

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

Институт – Энергетический
Направление подготовки – Электроэнергетика и электротехника
Кафедра – Электропривода и электрооборудования

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ МАШИННОГО ОТДЕЛЕНИЯ СУДНА

УДК 62-83-523:621.63:629.12-52

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Бевз Денис Владиславович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Н.В.Гусев	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2017 г.

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

Код ре- зультата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Универсальные компетенции	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный</i> и <i>общекультурный</i> уровень, добиваться <i>нравственного</i> и <i>физического</i> 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 <i>навыки и умения</i> 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 <i>научного познания и творчества</i> , роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением <i>современных информационных технологий</i> , синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
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	Ставить и <i>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	Выполнять <i>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	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить <i>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	Проводить <i>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	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , 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
Направление подготовки – Электроэнергетика и электротехника
Кафедра – Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Бевзу Денису Владиславовичу

Тема работы:

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ МАШИННОГО ОТДЕЛЕНИЯ СУДНА	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(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.).</i></p>	<p>Объектами исследования являются:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод радиального вентилятора низкого давления ВР 80-75 с производительностью $Q = 25000 \text{ м}^3/\text{ч}$.2. Система автоматического управления электроприводом на базе программируемого логического контроллера.
--	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(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).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разработка функциональной схемы автоматической системы вентиляции. 2. Выбор оборудования. Расчет параметров и характеристик асинхронного электродвигателя. 3. Имитационное моделирование частотно-регулируемого электропривода вентиляторной установки. 4. Разработка алгоритма автоматического управления электроприводом. 5. Разработка электрической схемы соединений автоматической системы вентиляции
---	---

<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Функциональная схема автоматической системы вентиляции. 2. Схема электрическая соединений автоматической системы вентиляции.
---	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Н. Г. Кузьмина, старший преподаватель
Социальная ответственность	А. Г. Дашковский, к.т.н., доцент
Английский язык	И.Ю.Краснов, к.т.н., доцент

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках

Введение, Моделирование скалярного частотного управления в среде Matlab, Разработка автоматического управления системой вентиляции, Анализ полученных результатов

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Н. В. Гусев	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Бевз Денис Владиславович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Бевзу Денису Владиславовичу

Институт	Энергетический	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<p>1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, финансовых и человеческих ресурсов.</i></p> <p>2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i></p>	<p><i>Материальные затраты, основная заработная плата, дополнительная заработная плата, отчисления, накладные расходы.</i></p>
<p>3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений</i></p>	<p><i>В соответствии с Налоговым кодексом РФ ЕСН=30 %</i></p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. <i>Планирование комплекса работ (определение состава работы, определение действующих лиц, установление длительности работы)</i></p>	<p>1. <i>Планирование перечня работ и оценка времени их выполнения</i></p> <p>2. <i>Смета затрат на проект</i></p> <p>3. <i>Смета затрат на оборудование</i></p> <p>4. <i>Анализ полученных результатов</i></p>
<p>2. <i>Расчет бюджета для научно-технического исследования</i></p>	
<p>3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i></p>	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталия Геннадьевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Бевз Денис Владиславович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ПАРОХОДСТВА ЗА ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ НА УЧАСТКЕ РЕГУЛИРУЕМОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ
МАШИННОГО ОТДЕЛЕНИЯ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Бевзу Денису Владиславовичу

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Характеристика объекта исследования и области его применения</i>	На территории машинного отделения возможно возникновение: <i>1. электрической искры; 2. открытого пламени.</i>
<i>2. Ознакомление и отбор законодательных и нормативных документов по теме и отбор их.</i>	ГОСТ 12.0.003-74, ГОСТ 12.1.01290, ГОСТ 12.1.005-88, ПУЭ 7-е издание, Технический регламент о «требованиях пожарной безопасности».

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ вредных факторов</i>	Вредные факторы: <i>1. Шум; 2. Вибрации; 3. Ненормативные метеоусловия;</i>
<i>2. Анализ опасных факторов</i>	<i>1. Опасность электропоражения; 2. Пожаровзрывоопасность.</i>
<i>3. Охрана окружающей среды</i>	Правила утилизации твердых отходов.
<i>4. Защиты в чрезвычайных ситуациях</i>	Разработка мероприятий по предупреждению загораний и электропоражений и мер по ликвидации их последствий.
<i>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности</i>	Законодательные и нормативные документы регулирующие безопасность труда на судне

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Дашковский Анатолий Григорьевич	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Бевз Денис Владиславович		

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	9
ВВЕДЕНИЕ	10
1. РАСЧЕТ И ВЫБОРА СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	15
1.1. Выбор вентилятора	15
1.2. Расчет мощности двигателя и предварительный его выбор.....	20
1.2.1. Расчетные параметры электродвигателя	22
1.2.2. Расчетные параметры Т-образной схемы замещения	23
1.2. Выбор преобразовательного устройства для системы регулируемого электропривода.....	27
1.3. Выбор кабелей: питающей сети, подключения электродвигателя, кабелей управления.....	32
1.4. Выбор аппаратуры защиты	34
1.5. Выбор программируемого логического контроллера	35
1.6. Выбора датчика температуры	47
2. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ...	48
2.1. Расчет и построение естественных характеристик $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ системы регулируемого электропривода.....	48

2.2. Расчет и построение искусственных характеристик $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с IR-компенсацией.....	51
3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СКАЛЯРНОГО ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ МАТЛАВ	61
4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ.....	80
4.1. Алгоритм работы автоматической системы вентиляции.....	80
4.2. Реализация алгоритма работы в программной среде контроллера.....	81
5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	93
6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ МАГИСТРАНТА.....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	123

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 135 страниц, 56 рисунков, 22 таблицы, 30 источников, 2 приложения.

Регулируемый электропривод автоматической системы вентиляции машинного отделения судна.

Ключевые слова: регулируемый электропривод, преобразователь частоты, скалярное управление, программируемый логический контроллер, автоматическое управление, система вентиляции, имитационное моделирование.

В первой главе приведен расчет и выбор основного оборудования автоматической системы вентиляции.

Во второй главе произведен расчет и построение статических и динамических характеристик частотно-регулируемого электропривода.

В третьей главе представлены:

1. имитационная модель частотно-регулируемого электропривода со скалярным управлением, регулятором ограничения тока, скалярной IR-компенсацией и компенсацией скольжения, выполненная в среде Matlab Simulink;
2. переходные процессы скорости, момента и тока при различных режимах работы электропривода.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритма автоматического управления системой вентиляции и реализации его в программной среде программируемого логического контроллера.

Пояснительная записка выпускной квалификационной работы выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2010 с использованием пакетов MathCad 15, MATLAB Simulink, Microsoft Visio.

ВВЕДЕНИЕ

Машинное отделение (МО) – это помещение или помещения на судне, предназначенные для размещения машин и механизмов, обеспечивающих его движение [1].

В этом помещении располагаются:

1. центральный пост управления, куда выведены все системы автоматики, управления и сигнализации;
2. главный двигатель, который вращает гребной винт, сообщаящий судну поступательное движение;
3. вспомогательные двигатели, предназначенные для выработки электрической энергии для освещения, отопления, работы различных устройств и механизмов;
4. насосы (для подачи масла, жидкого топлива, охлаждающей воды и т.д.);
5. сепараторы, предназначенные для очищения топлива и масла от примесей;
6. компрессоры, подающие сжатый воздух для пуска двигателей;
7. паровой котел, предназначенный для отопления, подогрева жидких грузов, технологических нужд и т.д.

Внешний вид машинного отделения судна представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид машинного отделения судна

Машины и механизмы машинного отделения являются ответственными потребителями, которые могут быть отнесены к I группе электроприемников [3]. Неправильное функционирование или неисправность какого-либо агрегата МО могут привести к угрозе для жизни и здоровья экипажа, находящегося на борту судна.

Одной из причин возникновения такого рода ситуаций является нарушение условий эксплуатации оборудования, к которым относятся климатические условия.

Для удаления излишней теплоты, выделяющейся в процессе эксплуатации механизмов машинного отделения, на судне оборудуют систему вентиляции, которая обеспечивает требуемые климатические условия согласно СанПиН 2.5.2.703-98. Воздухообмен в машинном отделении осуществляется с помощью естественной вытяжной и искусственной приточной вентиляции [2].

Для морских судов смешанного плавания относящихся к I группе – судна, на которых экипаж постоянно работает и проживает на судне в течение всего времени навигации, предназначенных для эксплуатации в Центральном и Южном речных бассейнах СанПиН 2.5.2.703-98 устанавливают следующие значения температур в машинном отделении:

- от плюс 19 °С до плюс 21 °С в холодное время года (при температуре наружного воздуха от плюс 10 °С и ниже);
- не более чем на 5 °С выше наружной расчетной температуры в теплое время года (при температуре наружного воздуха плюс 10 °С).

Необходимый для удаления теплоты объем воздуха подается вентилятором, который непосредственно соединен с асинхронным электродвигателем.

В зависимости от конструкции и принципа действия выделяют осевые и радиальные вентиляторы [4].

Для осуществления вентиляции производственных и промышленных помещений наиболее предпочтительной является конструкция радиального вентилятора. Схема радиального вентилятора представлена на рисунке 2.

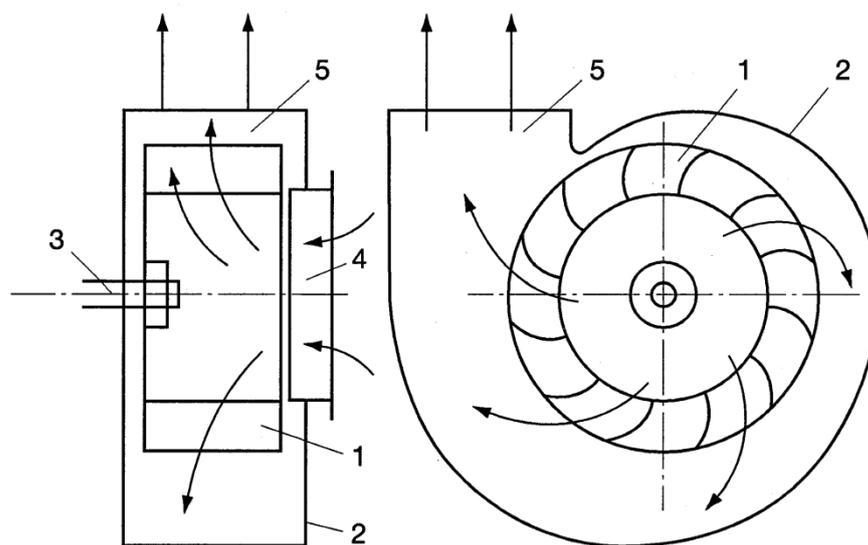


Рисунок 2 – Схема радиального вентилятора

На схеме приняты следующие обозначения:

1. рабочее колесо;
2. корпус;
3. вал;
4. всасывающее отверстие;
5. нагнетательное отверстие;

В корпусе вентилятора располагается рабочее колесо, которое состоит из сплошного диска, кольца с таким же диаметром и установленными между ними лопастями. Рабочее колесо закрепляет на валу, который соединяется с электродвигателем.

Захват воздуха происходит по центру рабочего колеса через всасывающее отверстие, где под действием тяги, развиваемой лопатками, и центробежной силы поворачивает на 90° . Затем воздух поступает в пространство между колесом и корпусом и выходит через нагнетательное отверстие под действием высокого давления.

Достоинства радиальных вентиляторов:

- высокая механическая надежность и большой срок службы;
- высокая устойчивость и надежность рабочих режимов;
- меньшая шумность при работе;
- большая глубина регулирования;
- меньшая чувствительность к загрязненному воздуху.

С целью повышения надежности системы вентиляции машинного отделения применяются два (основной и резервный) частотно-регулируемых асинхронных электропривода вентиляторов и программируемый логический контроллер.

Регулируемый электропривод выполнен по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель». Частотный преобразователь позволяет обеспечить плавный пуск асинхронного двигателя, что приводит к уменьшению пускового тока, который при прямом пуске двигателя в 3 – 5 раз превышает номинальный. Кроме того, преобразователь частоты обеспечивает необходимый пакет защит, что позволяет исключить работу двигателя в ненормальном режиме.

Применение программируемого логического контроллера в системе электропривода позволяет осуществлять его управление в зависимости от величины регулируемого технологического параметра, а также обеспечить управление резервным электроприводом в случае возникновения аварий и неисправностей на основном. Помимо формирования команд телеуправления, контроллер обеспечивает телесигнализацию о текущем состоянии системы на верхний уровень (рабочее место оператора) [5, 20].

Функциональная схема автоматической системы вентиляции приведена на рисунке 3.

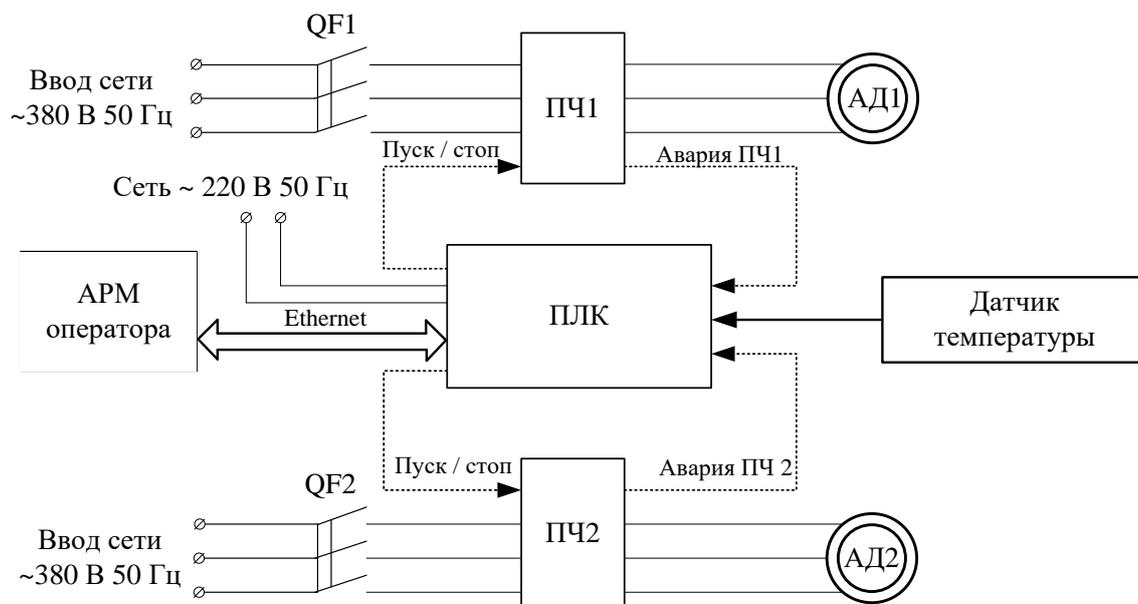


Рисунок 3 – Функциональная схема автоматической системы
вентиляции

В системе имеются два частотно-регулируемых электропривода. Электропривод «ПЧ1 – АД1» является основным, а привод «ПЧ2 – АД2» – резервным. Программируемый логический контроллер (ПЛК) предназначен для формирования задания на скорость электропривода, а также для его остановки. Сигнал задания представляет собой сигнал типа «открытый коллектор» и поступает с дискретного выхода ПЛК на дискретный вход преобразователя частоты. На дискретный вход ПЛК поступают сигналы о наличии в системе неисправностей и аварий с дискретных выходов преобразователей частоты.

В качестве датчика температуры применяется аналоговый преобразователь температуры с диапазоном аналогового сигнала 0..10 В, что соответствует диапазону температуры от 0 до 100 ° С. Выходной сигнал датчика температуры поступает на аналоговый вход контроллера.

ПЛК формирует управляющие воздействия на частотные преобразователи в зависимости от значения температуры, а также наличия неисправностей в системе, а также вывод телесигнализации о текущем состоянии системы.

Связь контроллера с автоматизированным рабочим местом оператора (АРМ оператора), которое представляет собой верхний уровень автоматизированной системы управления, осуществляется посредством интерфейса Ethernet со скоростью обмена 100 Мбит/с.

Электрическая схема соединений автоматической системы вентиляции приведена в приложении «А».

1. РАСЧЕТ И ВЫБОР СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Выбор вентилятора

Вентиляторы работают на сеть без противодействия, вследствие чего зависимость момента статического сопротивления на валу приводного двигателя от скорости носит квадратичный характер, а подводимая к вентилятору мощность без учета потерь на трение в подшипниках пропорциональна кубу скорости [7]. Вентиляторы имеют большой момент инерции, иногда на порядок и более превышающий момент инерции приводного двигателя, что затрудняет их пуск, а в некоторых случаях требует применения электрического торможения для быстрой остановки рабочего колеса.

Необходимый диапазон регулирования скорости для вентиляторов обычно не превышает 2:1.

Теплопоступления от оборудования машинного отделения определяются [1]:

$$Q = N_y k_{исп} k_{загр} k_{одн} = 750000 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 150000 \text{ Вт}, \quad (1.1)$$

где $N_y = 750$ кВт – принятое значение суммарной мощности оборудования;

$k_{исп} = 0,8$ – коэффициент использования установочной мощности (принимается от 0,7 до 0,9);

$k_{загр} = 0,5$ – коэффициент загрузки (принимается от 0,5 до 0,8);

$k_{одн} = 0,5$ – коэффициент одновременности работы электродвигателей (принимается от 0,5 до 1).

Необходимый объем воздуха который должен подавать вентилятор определяется из уравнения теплового баланса [6]:

$$L = \frac{3600 \cdot Q}{C \cdot \rho \cdot (t_{уход} - t_{приход})} = \frac{3600 \cdot 150000}{1004 \cdot 1,2 \cdot (40 - 20)} = 22410,39 \text{ м}^3 / \text{ч}, \quad (1.2)$$

где $C = 1004 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°C}$ – теплоемкость воздуха;

$\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха;

$t_{уход} = 40 \text{ °C}$ – температура уходящего воздуха;

$t_{приход} = 20 \text{ °C}$ – температура приходящего воздуха.

По рассчитанному значению необходимого воздухообмена (производительность вентилятора) был выбран радиальный вентилятор низкого давления ВР 80-75, внешний вид которого приведен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид радиального вентилятора ВР 80-75

Рабочее колесо вентиляторов содержит 12 загнутых назад лопаток. Лопатки специальной нецилиндрической формы с развертывающейся поверхностью выполнены с переменными по ширине колеса углами входа. Конический входной патрубок имеет тороидальный выходной участок, что обеспечивает равномерную нагрузку на лопатки по всей ширине и высокий максимальный КПД вентиляторов [13].

Технические характеристики вентилятора представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики вентилятора

Типоразмер		АИР160S8
Производительность, $10^3 \cdot \text{м}^3/\text{час}$		15,9 – 31,5
Давление, Па		860 – 550
Мощность, кВт		7,5
Частота вращения рабочего колеса, об/мин		725
Масса, кг		600
Виброизоляторы	Тип	ДО43
	Количество	5

Область применения:

- в системах вентиляции производственных, общественных и жилых зданий;
- в системах кондиционирования воздуха;
- в технологических установках, предназначенных для перемещения воздуха и газопаровоздушных смесей с содержанием пыли и твердых примесей не более $0,1 \text{ г}/\text{м}^3$, не содержащих липких и волокнистых материалов.

Вентиляторы эксплуатируются в условиях умеренного и тропического климата, второй и третьей категории размещения, согласно ГОСТ 15150-69.

Допустимая температура окружающей среды от минус 40°C до плюс 40°C .

Аэродинамическая характеристика вентилятора представлена на рисунке 5.

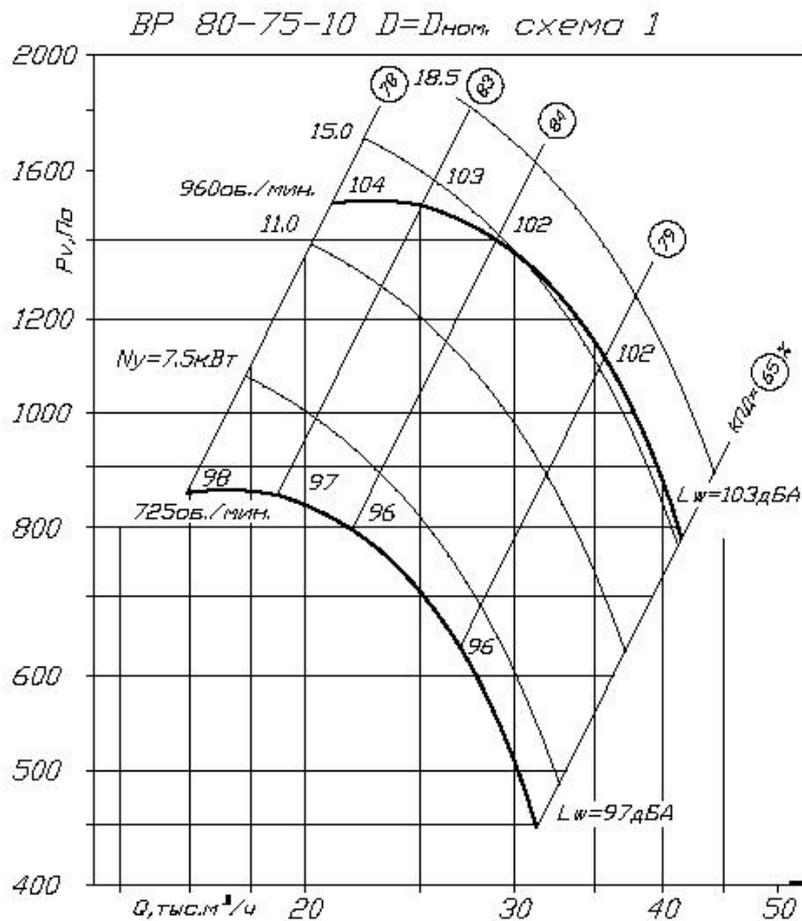


Рисунок 5 – Аэродинамическая характеристика вентилятора ВР 80-75

Режим работы вентилятора, соответствующий максимальному значению КПД, является номинальным [7].

Максимальное значение КПД определяется по аэродинамической характеристике вентилятора и численно равен 84%.

Определим полную и полезную мощность и полный и полезный момент на валу вентилятора при номинальном режиме.

Номинальная скорость вращения приводного двигателя:

$$\omega_n = 725 \text{ об/мин} = 75,9 \text{ рад/с}$$

Полная мощность на валу вентилятора:

$$N_{валн} = N_{баз} \cdot \frac{Q_i}{Q_{баз}} \cdot \frac{P_i}{P_{баз}} \cdot \frac{\eta_{баз}}{\eta_i} = 7,5 \cdot \frac{23000}{22000} \cdot \frac{800}{900} \cdot \frac{0,84}{0,84} = 6,97 \text{ кВт} \quad (1.3)$$

Полезная мощность на валу вентилятора:

$$N_{полн} = N_{вал.н} \cdot \eta_i = 6,97 \cdot 0,84 = 5,85 \text{ кВт} \quad (1.4)$$

Полный момент нагрузки на валу вентилятора:

$$M_{вал.н} = \frac{N_{вал.н}}{\omega_n} = \frac{6,97 \cdot 1000}{75,9} = 91,8 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (1.5)$$

Полезный момент нагрузки на валу вентилятора:

$$M_{полн} = \frac{N_{полн}}{\omega_n} = \frac{5,85 \cdot 1000}{75,9} = 77,05 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.6)$$

Габаритные и присоединительные размеры представлены на рисунке 6 и в таблице 2.

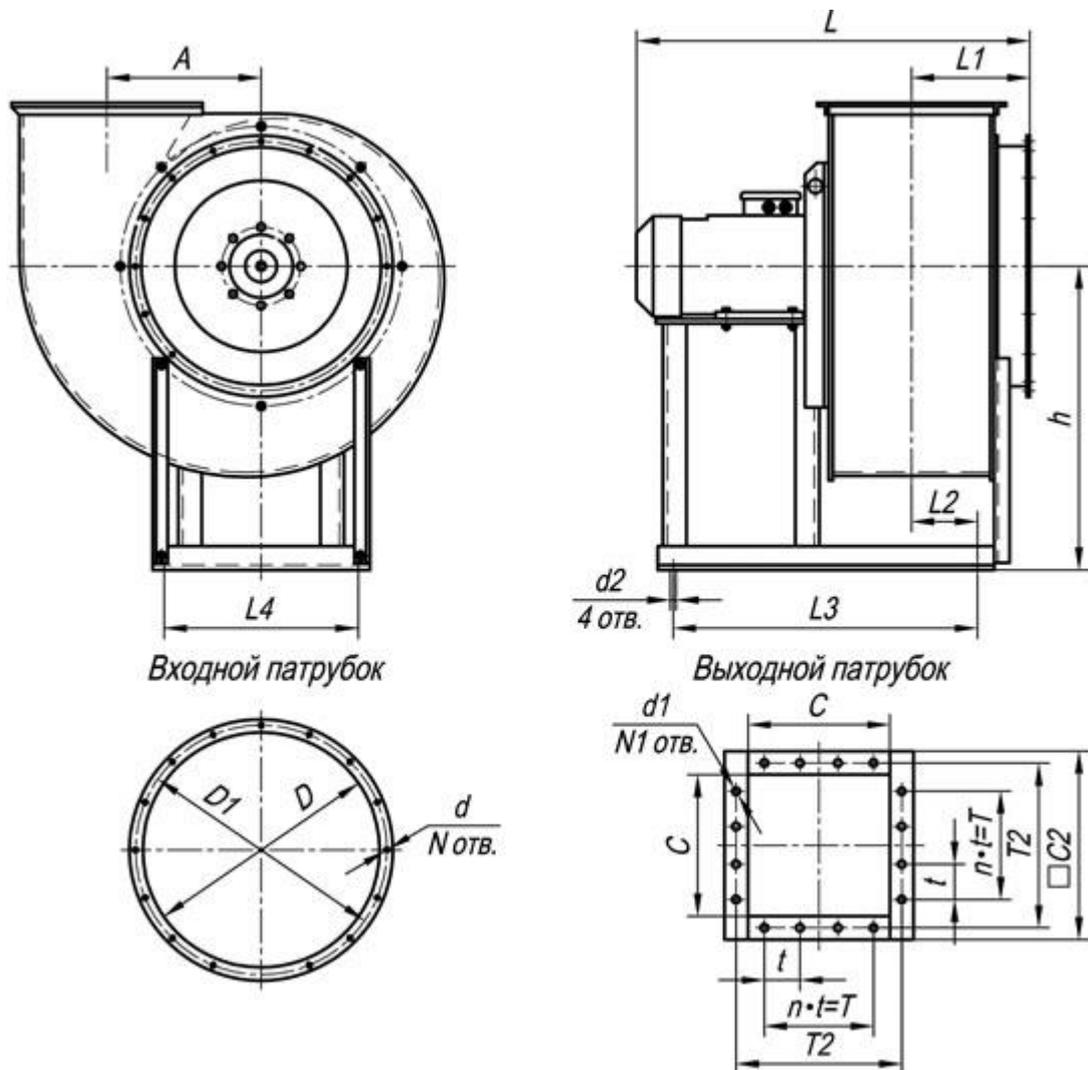


Рисунок 6 – Габаритные и присоединительные размеры

Таблица 2 – Габаритные и присоединительные размеры

A, мм	D, мм	D1, мм	d, мм	d1, мм	d2, мм	h, мм	L, мм	L1, мм	L2, мм	L3, мм
650	1010	1040	12,5	10	15	1212	1440	452	296	1245

Продолжение таблицы 2

L4, мм	C, мм	C2, мм	t, мм	T, мм	T2, мм.	N, шт	N1, шт	n, шт
990	700	805	150	750	750	16	20	5

1.2. Расчет мощности двигателя и предварительный его выбор

Номинальная мощность приводного двигателя должна быть равна или несколько больше мощности на валу вентилятора [7].

