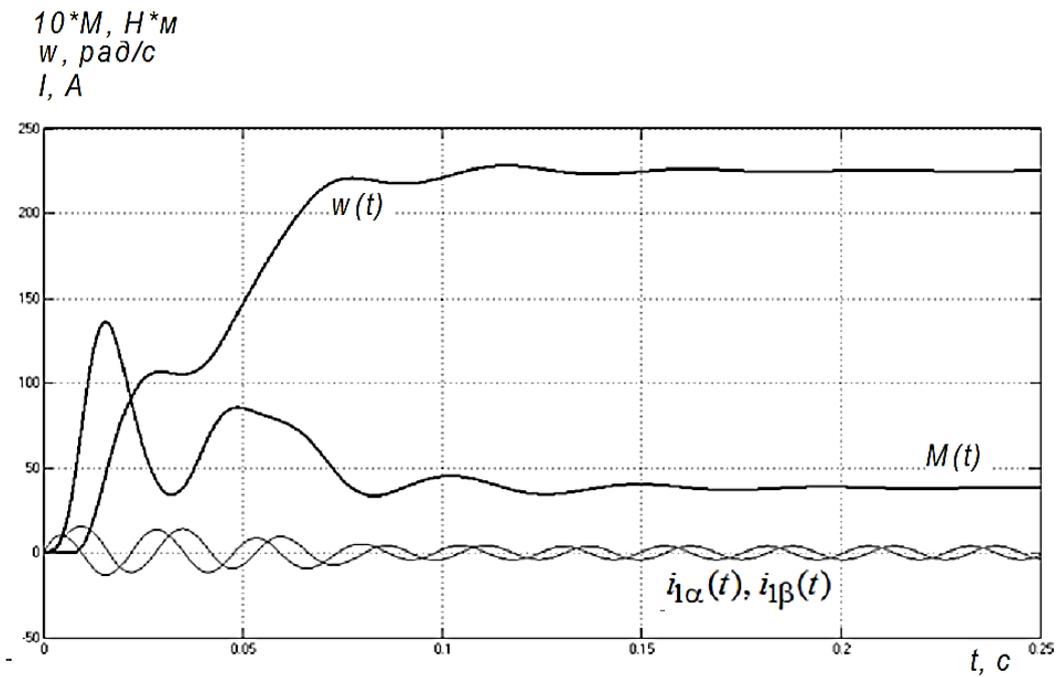


Рисунок 1.4.3.1 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f=\text{const}$ при значении частоты $f=39,14 \text{ Гц}$

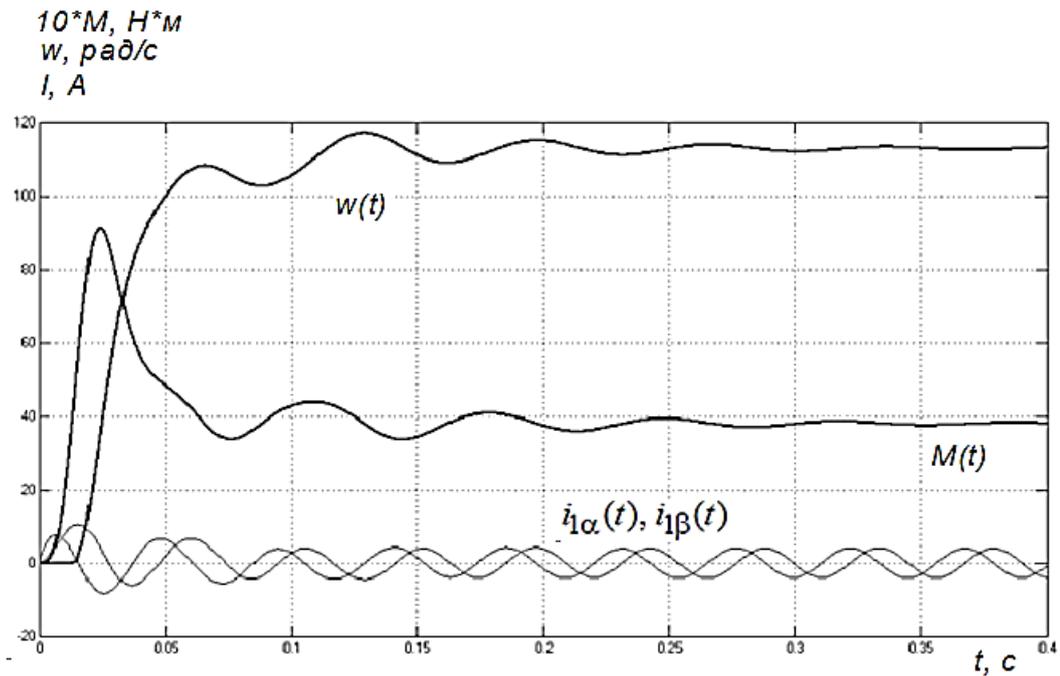


Рисунок 1.4.3.2 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f=\text{const}$ при значении частоты $f=18,34 \text{ Гц}$

1.4.4. Выбор способа управления скоростью двигателя в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД)

Основные способы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом и их показатели приведены в приложении Б. [11]

Принят способ управления – скалярное управление, с законом управления $U_1 / f_1 = const$, разомкнутая система, в том числе с коррекцией вольт-частотной характеристики; с диапазоном регулирования 2. Согласно выбранному способу управления выбирается соответствующий преобразователь [11].

1.4.5. Параметры преобразователя частоты

Параметры выбранного преобразователя частоты [12] сведены в таблице 1.4.5.1.

Таблица 1.4.5.1 – Параметры преобразователя частоты

Тип	Параметры питающей сети		Выходное напряжение U_H , В	Выходная частота f_H , Гц	Выходной ток		Рекомендуемая мощность P_2 , Вт
	$U_{1л}$, В	f_c , Гц			$I_{VLT.н}$, А	$I_{VLT.макс}$, А	
VLT fc51 “Danfoss”	3×220	50	380	(0-132)	3.7	5.6	1500

Несущая частота инвертора принимается $f_{ШИМ} = 8$ кГц.

В данном разделе, путем моделирования аналога, была показана правильность выбора насоса Grundfos CM1-10 A-R-G-E-AQQE. Полученные показатели соответствуют требуемым.

1.4.6. Выбор автоматического выключателя

$$I_{\text{дл}} = I_{\text{н.ЭД}} = 2,621 \text{ A}$$

$$I_{\text{расц}} = \frac{I_{\text{дл}}}{K_T} = \frac{2,621}{0,85} = 3,084 \text{ A}$$

Так как автомат будет установлен в шкафу, то $K_T=0,85$

На основании таблицы, (приложение В) по току расцепителя, выбирается автоматический выключатель ВА 51 – 25 с номинальным током расцепления 3,15 А.

Проверка:

$$I_{\text{мгн.ср}} = 10 \cdot I_{\text{расц}} = 30,84 \text{ A}$$

$$I_{\text{кр}} = I_{\text{пуск}} = K_i \cdot I_{\text{н}} = 6 \cdot 2,621 = 15,726 \text{ A}$$

$$I_{\text{мгн.ср}} \geq K \cdot I_{\text{пуск}}$$

$$30,84 \geq 1,4 \cdot 15,726 = 22,016 \text{ A}$$

Где $K=1,4$ для АВ с $I_{\text{н}} < 100 \text{ A}$.

Неравенство выполняется, следовательно, АВ выбран верно.

1.4.7. Расчет и выбор типа и сечения кабеля высокого напряжения

В распределительных сетях до 1000 В, выбор сечений питающей сети производится по длительно допустимому току:

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{ном}}}{k_{\text{прок}}} = \frac{2,621}{1} = 2,621 \text{ A},$$

$$I_{\text{доп}} \geq k_3 \cdot \frac{I_{\text{н.расц.}}}{k_{\text{прок}}} = 1 \cdot \frac{3,15}{1} = 3,15 \text{ A},$$

где $k_3 = 1$ – коэффициент защиты для сетей требующей защиты от перегрузки, находящийся в нормальном помещении и имеющих изоляцию из резины или аналогичную по тепловым характеристикам.

$k_{\text{прок}} = 1$ – поправочный коэффициент, зависящий от количества параллельно прокладываемых кабелей.

Выбран кабель марки ВВГ (1x0,75) с $I_{\text{доп}} = 15 \text{ A}$.

1.5. Моделирование системы

На основании полученных расчетных результатов и информационных данных представленных специалистами ООО «НПО ВЭСТ», была разработана и построена модель, обеспечивающая разморозку вентиляционной системы.

Моделирование будет производиться в программной среде SciLab.

Scilab — пакет прикладных математических программ, предоставляющий открытое окружение для инженерных (технических) и научных расчётов. Это самая полная общедоступная альтернатива MATLAB. [13]

Модель имеет следующие составные части:

1. ПИ-регулятор, обеспечивающий стабильную работу системы, с параметрами $T_i = 0,01$ с и $k_p=2$ (Рисунок 1.5.1).

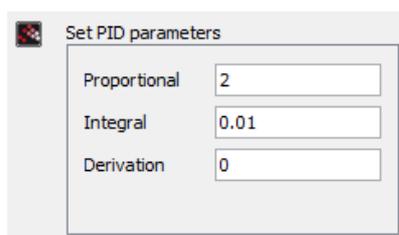


Рисунок 1.5.1 – Параметры блока «ПИ-регулятор»

2. Гистерезисный элемент, обеспечивающий работу системы в заданном диапазоне (Рисунок 1.5.2).

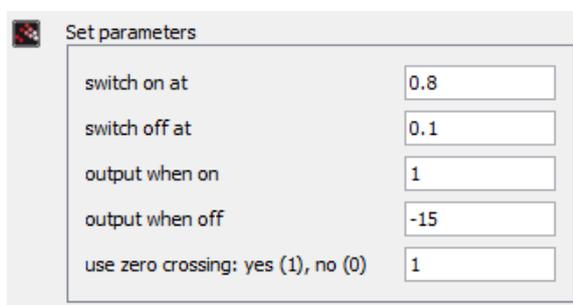


Рисунок 1.5.2 – Параметры блока «Гистерезисный элемент»

3. Ограничитель — блок, ограничивающий максимально возможное напряжение задания $U_{зад}=10$ В.