В соответствии с данным условием для синхронной скорости 750 об/мин был выбран асинхронный электродвигатель АИР160S8 с номинальной мощностью $P_H = 7,5 \text{ кВт} \geq 6,97 \text{ кВт}$ [14].

Внешний вид двигателя представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Внешний вид асинхронного двигателя

Технические характеристики электродвигателя АИР160S8 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики электродвигателя

P_H , кВт	U_{1H} , В	n , об / мин	η_H , о.е.	$\cos \varphi$, о.е.	$k_{I\text{ДВ}} = \frac{I_{\text{ПУСК}}}{I_H}$	$k_{II} = \frac{M_{\text{ПУСК}}}{M_H}$	$k_{\text{МАКС}} = \frac{M_{\text{МАКС}}}{M_H}$	$J_{\text{ДВ}}$, кг·м ²
7,5	220	750	0,85	0,73	6	1,9	2	0,08

Число пар полюсов двигателя: $p = 4$.

Степень защиты, обеспечиваемая оболочкой – IP54 по ГОСТ 14254-96.

Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя представлены на рисунке 8 и в таблице 4.

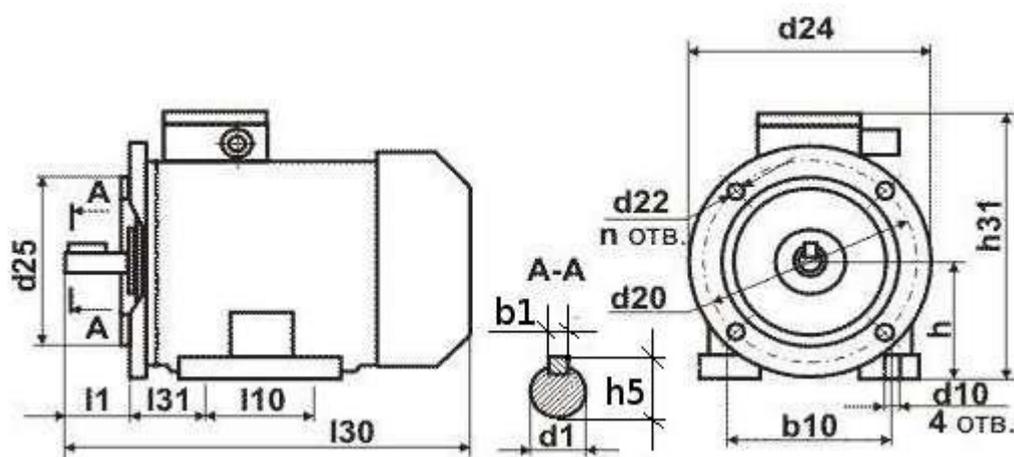


Рисунок 8 - Габаритные и установочно-присоединительные размеры

Таблица 4 – Габаритные и установочно-присоединительные размеры

l_{30} , мм	h_{31} , мм	d_{24} , мм	l_1 , мм	l_{10} , мм	l_{31} , мм	d_1 , мм	d_{10} , мм	d_{20} , мм	d_{22} , мм	d_{24} , мм	b_{10} , мм	n , шт.
625	435	350	110	178	108	48	15	300	19	250	254	4

Продолжение таблицы 4

h , мм	l_{21} , мм	l_{20} , мм	h_{10} , мм	h_5 , мм	b_1 , мм
160	15	5	20	51,5	14

1.2.1. Расчетные параметры электродвигателя

Синхронная скорость вращения двигателя:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_{1H}}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об / мин}, \quad (1.7)$$

где f_{1H} – частота сети, p – число пар полюсов.

Синхронная угловая скорость вращения двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ рад/с} \quad (1.8)$$

Номинальное скольжение:

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{750 - 725}{750} = 0,033 \text{ о.е.} \quad (1.9)$$

Номинальная угловая скорость вращения двигателя:

$$\omega_{двн} = (1 - s_H) \cdot \omega_0 = (1 - 0,033) \cdot 78,5 = 75,9 \text{ рад/с} \quad (1.10)$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{двн} = \frac{P_{двн}}{\omega_{двн}} = \frac{7500}{75,9} = 98,752 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.11)$$

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_H = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \phi \cdot \eta_H} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,73 \cdot 0,85} = 18,314 \text{ А} \quad (1.12)$$

Ток статора двигателя при частичной нагрузке:

$$I_{11} = \frac{p_{жс} \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{pжс} \cdot \eta_{pжс}} = \frac{0,75 \cdot 7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,73 \cdot 0,85} = 14,272 \text{ А}, \quad (1.13)$$

где $p_{жс} = 0,75$ о.е. – коэффициент загрузки двигателя;

$\cos \varphi_{pжс} = 0,73$;

$\eta_{pжс} = \eta_H = 0,85$.

Ток холостого хода двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_{жс} \cdot I_{1н} \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p_{жс} \cdot s_H} \right)^2}{1 - \left(p_{жс} \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p_{жс} \cdot s_H} \right)^2}} \quad (1.14)$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{14,272 - \left(0,75 \cdot 18,314 \cdot \frac{1 - 0,033}{1 - 0,75 \cdot 0,033} \right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1 - 0,033}{1 - 0,75 \cdot 0,033} \right)^2}} = 6,385 \text{ A}$$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске:

$$I_{1\text{макс}} = k_{i\text{дв}} \cdot I_{1н} = 6 \cdot 18,314 = 109,882 \text{ A} \quad (1.15)$$

Критический момент двигателя:

$$M_k = k_{\text{макс}} \cdot M_{\text{двн}} = 2 \cdot 98,8 = 197,6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.16)$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске:

$$M_{\text{двпуск}} = k_{\text{п}} \cdot M_{\text{двн}} = 1,6 \cdot 98,8 = 158,08 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.17)$$

1.2.2. Расчетные параметры Т-образной схемы замещения

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя необходимо воспользоваться его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, представленная на рисунке 9, где [8]:

$U_{1\phi}$ – фазное напряжение подводимое к обмотке статора двигателя;

I_1 – ток обмотки статора;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

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

I_2' – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора;

R'_2 – приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;

$X'_{2\sigma}$ – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;

I_0 – ток холостого хода (намагничивания);

X_m - индуктивное сопротивление контура намагничивания.

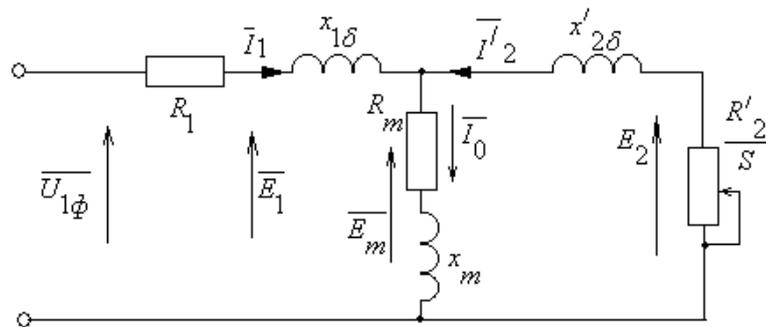


Рисунок 9 – Т-образная схема замещения двигателя

Для нахождения значений приведенного активного сопротивления обмотки ротора и активного сопротивления статора определим коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1н}} = 1 + \frac{6,385}{2 \cdot 6 \cdot 18,314} = 1,029; \quad (1.18)$$

$$A_1 = m \cdot U_{1н}^2 \cdot \frac{1 - s_n}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_n} = 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{1 - 0,033}{2 \cdot 1,029 \cdot 2 \cdot 7500} = 4,548, \quad (1.19)$$

где $m = 3$ – число фаз,

I_0 – ток холостого хода.

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) \cdot C_1} = \frac{4,548}{\left(1 + \frac{1}{0,133}\right) \cdot 1,029} = 0,517 \text{ Ом}, \quad (1.20)$$

где $\beta = 1$;

s_k – критическое скольжение, которое определяется по формуле Клосса:

$$s_k = s_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} \quad (1.21)$$

$$s_k = 0,033 \cdot \frac{2 + \sqrt{2^2 - [1 - 2 \cdot 0,033 \cdot 1 \cdot (2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,033 \cdot 1 \cdot (2 - 1)} = 0,133 \text{ o.e.}$$

Активное сопротивление статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,029 \cdot 0,517 \cdot 1 = 0,532 \text{ Ом} \quad (1.22)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 7,479 \cdot 1,029 \cdot 0,517 = 3,98; \quad (1.23)$$

$$\text{где } \gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,133^2} - 1^2} = 7,479$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$X'_{2н} = 0,58 \cdot \frac{X_{кн}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{3,98}{1,029} = 2,243 \text{ Ом} \quad (1.24)$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$X_{1н} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 3,98 = 1,672 \text{ Ом} \quad (1.25)$$

По найденным значения определим критическое скольжение:

$$s_{к1} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} = \frac{1,029 \cdot 0,517}{\sqrt{0,532^2 + 3,98^2}} = 0,133 \text{ o.e.} \quad (1.26)$$

Полученные значения s_k и $s_{к1}$ совпадают.

ЭДС ветви намагничивания, наведенная магнитным потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1н} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1н})^2 + (U_{1н} \cdot \sin \varphi - X_{1н} \cdot I_{1н})^2} \quad (1.30)$$

где $\varphi = \arccos(\cos \varphi) = 0,752$,

$\sin \varphi = \sin(\varphi) = 0,683$.

$$E_1 = \sqrt{(220 \cdot 0,73 - 0,532 \cdot 18,314)^2 + (220 \cdot 0,683 - 1,672 \cdot 18,314)^2} = 235,603 \text{ В}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{235,603}{6,385} = 36,899 \text{ Ом} \quad (1.31)$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,672}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 5,324 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (1.32)$$

Приведенное значение индуктивности обмотки ротора, обусловленной потоком рассеяния:

$$L_{2\sigma} = \frac{X'_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{2,243}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 7,145 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (1.33)$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре, создаваемым суммарным действием токов статора (индуктивность контура намагничивания):

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{36,899}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,118 \text{ Гн} \quad (1.34)$$

Параметры схемы замещения представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры схемы замещения

$R_1,$ Ом	$X_1,$ Ом	$L_1,$ Гн	$X_{\mu},$ Ом	$L_{\mu},$ Гн	$R'_2,$ Ом	$X'_2,$ Ом	$L'_2,$ Гн	$X_{кн},$ Ом
0,532	1,672	$5,324 \cdot 10^{-3}$	36,899	0,118	0,517	2,243	$7,145 \cdot 10^{-3}$	3,98

1.3. Выбор преобразовательного устройства для системы регулируемого электропривода

Для плавного пуска и регулирования скорости асинхронного электродвигателя применяется преобразователь частоты. По номинальной мощности двигателя и в соответствии с условием: $I_{н.пч} \geq I_{н.дв.} = 20 \text{ A} \geq 18,314 \text{ A}$, был выбран преобразователь частоты ESD-TCL производства компании «ЭлеСи» [7].

Внешний вид преобразователя приведен на рисунке 10. Преобразователь состоит из металлического корпуса и размещенных внутри него элементов электрической схемы. Охлаждение элементов электрической схемы преобразователя производится с помощью радиатора, находящегося внутри корпуса, дополнительное охлаждение радиатора обеспечивают два вентилятора [15].

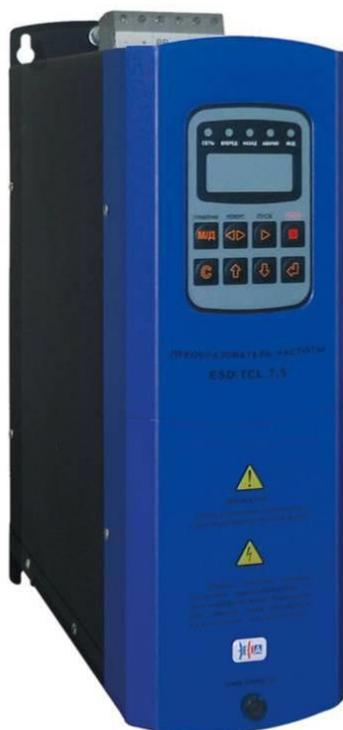


Рисунок 10 – Внешний вид преобразователя частоты ESD-TCL

Основные технические характеристики преобразователя приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Основные технические характеристики преобразователя частоты

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Номинальная мощность электродвигателя	кВт	7,5
Диапазон входного напряжения	В	380 ^{+10%} _{-15%}
Диапазон частоты входного напряжения	Гц	50 ^{+5%} _{-5%}
Номинальный выходной ток	А	19
Максимальный выходной ток в течение 30 с	А	28
Номинальное выходное напряжение	В	380
Время готовности преобразователя после подачи питания, не более	с	5
Степень защиты, обеспечиваемая оболочкой, по ГОСТ 14254-96		IP20
Наработка на отказ, не менее	ч	80000

Основные функции и характеристики преобразователя приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Основные функции и характеристики преобразователя частоты

Характеристики	Описание
Метод регулирования частоты	Формирование синусоидального тока методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ)
Частота ШИМ, кГц	От 2 до 16
Диапазон регулирования скорости: – векторное управление с обратной связью – скалярное управление U/f	1:1000, ПГ ± 0,05 % 1:40, ПГ ± 3 %
Максимальная выходная частота, Гц	320
Шаг задания выходной частоты, Гц	0,01
Контроль скорости электродвигателя	Вычисление скорости электродвигателя по квадратурным сигналам с преобразователя угловых перемещений

Продолжение таблицы 7

Пусковой момент	200 %
Многофункциональные входы управления	7 дискретных входов Напряжение постоянного тока: – уровень логической "1" – от 19 до 30 В; – уровень логического "0" – от 0 до 8 В. Входной ток – не более 15 мА
Вход блокировки преобразователя	1 дискретный вход Напряжение постоянного тока: – уровень логической "1" – от 19 до 30 В; – уровень логического "0" – от 0 до 8 В. Входной ток – не более 15 мА
Многофункциональные выходы сигнализации типа "открытый коллектор" с рпн-транзистором	2 дискретных выхода Напряжение постоянного тока – 30 В, Ток – не более 0,15 А
Источник питания для дискретных входов/выходов	Напряжение – 24 В постоянного тока, Сила тока – 0,3 А
Релейные выходы	4 переключающихся контакта Переменный ток частотой (50 ± 1) Гц, Напряжение переменного тока – до 250 В, Напряжение постоянного тока – до 30 В,
Вход для подключения последовательного интерфейса	RS-485, протокол Modbus RTU, Скорость обмена данными – до 115200 Бод

Преобразователь частоты обеспечивает защиты в соответствии с таблицей 8.

Таблица 8 – Защиты, обеспечиваемые преобразователем частоты

Характеристики	Описание
Защита от перегрузки преобразователя	Выходное напряжение инвертора отключается после продолжительной работы с перегрузкой
Защита от перегрева преобразователя	Выходное напряжение инвертора отключается, если температура радиатора превышает 90 °С

Продолжение таблицы 8

Времятоковая защита электродвигателя	Выходное напряжение инвертора отключается. Конфигурируется тремя ступенями срабатывания. Для каждой ступени указывается уровень тока и время срабатывания
Защита от превышения напряжения в звене постоянного тока	Выходное напряжение инвертора отключается, если уровень напряжения превышает 880 В
Защита от понижения напряжения в звене постоянного тока	Выходное напряжение инвертора отключается, если уровень напряжения меньше 270 В
Защита от пропадания фазы на входе/выходе преобразователя	Выходное напряжение инвертора отключается, если в одной из фаз отсутствует напряжение/ток

В состав силовой части преобразователя частоты входят следующие основные компоненты:

1. неуправляемый выпрямитель, формирующий пульсирующее выпрямленное напряжение;
2. промежуточная цепь, представляющая собой фильтр, содержащий конденсатор;
3. инвертор, формирующий выходное напряжение с необходимыми значениями амплитуды и частоты.

Выходной каскад инвертора выполняется на основе *IGBT*-модулей со встроенными обратными диодами. Методом высокочастотной широтно-импульсной модуляции осуществляется преобразование напряжения постоянного тока в систему переменных трехфазных напряжений.

Схема подключения преобразователя частоты приведена на рисунке 11.

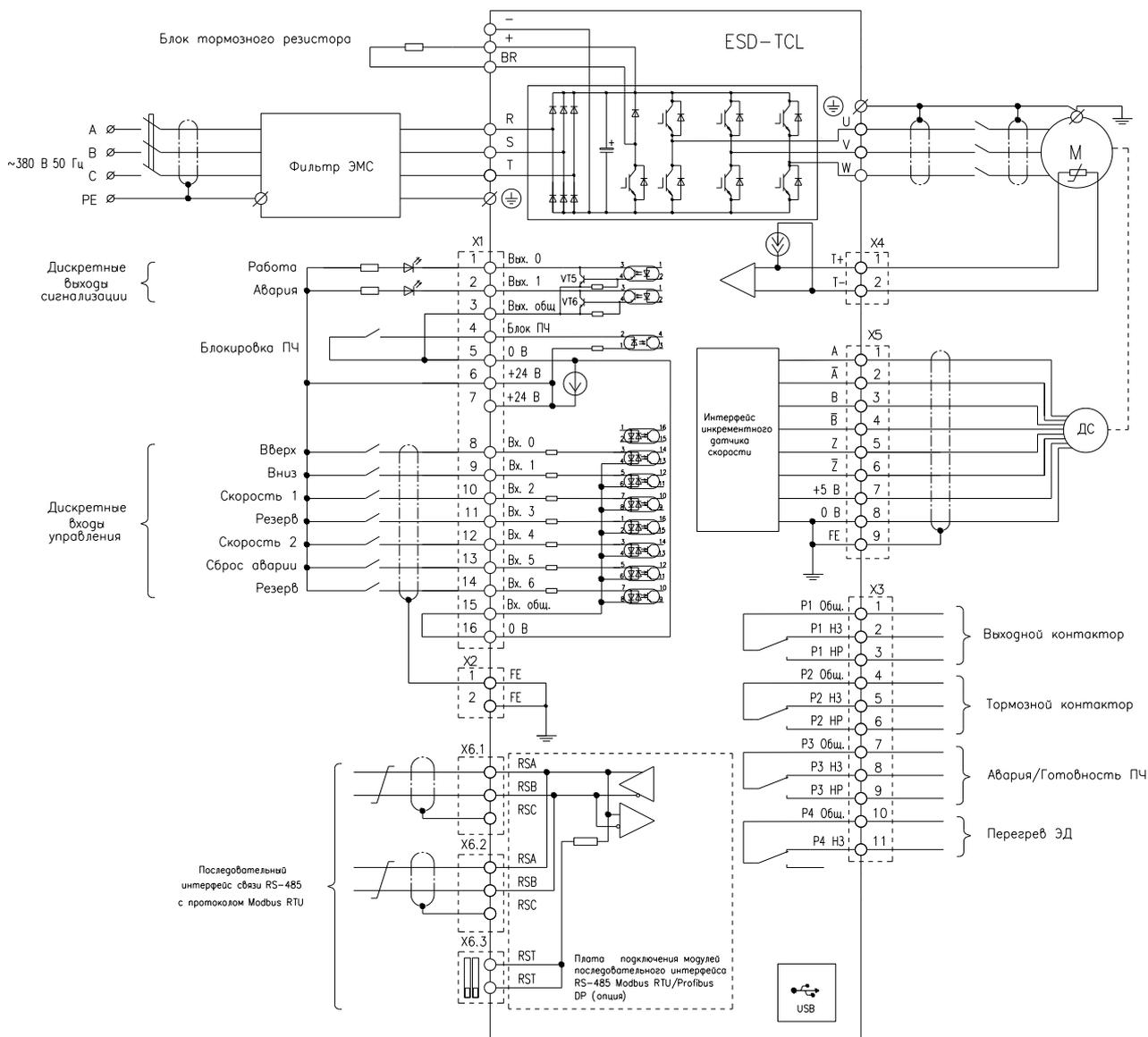


Рисунок 11 – Схема подключения преобразователя частоты

Все цепи управления имеют гальваническую развязку от силовых высоковольтных цепей. Напряжение изоляции – 1,5 кВ. Дискретные входы/выходы имеют оптронную развязку от микроконтроллера и изолированы от всех других цепей преобразователя. Релейные выходы имеют "сухие" контакты и могут быть подключены к потенциалу любых цепей ввода/вывода или включены в схемы управления силовыми цепями. Напряжение изоляции между катушкой и контактами – 1,5 кВ.

В преобразователе возможно контролировать температуру электродвигателя, оснащенного термометрическими РТС-резисторами

(термисторами). Подключение термисторов необходимо выполнить согласно схеме представленной на рисунке 8. Последовательно включенные термисторы подсоединить к зажимам T+ и T-. Суммарное сопротивление термисторов в холодном состоянии должно находиться в диапазоне от 100 Ом до 1,5 кОм. В нормальном режиме работы электродвигателя сопротивление термисторов не достигает порога срабатывания.

При нагревании электродвигателя из-за длительной перегрузки происходит увеличение сопротивления термисторов и при достижении значения выше заданного предела преобразователь регистрирует перегрев электродвигателя.

В качестве PTC-резисторов для контроля температуры электродвигателя используются термисторы типа СТ14.2 с температурой срабатывания 130, 145 и 160 °С.

Для контроля целостности цепи термисторов преобразователь регистрирует обрыв цепи температурного датчика, если сопротивление цепи превышает значение 3,8 кОм и короткое замыкание цепи, если сопротивление цепи оказалось менее 50 Ом.

1.4. Выбор кабелей: питающей сети, подключения электродвигателя, кабелей управления

Подключение сети, электродвигателя и модуля тормозного резистивного выполняется кабелями с изоляцией, соответствующей напряжению питающей сети и нагревостойкостью не менее 70 °С. Подключение к сети выполняется через защитный автоматический выключатель, выбранный исходя из номинального тока преобразователя и с соответствующей характеристикой. Сечение проводов кабелей выполняется согласно таблице 9.

Таблица 9 – Рекомендации по выбору сечения проводов кабелей

Сечение проводов подключения сети S, мм ²	Сечение проводов подключения электродвигателя S, мм ²	Сечение защитного проводника S, мм ² , не менее
Клеммы R, S, T	Клеммы U, V, W	РЕ
2,5–4,0	2,5–4,0	4

Кабель подключения электродвигателя необходимо размещать по возможности отдельно от других кабелей и избегать параллельной прокладки его с другими кабелями. При параллельной прокладке соблюдать минимальные расстояния между кабелями:

- 0,3 м – при длине кабеля до 50 м;
- 1,0 м – при длине кабеля до 200 м.

Максимальная длина кабеля подключения электродвигателя без фильтров не должна превышать 15 м. Кабели управления должны прокладываться отдельно от силовых. Силовые кабели должны пересекать кабели управления под углом 90°.

При подключении цепей сигналов управления требуется выполнять следующие рекомендации:

- подключение производить гибкими экранированными многожильными кабелями;
- сечение проводов кабелей должно соответствовать характеристикам клемм подключения, приведенным в таблице 10;
- сигналы с напряжением постоянного тока 24 В и 110/220 В переменного тока рекомендуется подключать отдельными кабелями;
- сигналы последовательного интерфейса RS-485 и преобразователя угловых перемещений необходимо подключать экранированными кабелями с витой парой;
- экраны кабелей необходимо подключать к клеммам с маркировкой "FE".

Таблица 10 – Характеристики клемм подключения

Характеристика	Значение
Сечение жесткого провода, мм ²	от 0,14 до 1,50
Сечение гибкого провода, мм ²	от 0,14 до 1,00
Сечение гибкого провода с кабельным наконечником без пластмассовой втулки, мм ²	от 0,25 до 0,50
Сечение гибкого провода с кабельным наконечником с пластмассовой втулкой, мм ²	0,25
Длина снятия изоляции, мм	7,5

1.5. Выбор аппаратуры защиты

Для защиты преобразователей частоты и асинхронных электродвигателей в случае возникновения короткого замыкания устанавливаются автоматические выключатели [3].

Ток теплового расцепителя автоматического выключателя $I_{Т.Р.}$ должен быть больше номинального тока электроприемника $I_{Н.П.ч.}$. В соответствии с

данном условием был выбран автоматический выключатель ВА 47-29 с $I_{T.P.} = 20 A \geq 20 A$ [17].

Внешний вид автоматического выключателя представлен на рисунке 12.



Рисунок 12 – Автоматический выключатель ВА 47-29 (20 А)

1.6. Выбор программируемого логического контроллера

В проектируемой автоматической системе вентиляции используется программируемый логический контроллер Элсима-M01-220P-GSM.

Основная область применения контроллера – это малые системы автоматического и автоматизированного управления технологическими процессами в областях, таких как, управление климатическим оборудованием, управление малыми станками и механизмами, автоматизация котельных, работа в системах «Умный дом» и других отраслях [16].

Контроллер Элсима имеет следующие виды входных и выходных сигналов:

- дискретный ввод сигналов различной полярности относительно общего проводника;
- дискретный вывод сигналов типа «Открытый коллектор» и «Сухой контакт»;

- ввод непрерывных сигналов, представленных напряжением постоянного тока, постоянным током, термопреобразователями и импульсными сигналами;
- вывод непрерывных сигналов, представленных напряжением постоянного тока и постоянным током.

При необходимости, для увеличения количества сигналов, контроллер позволяет подключать модули удаленного ввода-вывода серии Элсима и аналогичные.

Технические характеристики контроллера приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Технические характеристики контроллера

Наименование параметра	Значение
Тип процессора	Cortex ARM8
Частота процессора	300 МГц
Максимальный объем памяти для хранения задачи пользователя	32 Мбайт
Максимальный объем энергонезависимой памяти, доступной к задаче пользователя	27 Кбайт
Скорость выполнения инструкций:	
– Логическая инструкция	0,01 мкс
– Арифметическая операция с целыми числами	0,02 мкс
– Арифметическая операция с числами формата Real	0,03 мкс

Продолжение таблицы 11

Наличие часов реального времени со съемной батареей	есть
Время автономной работы часов реального времени	5 лет
Точность хода часов реального времени (с отключенным питанием)	3 с в сутки
Наличие четырехпозиционного DIP-переключателя, состояние которого считывается программно	есть
Габаритные размеры контроллера, мм, не более	158,5x116,6x59,0
Аппаратный WatchDog-таймер	
Первый период сброса WatchDog-таймера	70 с
Второй и последующий периоды сброса WatchDog-таймера	От 0,9 с до 2,5 с
Возможность аппаратного отключения WatchDog-таймера	есть
Интерфейсы контроллера	
Количество разъемов для подключения Ethernet 10/100 Mbi	2 шт.
Напряжение гальванического разделения от цепей модуля, не менее	1000 В АС
Наличие встроенного GSM модема	есть
Количество разъемов подключения по интерфейсу RS-485, цепи А, В, подключение экрана	1 шт.
– Максимальная скорость обмена	115200 бис/с
– Гальваническая развязка, не менее	750 В АС
Работа с модулями удаленного ввода-вывода (УВВ)	
Количество одновременно подключенных модулей УВВ	не более 4 шт.
Скорость обновления данных с модулей УВВ	от 20 мс
Возможность работы в общих сетях Ethernet	есть по предустановленному IP-адресу

Продолжение таблицы 11

Дополнительное оборудование	
Разъем USB для подключения внешних устройств в режиме host	1 шт.
Разъем USB для подключения внешних устройств в режиме device	1 шт.
Тип SD-карты	microSD
Объем microSD-карты	от 2 до 32 Гбайт
Дискретные входы контроллера	
Количество гальванически развязанных групп	2 группы
Количество дискретных входов	20 шт.
Напряжение логического нуля	от минус 3 до плюс 5 В
Напряжение логической единицы	от 15 до 30 В
Максимальный ток логической единицы	10 мА
Минимальная детектируемая длительность импульса, не менее	1,5 мс
Минимальный период следования импульсов	3 мс
Напряжение гальванического разделения между дискретными входами и внутренней шиной контроллера (эффективное значение), не менее	1500 В

Продолжение таблицы 11

Дискретные выходы контроллера	
Количество дискретных выходов тип «Открытый коллектор» (одна группа)	4 шт.
Общая гальваническая изоляция от внутренней шины контроллера (эффективное значение) выходов типа «Открытый коллектор», не менее	1500 В
Максимальное коммутируемое напряжение для выходов «Открытый коллектор»	30 В
Остаточное напряжение в состоянии «включено» для выходов «Открытый коллектор»	1 В
Максимальный коммутируемый ток для выходов «Открытый коллектор»	0,3 мА
Количество гальванически разделенных групп дискретных выходов, тип «Реле»	2 группы
Количество дискретных выходов, тип «Реле» в одной группе	2 шт.
Максимальное коммутируемое напряжение для релейных выходов	250 В АС
Максимальный коммутируемый ток для релейных выходов	2 А
Гальваническая развязка от внутренней шины контроллера (эффективное значение) групп релейных выходов, не менее	2000 В

Продолжение таблицы 11

Аналоговые входы	
Количество универсальных аналоговых входов	4 шт.
Гальваническая развязка от внутренней шины контроллера (эффективное значение) каждого аналогового входа, не менее	750 В
Возможность подключать датчики с сигналами следующих типов: – Ток – Напряжение	0 – 20 мА 0 – 10 В
Минимальное время измерения одного канала для ввода сигналов постоянного тока или напряжения постоянного тока, температуры в режиме измерения сигнала термопары	25 мс
Выходное напряжение встроенного источника питания для подключения датчиков с контролем целостности цепи	соответствует значению входного напряжения
Максимальный ток нагрузки встроенного источника питания	0,3 А

Продолжение таблицы 11

Аналоговые выходы	
Количество аналоговых выходов	2 шт.
Количество групп аналоговых выходов	1 группа
Гальваническая развязка группы от внутренней шины контроллера (эффективное значение), не менее	750 В
Каждый аналоговый выход может быть программно сконфигурирован для работы в следующих режимах: – Ток (с внешним шунтом) – Напряжение	0 – 20 мА 0 – 10 В
Цепи питания	
Питание контроллера (в зависимости от исполнения)	20...28 В DC 36...72 В DC 90...264 В AC

Контроллер предназначен для работы в климатических условиях, указанных в таблице 12.

Таблица 12 – Климатические условия

Наименование параметра	Значение
Диапазон рабочих температур	От 0 до плюс 60 °С
Относительная влажность воздуха	от 50 до 95 % (при температуре плюс 40 °С)
Атмосферное давление	от 84,0 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт.ст.)

Контроллер удовлетворяет критерию качества функционирования, а по требованиям устойчивости к воздействию электромагнитных помех в соответствии с ГОСТ CISPR 24-2013, ГОСТ 30804.6.2-2013 по следующим типам воздействий:

- уровень электростатического разряда в соответствии с ГОСТ 30804.4.2-2013, степень жесткости 1;
- радиочастотное электромагнитное поле в соответствии с ГОСТ 30804.4.3-2013, степень жесткости 2;
- наносекундные импульсные помехи по цепи электропитания в соответствии с ГОСТ 30804.4.4-2013, степень жесткости 3;
- микросекундные импульсные помехи большой энергии по цепям электропитания в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.5-99, степень жесткости 2;
- динамические изменения напряжения сети электропитания в соответствии с ГОСТ 30804.4.11-2013, класс электромагнитной обстановки 3;
- колебания напряжения питания ГОСТ Р 51317.4.14-2000, класс электромагнитной обстановки 3.

Контроллер удовлетворяет нормам промышленных радиопомех класса А по ГОСТ 30428-96 и ГОСТ 30805.22-2013.

Внешний вид контроллера приведен на рисунках 13, 14, 15.

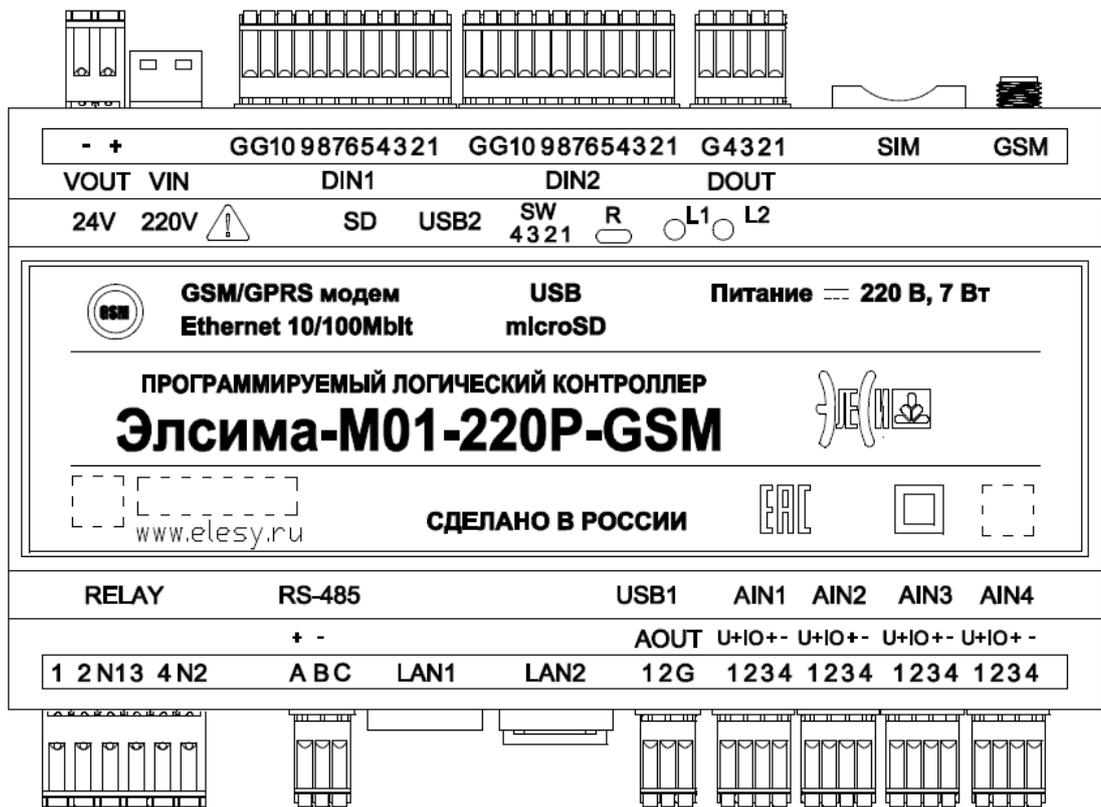


Рисунок 13 – Внешний вид лицевой панели контроллера Элсима

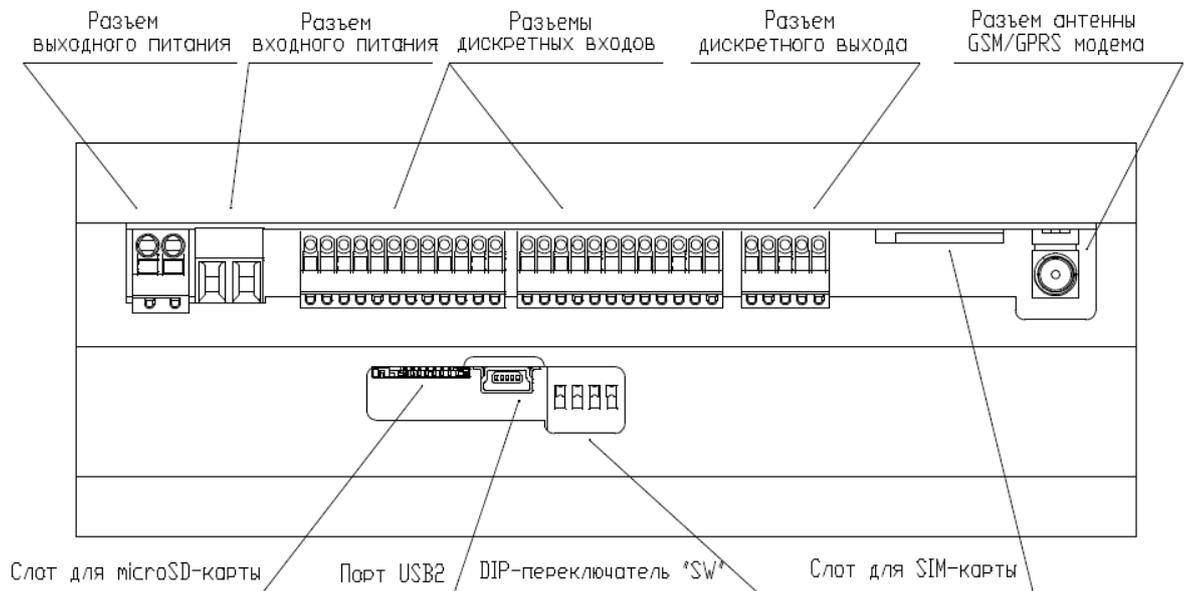


Рисунок 14 – Внешний вид контроллера (вид сбоку)

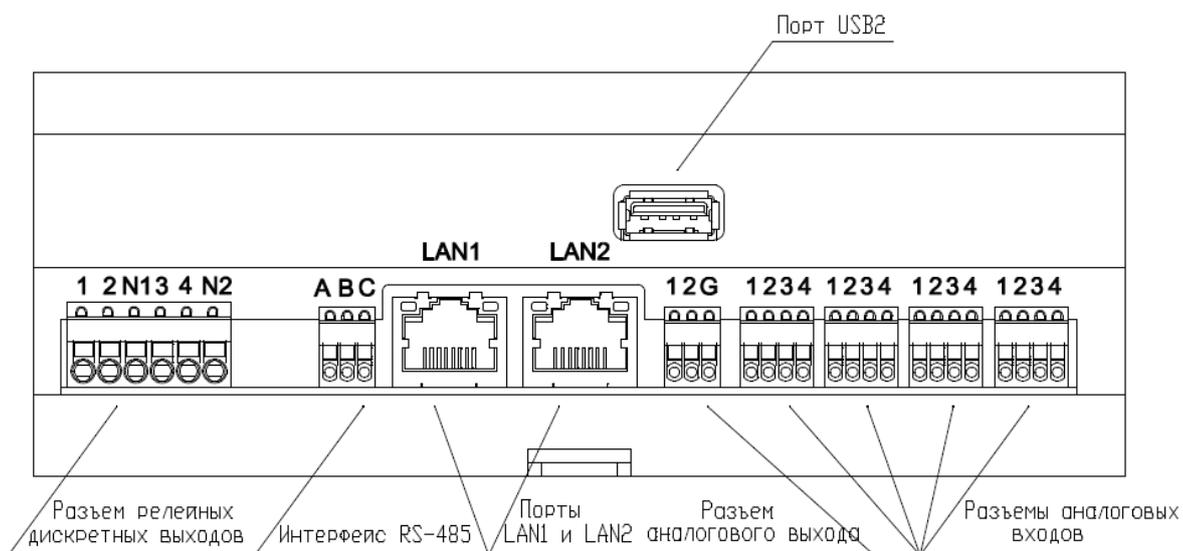


Рисунок 15 – Внешний вид контроллера с противоположной боковой стороны

Контроллер устойчив к синусоидальной вибрации согласно ГОСТ ИЕС 61131-2-2012 с параметрами, представленными в таблице 13.

Таблица 13 – Параметры устойчивости к синусоидальной вибрации

Наименование параметра	Значение
Частота	от 5 до 150 Гц
Максимальное ускорение	1,0 g
Максимальное смещение	3,5 мм
Удары с параметрами: – амплитуда – длительность – форма ударной волны	до 15 g 11 мс полусинусоида

Разъемы «VOUT» и «VIN» являются соединителями выходного и входного питания. Назначение контактов приведено в таблице 14.

Таблица 14 – Назначение контактов выходного и входного питания

Исполнение по напряжению питания 24 В DC			
Контакт		Обозначение на корпусе	Цепь
VOUT	1	+	+24 В
	2	–	GND
VIN	1	+	+24 В
	2	–	GND

Назначение контактов разъемов «DIN1», «DIN2» представлено в таблице 15.

Таблица 15 – Назначение контактов разъемов «DIN1», «DIN2»

Контакт	Обозначение на корпусе	Разъем	Контакт	Обозначение на корпусе	Разъем
		DIN1			DIN2
1	1	Вход 1	1	1	Вход 1
2	2	Вход 2	2	2	Вход 2
3	3	Вход 3	3	3	Вход 3
4	4	Вход 4	4	4	Вход 4
5	5	Вход 5	5	5	Вход 5
6	6	Вход 6	6	6	Вход 6
7	7	Вход 7	7	7	Вход 7
8	8	Вход 8	8	8	Вход 8
9	9	Вход 9	9	9	Вход 9
10	10	Вход 10	10	10	Вход 10
11	G	Общий	11	G	Общий
12	G	Общий	12	G	Общий

Назначение контактов разъема «DOUT» представлено в таблице 15.

Таблица 16 – Назначение контактов разъема «DOUT»

Контакт	Обозначение на корпусе	Разъем
		DOUT
1	1	Выход 1
2	2	Выход 2
3	3	Выход 3
4	4	Выход 4
5	G	Общий

Назначение контактов разъемного соединителя релейных дискретных выходов «RELAY» представлено в таблице 17.

Таблица 17 – Назначение контактов разъемного соединителя релейных дискретных выходов «RELAY»

Контакт	Обозначение на корпусе	Разъем
		RELAY
1	1	Выход 1
2	2	Выход 2
3	N1	GND для выходов 1 и 2
4	3	Выход 3
5	4	Выход 4
6	N2	GND для выходов 3 и 4

Подключение приборов по интерфейсу RS-485 выполняется коммуникационным кабелем – только экранированной витой парой. Для обеспечения скорости передачи 115200 бит/с максимальная длина кабеля составляет 1058 м.

Назначение контактов разъемов «AIN1», «AIN2», «AIN3», «AIN4» представлено в таблице 18.

Таблица 17 – Назначение контактов разъемов «AIN1», «AIN2», «AIN3», «AIN4»

Разъем	Разъем	Разъем	Разъем
AIN1	AIN2	AIN3	AIN4
«U+» - вход по напряжению			
«IO» - выход по току			
«+» - измерение	«+» - измерение	«+» - измерение	«+» - измерение
«-» - измерение	«-» - измерение	«-» - измерение	«-» - измерение

1.7. Выбора датчика температуры

В качестве датчика температуры используется трехпроводной аналоговый преобразователь температуры WKA T91.10.104, выходной сигнал которого составляет 0...10 В, что соответствует диапазону температур от 0 °С до плюс 100 °С. Напряжение питания – постоянное 24В [18].

Трехпроводная схема датчика представлена на рисунке 16. На этой схеме положительный провод термопары присоединяется к клемме «ТС+», а отрицательный – к клемме «ТС-» преобразователя.

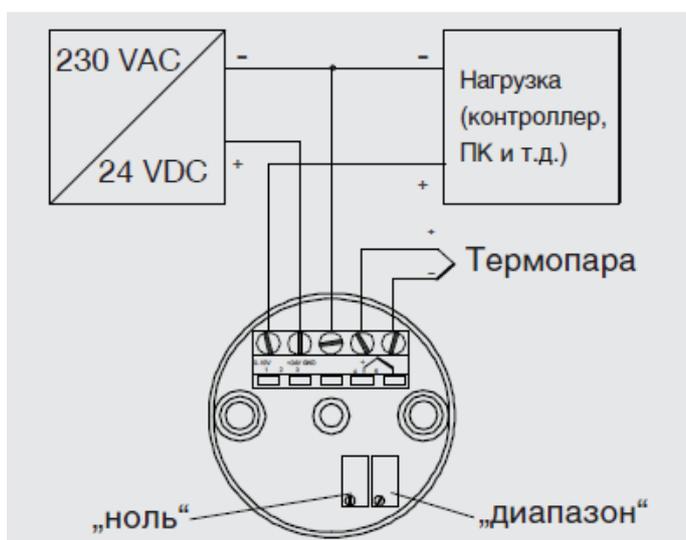


Рисунок 16 – Схема подключения датчика температуры

Внешний вид датчика температуры представлен на рисунке 17.



Рисунок 17 – Внешний вид датчика температуры

2. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Расчет и построение естественных характеристик $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ системы регулируемого электропривода

Рассчитаем и построим естественные электромеханические характеристики [1].

Зависимость приведенного значения тока ротора от скольжения:

$$I'_2(\omega) = \frac{U_n}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}} \right)^2 + X_{кн}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \cdot X_{\mu H}} \right)^2}} \quad (2.1)$$

Зависимость тока статора от скольжения:

$$I_1(s) = I_0^2 + I'_2(\omega) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin \left(\frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\omega - \omega_0} \right)^2 + X_{KH}^2}} \right) \quad (2.2)$$

Естественные электромеханические характеристики приведены на рисунке 18.

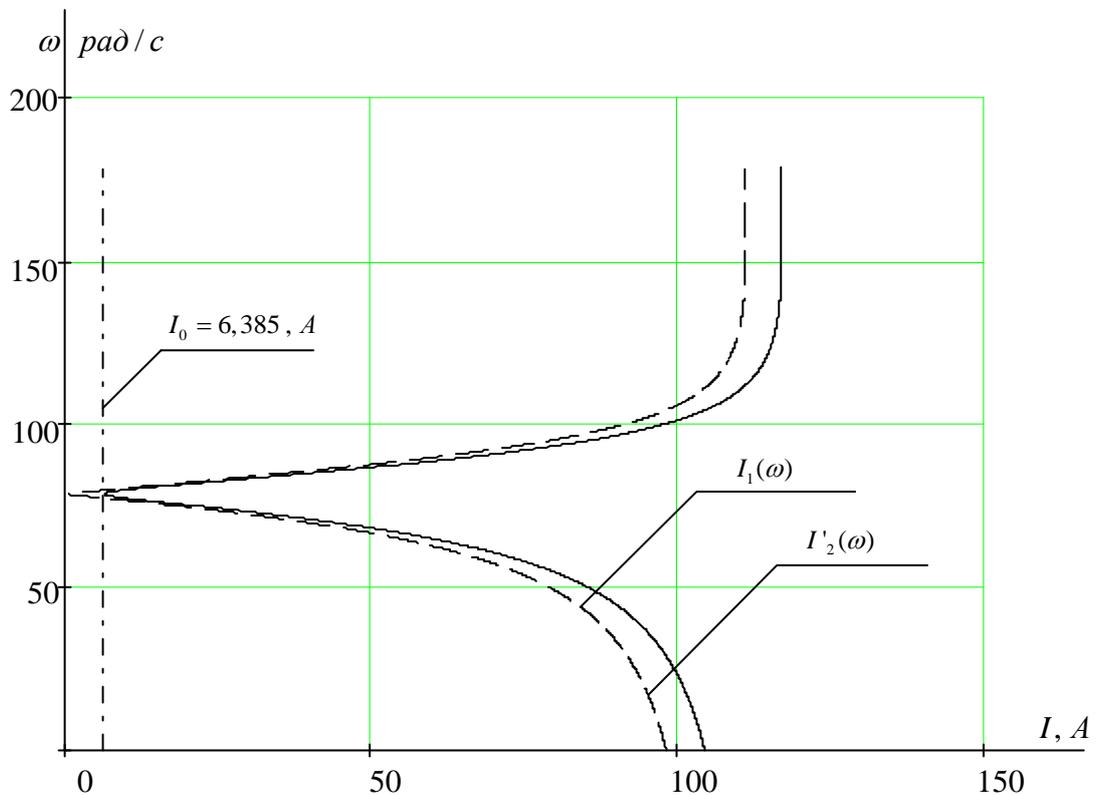


Рисунок 18 – Естественные электромеханические характеристики

Механическая характеристика вентилятора определяется по выражению:

$$M_c(\omega) = M_0 + k \cdot \omega^2, \quad (2.3)$$

где

$$M_0 = M_{эмн} - M_{двн} = 104,04 - 98,8 = 5,289 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.4)$$

$$M_{эмн} = \frac{3 \cdot U_{1н}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_n \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_n} \right)^2 + X_{кн}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_n \cdot X_{μн}} \right)^2 \right]} = 104,04 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.5)$$

$$k = \frac{M_{двн} - M_0}{\omega_{двн}^2} = \frac{98,8 - 5,289}{75,9^2} = 0,016. \quad (2.6)$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя определяется по выражению:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1н}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}} \right)^2 \right]} \quad (2.7)$$

Механические характеристики вентилятора и асинхронного электродвигателя приведены на рисунке 19.

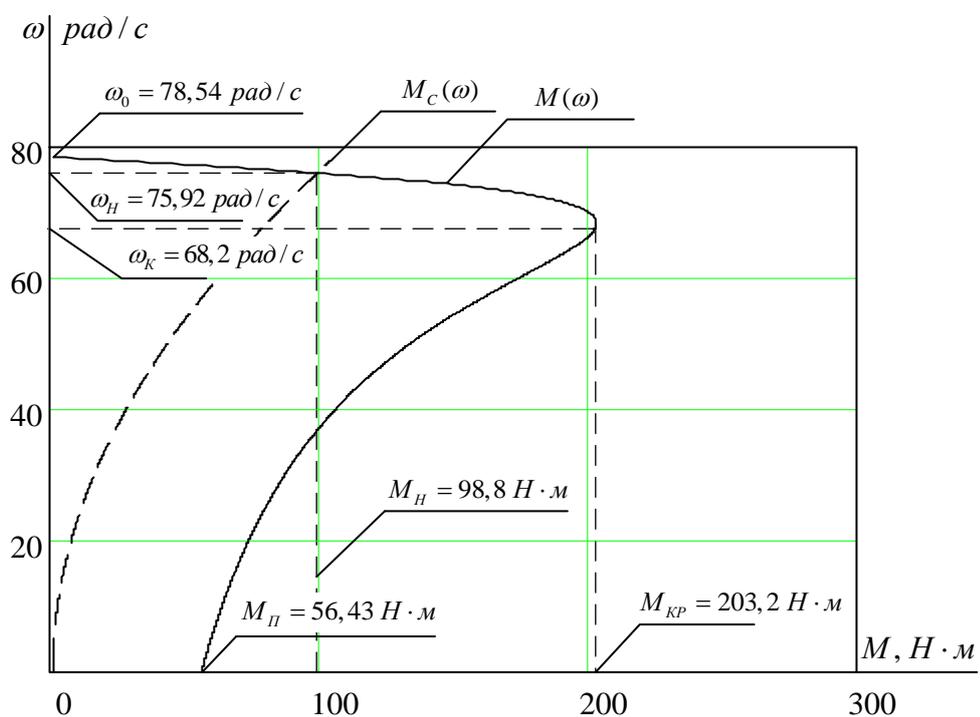


Рисунок 19 – Естественные механические характеристики

2.2. Расчет и построение искусственных характеристик $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с ИР-компенсацией

Вольт-частотная характеристика преобразователя для выбранного закона регулирования рассчитывается по выражению [7]:

$$U_1(f_1) = U_{1\text{фн}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 \quad (2.8)$$

Примем $f_{1н1} = 50 \text{ Гц}$, $f_{1н2} = 30 \text{ Гц}$, $f_{1н3} = 15 \text{ Гц}$, $f_{1н4} = 5 \text{ Гц}$.