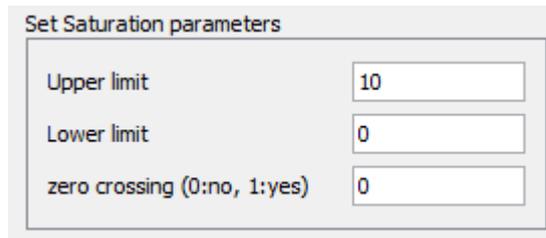


Рисунок 1.5.3 – Параметры блока «Ограничитель»

4. Основным исполнительным элементом системы будет являться насос, перегоняющий раствор теплоносителя по трубам и выполненный на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и управляющийся преобразователем частоты. В связи с тем, что переходный процесс нарастания инея и его разморозки протекает намного медленнее, чем переходные процессы самого двигателя, данная связка элементов будет упрощена. Преобразователь частоты упрощен до апериодического звена первого порядка с постоянной времени $T_{пч} = 0,2$ с., а асинхронный двигатель колебательным звеном с постоянными времени, $T_{ад1} = 0,15$ с и $T_{ад2} = 0,03$ с. Из сравнения переходных процессов полной модели и звена заменившего его, видно что колебательность и перерегулирование оказались схожими. (Рисунок 1.5.4).

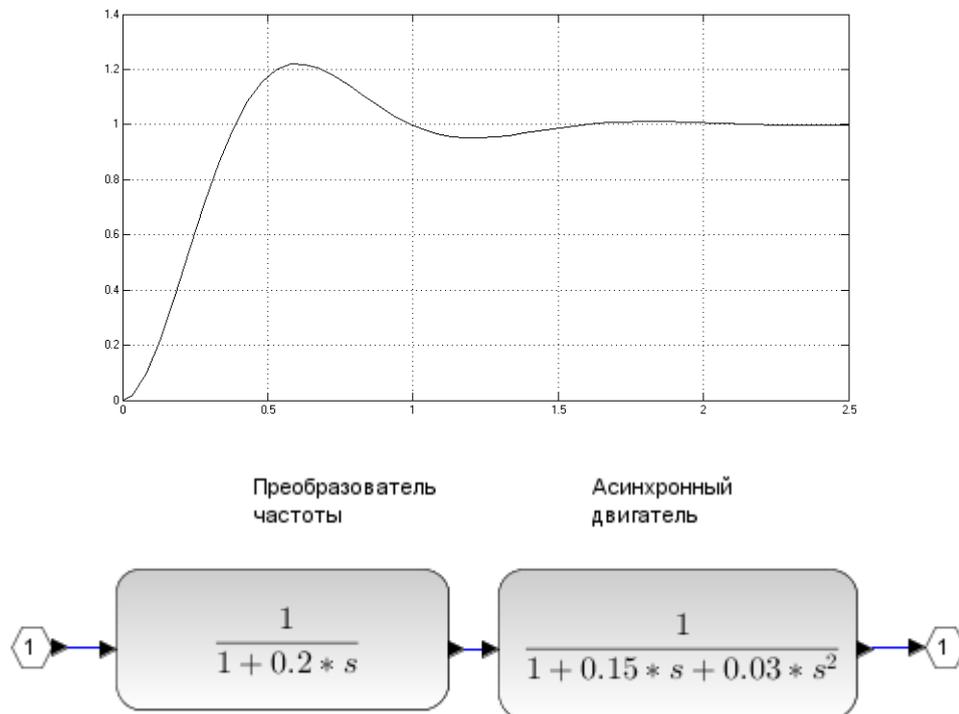


Рисунок 1.5.4 – Блок, описывающий работу системы ПЧ – АД в системе

5. Переход от сигнала напряжения подаваемого с датчиков системы «Преобразователь частоты – Асинхронный двигатель», к температурному сигналу будет осуществляться с помощью функции:

$$T_{\text{ПОМ}} + (T_{\text{ВН}} - T_{\text{ПОМ}}) \cdot K_{\text{ЭФ}} \cdot \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{упр}}} = T_{\text{ИН}}$$

где, $T_{\text{ПОМ}}$ – температура помещения;

$T_{\text{ВН}}$ – температура внешнего воздуха;

$K_{\text{ЭФ}}$ – коэффициент эффективности рекуператора

$U_{\text{вх}}/U_{\text{упр}}$ – величина, обратная максимальному значению напряжения;

Данная функция показывает, какой величине напряжения будет соответствовать температура на входе с учетом эффективности рекуператора. Данная эффективность также является коэффициентом пропорциональности для звена «Преобразователь частоты – Асинхронный двигатель», представленной в модели

Функция, собранная в программной среде SciLab представлена на рисунке 1.5.5.

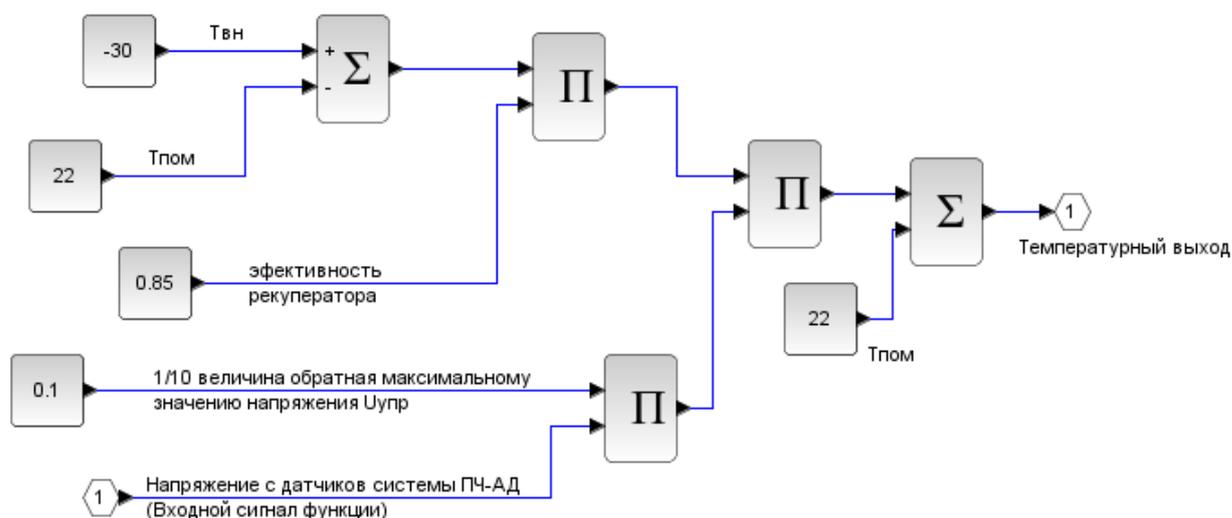


Рисунок 1.5.5 – Функция отображения в частотном управлении с температурой на выходе

6. Звено, характеризующее процесс нарастания инея представлено двумя, последовательно соединенными апериодическими звеньями первого порядка,

с постоянными времени 80 с и 20 с (Рисунок 1.5.6). Данные величины постоянных времени выбраны из описания кривых разгона, представленных специалистами ООО «НПО ВЭСТ».

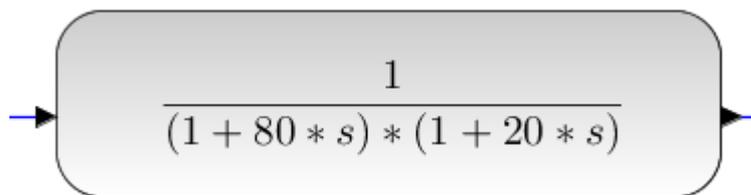


Рисунок 1.5.6 – Звено, описывающее переходный процесс нарастания инеевого слоя

7. Процесс разморозки описывает апериодическое звено первого порядка с постоянной времени 30 с и коэффициентом пропорциональности 0,0002 (Рисунок 1.5.7).

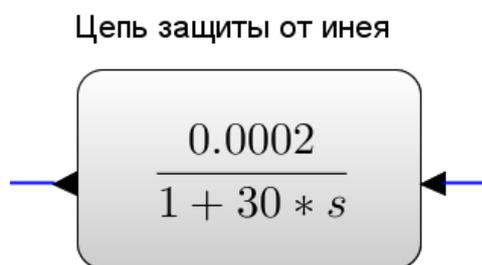


Рисунок 1.5.7 – Звено защиты от инея

Данные звенья образуют общую структуру. Основным исполнительным элементом системы будет являться насос, перегоняющий раствор теплоносителя по трубам и выполненный на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Переход на необходимую температуру будет описываться передаточной функцией, описанной выше:

$$W(s) = \frac{1}{(1 + 80s)(1 + 20s)}$$

На выходе у данного звена будет температура T_{out} . Данный параметр определяет температуру на выходе вытяжной части установки, соответственно, изменяя эффективность рекуперативной установки, будет

меняться температура. В этом и заключается суть работы: потери, полученные из-за неэффективной работы и превращенные в тепло, будут нагревать вентиляционную шахту и плавить иней.

В цепи обратной связи происходит операция сложения $-T_{OUT}$ и $T_{п.и.}$. При достижении T_{OUT} температуры в $-15^{\circ}C$, начинается процесс нарастания иневого слоя на стенках шахты. Условно, время нарастания инея, при котором передача воздушных потоков ухудшится на 80%, принято $t_{у.в.} = 800$ с. Так при плохой воздушной проводимости, срабатывает «Цепь защиты от инея», которая посылает сигнал на гистерезисный элемент, который сравнивает соответствующие значения и передает их ПИ-регулятору.

Окончательный вид модели в среде Scilab изображен в приложении Г.1.

Переходные процессы, протекающие в автоматизированной системе защиты от инея представлены в приложении Г.2.

Переходные характеристики сняты с выходов трех звеньев:

1. На выходе системы «ПЧ-АД»;
2. На выходе цепи перехода на необходимую температуру;
3. На выходе цепи разморозки.

На основании графиков переходных процессов можно сделать вывод о том, что модель является рабочей, так как работа ПИ-регулятора, обеспечивающая стабильность работы системы «ПЧ-АД» в смоделированной системе, является весьма корректной, а значения на выходах цепей вывода температуры и избавления от инея, после переходного процесса устанавливаются в стабильное положение.

Далее, чтобы окончательно убедиться в правильности построения модели и возможности ее внедрения в реальные объекты, необходимо будет определить, является ли система устойчивой.

1.6. Проверка устойчивости

Полученная модель системы разморозки оказалась рабочей, но для дальнейшего ее использования, необходимо провести проверку устойчивости

Для проверки устойчивости будет использован внутренний контур, изображенный на рисунке 1.6.1.



Рисунок 1.6.1 – Контур для определения устойчивости

Данный контур выбран исходя из того, что система работает в наиболее неустойчивом состоянии в режиме максимальной эффективности, то есть когда контур разморозки отключен.

Проверка будет производиться в среде CLASSiC 3.01, рабочая схема представлена на рисунке 1.6.2.

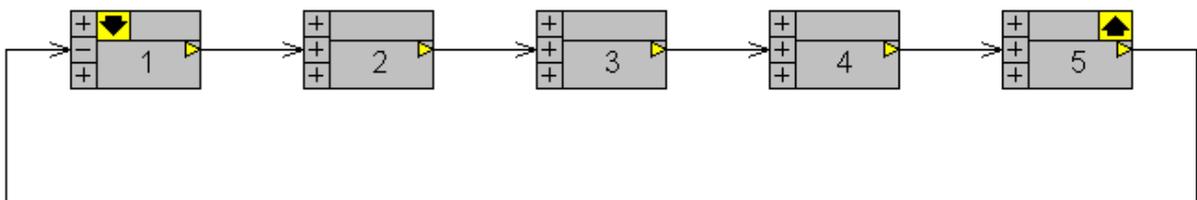


Рисунок 1.6.2 – Контур для определения устойчивости в среде CLASSiC 3.01

Первый блок представляет из себя ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{K_p + T_i \cdot s \cdot K_p}{T_i \cdot s}$$

где $K_p = 21$ – коэффициент пропорциональности П-части

$T_i = 84$ с – интегральная постоянная времени

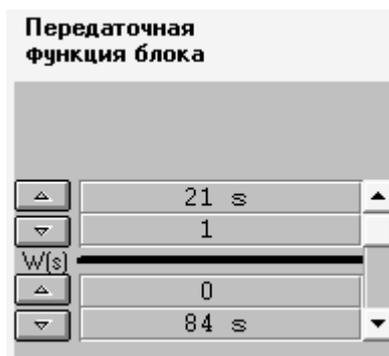


Рисунок 1.6.3 – ПИ – регулятор в программной среде CLASSiC 3.01

Второй блок содержит передаточную функцию описывающую асинхронный электродвигатель в данной системе, а также температурную функцию, которая представлена в виде коэффициента пропорциональности равном 0,407.

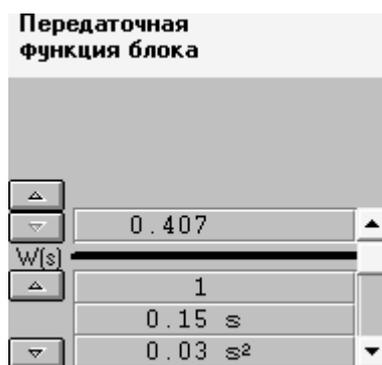


Рисунок 1.6.4 –Асинхронный двигатель в программной среде CLASSiC 3.01

Третий блок описывает работу преобразователя частоты.

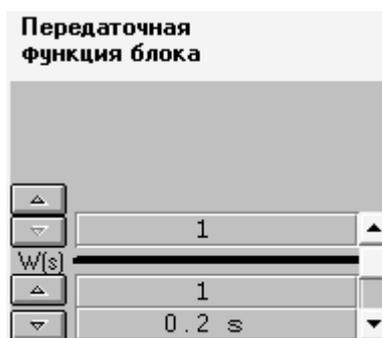


Рисунок 1.6.5 –Передаточная функция преобразователя частоты в программной среде CLASSiC 3.01

Четвертый и пятый блоки в совокупности представляют из себя передаточную функцию перехода на необходимую температуру



Рисунок 1.6.6 – Блоки, описывающие переход на необходимую температуру в программной среде CLASSiC 3.01

Переходный процесс и показатели качества замкнутой системы представлены на рисунке 1.6.7.

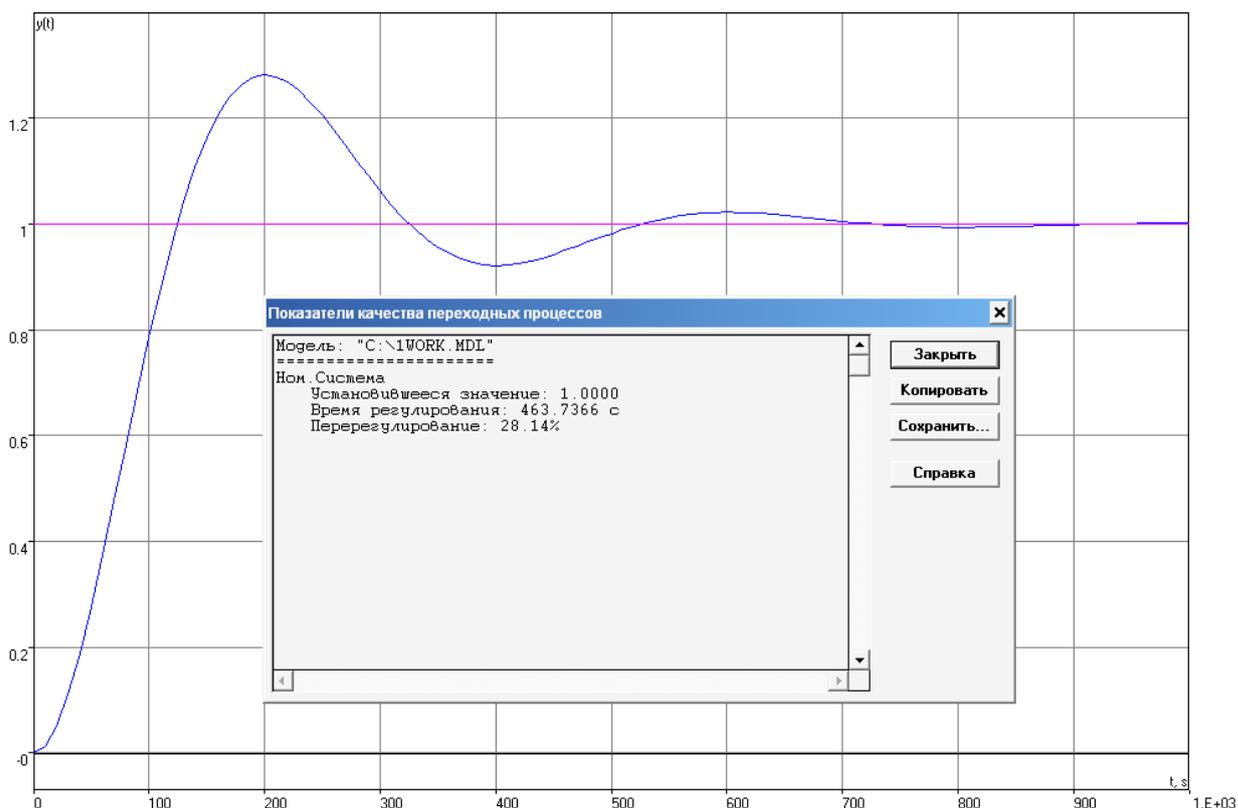


Рисунок 1.6.7 – Переходный процесс и его показатели качества в программной среде CLASSiC 3.01

Для оценки устойчивости будет использован критерий устойчивости Найквиста. Для дальнейшей оценки необходимо разомкнуть систему (рисунок 1.6.10).

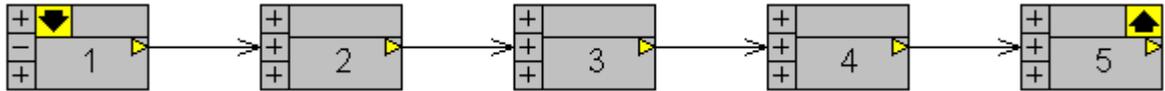


Рисунок 1.6.10 – Разомкнутая система.

Далее необходимо построить годограф и определить устойчивость.

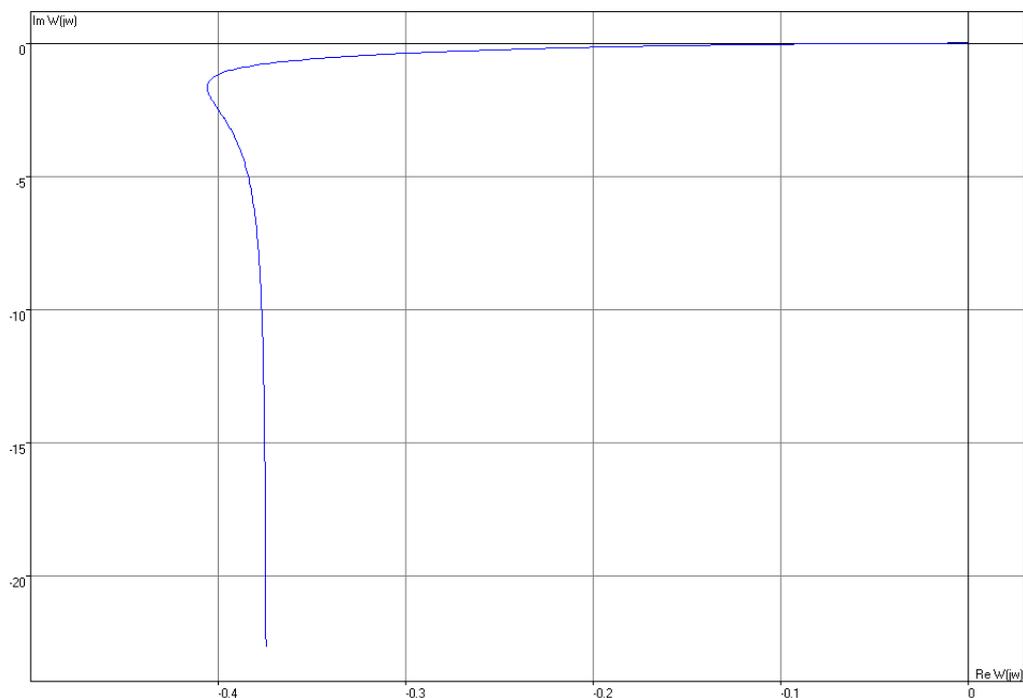


Рисунок 1.6.11 – АФХ разомкнутой системы

На основании полученного годографа, можно сделать вывод о том, что система является устойчивой, поскольку критерий устойчивости Найквиста гласит о том, что если корней в правой полуплоскости нет, то годограф $W(j\omega)$ не должен охватить точку $(-1, j0)$. [14] Что соответствует полученным результатам.