Относительные значения частот питающего напряжения соответственно равны:

$$f_{1\text{ж}1} = \frac{f_{1н1}}{f_{1н}} = \frac{50}{50} = 1;$$

$$f_{1\text{ж}2} = \frac{f_{1н2}}{f_{1н}} = \frac{30}{50} = 0,6;$$

$$f_{1\text{ж}3} = \frac{f_{1н3}}{f_{1н}} = \frac{15}{50} = 0,3;$$

$$f_{1\text{ж}4} = \frac{f_{1н4}}{f_{1н}} = \frac{5}{50} = 0,1.$$

Значения фазных напряжений обмотки статора асинхронного двигателя для заданного ряда частот:

$$U_{1н1} = Zp \cdot f_{1н1} = 0,088 \cdot 50 = 220 \text{ В};$$

$$U_{1н2} = Zp \cdot f_{1н2} = 0,088 \cdot 30 = 79,2 \text{ В};$$

$$U_{1н3} = Zp \cdot f_{1н3} = 0,088 \cdot 15 = 19,8 \text{ В};$$

$$U_{1н4} = Zp \cdot f_{1н4} = 0,088 \cdot 5 = 2,2 \text{ В};$$

где $Zp = U_{1н}/f_{1н}^2 = 0,088$.

Значения синхронных угловых скоростей:

$$\omega_{01} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1н1}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 78,54 \text{ рад / с};$$

$$\omega_{02} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1н2}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30}{1} = 47,124 \text{ рад / с};$$

$$\omega_{03} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1н3}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 15}{1} = 23,562 \text{ рад / с};$$

$$\omega_{04} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1н4}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5}{1} = 7,854 \text{ рад / с}.$$

Значения угловых скоростей находятся из выражений:

$$\omega_1(s) = \omega_{01} \cdot (1 - s);$$

$$\omega_2(s) = \omega_{02} \cdot (1 - s);$$

$$\omega_3(s) = \omega_{03} \cdot (1 - s);$$

$$\omega_4(s) = \omega_{04} \cdot (1 - s).$$

Искусственные электромеханические характеристики с IR-компенсацией при частотном регулировании, определяющие зависимость приведенного значения тока в фазе обмотки ротора от скольжения, были рассчитаны и построены по выражениям [8]:

$$I'_{211}(s) = \frac{U_{1н}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1жс1}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu н} \cdot f_{1жс1}}\right)^2}}; \quad (2.9)$$

$$I'_{221}(s) = \frac{U_{1н2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1жс2}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu н} \cdot f_{1жс2}}\right)^2}}; \quad (2.10)$$

$$I'_{231}(s) = \frac{U_{1н3}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1жс3}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu н} \cdot f_{1жс3}}\right)^2}}; \quad (2.11)$$

$$I'_{241}(s) = \frac{U_{1н4}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1жс4}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu н} \cdot f_{1жс4}}\right)^2}}; \quad (2.12)$$

$$I'_{212}(s) = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭKB1}} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\kappa H}^2 \cdot f_{1\text{ЭC1}}^2 + \left(\frac{R_{1\text{ЭKB1}} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\text{ЭC1}}}\right)^2}}; \quad (2.13)$$

$$I'_{222}(s) = \frac{U_{1H2}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭKB1}} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\kappa H}^2 \cdot f_{1\text{ЭC2}}^2 + \left(\frac{R_{1\text{ЭKB1}} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\text{ЭC2}}}\right)^2}}; \quad (2.14)$$

$$I'_{232}(s) = \frac{U_{1H3}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭKB1}} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\kappa H}^2 \cdot f_{1\text{ЭC3}}^2 + \left(\frac{R_{1\text{ЭKB1}} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\text{ЭC3}}}\right)^2}}; \quad (2.15)$$

$$I'_{242}(s) = \frac{U_{1H4}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭKB1}} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\kappa H}^2 \cdot f_{1\text{ЭC4}}^2 + \left(\frac{R_{1\text{ЭKB1}} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\text{ЭC4}}}\right)^2}}; \quad (2.16)$$

$$I'_{213}(s) = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭKB2}} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\kappa H}^2 \cdot f_{1\text{ЭC1}}^2 + \left(\frac{R_{1\text{ЭKB2}} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\text{ЭC1}}}\right)^2}}; \quad (2.17)$$

$$I'_{223}(s) = \frac{U_{1H2}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭKB2}} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\kappa H}^2 \cdot f_{1\text{ЭC2}}^2 + \left(\frac{R_{1\text{ЭKB2}} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\text{ЭC2}}}\right)^2}}; \quad (2.18)$$

$$I'_{233}(s) = \frac{U_{1H3}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭKB2}} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\kappa H}^2 \cdot f_{1\text{ЭC3}}^2 + \left(\frac{R_{1\text{ЭKB2}} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\text{ЭC3}}}\right)^2}}; \quad (2.19)$$

$$I'_{243}(s) = \frac{U_{1H4}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭKB2}} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\kappa H}^2 \cdot f_{1\text{ЭC4}}^2 + \left(\frac{R_{1\text{ЭKB2}} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\text{ЭC4}}}\right)^2}}; \quad (2.20)$$

$$I'_{214}(s) = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭKB3}} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\kappa H}^2 \cdot f_{1\text{ЭC1}}^2 + \left(\frac{R_{1\text{ЭKB3}} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\text{ЭC1}}}\right)^2}}; \quad (2.21)$$

$$I'_{224}(s) = \frac{U_{1H2}}{\sqrt{\left(R_{1ЭKB3} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1эс2}^2 + \left(\frac{R_{1ЭKB3} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\muн} \cdot f_{1эс2}}\right)^2}}; \quad (2.22)$$

$$I'_{234}(s) = \frac{U_{1H3}}{\sqrt{\left(R_{1ЭKB3} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1эс3}^2 + \left(\frac{R_{1ЭKB3} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\muн} \cdot f_{1эс3}}\right)^2}}; \quad (2.23)$$

$$I'_{244}(s) = \frac{U_{1H4}}{\sqrt{\left(R_{1ЭKB3} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1эс4}^2 + \left(\frac{R_{1ЭKB3} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\muн} \cdot f_{1эс4}}\right)^2}}; \quad (2.24)$$

где $R_{1ЭKB1}$, $R_{1ЭKB2}$, $R_{1ЭKB3}$ – эквивалентные сопротивления статора с учетом IR-компенсации, которые определяются по выражениям:

$$R_{1ЭKB1} = R_1 \cdot (1 - K_{KM1});$$

$$R_{1ЭKB2} = R_1 \cdot (1 - K_{KM2});$$

$$R_{1ЭKB3} = R_1 \cdot (1 - K_{KM3});$$

Где K_{KM1} , K_{KM2} , $K_{KM3} = 0,25; 0,5; 0,7$ – принятые значения коэффициентов IR-компенсации.

Искусственные электромеханические характеристики $\omega = f(I'_2)$ приведены на рисунке 21.

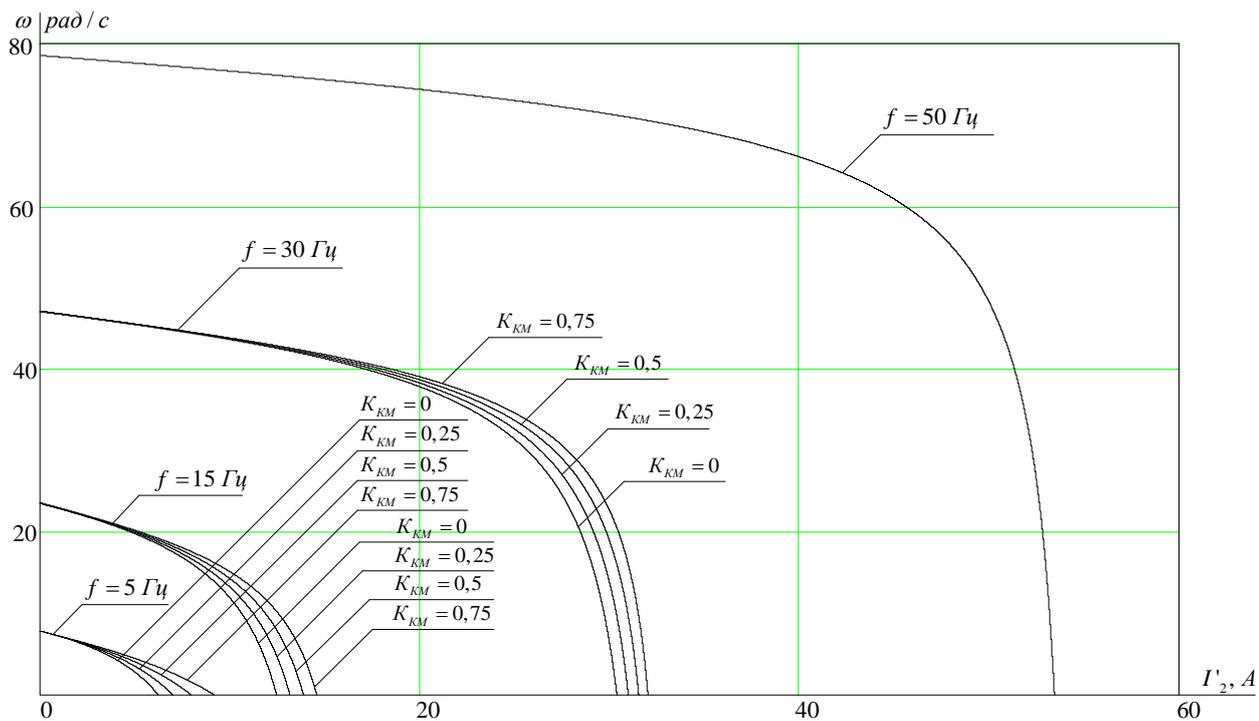


Рисунок 21 – Искусственные электромеханические характеристики $\omega = f(I'_2)$ при частотном регулировании с ИР-компенсацией

Искусственные электромеханические характеристики с ИР-компенсацией при частотном регулировании, определяющие зависимость тока статора от скольжения были рассчитаны и построены по следующим выражениям:

$$I_{111}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{211}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{211}(s) \cdot \sin \left[\frac{X_{кн} \cdot f_{1\lambda c1}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1\lambda c1}^2}} \right]}; \quad (2.25)$$

$$I_{121}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{221}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{221}(s) \cdot \sin \left[\frac{X_{кн} \cdot f_{1\lambda c2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1\lambda c2}^2}} \right]}; \quad (2.26)$$

$$I_{131}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{231}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{231}(s) \cdot \sin \left[\frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c3}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c3}^2}} \right]}; \quad (2.27)$$

$$I_{141}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{241}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{241}(s) \cdot \sin \left[\frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c4}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c4}^2}} \right]}; \quad (2.28)$$

$$I_{112}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{212}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{212}(s) \cdot \sin \left[\frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c1}}{\sqrt{\left(R_{1\lambda KB1} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c1}^2}} \right]}; \quad (2.29)$$

$$I_{122}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{222}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{222}(s) \cdot \sin \left[\frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c2}}{\sqrt{\left(R_{1\lambda KB1} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c2}^2}} \right]}; \quad (2.30)$$

$$I_{132}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{232}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{232}(s) \cdot \sin \left[\frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c3}}{\sqrt{\left(R_{1\lambda KB1} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c3}^2}} \right]}; \quad (2.31)$$

$$I_{142}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{242}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{242}(s) \cdot \sin \left[\frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c4}}{\sqrt{\left(R_{1\lambda KB1} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c4}^2}} \right]}; \quad (2.32)$$

$$I_{113}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{213}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{213}(s) \cdot \sin \frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c1}}{\sqrt{\left(R_{1\lambda KB2} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c1}^2}}}; \quad (2.33)$$

$$I_{123}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{223}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{223}(s) \cdot \sin \frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c2}}{\sqrt{\left(R_{1\lambda KB2} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c2}^2}}}; \quad (2.34)$$

$$I_{133}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{233}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{233}(s) \cdot \sin \frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c3}}{\sqrt{\left(R_{1\lambda KB2} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c3}^2}}}; \quad (2.35)$$

$$I_{143}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{243}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{243}(s) \cdot \sin \frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c4}}{\sqrt{\left(R_{1\lambda KB2} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c4}^2}}}; \quad (2.36)$$

$$I_{114}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{214}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{214}(s) \cdot \sin \frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c1}}{\sqrt{\left(R_{1\lambda KB3} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c1}^2}}}; \quad (2.37)$$

$$I_{124}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{224}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{224}(s) \cdot \sin \frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c2}}{\sqrt{\left(R_{1\lambda KB3} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c2}^2}}}; \quad (2.38)$$

$$I_{134}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{234}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{234}(s) \cdot \sin \left[\frac{X_{KH} \cdot f_{1\text{ж}3}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭКВ}3} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\text{ж}3}^2}} \right]}; \quad (2.39)$$

$$I_{144}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{244}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{244}(s) \cdot \sin \left[\frac{X_{KH} \cdot f_{1\text{ж}4}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭКВ}3} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\text{ж}4}^2}} \right]}. \quad (2.40)$$

Искусственные электромеханические характеристики $\omega = f(I_1)$ приведены на рисунке 22.

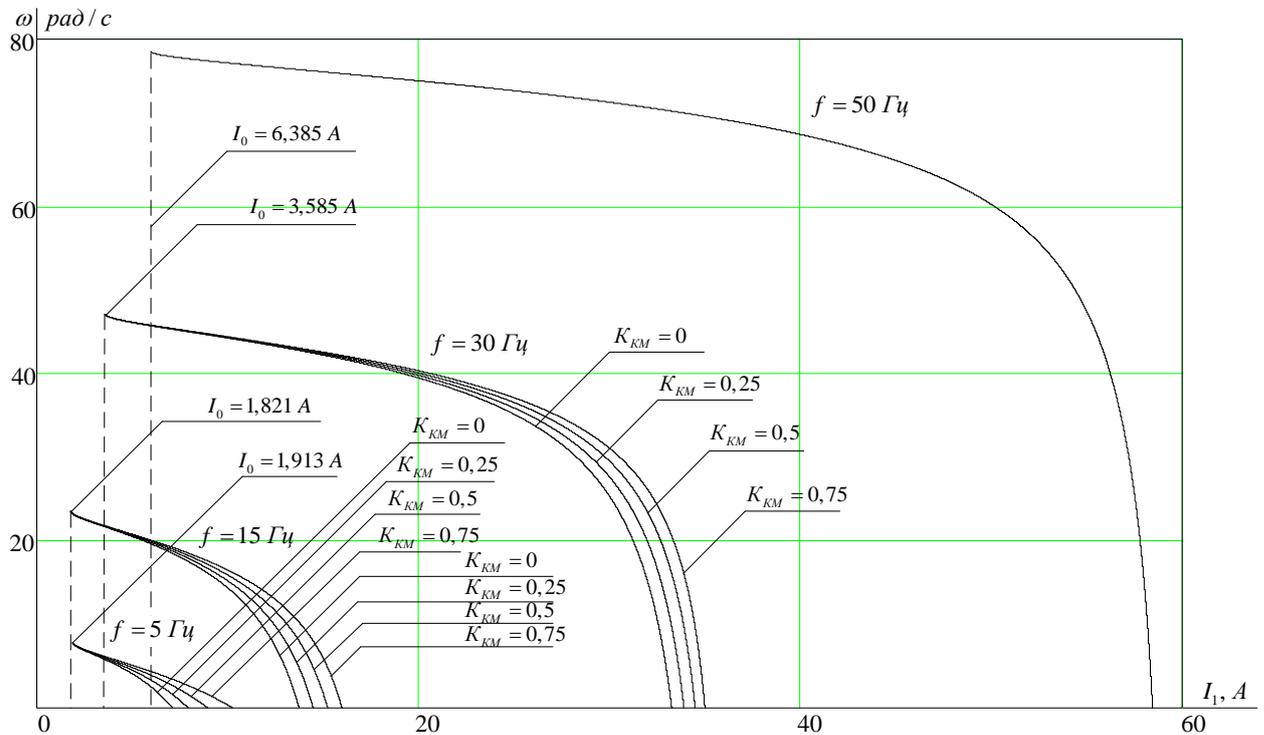


Рисунок 22 – Искусственные электромеханические характеристики $\omega = f(I_1)$ при частотном регулировании с ИР-компенсацией

Расчет и построение искусственных механических характеристик производится по выражениям:

$$M_1(s) = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R'_2}{\omega_{01} \cdot s \cdot \left[X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c1}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\lambda c1}} \right)^2 \right]}; \quad (2.41)$$

$$M_2(s) = \frac{3 \cdot U_{1H2}^2 \cdot R'_2}{\omega_{02} \cdot s \cdot \left[X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c2}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\lambda c2}} \right)^2 \right]}; \quad (2.42)$$

$$M_3(s) = \frac{3 \cdot U_{1H3}^2 \cdot R'_2}{\omega_{03} \cdot s \cdot \left[X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c3}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\lambda c3}} \right)^2 \right]}; \quad (2.43)$$

$$M_4(s) = \frac{3 \cdot U_{1H4}^2 \cdot R'_2}{\omega_{04} \cdot s \cdot \left[X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c4}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1\lambda c4}} \right)^2 \right]}. \quad (2.44)$$

Искусственные механические характеристики приведены на рисунке

23.

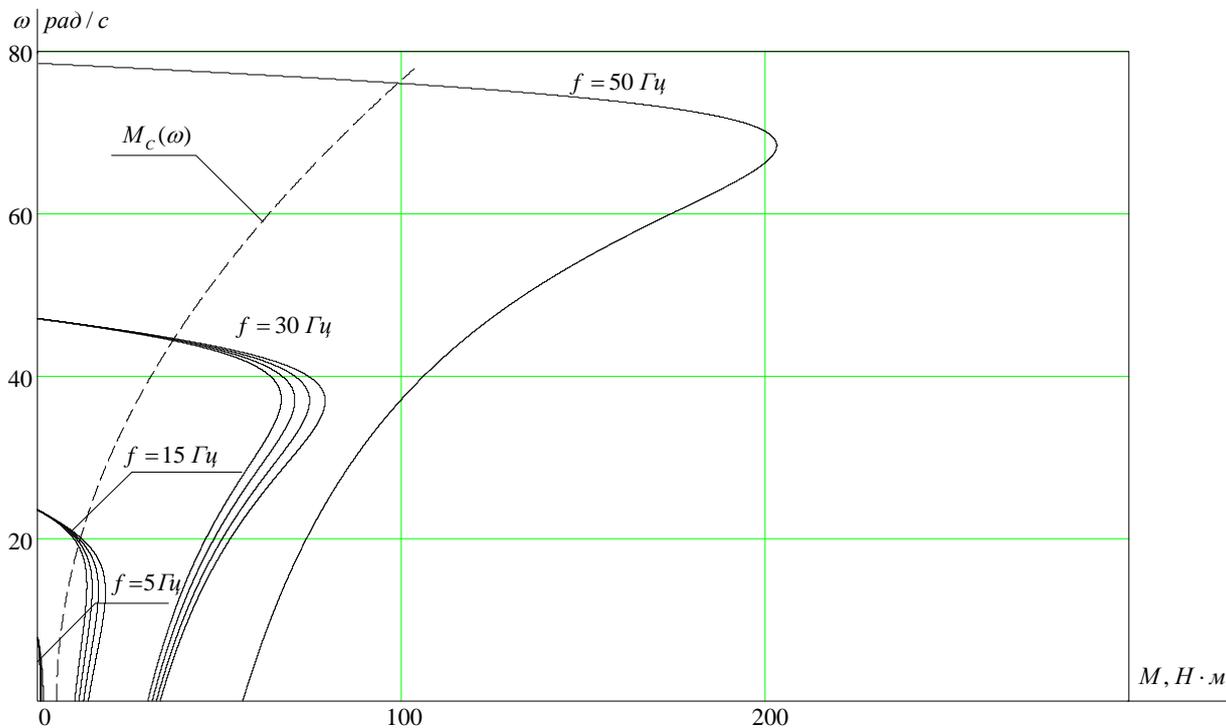


Рисунок 23 – Искусственные механические характеристики $\omega = f(M)$ при частотном регулировании с IR-компенсацией

Анализ приведенных на рисунке 23 механических характеристик электропривода и нагрузки показывает, что при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ не удастся обеспечить пуск электропривода при выборе начальной частоты инвертора $f_{\text{и.мин}} = 5$ Гц.

С целью обеспечения двукратного пускового момента экспериментально выбраны для начального участка характеристики следующие параметры: $U_{\text{1мин}} = 10$ В, $f_{\text{и.мин}} = 5$ Гц.

В результате вольт-частотная характеристика представлена зависимостью [7]:

$$U_1(f_1) = U_{\text{1мин}} + (U_{\text{1фн}} - U_{\text{1мин}}) \cdot \left(\frac{f_1}{f_{\text{1н}}} \right)^2 \quad (2.45)$$

Рассчитанные механические характеристики системы с учетом выбранной настройки вольт-частотной характеристики приведены на рисунке 24.

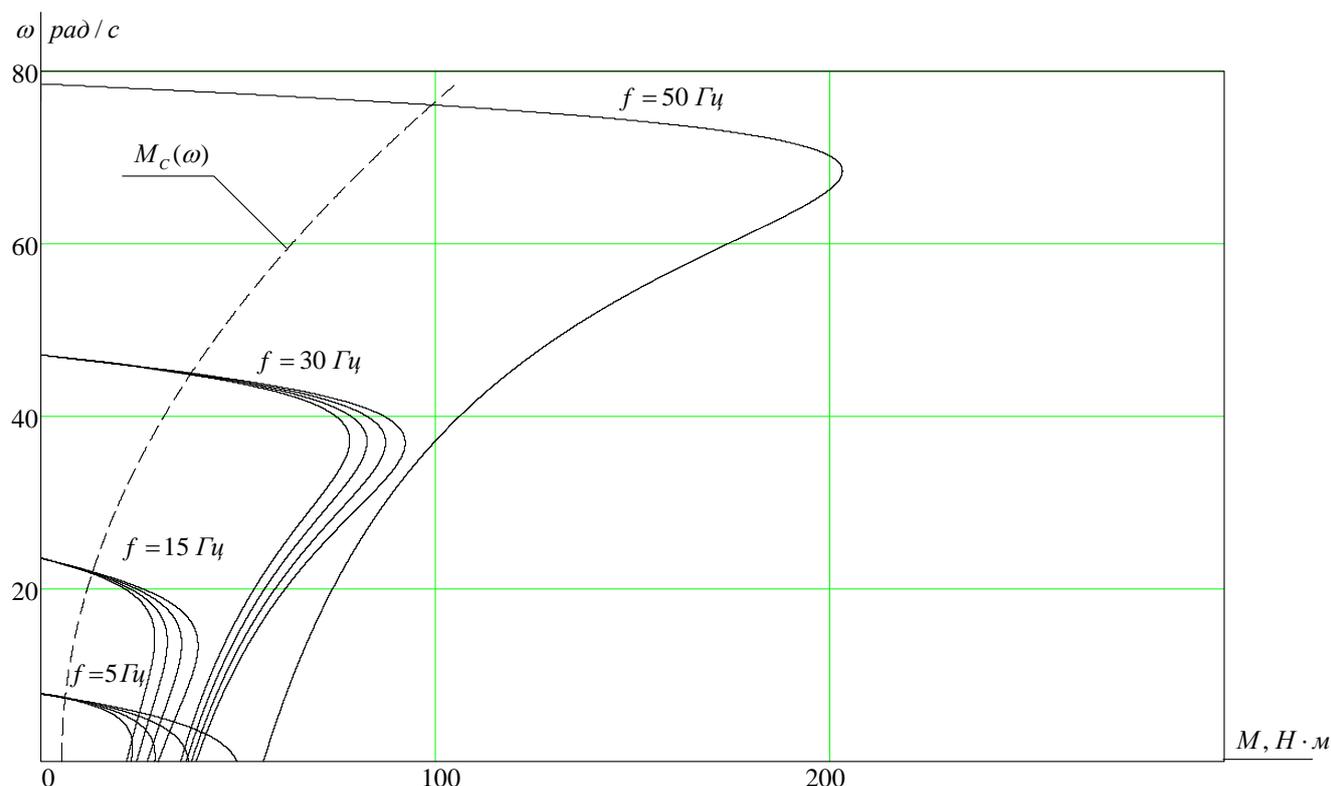


Рисунок 24 – Искусственные механические характеристики $\omega = f(M)$ при частотном регулировании с IR-компенсацией

3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СКАЛЯРНОГО ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB

Прямой пуск электродвигателя характеризуется значительными колебаниями электромагнитного момента и большими значениями пускового тока. Такие перегрузки неблагоприятно сказываются на двигателе, преобразователе и механизме вентилятора и приводят к сокращению срока их службы. Фактические перегрузки при прямом пуске могут быть еще больше, так как в методике расчета модели асинхронного электродвигателя и ее параметров не были учтены эффекты вытеснения тока в обмотке ротора и насыщения магнитной системы двигателя.

Плавный пуск вентилятора с ограничением величины динамического момента электропривода достигается применением задатчика интенсивности. Линейный задатчик интенсивности обеспечивает постоянное значение темпа нарастания (спадания при торможении) скорости. Задатчик интенсивности с S-образной характеристикой позволяет дополнительно ограничить вторую производную скорости (темп нарастания динамического момента электропривода) и тем самым повысить плавность переходных процессов в электроприводе [7].

Базовая функциональная схема асинхронного электропривода с частотным скалярным управлением и моделью двухфазного двигателя приведена на рисунке 25.

Структурная схема эквивалентного двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат приведена на рисунке 26 .