Далее необходимо проанализировать частотные характеристики разомкнутой системы, на основании которых можно определить качество оптимизации системы.

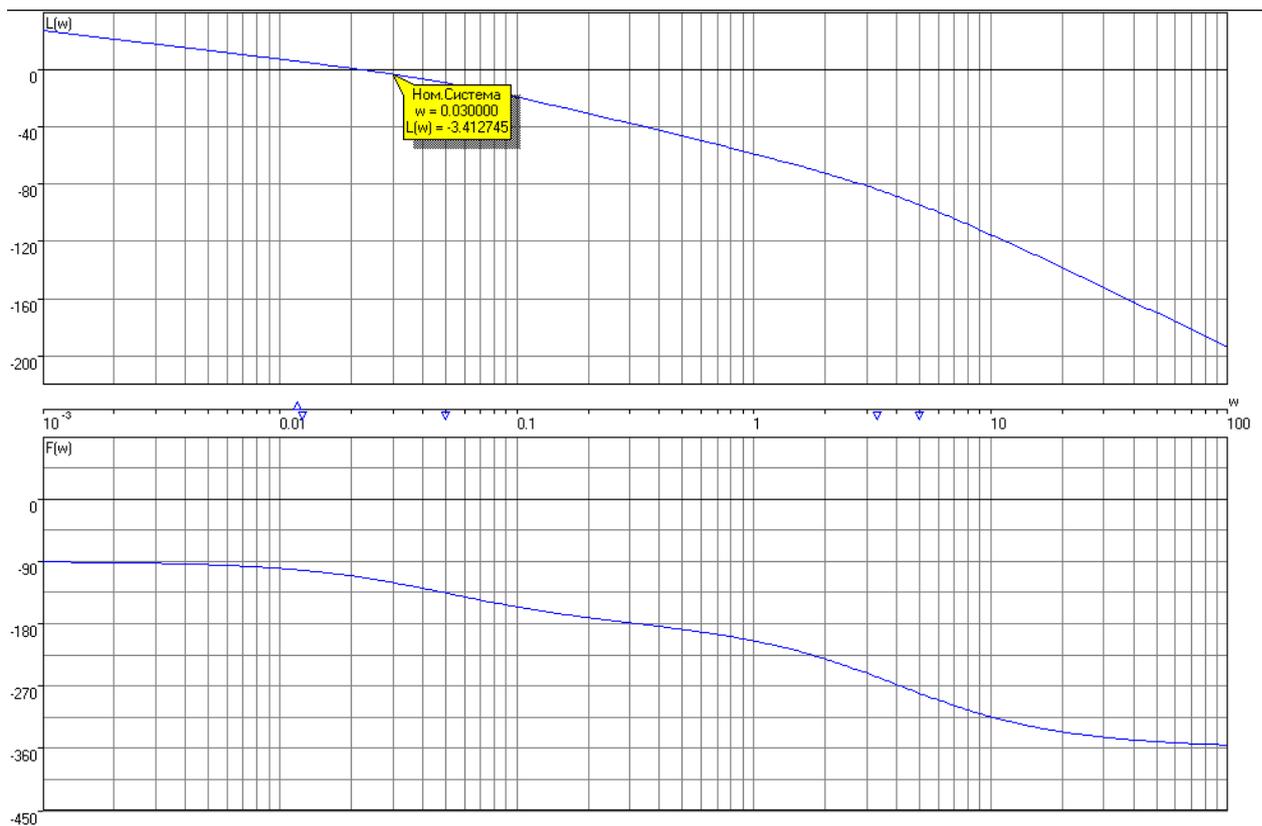


Рисунок 1.6.13 – ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы.

На основании полученных частотных характеристик, можно сделать вывод о том, что система, настроенная на симметричный оптимум, находится ни в самом оптимальном состоянии, так как точка частоты среза смещена относительно симметричного положения между двумя соседними точками сопряжения. Для исправления данного положения, частотную характеристику нужно поднять на 3,41 дБ, для этого нужно ввести в систему корректирующий коэффициент равный:

$$K_{кор} = 10^{\frac{3,4}{20}} = 1,479$$

После внедрения данного коэффициента, коэффициент пропорциональности асинхронного двигателя изменится и станет равным 0,602:

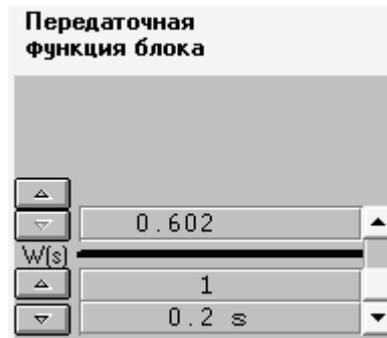


Рисунок 1.6.14 –Асинхронный двигатель после оптимизации в программной среде CLASSiC 3.01

Частотные характеристики разомкнутой оптимизированной системы. ЛАЧХ и ЛФЧХ (Рисунок 1.6.15).

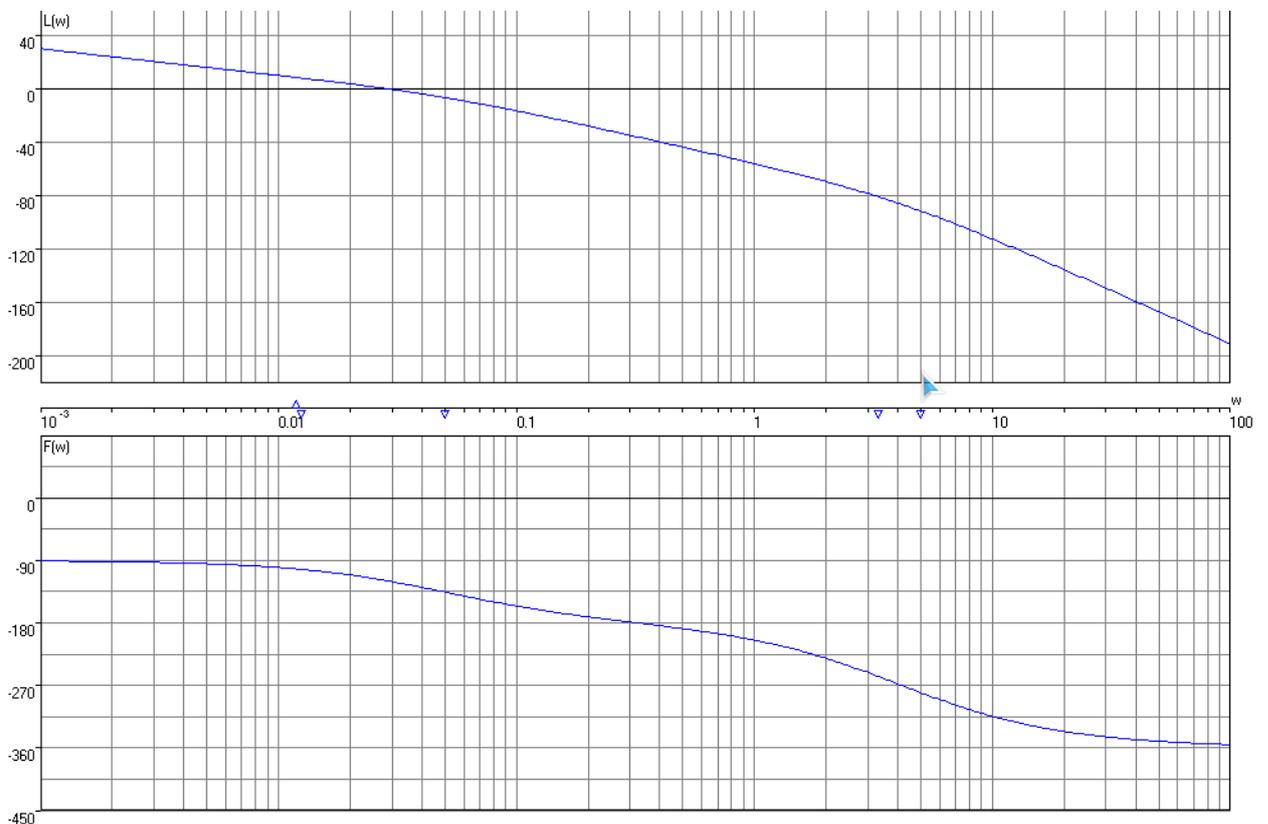


Рисунок 1.6.14 – ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы.

Как видно из характеристики, после корректировки, частота среза установилась посередине между двумя соседними точками сопряжения, что свидетельствует о том, что система оптимизирована на симметричный оптимум.

Далее, необходимо исправить данный коэффициент, в полной модели, описывающей весь процесс, в программной среде SciLab. Ниже представлены графики до (Рисунок 1.6.15) и после (Рисунок 1.6.16) корректировки.