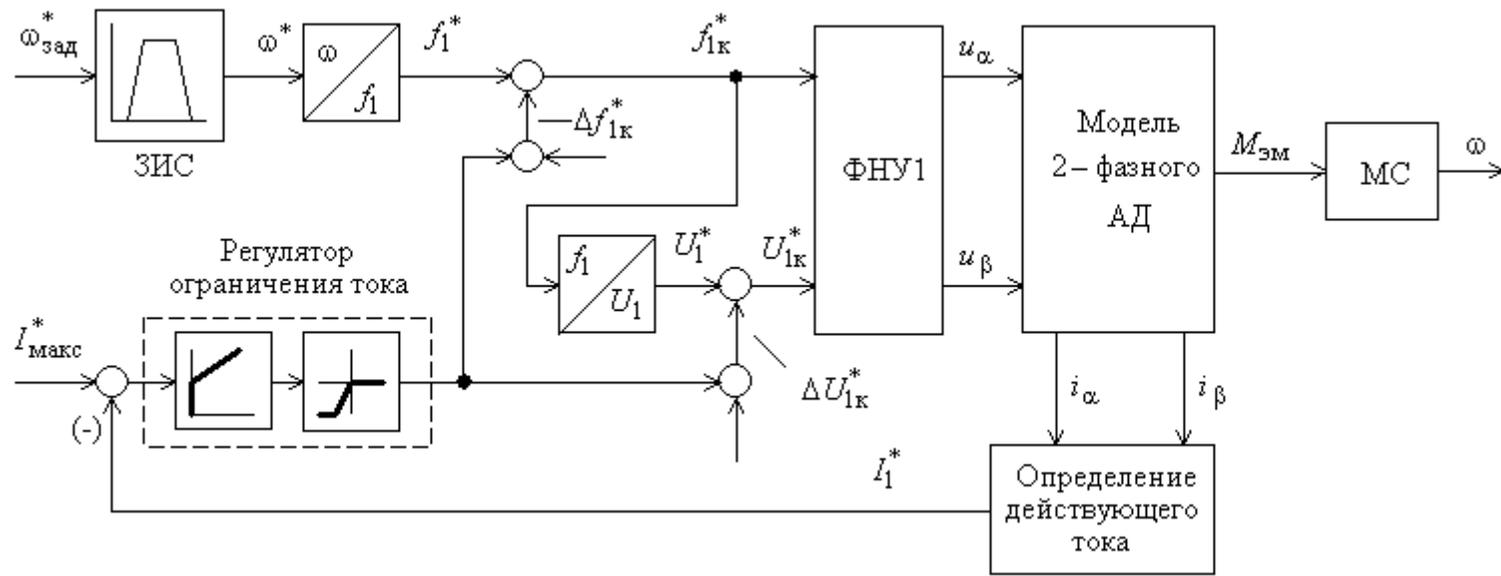


Рисунок 25 – Функциональная схема асинхронного электропривода с частотным скалярным управлением

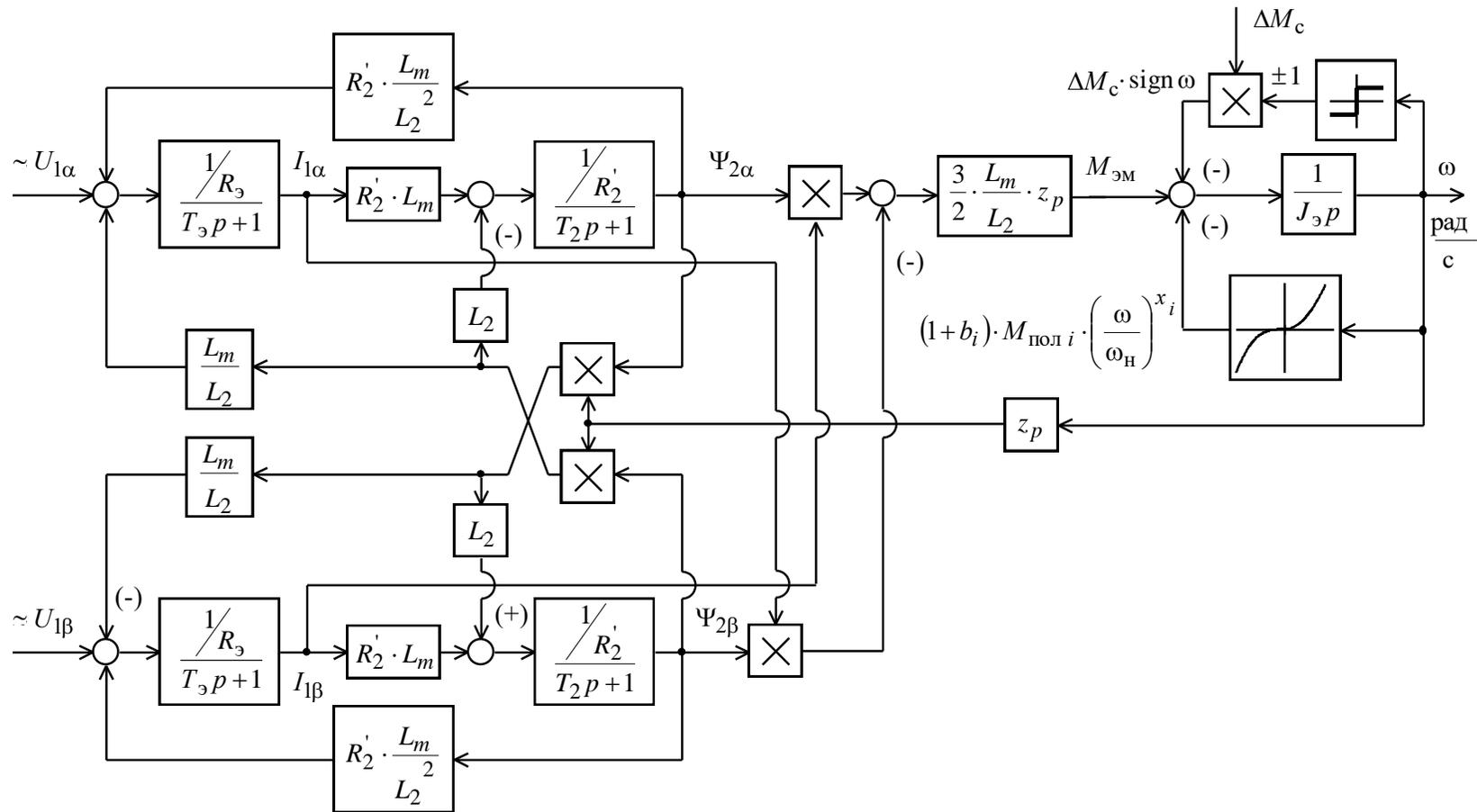


Рисунок 26 – Структурная схема асинхронного электродвигателя в неподвижной системе

координат

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu = 5,324 \cdot 10^{-3} + 0,118 = 0,123 \text{ Гн} \quad (3.1)$$

– ротора

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_\mu = 7,14 \cdot 10^{-3} + 0,118 = 0,125 \text{ Гн} \quad (3.2)$$

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,118^2}{0,123 \cdot 0,125} = 0,098 \quad (3.3)$$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_\sigma = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2^2} = 0,532 + 0,517 \cdot \frac{0,188^2}{0,125^2} = 0,992 \text{ Ом} \quad (3.4)$$

Электромагнитные постоянные времени:

$$T_\sigma = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_\sigma} = \frac{0,098 \cdot 0,123}{0,922} = 0,012 \text{ с}; \quad (3.5)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R'_2} = \frac{0,125}{0,517} = 0,241 \text{ с} \quad (3.6)$$

Для имитационных исследований системы частотно-регулируемого электропривода используется программа Matlab Simulink R2012a.

Имитационная модель регулируемого электропривода с частотным скалярным управлением, содержащая регулятор ограничения тока, IR-компенсацию и компенсацию скольжения составлена в соответствии со структурной схемой, приведенной на рисунке 25 и структурной схемой частотного управления, приведенной в [9]. Имитационная модель представлена на рисунке 27.

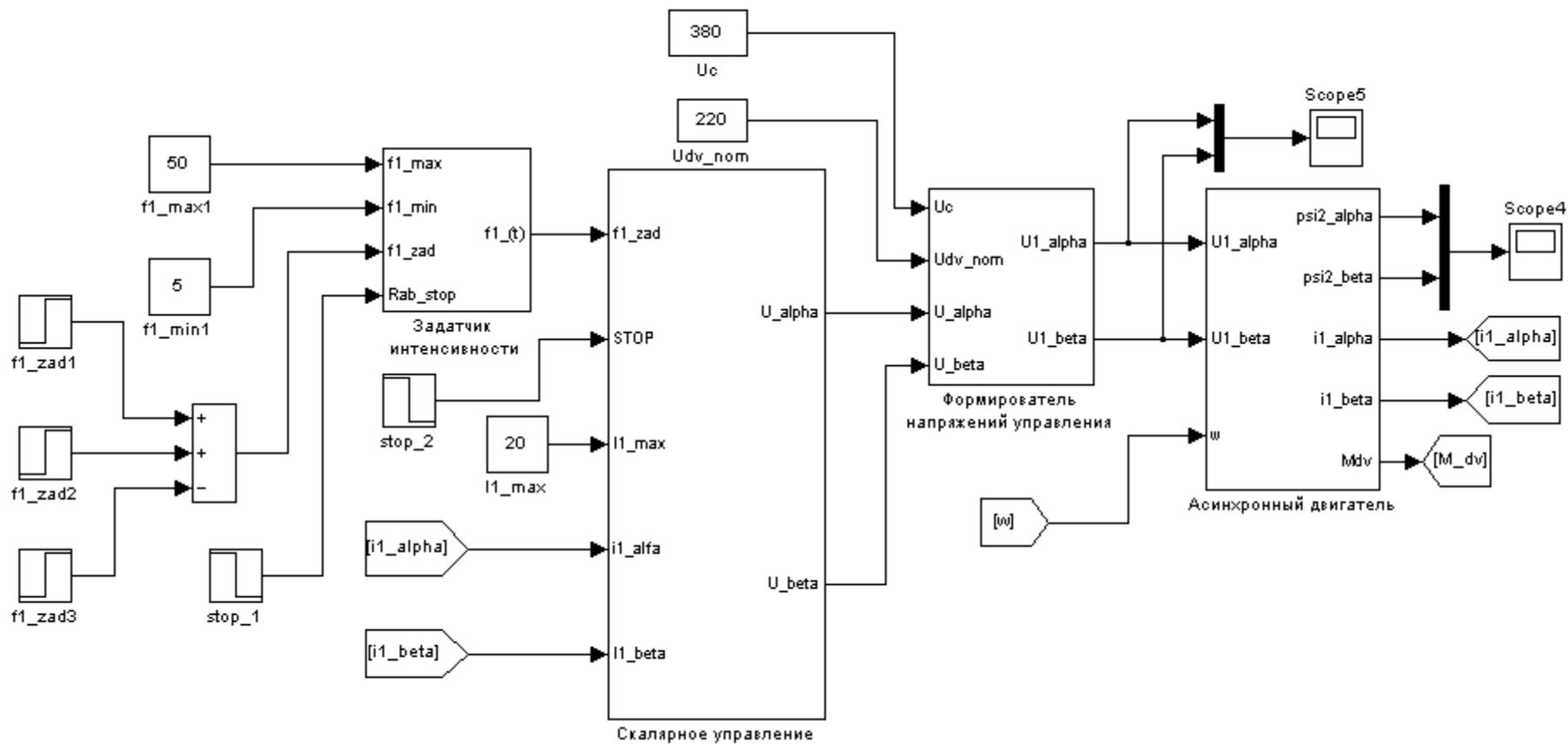


Рисунок 27 – Имитационная модель электропривода с частотным скалярным управлением

Модель вентиляторной нагрузки и инерционной массы с учетом переменного момента инерции J и переменного момента сопротивления реактивного характера M_{cP} приведены на рисунке 28 и 29 [7].

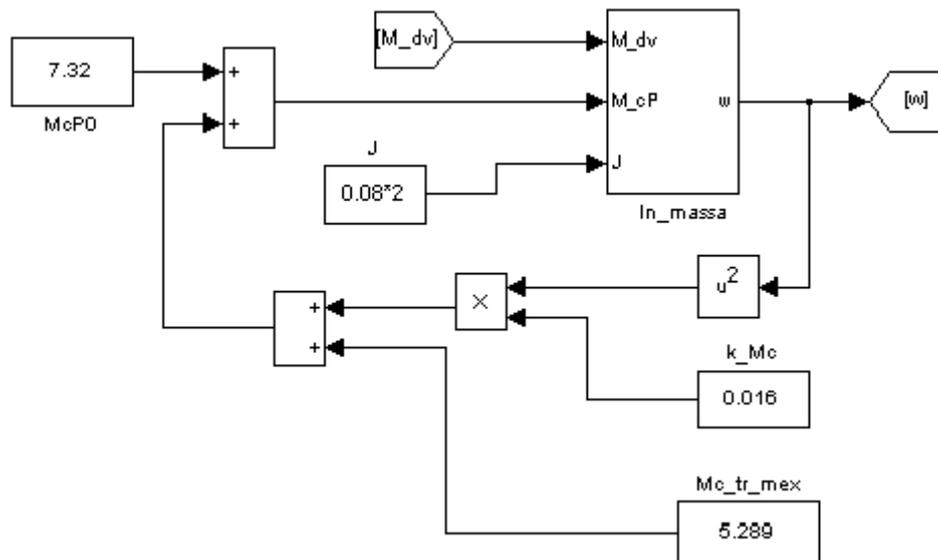


Рисунок 28 – Имитационная модель вентиляторной нагрузки

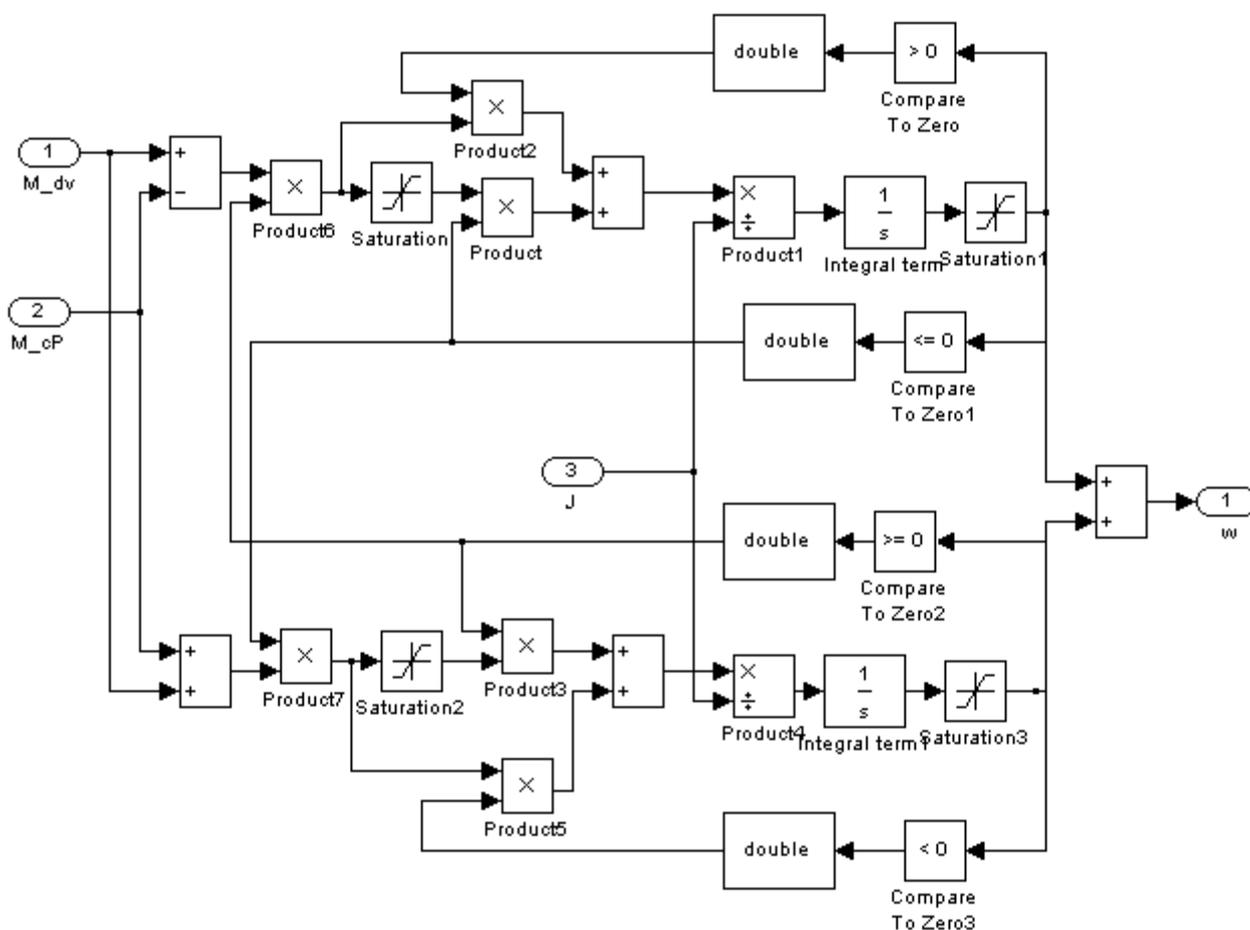


Рисунок 29 – Имитационная модель инерционной массы

Имитационная модель задатчика интенсивности на рисунке 30 .

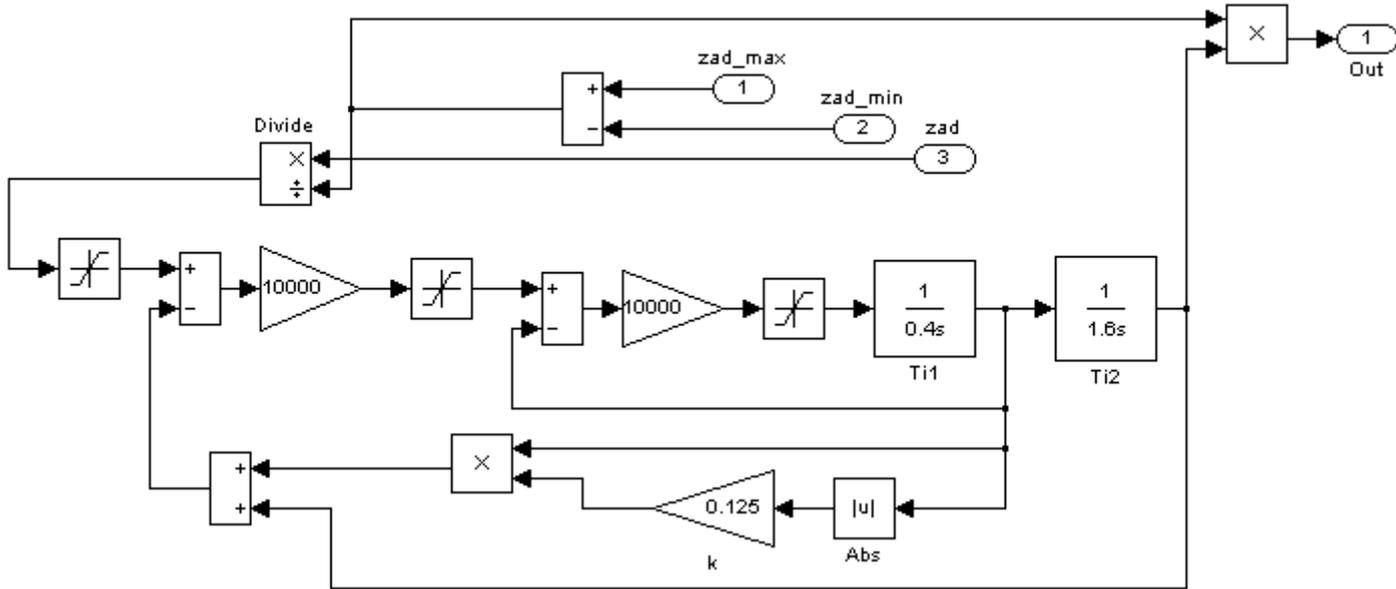


Рисунок 30 – Имитационная модель S-образного задатчика интенсивности

Постоянная времени задатчика интенсивности составляет: $T_{II} = 2 \cdot t_1 + t_2 = 2,4 \text{ с}$, где $t_1 = 0,4 \text{ с}$, $t_2 = 1,6 \text{ с}$.

Структура подсистемы «Скалярное управление» приведена на рисунке 31.

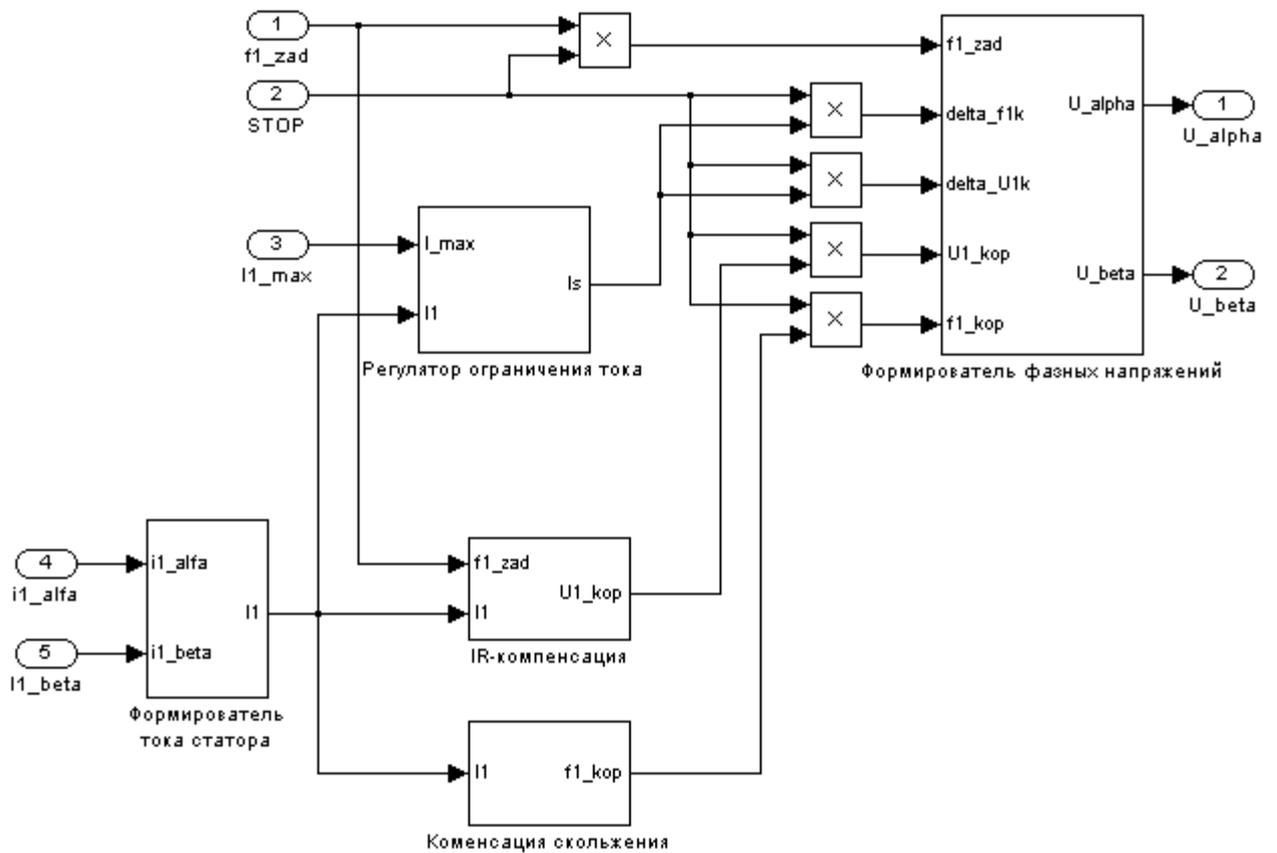


Рисунок 31 – Структура подсистемы «Скалярное управление»

Блок «Формирователь тока статора» содержит аналоговые датчики тока и блок, вычисляющий истинное значение тока. Структура приведена на рисунке 32.

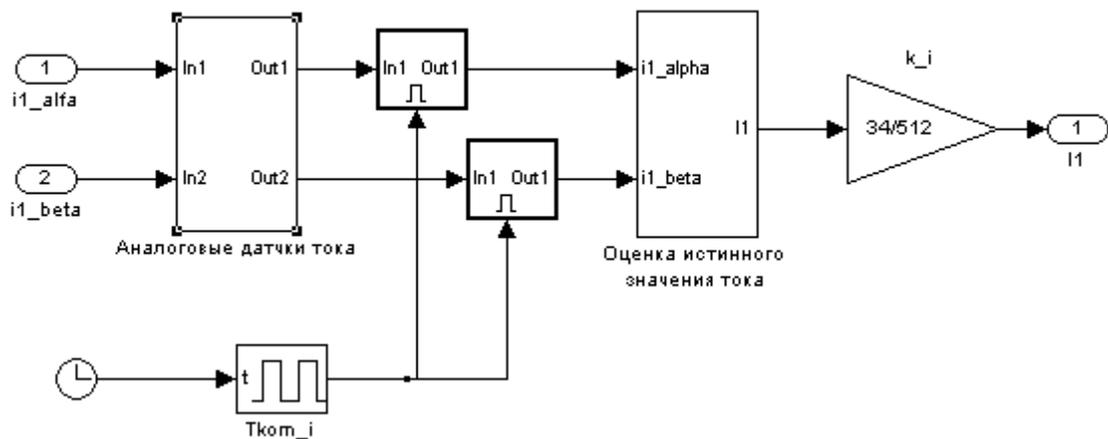


Рисунок 32 – Структура блока «Формирователь тока статора»

Структура блока «Аналоговые датчики тока» представлена на рисунке 33 [7].