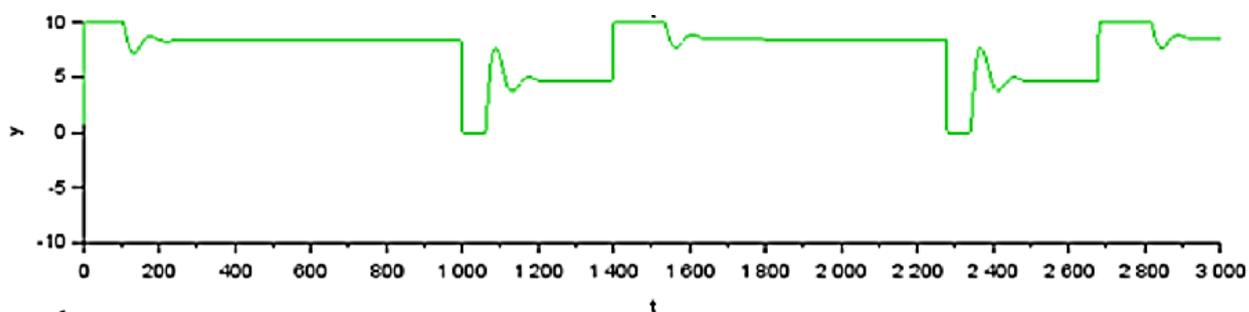


Рисунок 1.6.15 – Переходные процессы системы до корректировки

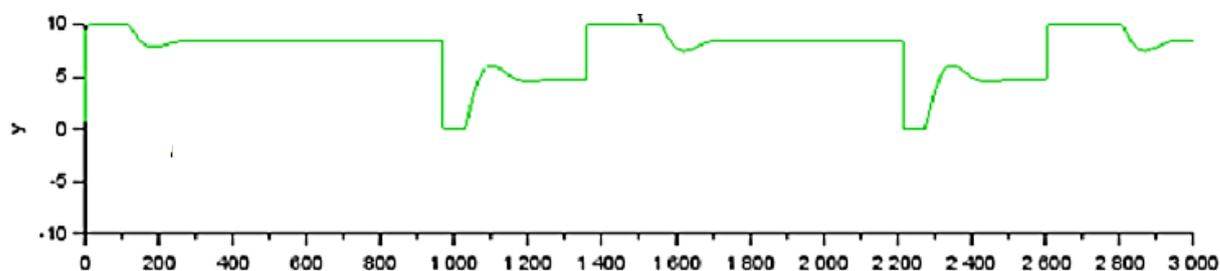


Рисунок 1.6.16 – Переходные процессы системы после корректировки

Из переходных процессов, полученных до и после корректировки, видно, что характеристики, полученные после корректировки уменьшились колебательность и перерегулирование.

1.7. Моделирование в среде CODESYS

Так как система оказалась устойчивой, то ее можно использовать в реальных системах. Далее модель будет собрана в программной среде CODESYS с целью переноса разработки модели в реальный регулятор. Данная среда выбрана в связи с ее распространенностью среди инженеров.

CODESYS (акроним англ. Controller Development System) — инструментальный программный комплекс промышленной автоматизации.

Основой комплекса CODESYS является среда разработки прикладных программ для программируемых логических контроллеров (ПЛК). Она распространяется бесплатно и может быть без ограничений установлена на нескольких рабочих местах.

В CODESYS для программирования доступны все пять определяемых стандартом IEC 61131-3 (МЭК 61131-3) языков:

IL (Instruction List) — ассемблер-подобный язык;

ST (Structured Text) — Pascal-подобный язык;

LD (Ladder Diagram) — Язык релейных схем;

FBD (Function Block Diagram) — Язык функциональных блоков;

SFC (Sequential Function Chart) — Язык диаграмм состояний.

В дополнение к FBD поддержан язык программирования CFC (Continuous Function Chart) с произвольным размещением блоков и расстановкой порядка их выполнения (Рисунок 1.7.1). [15]

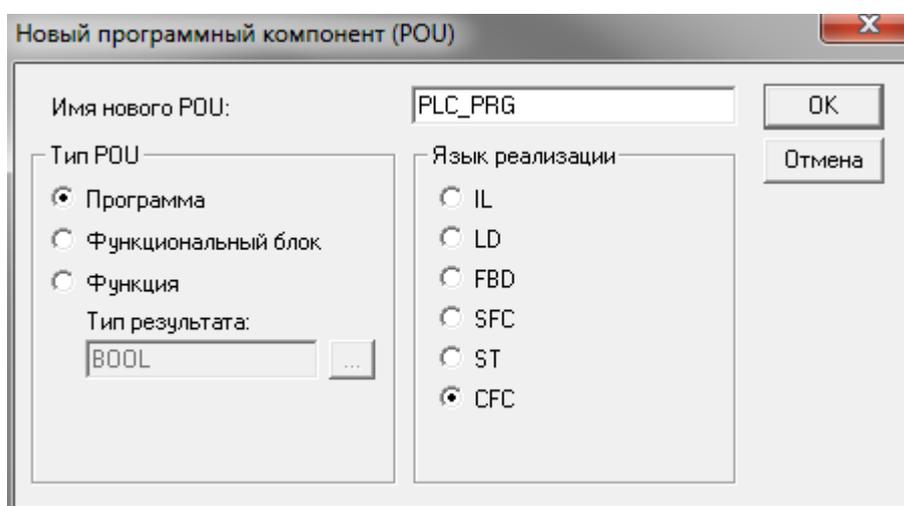


Рисунок 1.7.1 – Создание нового программного объекта в среде CODESYS

Реализация проекта, представленного в данной выпускной квалификационной работе в среде CODESYS, будет основана на языке программирования CFC, так как он отличается простотой реализации и некоторой схожестью с программами, изученными ранее.

Главный экран, представленный на рисунке 1.7.2, представляет из себя несколько окон, в данном случае главным из них является окно программирования в CFC (1). Также присутствует окно ST (Structured Text) (2), окно показывающее структуру системы (3), окно просмотра сообщений, предупреждений и ошибок (4), а также стандартная для многих программ панель инструментов (5).

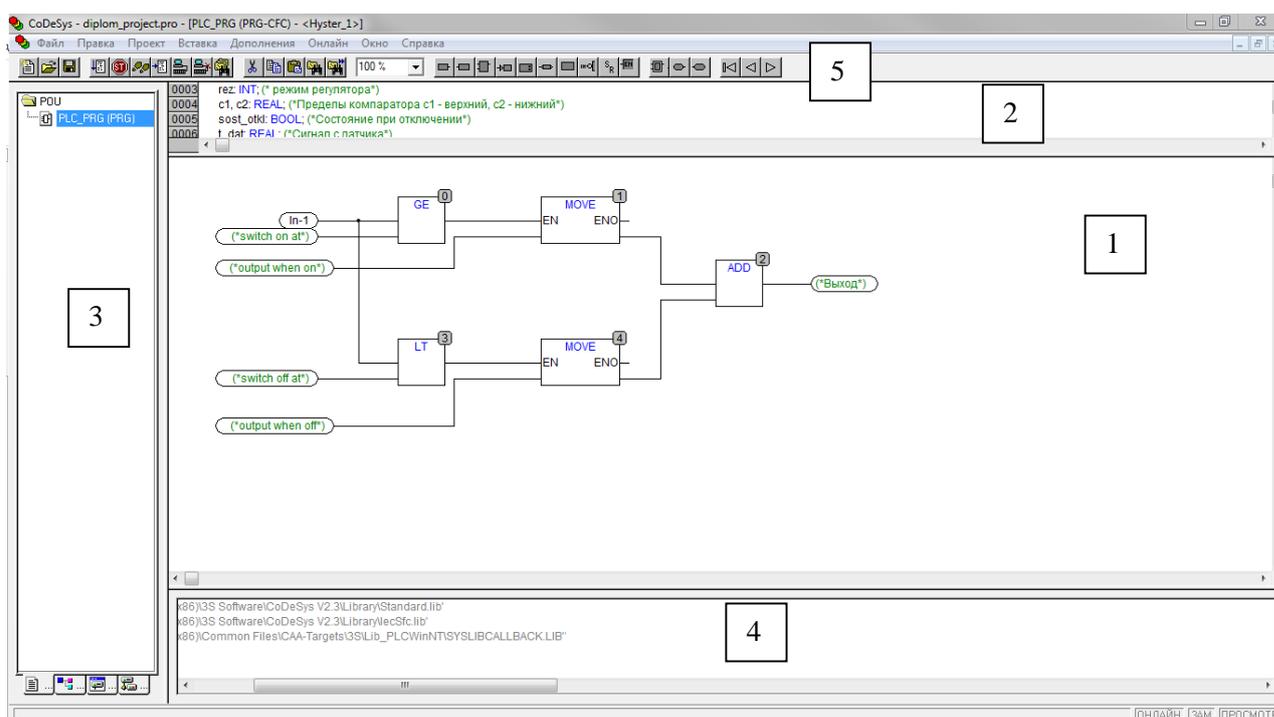


Рисунок 1.7.2 – Главный экран программной среды CoDeSys

Из-за особенностей представленного программного обеспечения, многие дополнительные блоки, которые были в других программных средствах, отсутствуют. Поэтому, одной из задач данного раздела будет разработка подобных структур.

Таким образом, блок «Гистерезисный элемент» составленный на основе логических блоков и блока сравнения в среде CODESYS, будет иметь вид, представленный на рисунке 1.7.3.

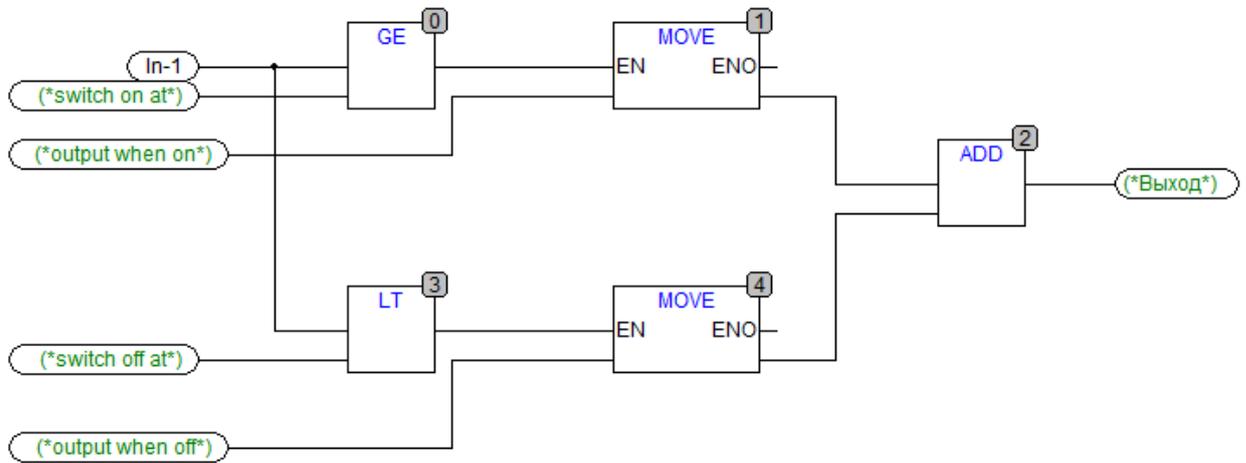


Рисунок 1.7.3 – Блок «Гистерезисный элемент» в среде CODESYS

Далее, для дальнейшего составления схемы, все элементы с оператором Лапласа необходимо привести к удобной для программирования, дискретной форме, которая будет применена в данном средстве программирования. В качестве примера будет рассмотрено типовое апериодическое звено первого порядка:

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{1}{1+Ts}$$

Далее будут произведены следующие преобразования:

$$x(s) = y(s) + T \cdot s \cdot y(s)$$

$$x = y + T \cdot \frac{y_{+1} - y}{\Delta t}$$

$$\text{где } s \cdot y(s) \equiv \frac{dy(t)}{dt} \cong \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

Данная система представлена следующим образом:

$$y = y + (x - y) \cdot \Delta t / T$$

Реализация данного блока в CODESYS представлена на рисунке 1.7.4:

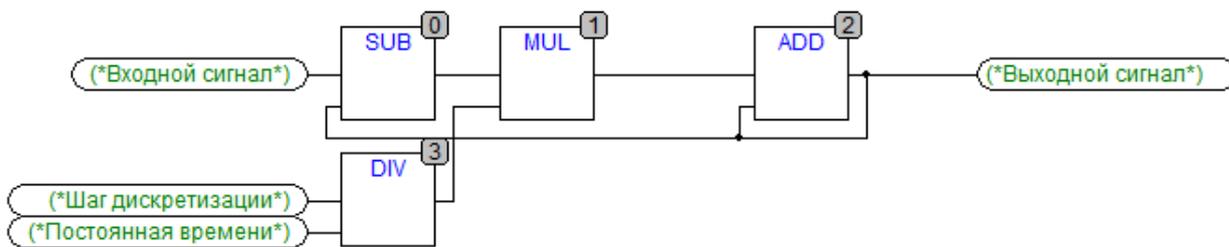


Рисунок 1.7.4 – Блок «Transfer function» в среде CODESYS

При подобной реализации блоков, система будет применима в реальных системах.

Интегратор представлен в следующем виде (Рисунок 1.7.5):

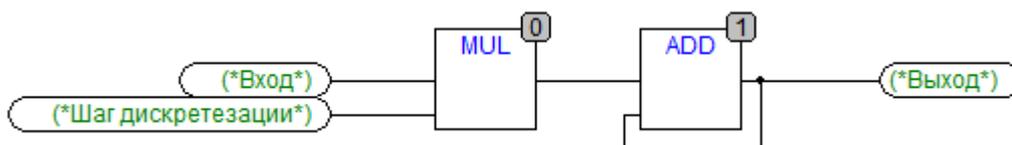


Рисунок 1.7.5 – Блок «Интегратор» в среде CODESYS

ПИ-регулятор (Рисунок 1.7.6):

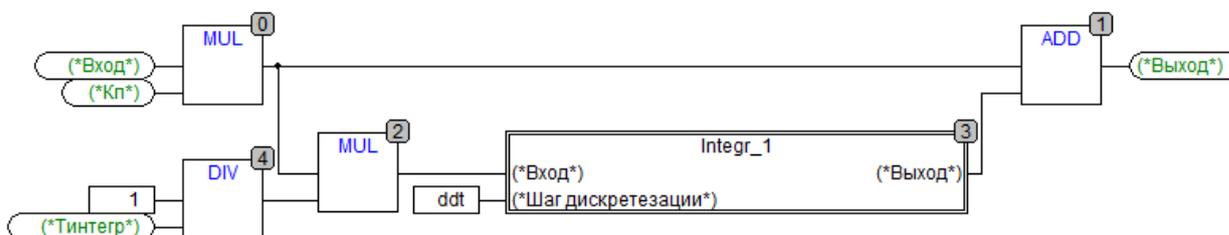


Рисунок 1.7.6 – Блок «ПИ-регулятор» в среде CODESYS

Ограничитель с верхним пределом ограничения (Рисунок 1.7.7):

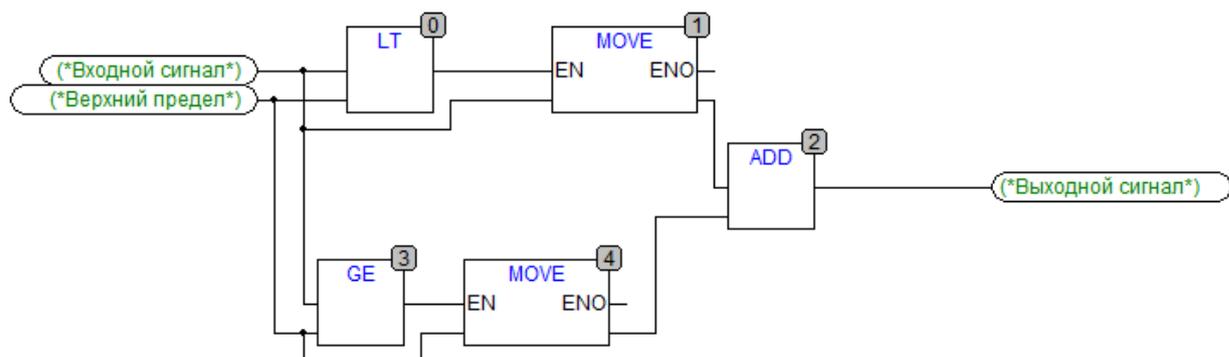


Рисунок 1.7.7 – Блок «Ограничитель» в среде CODESYS

В данном случае, можно обойтись лишь ограничением верхнего предела. Элемент «MOVE» присваивает значение одной переменной другой соответствующего типа. Управление производится с помощью входа «EN» (разрешать или запрещать операцию). Только если EN=TRUE (1), значению выходной переменной будет присвоено значение входной

Функция отображения в частотном управлении, с температурой на выходе представлена следующим образом (Рисунок 1.7.8):

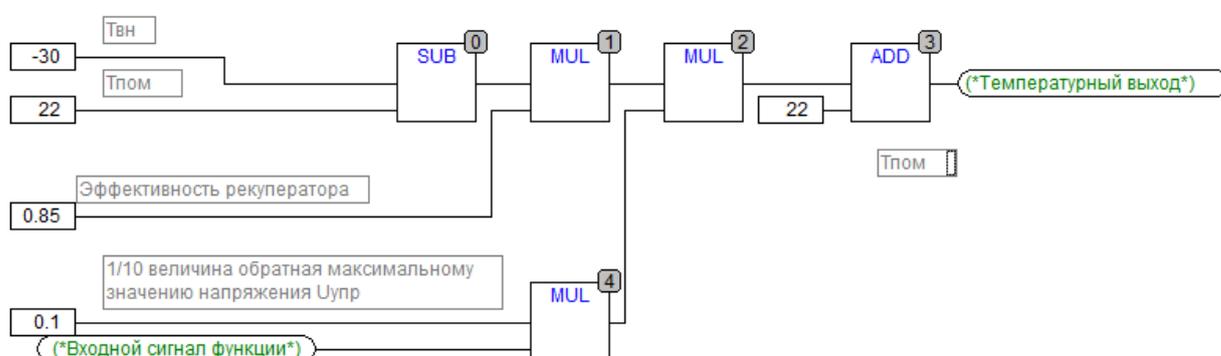


Рисунок 1.7.8 – Функция отображения в частотном управлении, с температурой на выходе в среде CODESYS

Оставшиеся блоки имеют схожую с вышеописанными блоками структуру, так как блоки «Преобразователь частоты», «Асинхронный двигатель», «Переход на нужную температуру», «Цепочка разморозки» представлены в виде аperiodических звеньев, но с разными коэффициентами передачи и постоянными времени.

Имитационная модель, составленная ранее и построенная в SciLab в среде CODESYS, будет иметь вид, представленный в приложении Д.

1.8. Подключение к программируемому логическому контроллеру

Далее, для привязки данной модели к реальному устройству, необходимо подключить к реальным устройствам. Из системы моделирования была удалена часть, относящаяся к модели, и оставшиеся неподключенные линии, являются датчиками или исполнительными элементами.