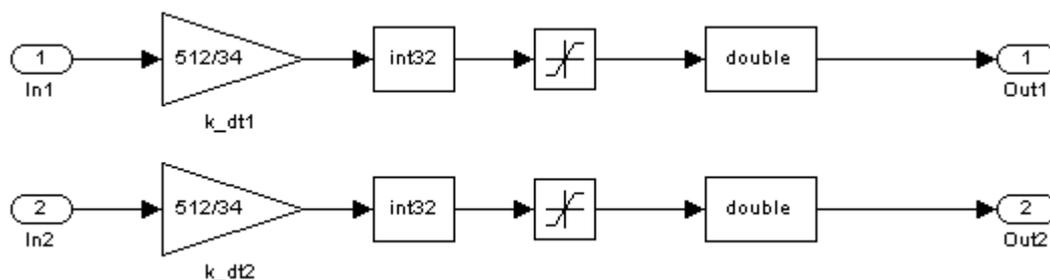


Рисунок 33 – Имитационная модель аналоговых датчиков тока

Коэффициент передачи датчика тока:

$$k_{DT} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{\text{АЦП.ДТ}}}}{\sigma_T \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.МАКС}})} = \frac{0,5 \cdot 2^{10}}{1,2 \cdot (\sqrt{2} \cdot 20)} = 15,06, \quad (3.7)$$

где $n_{\text{АЦП.ДТ}} = 10$ – разрядность АЦП датчика тока преобразователя,
 $\sigma_T = 1,2$ – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока.

Коэффициент обратной связи по току:

$$k_{\text{ОС.Т}} = \frac{1}{k_{DT}} = 0,00664$$

Структура блока «Вычислитель истинного значения тока» представлена на рисунке 34.

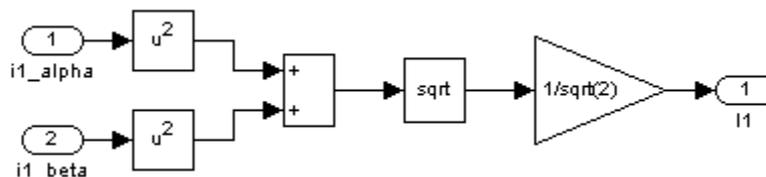


Рисунок 34 – Модель вычислителя истинного значения тока статора

Структура блока «регулятор ограничения тока» приведена на рисунке 35.

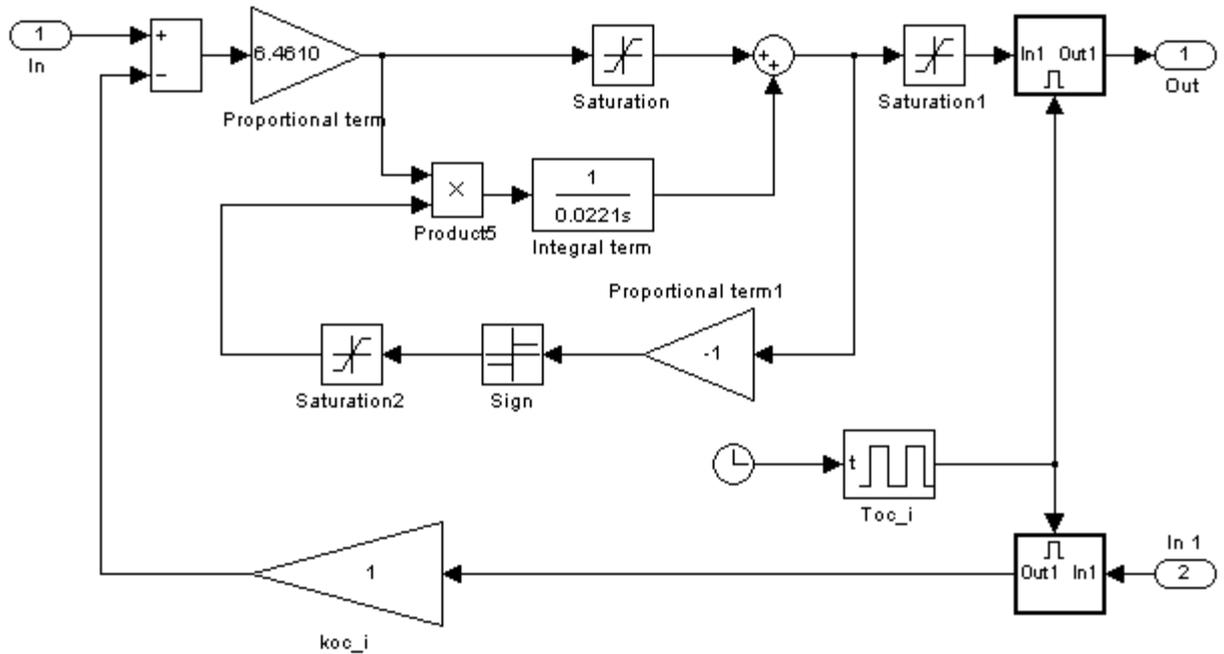


Рисунок 35 – Имитационная модель ПИ-регулятора ограничения тока

Передаточная функция ПИ-регулятора ограничения тока [7]:

$$W(p) = k_{PT} \cdot \frac{T_{PT} \cdot p + 1}{T_{PT} \cdot p} \quad (3.8)$$

Постоянная времени регулятора тока:

$$T_{PT} = T_{1\Omega} = 0,0221 \text{ с}$$

Коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_{PT} = \frac{T_{1\Omega} \cdot R_{1\Omega}}{k_H \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\mu T\Omega}} = \frac{0,0221 \cdot 0,9917}{4,437 \cdot 0,7071 \cdot 2 \cdot 0,0003}, \quad (3.9)$$

где k_H – коэффициент передачи по каналу частоты:

$$k_H = \frac{U_{1H}}{f_{1H} \cdot R_{1\Omega}} = \frac{220}{50 \cdot 0,9917} = 4,437 \text{ A / Гц};$$

k_T – коэффициента обратной связи по току:

$$k_H = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7071 \text{ 1 / A};$$

$a_T = 2$ – коэффициент типовой настройки контура тока на модульный оптимум (МО);

$T_{\mu TЭ}$ – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока:

$$T_{\mu TЭ} = \frac{T_{OC.T}}{n_T} + T_{ЗУ.И} = \frac{0,0002}{2} + 0,0002 = 0,0003 \text{ с};$$

где $T_{OC.T} = T_{ШИМ} = 0,0002 \text{ с}$ – интервал квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока;

$n_T = 2$ – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном (при настройке контура тока на МО);

$T_{ЗУ.И} = T_{ШИМ} = 0,0002 \text{ с}$ – интервал времени задержки подачи управления регулятора тока к ключам инвертора.

Структура блока IR-компенсации приведена на рисунке 36.

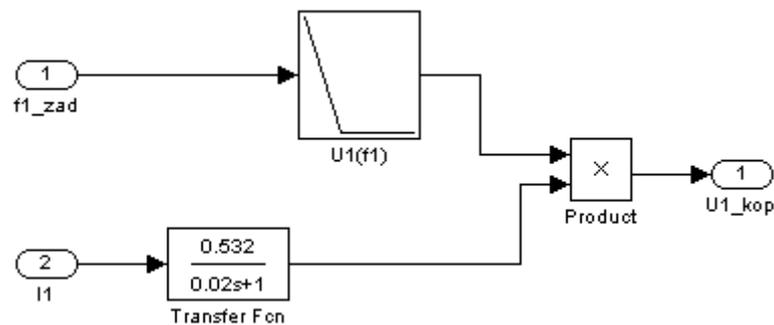


Рисунок 36 – Реализация скалярной IR-компенсации

Передаточная функция цепи положительной обратной связи по каналу регулирования напряжения [7]:

$$W(p)_{iR} = \frac{k_{iR} \cdot R_1}{T_{iR} \cdot p + 1}, \quad (3.10)$$

где $T_{iR} = 0,02 \text{ с}$ – постоянная времени задержки компенсации момента, $k_{iR} = 0,1$ – коэффициент компенсации момента.

Значение коэффициента обратной связи k_{iR} задается в виде функции $k_{iR}(f_1)$ и уменьшается по мере увеличения частоты преобразователя.

Структура блока «Формирователь фазных напряжений» приведена на рисунке 37.

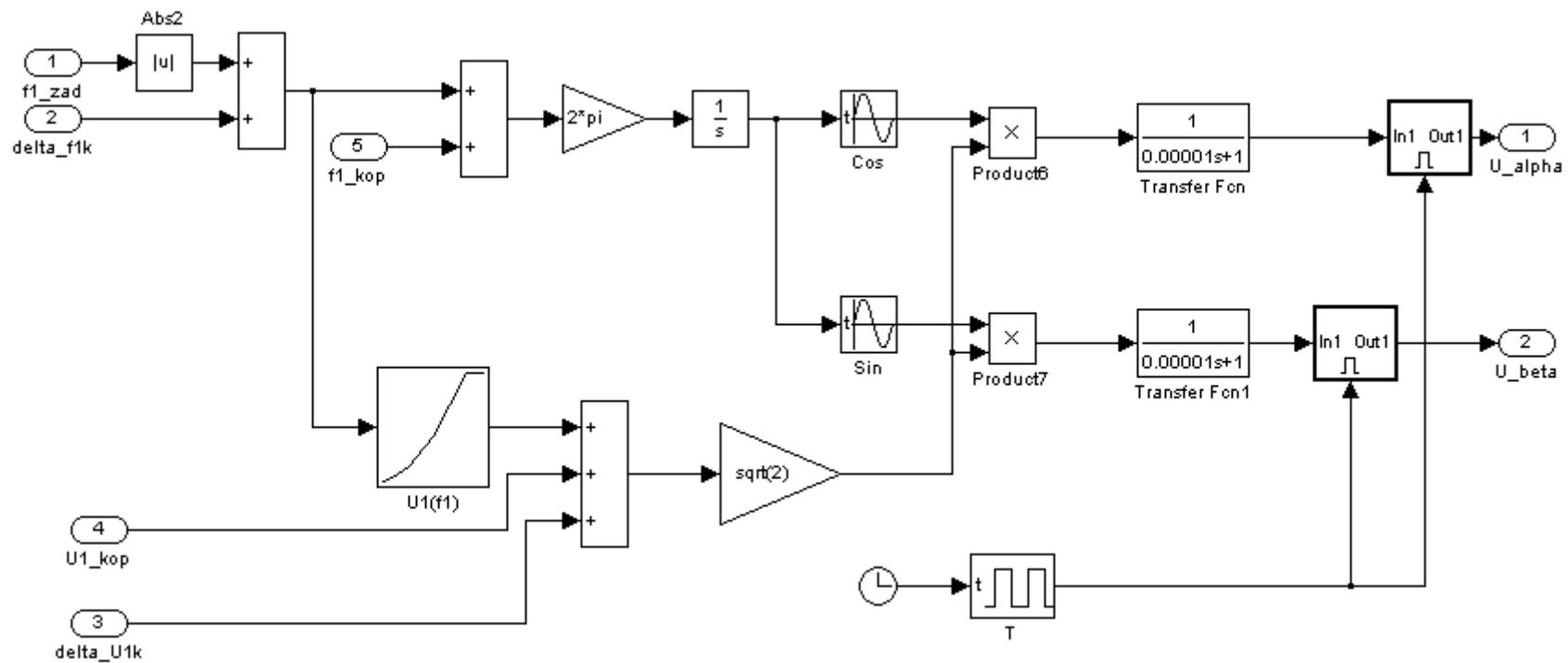


Рисунок 37 – Структура подсистемы «Формирователь фазных напряжений»

Вольт-частотная характеристика задается следующими точками:

1. $f = 5 \text{ Гц}, U = 11 \text{ В};$
2. $f = 15 \text{ Гц}, U = 29 \text{ В};$
3. $f = 30 \text{ Гц}, U = 86 \text{ В};$
4. $f = 50 \text{ Гц}, U = 220 \text{ В}.$

Инвертор напряжения представлен апериодическим звено первого порядка с передаточной функцией [7, 9]:

$$W_{ин}(p) = \frac{k_{ин}}{1 + T_{ин} \cdot p}, \quad (3.11)$$

Где $k_{ин} = 1$ – коэффициент передачи инвертора;

$T_{ин} = 0,00001 \text{ с}$ – постоянная времени инвертора.

Структура блока «Формирователь напряжений управления» представлена на рисунке 38.

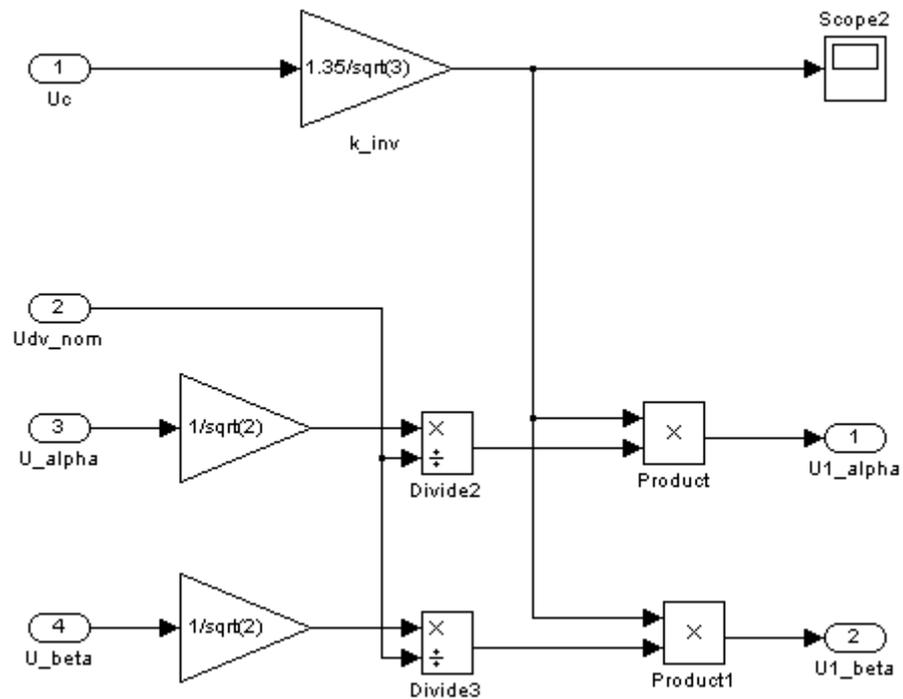


Рисунок 38 – Структура блока «Формирователь напряжений управления»

Данный блок формирует управляющие напряжения от инвертора на асинхронный двигатель.

Напряжение звена постоянного тока преобразователя [7]:

$$U_{d0} = 1,35 \cdot U_c = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В}, \quad (3.12)$$

где $U_c = 380 \text{ В}$ – линейное напряжение источника питания преобразователя.

Коэффициент усиления инвертора:

$$k_{II} = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} = \frac{513}{\sqrt{3}} = 296,18$$

В процессе имитационных исследований рассматриваются следующие режимы работы системы электропривод – вентилятор [7]:

- пуск электропривода на минимальную рабочую скорость;
- пуск электропривода на максимальную рабочую скорость;
- пуск электропривода с минимальной рабочей скорости на максимальную;
- торможение электропривода с максимальной скорости до минимальной;
- остановка электропривода.

При пуске частотно-регулируемых асинхронных электроприводов производится первоначальный прямой пуск двигателя на минимальную частоту $f_{\text{мин}}$, а затем по окончании переходного процесса, когда потокосцепления достигнут установившихся значений, осуществляется дальнейший разгон привода от задатчика интенсивности до значения заданной скорости [9].

Переходные процессы скорости $\omega = f(t)$, момента $M = f(t)$ и тока статора $I = f(t)$ при пуске на минимальную рабочую скорость вентилятора приведены на рисунке 39, при пуске на максимальную рабочую скорость на

рисунке 40. На рисунке 41 приведены переходные процессы при отработке вентилятором следующего цикла работы:

- пуск на минимальную частоту ($f_{u \text{ мин}} = 5 \text{ Гц}$);
- переход на минимальную рабочую скорость вентилятора ($f_{p \text{ мин}} = 20 \text{ Гц}$);
- переход на максимальную рабочую скорость вентилятора ($f_{p \text{ макс}} = 50 \text{ Гц}$);
- переход на минимальную частоту ($f_{u \text{ мин}} = 5 \text{ Гц}$);
- остановка электропривода;

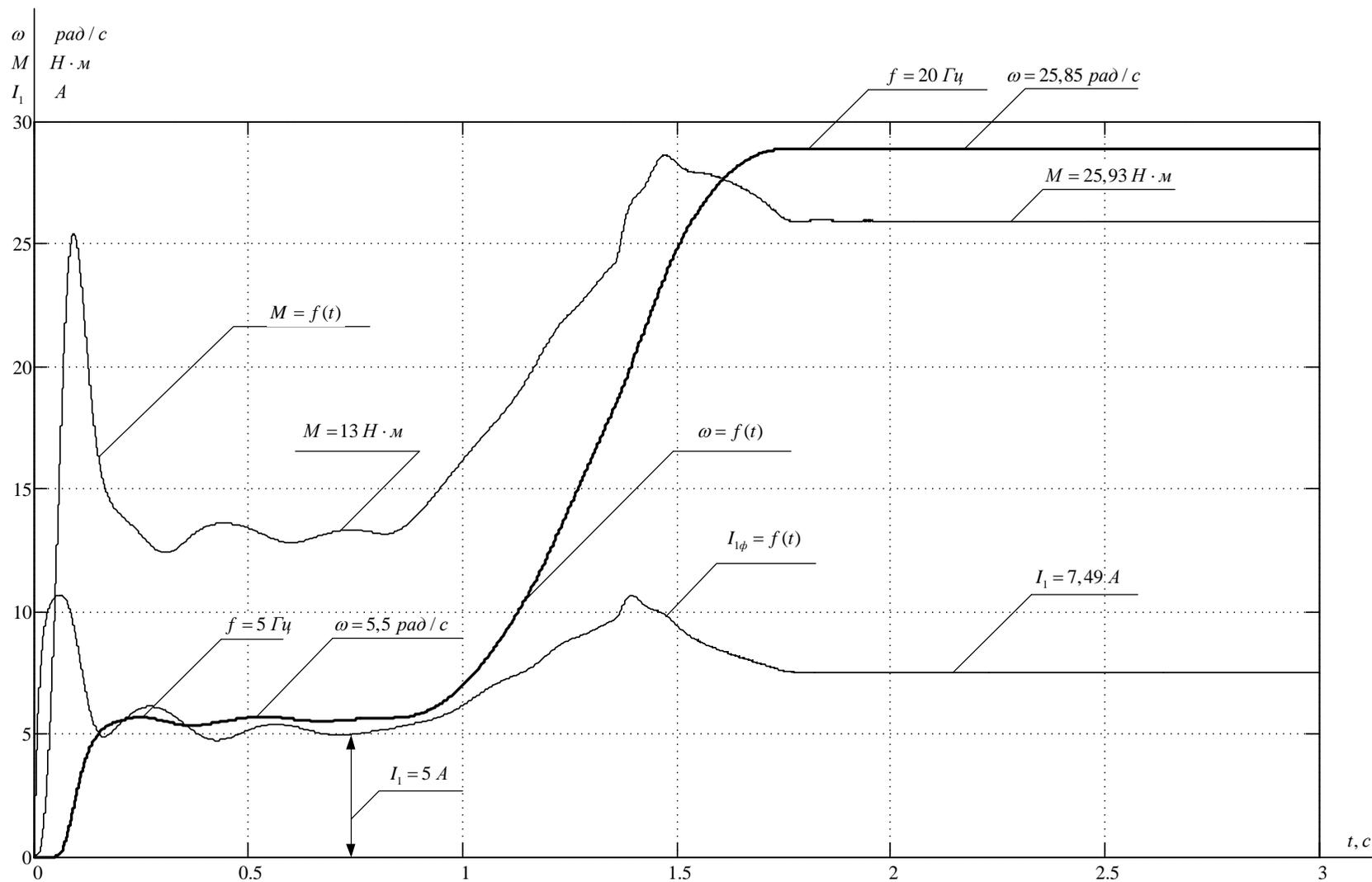


Рисунок 39 – Переходные процессы $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при пуске на минимальную рабочую скорость вентилятора

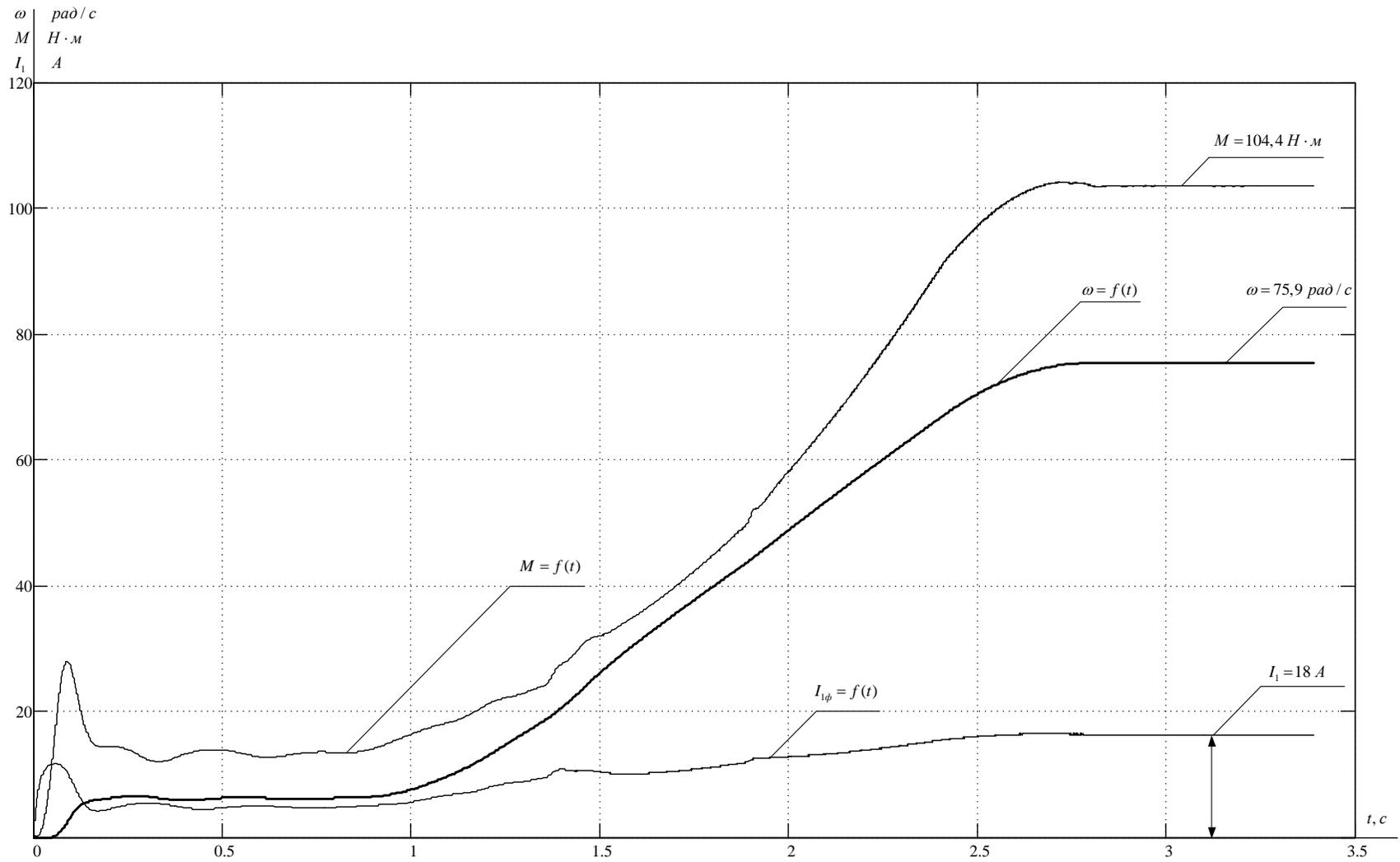


Рисунок 40 – Переходные процессы $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при пуске на максимальную рабочую скорость вентилятора

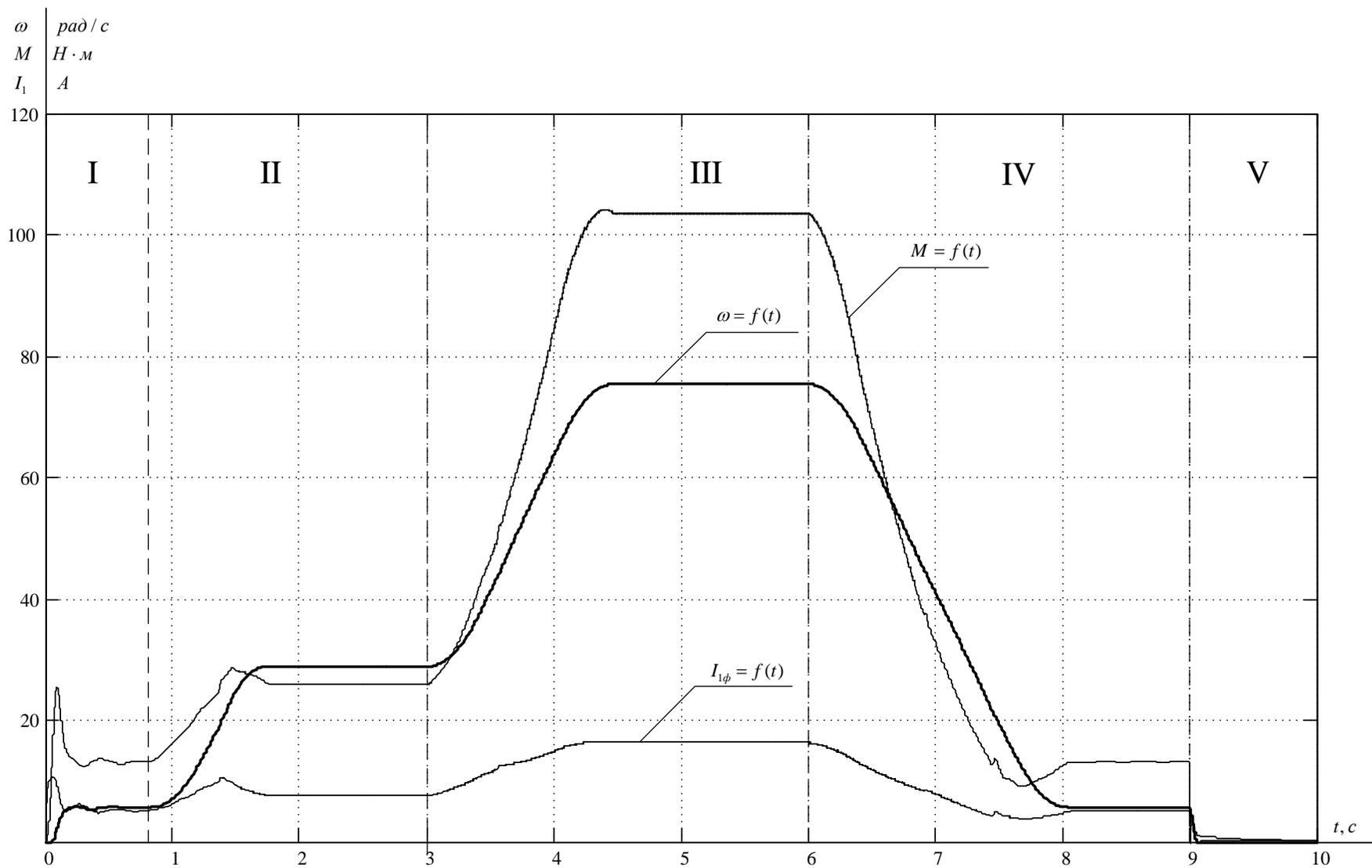


Рисунок 41 – Переходные процессы $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при обработке вентилятором заданного цикла работы

На рисунке 42 приведены переходные процессы $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при пуске двигателя с токовой отсечкой в канале регулирования частоты.