Упрощенная схема представлена на рисунке 1.8.1

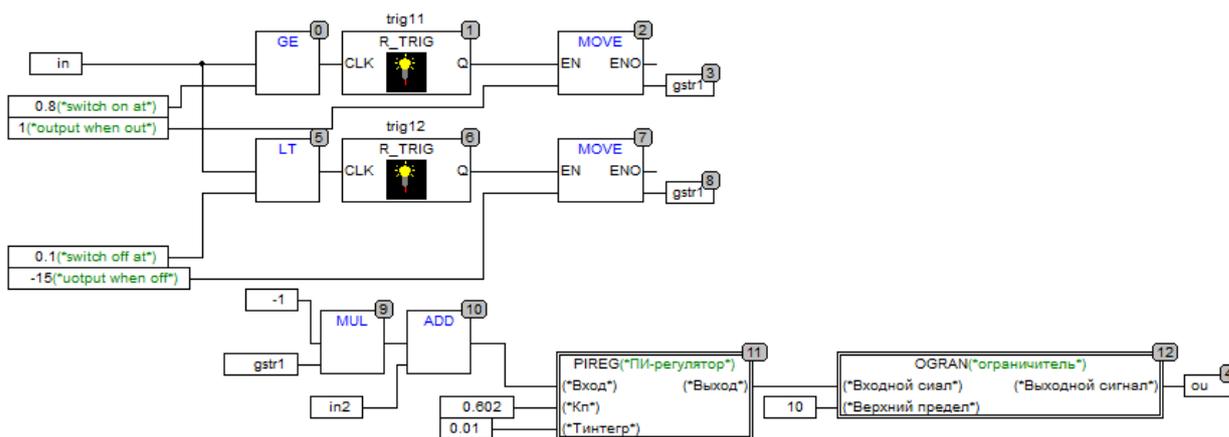


Рисунок 1.8.1 – Схема для настройки контроллера

Выбор логического контроллера будет производиться из модельного ряда контроллеров ОВЕН ПЛК150, так как данный вид программируемых контроллеров поддерживается средой CoDeSys. Основанием для выбора будет служить следующее описание моделей [16] (рисунок 1.8.2)



Рисунок 1.8.2 – Модельный ряд контроллеров ОВЕН ПЛК150-220.

В результате был выбран ОВЕН ПЛК150-220.А-L.

Представленный контроллер питается от сети 220 В, и имеет 4 аналоговых входа и 2 выхода, что вполне достаточно, для реализации данного решения.

Принципиальная схема ОВЕН ПЛК150-220.А-L представлена в приложении Е.1.

Ко входу «in»(), разработанной модели, необходимо подключить датчик перепада давления, для контроля уровня заиневаания. Уровень заиневаания будет измеряться в относительных единицах (где 0 – полное заиневаание, 1 – без инея). Для данного датчика, будет использован аналоговый вход 1.

Информацию о перепаде давления будет предоставлять дифференциальный преобразователь давления Polar Bear DPM-2500D [17] (Приложение Е.2).

Необходимо произвести настройку в CoDeSys (Рисунок 1.8.3)

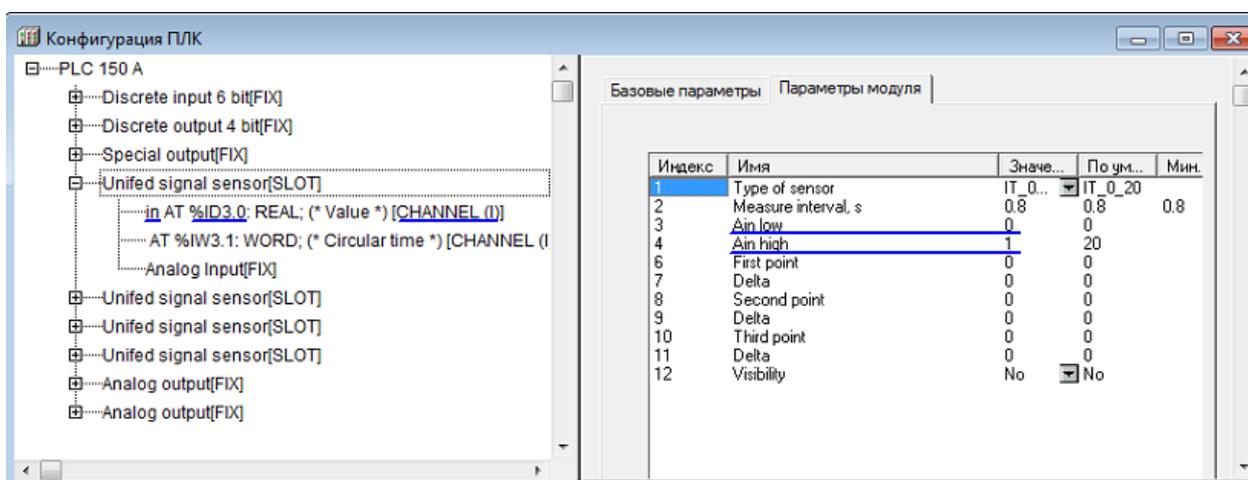


Рисунок 1.8.3 – Настройка датчика в среде CoDeSys

Данному входу соответствует идентификатор №3. Также здесь присвоена переменная «in» и предельные значения соответствуют 0 и 1.

Аналогично производится настройка датчика температуры, который подключается ко входу «in2».

В случае ограниченного бюджета, в системе можно использовать дифференциальное реле давления, переключающее систему в соответствующий режим при определенных заданных условиях.

В данном случае в системе будет применен датчик Polar Bear DPS-500N, производства компании «Арктика» [18] (Приложение Е.3).

Привязка датчика к системе будет осуществляться в программной среде CoDeSys, схема подключения представлена на рисунке 1.8.4.

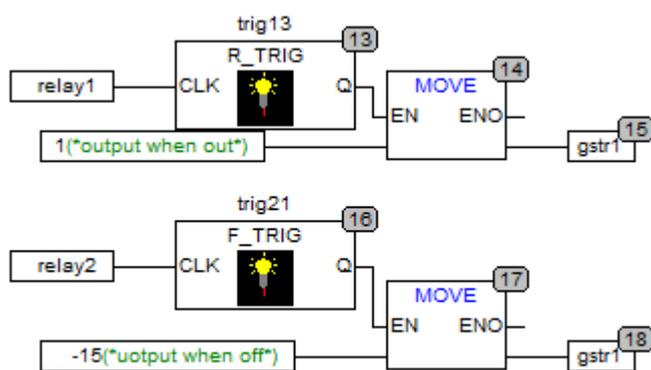


Рисунок 1.8.4 – Схема подключения выходов реле Polar Bear DPS-500N

Где выход «relay1» является нормально открытым контактом реле давления, а «relay2» нормально закрытым. При достижении предельных значений, реле срабатывает и элемент «MOVE» пропускает сигнал задания ((*output when off*) и (*output when out*)), при этом фиксируясь триггером.

Данные выходы будут подсоединены к дискретным входам предоставленного логического контроллера (рисунок 1.8.5).

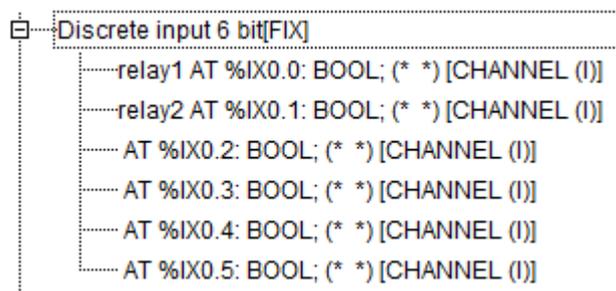


Рисунок 1.8.5 – Подключение выходов реле перепада давления

Для лучшей совместимости, будет выбран датчик, из модельного ряда ОВЕН. Основанием для выбора будет служить следующее описание моделей датчиков [19] (Приложение Е.4).

В результате выбран датчик ОВЕН ДТС045-50М.В3.20.

Также для представленного датчика необходимо выбрать программируемый нормирующий температурный преобразователь. Для лучшей совместимости был выбран преобразователь ОВЕН. Основанием для выбора будет служить следующее описание моделей преобразователей (Приложение Е.5).

В результате выбран преобразователь температуры ОВЕН НПТ-2.11.1.2.
Настройка в CoDeSys (Рисунок 1.8.6)

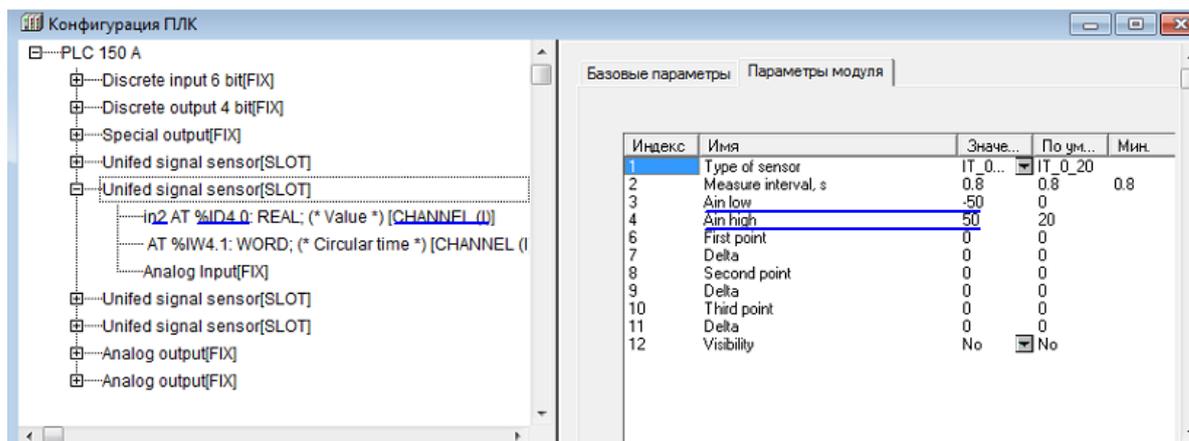


Рисунок 1.8.6 – Настройка датчика в среде CoDeSys

Данному входу соответствует идентификатор №4. Также здесь присвоена переменная «in2» и предельные значения соответствуют -50 и 50.

Аналогично с выходом.

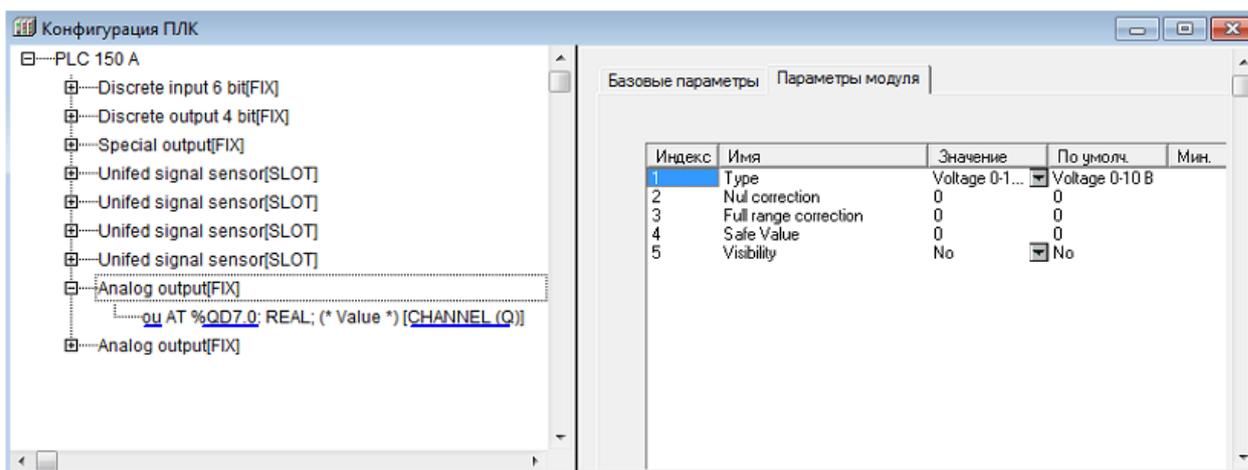


Рисунок 1.8.7 – Настройка аналогового выхода в среде CoDeSys

Данному выходу соответствует идентификатор Q. Также здесь присвоена переменная «ou» и предельные значения управляющего сигнала соответствуют 0 – 10 В.

На основании полученных результатов, была построена принципиальная схема, представленная в Приложении Ж, пригодная для монтажа реальной схемы и является исходной информацией для монтажника, выполняющего сборку и установку. Все элементы являются доступными и выбраны по методикам, которые были освоены в процессе обучения. Специалист производящий монтаж должен обладать 3 разрядом и группой допуска (до 1000 В) по электробезопасности не ниже 3

При эксплуатации и испытаниях установки должны соблюдаться «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей», «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и требования ГОСТ 12.3.019.

Для получения наилучших показателей, при пуско-наладке возможно изменение параметров регулирующих компонентов модели в ПЛК.

Вывод

В данной выпускной квалификационной работе, на основании знаний, полученных за период обучения по специальности, была спроектирована рекуперативная установка на базе системы, которая включает в себя асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и преобразователь частоты.

На основании данных о рекуперативной установке, предоставленных специалистами из ООО «НПО ВЭСТ», предложено техническое решение по модернизации. Основанием для модернизации служила необходимость улучшения экономических показателей в холодный период времени и показателей срока службы данной системы.

Поиск решения проблемы производился в российских и международных патентных базах (<http://www1.fips.ru>, <http://ru.espacenet.com/>), крупнейшей в мире базе рефератов и цитирования – Scopus, политематической реферативно-библиографической и наукометрической базе данных – Web of Science. Направление развития данного проекта было выбрано на основании проанализированных литературных источников.

Реализация проекта производилась при помощи современных математических (MATLAB, SciLab) и научных средств, была использована специализированная литература и учебный материал по исследованию устойчивости (критерий Найквиста), а также выбору и настройке регулятора, в данном случае был выбран ПИ-регулятор настроенный на симметричный оптимум.

Были определены технические характеристики, на основании которых произведен выбор оборудования. Выбор производился с помощью различных справочных документов и руководств, представленных производителями оборудования.

С целью более широкого распространения, обеспечения доступности данного решения для других специалистов и возможности его использования на других устройствах, программирование произведено в программной среде

CoDeSys, так как множество (более 500 типов) программируемых логических контроллеров поддерживают программирование в предоставленной среде. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что работа данных средств возможна и на других устройствах. На примере ОВЕН ПЛК 150, проиллюстрирована реализация данного решения.

Рассмотрены экономические аспекты проектирования электропривода: произведена оценка потенциала и перспективности. Выполнен SWOT-анализ и определена ресурсоэффективность проекта.

Учтены вопросы социальной безопасности. Рассчитано освещение и приведен план эвакуации при чрезвычайных ситуациях.

Выполненная квалификационная работа является готовым техническим решением для реального рабочего проекта. Произведены основные расчеты и сформирована схема для монтажа. Собранная система готова к запуску на объекте, но в процессе запуска возможны значительные изменения в структуре программного обеспечения для ПЛК, в связи с тем, что могут быть найдены различные неточности и неучтенные моменты, которые будут исправляться непосредственно при настройке на объекте.

В процессе синтеза модели были выявлены некоторые моменты, которые требуют дополнительного исследования, к ним можно отнести различные нелинейности в математической модели, возможность применения более дешевых, релейных датчиков и получение оптимальных характеристик при их использовании, а также сравнение с системой, основанной на аналоговом датчике. Данные моменты могут служить достаточным основанием для начала работы над магистерской диссертацией.

Список использованных источников

1. ГОСТ Р 50369-92. Электроприводы. Термины и определения. – Введен впервые. Введ. 21.10.1992. – М.: Госстандарт России. 1992. – 13 с.
2. Мастерклимата. Рекуператоры [\[\[Электронный ресурс\]](#) / Бытовые и промышленные климатические системы. «Мастерклимата». – Режим доступа: http://www.sistemair.ru/catalog/systemair_537-563-3-4.htm, свободный.
3. ООО ТПК «ЭИ–ресурс». Водные растворы пропиленгликоля и этиленгликоля [\[\[Электронный ресурс\]](#) / ООО ТПК «ЭИ–ресурс» – Режим доступа: <http://www.glikoli.ru/etilsprav.htm>, свободный.
4. Boualem Ouazia. Performance Testing of a Residential Motorless Air Exchanger System [Текст]/ B. Ouazia, R. Glazer, F. Szadkowski, C. Ноyme//– International Journal of Ventilation ISSN 1473-3315. – 2015. – Volume 14. – С 219 – 230.
5. Пат. 2176365 Российская Федерация, МПК. F24F 3/147 (2000.01) Способ работы теплообменника-утилизатора [Текст] / Бурцев С.И.; заявитель и патентообладатель ЗАО"Бюро техники кондиционирования и охлаждения". - № 2001105108/06; заявл. 20.02.2001; опубл. 27.11.2001, Бюл. № 33. – 3 с.
6. Пат. 2281437 Российская Федерация, МПК. F24F 3/147 (2006.01) Установка утилизации тепла вытяжного воздуха [Текст] / Кокорин О.Я., Балмазов М.В.; заявитель и патентообладатель: Балмазов Михаил Валентинович (RU)- № 2004114809/06; заявл. 17.05.2004; опубл. 10.08.2006, Бюл. № 32. – 4 с.
7. Kevin Michael Smith. Development of a plastic rotary heat exchanger for room-based ventilation in existing apartments [Текст]/ К.М. Smith, S. Svendsen //– Energy and Buildings. – 2015. – Volume 107. – С. 1 – 10.
8. GRUNDFOS CM1-10 A-R-G-V-AQQV [\[\[Электронный ресурс\]](#) / ЭкоМакс. Инженерные системы. – Режим доступа: http://www.ecomaks.ru/catalog/grundfos_cm/5243-cm1-10_a-r-g-v-aqqv, своб.

9. Электродвигатель АИР71В2 | АИР71В4 | АИР71В6 [[Электронный ресурс] / Электромотор. – Режим доступа: http://electronpo.ru/dvigatel_air71b, свободный.

10. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.

11. О. П. Мальцева, Л. С. Удут, Н. В. Кояин. Системы управления электроприводов: учебное пособие / Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. — 152 с.

12. Частотный преобразователь Danfoss VLT Micro Drive FC-51 [[Электронный ресурс] / Частотники.рф. – Режим доступа: http://xn--частотники.рф/vlt_fc51.html, свободный.

13. Scilab [[Электронный ресурс] / Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Scilab>, свободный.

14. Зайцев А.П. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 152 с.

15. CODESYS [[Электронный ресурс] / Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CoDeSys>, свободный.

16. ОВЕН. Программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК150 [[Электронный ресурс] / ОВЕН. Оборуд. для автоматизации. – Режим доступа: http://www.owen.ru/catalog/programmiruemij_logicheskij_kontroller_oven_plk_150/opisanie, свободный.

17. Арктика. Дифф. преобразователь давления DPM-2500D [[Электронный ресурс] / Арктика. Системы вентиляции, отопления и

кондиционирования воздуха. – Режим доступа:
<http://www.arktika.ru/html/dpm2500d.htm>, свободный.

18. Арктика. Дифференциальное реле давления DPS-N [Электронный ресурс] / Арктика. Системы вентиляции, отопления и кондиционирования воздуха. – Режим доступа: <http://www.arktika.ru/html/dpm2500d.htm>, свободный.

19. Конструктивные исполнения термометров сопротивления типа ДТС [Электронный ресурс] / ОВЕН СПб. КИП и А – инжиниринг. – Режим доступа: <http://ovenspb.ru/konstruktivnyye-ispolneniya-termometrov-soprotivleniya-tipa-dts-s-kommutatsionnoy-golovkoj-modeli-khkh5>, свободный.

20. И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие: ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 36 с.

21. Гигиенические требования к электронно-вычислительным машинам и организации работы. Санитарные правила и нормы 2.2.2 2.4.1340 – 03. – М., 2003

22. ГОСТ Р 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – Введен взамен ГОСТ 12.1.004-85. Введен 01.07.1992. – М.: Госстандарт России. 1992. – 126 с.

23. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР, 6-е издание – Энергоатомиздат, 1996. – 640с.

24. С.В. Белов. Охрана окр. среды. – М.: Высшая школа, 1991. –319 с.

25. Как утилизировать бытовую технику и электронику [Электронный ресурс] / Экопортал Респ. Башкортостан. – Режим доступа: <http://www.ecorb.ru/70>, свободный.

26. МЭИ. Эргономика рабочего места пользователя ПЭВМ [Электронный ресурс] / МЭИ. БЖД – Режим доступа: http://ftemk.mpei.ac.ru/bgd/_private/ERGONOM/glava4/V_4_C_treb_RM.htm, свободный.