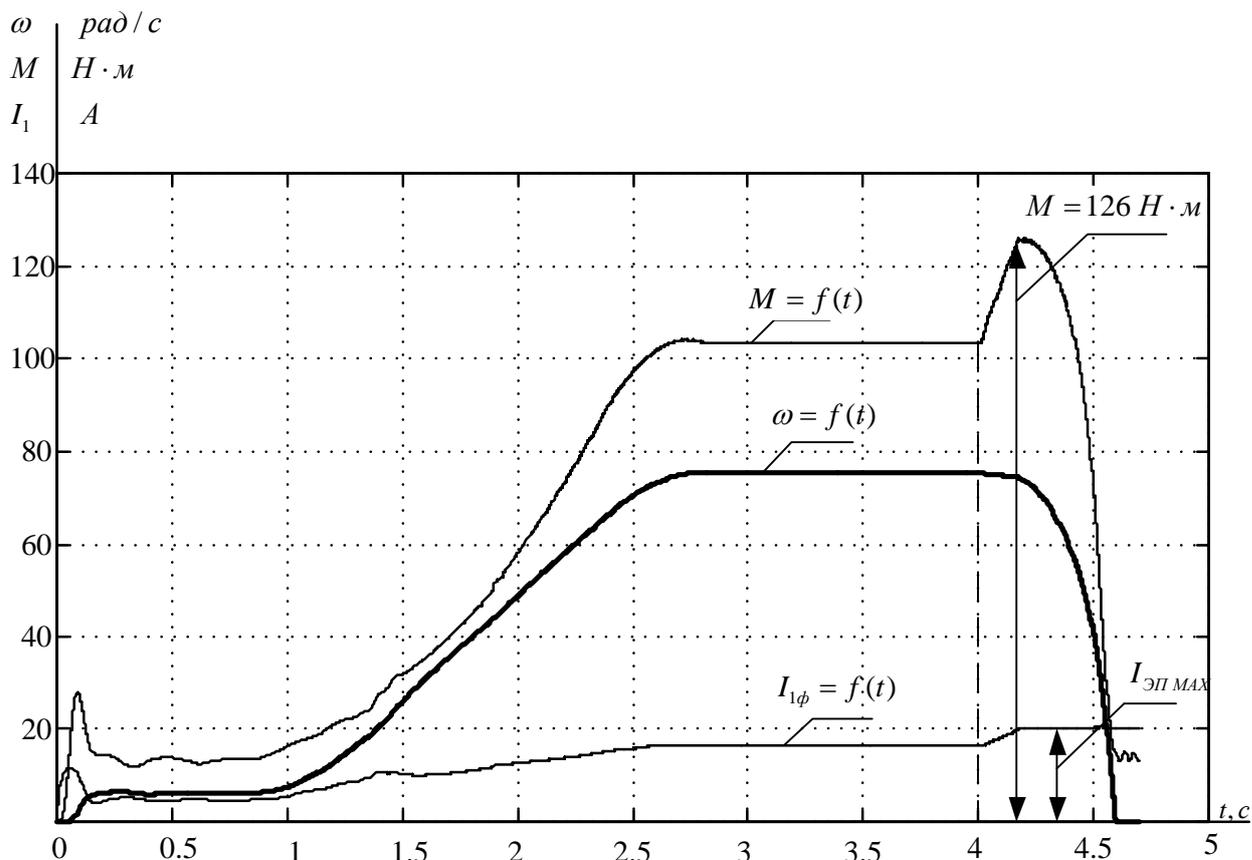


Рисунок 42 – переходные процессы $\omega = f(t)$, $M = f(t)$, $I = f(t)$ при пуске двигателя с токовой отсечкой в канале регулирования частоты

Время переходных процессов определяется постоянной времени датчика интенсивности и составляет: 2 с при пуске на максимальную рабочую скорость; 1 с при пуске на минимальную рабочую скорость. Применение датчика интенсивности повышает плавность переходных процессов. Перерегулирование скорости отсутствует.

Ток с статора в режиме ограничения поддерживается на заданном значении $I_{ЭП\ МАКС} = 20\ А$. В момент времени $t = 4\ с$ началось плавное увеличение момента сопротивления на валу асинхронного двигателя до полной его остановки. При действии токовой отсечки электромагнитный момент ограничился на уровне $126\ Н\cdot м$. Окончательное выключение электропривода происходит при срабатывании времятоковой защиты [13].

4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

4.1. Алгоритм работы автоматической системы вентиляции

Разработанный алгоритм работы автоматической системы вентиляции представлен на рисунке 43.

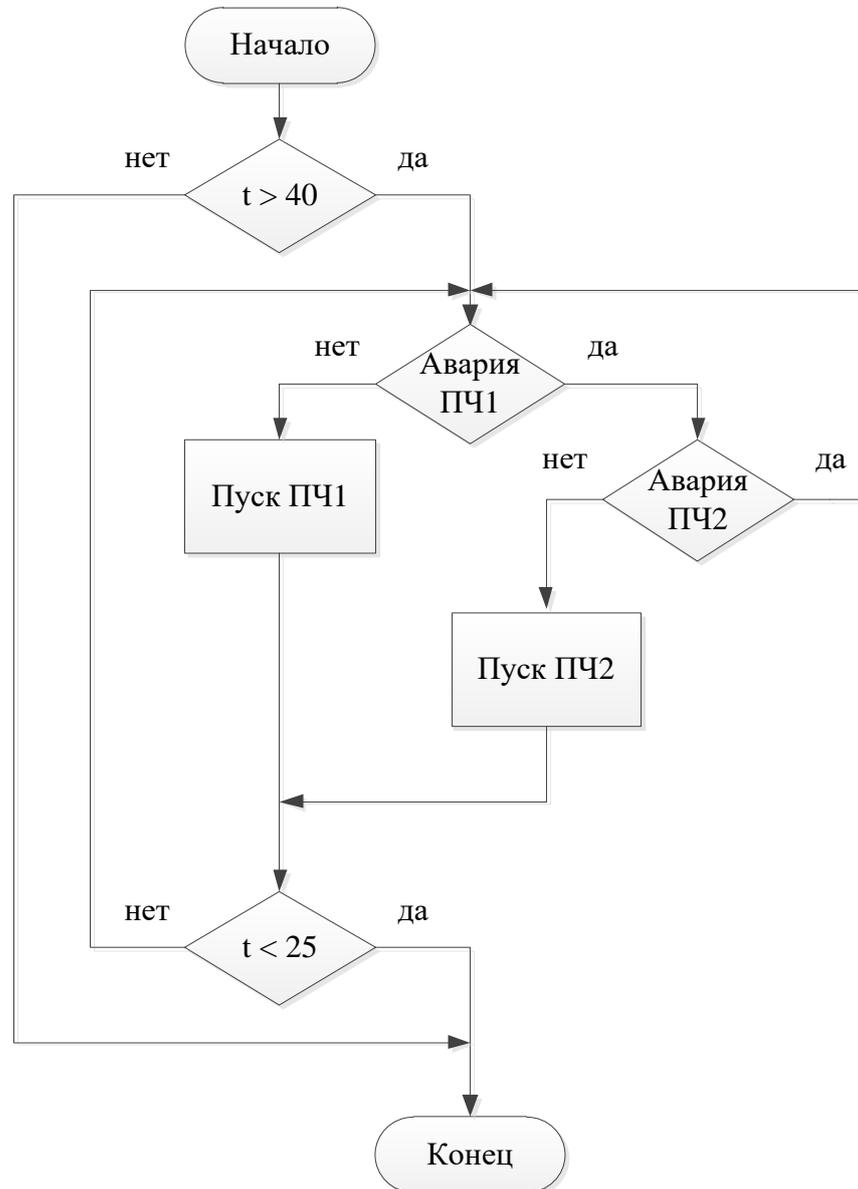


Рисунок 43 – Алгоритм работы автоматической системы вентиляции

В соответствии с данным алгоритмом можно выделить следующие основные режимы работы системы [5]:

1. запуск основного преобразователя частоты (ПЧ1) при превышении температуры плюс 40 °С;

2. запуск резервного преобразователя (ПЧ2) при наличии аварии на основном и условии превышения температуры;
3. остановка преобразователя частоты при достижении температуры плюс 25 °С и ниже.

4.2. Реализация алгоритма работы в программной среде контроллера

Программное обеспечение контроллера основано на системе разработки CoDeSys компании «3S-Smart Software Solutions» (Германия) и предназначено для программирования контроллеров на языках в соответствии со стандартом IEC-61131-3.

В базовый состав комплекса CoDeSys входят две системы: система разработки и система исполнения. Система разработки функционирует на компьютере и представляет собой инструмент для проектирования, конфигурирования системы и создания кода управляющей программы для ПЛК. Система исполнения (ИС) функционирует в контроллере и обеспечивает загрузку кода прикладной программы в контроллер, исполнение управляющей программы и выполнение отладочных функций.

Базовая версия CoDeSys специально адаптирована для функционирования в контроллере Элсима.

Разработка прикладных программ в среде CoDeSys обеспечивает:

1. единую среду конфигурирования, разработки программ и отладки;
2. возможность разработки программ на пяти языках программирования IEC 61131-3:

- IL (Instruction List) – список инструкций;
- ST (Structured Text) – структурированный текст;
- FBD (Functional Block Diagram) – функциональные блочные диаграммы;
- LD (Ladder Diagram) – релейно-контактные схемы;
- SFC (Sequential Function Chart) – последовательные функциональные схемы;

3. прямую генерацию машинного кода, что обеспечивает высокое быстродействие управляющих программ;
4. возможность производить отладку программы без привлечения аппаратных устройств благодаря наличию встроенного эмулятора.

В программной среде CoDeSys был создан проект для контроллера Элсима М-01. Созданный проект отображается в области «Устройства» в виде дерева объектов, представленного на рисунке 44. Проект включает одно или несколько устройств – элементов первого уровня (узел «Device (ELSYMA)»). Каждое устройство включает два основных объекта: «Pis Logic» (контейнер для программных компонентов) и аппаратную конфигурацию. Контейнер «Pis Logic», в свою очередь, содержит:

- Application – представляет собой набор объектов для запуска программы в конкретном аппаратном устройстве и включает в себя следующие компоненты:
 1. менеджер библиотек – компонент, предоставляющий доступ к библиотекам CoDeSys, которые представляют собой специализированный набор функций и функциональных блоков;
 2. программные компоненты:
 - PLC_PRG (PRG) – основная программа, самый верхний уровень проекта. При запуске проекта в контроллере программы PLC_PRG первая получает управления;
 - любое количество других программных компонентов (POU);
- конфигурация задач – конфигуратор для управления задачами с главной задачей Main Task;
- другие компоненты, поддерживаемые системой CoDeSys (список глобальных переменных, Interface и др.).

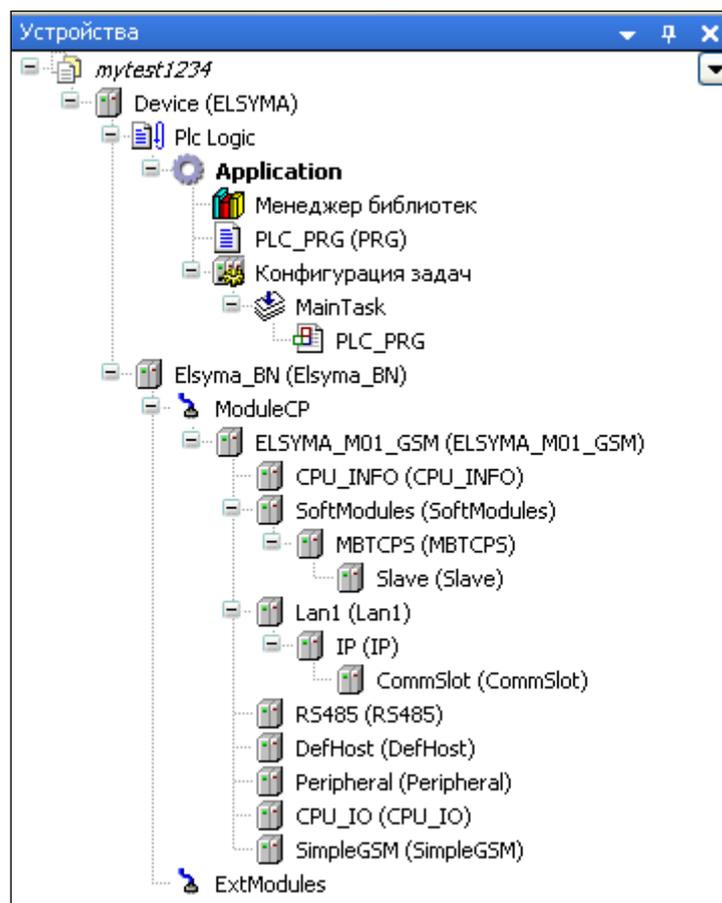


Рисунок 44 – Структура дерева устройств

Базовый узел подключения добавляется в первую очередь к узлу Device (ELSYMA) и служит для логической организации взаимодействия контроллера Элсима с модулями удаленного ввода-вывода.

Контроллер добавляется к базовому узлу и включает в себя следующие узлы:

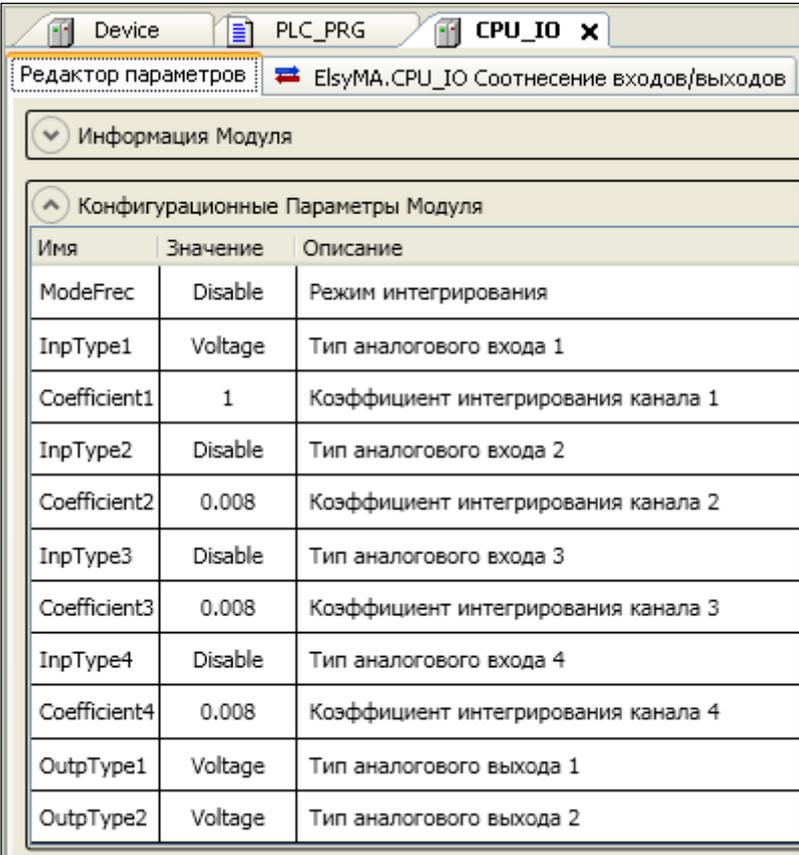
- настройка и работа с контроллером (CPU_INFO);
- программные модули (SoftModules);
- настройка и работа с интерфейсом Ethernet (LAN);
- настройка и работа с интерфейсом RS-485 (RS485);
- настройка сетевого шлюза (DefHost);
- настройка и работа с периферийными устройствами (Peripheral);
- настройка и работа с вводом-выводом контроллера (CPU_IO);
- настройка и работы с коммуникационным интерфейсом GSM (SimpleGSM).

Доступ к данным модуля осуществляется в области просмотра и конфигурирования устройства.

Закладка данных модуля включает:

- редактор параметров;
- соотнесение входов/выходов;
- состояние;
- информация.

На закладке «редактор параметров» был сконфигурирован аналоговый вход по напряжению в диапазоне 0 .. 10 В. Окно редактора параметров приведено на рисунке 45.



Имя	Значение	Описание
ModeFrec	Disable	Режим интегрирования
InpType1	Voltage	Тип аналогового входа 1
Coefficient1	1	Кэффициент интегрирования канала 1
InpType2	Disable	Тип аналогового входа 2
Coefficient2	0.008	Кэффициент интегрирования канала 2
InpType3	Disable	Тип аналогового входа 3
Coefficient3	0.008	Кэффициент интегрирования канала 3
InpType4	Disable	Тип аналогового входа 4
Coefficient4	0.008	Кэффициент интегрирования канала 4
OutpType1	Voltage	Тип аналогового выхода 1
OutpType2	Voltage	Тип аналогового выхода 2

Рисунок 45 – Закладка «Редактор параметров»

На закладке «Соотнесение входов/выходов» отображаются входные/выходные и диагностические данные. Окно закладки «Соотнесение входов/выходов» приведено на рисунке 46.

Переменная	Соотн...	Канал	Адрес	Тип
Каналы				
Outputs				
Analog Outputs				
Digital Outputs				
Application.PLC_PRG.myDigOut1	↔	DigOut1	%QX...	BIT
Application.PLC_PRG.myDigOut2	↔	DigOut2	%QX...	BIT
Application.PLC_PRG.myDigOut3	↔	DigOut3	%QX...	BIT
Application.PLC_PRG.myDigOut4	↔	DigOut4	%QX...	BIT
Application.PLC_PRG.myRelay1	↔	RelayOut1	%QX...	BIT
Application.PLC_PRG.myRelay2	↔	RelayOut2	%QX...	BIT
		RelayOut3	%QX...	BIT
		RelayOut4	%QX...	BIT
		DigOutDi...	%IB...	BYTE
Inputs				
Analog Inputs				
Application.PLC_PRG.myAIIn	↔	AIn1	%ID...	REAL
		AIn1Diag	%IB...	BYTE
		AIn2	%ID...	REAL
		AIn2Diag	%IB...	BYTE
		AIn3	%ID...	REAL
		AIn3Diag	%IB...	BYTE
		AIn4	%ID...	REAL
		AIn4Diag	%IB...	BYTE
Digital inputs				
		DigInDiag	%IB...	BYTE
Application.PLC_PRG.myDigIn1	↔	DigIn1_1	%IX...	BIT
Application.PLC_PRG.myDigIn2	↔	DigIn1_2	%IX...	BIT
		DigIn1_3	%IX...	BIT
		DigIn1_4	%IX...	BIT
		DigIn1_5	%IX...	BIT

Рисунок 46 – Представление входных/выходных и диагностических данных

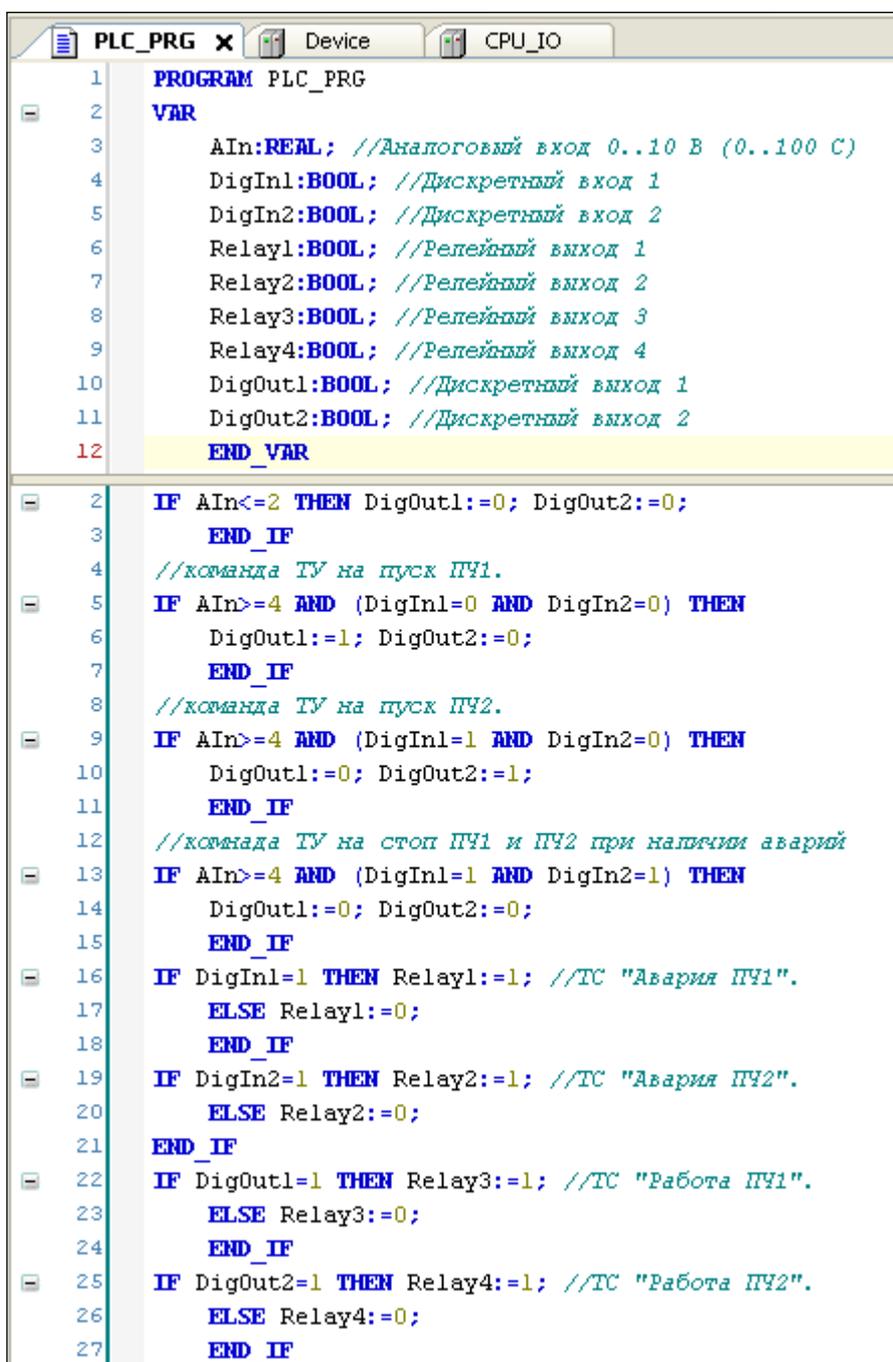
Данные представлены в форме таблицы сигналов «Каналы». Сигнал – это сегмент данных с набором атрибутов и с определенным адресом в памяти контроллера.

Из управляющей программы доступ к сигналам осуществляется через переменные, назначенные сигналам в конфигурации. Такие сигналы называются смappированными.

Таким образом, переменные «myDigOut1», «myDigOut2», «myDigOut3», «myDigOut4», «myRelay1», «myRelay2» были назначены, соответственно, выходным сигналам «DigOut1», «DigOut2», «DigOut3»,

«DigOut4», «RelayOut1», «RelayOut2», а переменные «myAnIn», «myDigIn1», «myDigIn2 – входным сигналам «AIn1», «DigIn1_1», «DigIn1_2».

Код управляющей программы реализован на языке структурированного текста в соответствии с алгоритмом работы автоматической системы вентиляции. Окно с кодом программы представлено на рисунке 47.



```
1  PROGRAM PLC_PRG
2  VAR
3      AIn:REAL; //Аналоговый вход 0..10 В (0..100 С)
4      DigIn1:BOOL; //Дискретный вход 1
5      DigIn2:BOOL; //Дискретный вход 2
6      Relay1:BOOL; //Релейный выход 1
7      Relay2:BOOL; //Релейный выход 2
8      Relay3:BOOL; //Релейный выход 3
9      Relay4:BOOL; //Релейный выход 4
10     DigOut1:BOOL; //Дискретный выход 1
11     DigOut2:BOOL; //Дискретный выход 2
12 END_VAR

2  IF AIn<=2 THEN DigOut1:=0; DigOut2:=0;
3      END_IF
4      //команда TV на пуск ПЧ1.
5  IF AIn>=4 AND (DigIn1=0 AND DigIn2=0) THEN
6      DigOut1:=1; DigOut2:=0;
7      END_IF
8      //команда TV на пуск ПЧ2.
9  IF AIn>=4 AND (DigIn1=1 AND DigIn2=0) THEN
10     DigOut1:=0; DigOut2:=1;
11     END_IF
12     //команда TV на стоп ПЧ1 и ПЧ2 при наличии аварий
13  IF AIn>=4 AND (DigIn1=1 AND DigIn2=1) THEN
14     DigOut1:=0; DigOut2:=0;
15     END_IF
16  IF DigIn1=1 THEN Relay1:=1; //TC "Авария ПЧ1".
17     ELSE Relay1:=0;
18     END_IF
19  IF DigIn2=1 THEN Relay2:=1; //TC "Авария ПЧ2".
20     ELSE Relay2:=0;
21     END_IF
22  IF DigOut1=1 THEN Relay3:=1; //TC "Работа ПЧ1".
23     ELSE Relay3:=0;
24     END_IF
25  IF DigOut2=1 THEN Relay4:=1; //TC "Работа ПЧ2".
26     ELSE Relay4:=0;
27     END_IF
```

Рисунок 47 – Код управляющей программы

По интерфейсу Ethernet устанавливается связь с контроллером. Взаимодействие среды разработки с системой исполнения контроллера

осуществляется через специальное приложение – шлюз связи (Gateway).
Окно с отображением установления связи с ПЛК представлено на рисунке 48.

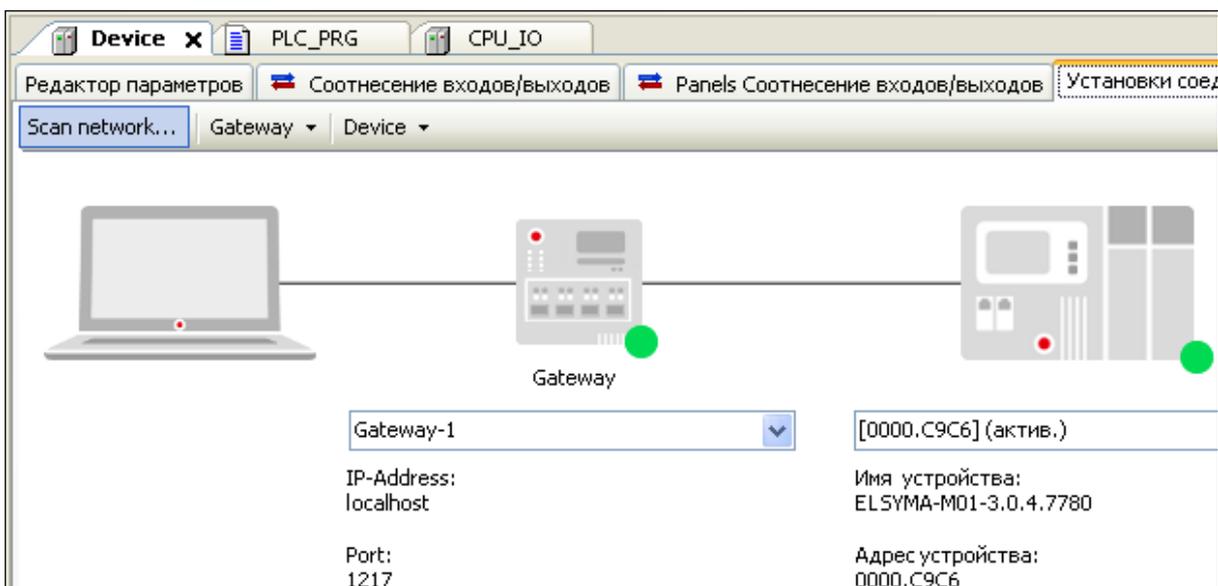


Рисунок 48 – Добавление шлюза связи

В списке устройств шлюза выбирается активный контроллер. Окно с выбором устройств, подключенных к общей сети приведено на рисунке 49.

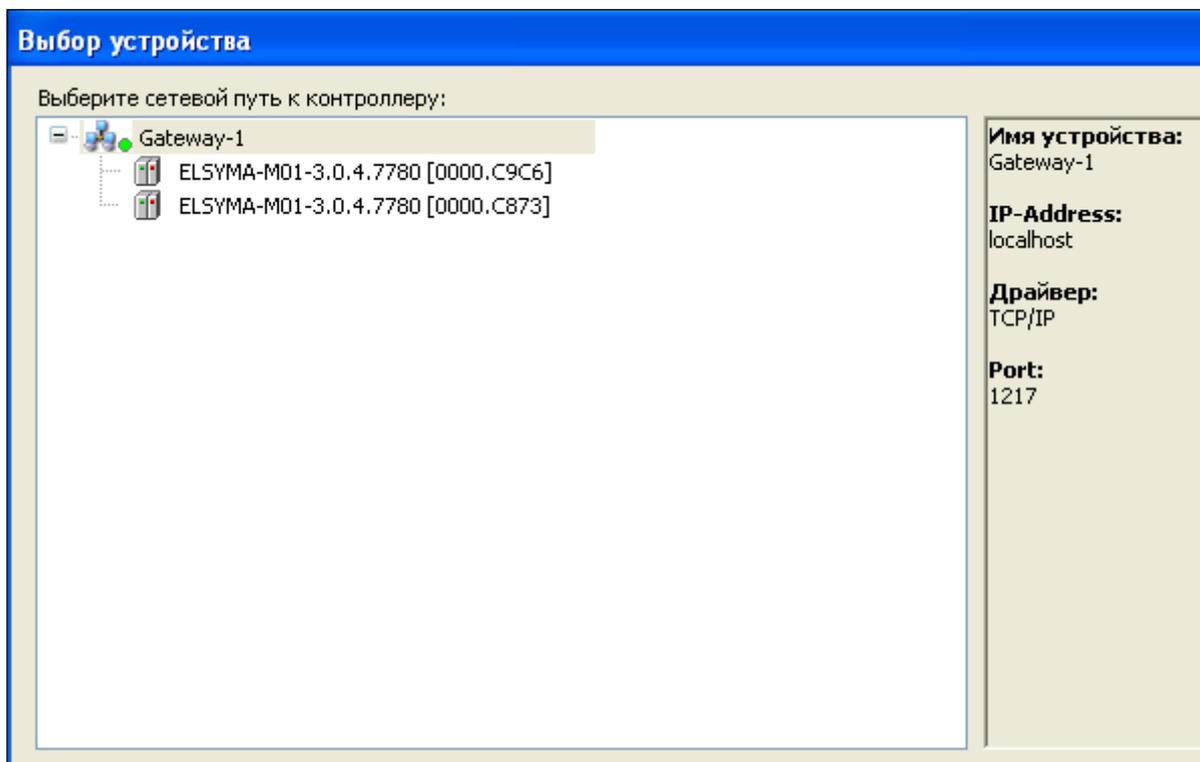


Рисунок 49 – Выбор активного контроллера, подключенного к общей сети

При запуске программы контроллер переходит в online-режим и запускается процесс мониторинга, при котором:

- индикация соответствует рабочему режиму;
- данные обновляются с заданным периодом;
- в окне редактора «POU» и на закладках «Редактор параметров», «Соотнесение входов/выходов» отображаются текущие значения переменных.

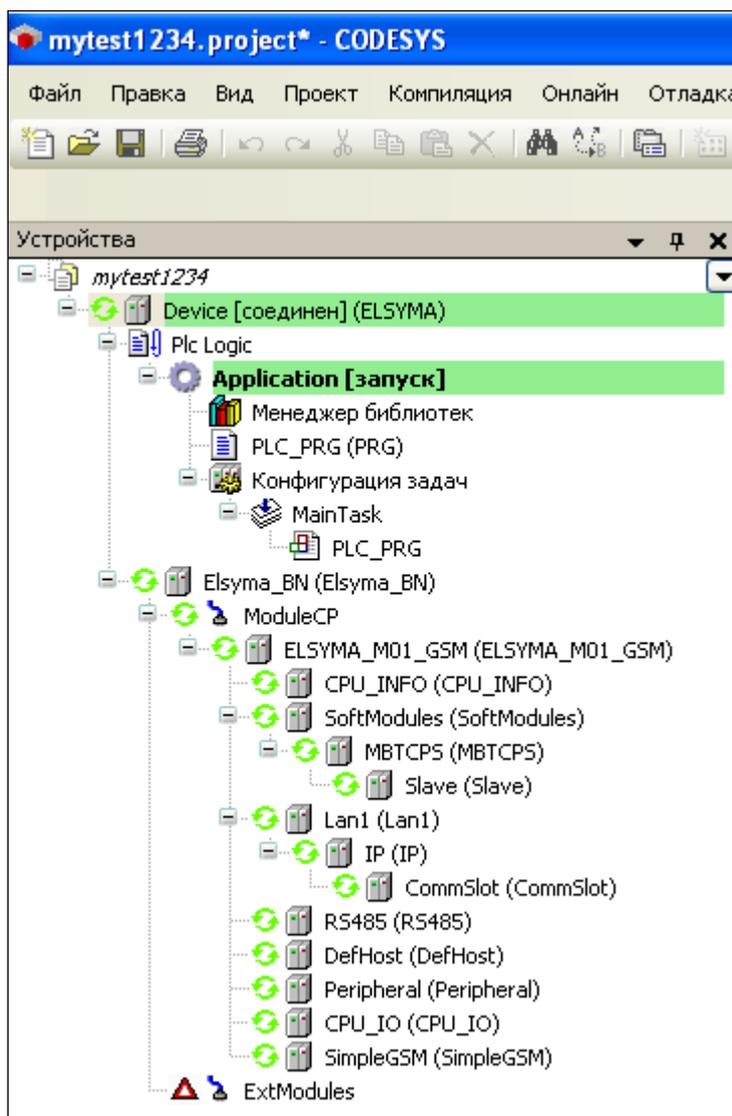


Рисунок 50 – Работа в online-режиме

Для отладки управляющей программы используется мониторинг переменных с возможностью:

- просмотра списка переменных;
- записи и фиксации значений переменных;

- контроля процесса выполнения кода в реальном времени.

На рисунке 51 приведено окно с кодом управляющей программы при работе контроллера в реальном времени в соответствии с режимом «1» алгоритма работы автоматической системы вентиляции.

Выражение	Тип	Значение	Подготовленн
AIn	REAL	4.08166	
DigIn1	BOOL	FALSE	
DigIn2	BOOL	FALSE	
Relay1	BOOL	FALSE	
Relay2	BOOL	FALSE	
Relay3	BOOL	TRUE	
Relay4	BOOL	FALSE	
DigOut1	BOOL	TRUE	
DigOut2	BOOL	FALSE	

```

2 IF AIn 4.08 <=2 THEN DigOut1 TRUE :=0; DigOut2 FALSE :=0;
3   END_IF
4 //команда TV на пуск ПЧ1.
5 IF AIn 4.08 >=4 AND (DigIn1 FALSE =0 AND DigIn2 FALSE =0) THEN
6   DigOut1 TRUE :=1; DigOut2 FALSE :=0;
7   END_IF
8 //команда TV на пуск ПЧ2.
9 IF AIn 4.08 >=4 AND (DigIn1 FALSE =1 AND DigIn2 FALSE =0) THEN
10  DigOut1 TRUE :=0; DigOut2 FALSE :=1;
11  END_IF
12 //команда TV на стоп ПЧ1 и ПЧ2 при наличии аварии
13 IF AIn 4.08 >=4 AND (DigIn1 FALSE =1 AND DigIn2 FALSE =1) THEN
14  DigOut1 TRUE :=0; DigOut2 FALSE :=0;
15  END_IF
16 IF DigIn1 FALSE =1 THEN Relay1 FALSE :=1; //TC "Авария ПЧ1".
17   ELSE Relay1 FALSE :=0;
18   END_IF
19 IF DigIn2 FALSE =1 THEN Relay2 FALSE :=1; //TC "Авария ПЧ2".
20   ELSE Relay2 FALSE :=0;
21   END_IF
22 IF DigOut1 TRUE =1 THEN Relay3 TRUE :=1; //TC "Работа ПЧ1".
23   ELSE Relay3 TRUE :=0;
24   END_IF
25 IF DigOut2 FALSE =1 THEN Relay4 FALSE :=1; //TC "Работа ПЧ2".
26   ELSE Relay4 FALSE :=0;
27   END_IF
28 RETURN
  
```

Рисунок 51 – Окно с кодом программы при работе ПЛК в режиме «1»

На рисунке 52 приведено окно с кодом программы при работе ПЛК в соответствии с режимом «2» алгоритма работы.

Выражение	Тип	Значение	Подготовленн
AIn	REAL	4.074116	
DigIn1	BOOL	TRUE	
DigIn2	BOOL	FALSE	
Relay1	BOOL	TRUE	
Relay2	BOOL	FALSE	
Relay3	BOOL	FALSE	
Relay4	BOOL	TRUE	
DigOut1	BOOL	FALSE	
DigOut2	BOOL	TRUE	


```

2  IF AIn 4.07 <=2 THEN DigOut1 FALSE :=0; DigOut2 TRUE :=0;
3      END_IF
4      //команда TV на пуск ПЧ1.
5  IF AIn 4.07 >=4 AND (DigIn1 TRUE =0 AND DigIn2 FALSE =0) THEN
6      DigOut1 FALSE :=1; DigOut2 TRUE :=0;
7      END_IF
8      //команда TV на пуск ПЧ2.
9  IF AIn 4.07 >=4 AND (DigIn1 TRUE =1 AND DigIn2 FALSE =0) THEN
10     DigOut1 FALSE :=0; DigOut2 TRUE :=1;
11     END_IF
12     //команда TV на стоп ПЧ1 и ПЧ2 при наличии аварии
13  IF AIn 4.07 >=4 AND (DigIn1 TRUE =1 AND DigIn2 FALSE =1) THEN
14     DigOut1 FALSE :=0; DigOut2 TRUE :=0;
15     END_IF
16  IF DigIn1 TRUE =1 THEN Relay1 TRUE :=1; //TC "Авария ПЧ1".
17     ELSE Relay1 TRUE :=0;
18     END_IF
19  IF DigIn2 FALSE =1 THEN Relay2 FALSE :=1; //TC "Авария ПЧ2".
20     ELSE Relay2 FALSE :=0;
21     END_IF
22  IF DigOut1 FALSE =1 THEN Relay3 FALSE :=1; //TC "Работа ПЧ1".
23     ELSE Relay3 FALSE :=0;
24     END_IF
25  IF DigOut2 TRUE =1 THEN Relay4 TRUE :=1; //TC "Работа ПЧ2".
26     ELSE Relay4 TRUE :=0;
27     END_IF
28  RETURN

```

Рисунок 52 – Окно с кодом программы при работе ПЛК в режиме «2»

Рисунок 53 иллюстрирует код программы при работе контроллера в режиме «3»

Выражение	Тип	Значение	Подготовленн
AIn	REAL	1.83993506	
DigIn1	BOOL	FALSE	
DigIn2	BOOL	FALSE	
Relay1	BOOL	FALSE	
Relay2	BOOL	FALSE	
Relay3	BOOL	FALSE	
Relay4	BOOL	FALSE	
DigOut1	BOOL	FALSE	
DigOut2	BOOL	FALSE	


```

2  IF AIn 1.84 <=2 THEN DigOut1 FALSE :=0; DigOut2 FALSE :=0;
3      END_IF
4      //команда TV на пуск ПЧ1.
5  IF AIn 1.84 >=4 AND (DigIn1 FALSE =0 AND DigIn2 FALSE =0) THEN
6      DigOut1 FALSE :=1; DigOut2 FALSE :=0;
7      END_IF
8      //команда TV на пуск ПЧ2.
9  IF AIn 1.84 >=4 AND (DigIn1 FALSE =1 AND DigIn2 FALSE =0) THEN
10     DigOut1 FALSE :=0; DigOut2 FALSE :=1;
11     END_IF
12     //команда TV на стоп ПЧ1 и ПЧ2 при наличии аварий
13  IF AIn 1.84 >=4 AND (DigIn1 FALSE =1 AND DigIn2 FALSE =1) THEN
14     DigOut1 FALSE :=0; DigOut2 FALSE :=0;
15     END_IF
16  IF DigIn1 FALSE =1 THEN Relay1 FALSE :=1; //TC "Авария ПЧ1".
17     ELSE Relay1 FALSE :=0;
18     END_IF
19  IF DigIn2 FALSE =1 THEN Relay2 FALSE :=1; //TC "Авария ПЧ2".
20     ELSE Relay2 FALSE :=0;
21     END_IF
22  IF DigOut1 FALSE =1 THEN Relay3 FALSE :=1; //TC "Работа ПЧ1".
23     ELSE Relay3 FALSE :=0;
24     END_IF
25  IF DigOut2 FALSE =1 THEN Relay4 FALSE :=1; //TC "Работа ПЧ2".
26     ELSE Relay4 FALSE :=0;
27     END_IF
28  RETURN

```

Рисунок 53 – Окно с кодом программы при работе ПЛК в режиме «3»

При возникновении аварии или неисправности на преобразователе частоты контроллер формирует сигнал на остановку ПЧ. На рисунке 46 представлена ситуация, когда имеется неисправность на обоих преобразователях.

Выражение	Тип	Значение	Подготовленн
AIn	REAL	4.07232	
DigIn1	BOOL	TRUE	
DigIn2	BOOL	TRUE	
Relay1	BOOL	TRUE	
Relay2	BOOL	TRUE	
Relay3	BOOL	FALSE	
Relay4	BOOL	FALSE	
DigOut1	BOOL	FALSE	
DigOut2	BOOL	FALSE	


```

2 IF AIn 4.07 <=2 THEN DigOut1 FALSE :=0; DigOut2 FALSE :=0;
3   END_IF
4 //команда TV на пуск ПЧ1.
5 IF AIn 4.07 >=4 AND (DigIn1 TRUE =0 AND DigIn2 TRUE =0) THEN
6   DigOut1 FALSE :=1; DigOut2 FALSE :=0;
7   END_IF
8 //команда TV на пуск ПЧ2.
9 IF AIn 4.07 >=4 AND (DigIn1 TRUE =1 AND DigIn2 TRUE =0) THEN
10  DigOut1 FALSE :=0; DigOut2 FALSE :=1;
11  END_IF
12 //команда TV на стоп ПЧ1 и ПЧ2 при наличии аварий
13 IF AIn 4.07 >=4 AND (DigIn1 TRUE =1 AND DigIn2 TRUE =1) THEN
14  DigOut1 FALSE :=0; DigOut2 FALSE :=0;
15  END_IF
16 IF DigIn1 TRUE =1 THEN Relay1 TRUE :=1; //TC "Авария ПЧ1".
17   ELSE Relay1 TRUE :=0;
18   END_IF
19 IF DigIn2 TRUE =1 THEN Relay2 TRUE :=1; //TC "Авария ПЧ2".
20   ELSE Relay2 TRUE :=0;
21   END_IF
22 IF DigOut1 FALSE =1 THEN Relay3 FALSE :=1; //TC "Работа ПЧ1".
23   ELSE Relay3 FALSE :=0;
24   END_IF
25 IF DigOut2 FALSE =1 THEN Relay4 FALSE :=1; //TC "Работа ПЧ2".
26   ELSE Relay4 FALSE :=0;
27   END_IF
28 RETURN

```

Рисунок 54 – Окно с кодом управляющей программы при работе ПЛК в случае возникновения аварии на обоих ПЧ

При возникновении ситуации, когда имеются аварии на обоих преобразователях, и при снятии аварии с «ПЧ2», происходит пуск «ПЧ2». Если в процессе его работы снялся сигнал об аварии с основного преобразователя, то контроллер переключает управляющую команду на пуск «ПЧ1».

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, направленного на повышение надежности системы вентиляции машинного отделения судна.

Повышение надежности системы достигается за счет:

1. применения преобразователя частоты, который обеспечивает пуск и остановку асинхронного двигателя с приводом радиального вентилятора, а также защиты электродвигателя от перегрузок;
2. применения двух взаимозаменяемых электроприводов с автоматическим управлением от программируемого логического контроллера, который дополнительно выполняет функции контроля и сигнализации текущего состояния системы вентиляции.

5.1. Планирование научно-исследовательских работ

5.1.1. Перечень работ и оценка времени их выполнения

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ.

В рабочую группу для выполнения научных исследований входят: инженер (10-ый разряд) и научный руководитель, занимающий должность доцента (15-ый разряд).

Перечень работ и время их выполнения представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Планирование перечня работ и оценка времени их выполнения

№ п.	Наименование работ	Количество исполнителей	Продолжительность, дни
1	Выдача и получение задания	Инженер (10 р), Научный руководитель (15 р)	1
2	Изучение литературы	Инженер (10 р)	40
3	Разработка функциональной схемы	Инженер (10 р)	5
4	Расчет необходимого воздухообмена в машинном отделении судна	Инженер (10 р)	2
5	Выбор силового оборудования	Инженер (10 р)	2
6	Расчет параметров схемы замещения электродвигателя	Инженер (10 р)	4
7	Выбор аппаратуры управления и защиты	Инженер (10 р)	2
8	Расчет и построение статических и динамических характеристик электропривода	Инженер (10 р)	10
9	Имитационное моделирование	Инженер (10 р)	20
10	Проверка и анализ результатов	Инженер (10 р), Научный руководитель (15 р)	5
11	Разработка автоматического управления электроприводом	Инженер (10 р)	5
12	Разработка электрической схемы соединений	Инженер (10 р)	10
13	Проверка схемы соединений	Научный руководитель (15 р)	4
14	Оформление пояснительной записки	Инженер (10р)	10
Итого		Инженер Научный руководитель	116 10

5.2. Расчет бюджета для научно-технического исследования

5.2.1. Смета затрат на научно-техническое исследование

Смета затрат на научно-техническое исследование (НТИ) рассчитывается по выражению:

$$K_{np} = K_{mat} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о.} + K_{пр} + K_{накл}, \quad (5.1)$$

где K_{mat} – материальные затраты на канцелярские товары;

$K_{ам}$ – амортизация компьютерной техники;

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

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

$K_{пр}$ – прочие затраты;

$K_{накл}$ – накладные расходы.

5.2.2. Материальные затраты

В данном проекте материальные затраты осуществляются только на канцелярские товары.

Материальные затраты составляют:

$$K_{mat} = 1000 \text{ руб.}$$

5.2.3. Амортизация компьютерной техники

Амортизация компьютерной техники определяется по выражению:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}, \quad (5.2)$$

где $T_{исп.кт} = 100$ дней – время использования компьютерной техники;

$T_{кал} = 365$ дней – календарное время;

$Ц_{кт} = 25000$ руб. – цена компьютерной техники;

$T_{сл} = 5$ лет – срок службы компьютерной техники.

Амортизация компьютерной техники составляет:

$$K_{ам} = \frac{100}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1370 \text{ руб.}$$

5.2.4. Заработная плата

Заработная плата – это 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:

$$K_{з/пл} = ЗП_{ф инж} + ЗП_{ф нр} \quad (5.3)$$

Месячная заработная плата определяется по выражению:

$$ЗП_{мес} = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (5.4)$$

где $ЗП_0$ – месячный оклад (инженер – 17000 руб., научный руководитель – 26300 руб.);

K_1 – коэффициент, учитывающий отпуск (1,1);

K_2 – районный коэффициент (1,3).

Месячная заработная плата инженера:

$$ЗП_{мес.инж} = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.},$$

Месячная заработная плата научного руководителя:

$$ЗП_{мес.нр} = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 26300 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 37609 \text{ руб.},$$

Фактическая заработная плата определяется по выражению:

$$ЗП_{ф} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n_{ф}, \quad (5.5)$$

где 21 – число рабочих дней в месяце;

$n_{ф}$ – фактическое число дней в проекте.

Фактическая заработная плата инженера:

$$ЗП_{ф инж} = \frac{ЗП_{мес.инж}}{21} \cdot n_{ф} = \frac{24310}{21} \cdot 108 = 125023 \text{ руб.},$$

Фактическая заработная плата научного руководителя:

$$ЗП_{ф нр} = \frac{ЗП_{мес.нр}}{21} \cdot n_{ф} = \frac{37609}{21} \cdot 8 = 14328 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату:

$$K_{з/пл} = 125023 + 14328 = 139351 \text{ руб.}$$

5.2.5. Отчисления на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды – это элемент себестоимости продукции (работ, услуг), в котором отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством нормам государственного социального страхования в Фонд социального страхования Российской Федерации, Пенсионный фонд Российской Федерации, Государственный фонд занятости населения Российской Федерации и фонды обязательного медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, включаемых в себестоимость продукции (работ, услуг) по элементу «Затраты на оплату труда» (кроме тех видов оплаты, на которые страховые взносы не начисляются).

Затраты на социальные отчисления принимаются равными 30% от затрат на заработную плату.

Затраты на социальные отчисления:

$$K_{c.o} = \frac{30 \cdot K_{з/пл}}{100} = \frac{30 \cdot 139351}{100} = 41806 \text{ руб.}$$

5.2.6. Прочие затраты

Прочие затраты принимаются в размере 10% от суммы материальных затрат и затрат на амортизацию компьютерной техники, заработную плату и социальные отчисления.

Прочие затраты составляют:

$$K_{np} = \frac{10 \cdot (K_{mat} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{c.o})}{100} \quad (5.6)$$

$$K_{np} = \frac{10 \cdot (1000 + 1370 + 139351 + 41806)}{100} = 18353 \text{ руб.}$$

5.2.7. Накладные расходы

Накладные расходы – это дополнительные к основным затратам расходы, необходимые для обеспечения процессов производства, связанные с управлением, обслуживанием, содержанием и эксплуатацией оборудования плюс ненормированные расходы.

Накладные расходы принимаются в размере 200% от затрат на заработную плату.

Накладные расходы составляют:

$$K_{накл} = \frac{200 \cdot K_{з/пл}}{100} = \frac{200 \cdot 139351}{100} = 278702 \text{ руб.}$$

Смета затрат на проект:

$$K_{пр} = 1000 + 1370 + 139351 + 41806 + 18353 + 278702 = 480582 \text{ руб.}$$

Все затраты сведены в таблицу 19.

Таблица 19 – Смета затрат на проект

Элементы затрат	Стоимость, руб.
Материальные затраты	1000
Амортизация компьютерной техники	1370
Заработная плата	139351
Социальные отчисления	41806
Прочие затраты	18353
Накладные расходы	27872
Итого	480582

5.2.8. Смета затрат на оборудование

В таблице 20 представлены затраты на оборудование.

Таблица 20 – Смета затрат на оборудование

Наименование устройства	Стоимость, руб
Преобразователь частоты ESD-TCL	2x20000
Контроллер Элсима-М01	10000
Автоматический выключатель ВА 47-29	2x500
Датчик температуры	1000
Кабель силовой с медными жилами ВВГ 4x2,5, 50 м	2x5000
Кабель силовой ВВГ 2x2,5, 30 м	3000
Кабель управления МКЭШ 5x0,5, 5 м	2x250
Итого	64500

При прямом пуске асинхронного электродвигателя (при пуске непосредственным включением в сеть) в обмотке статора протекает пусковой ток, который превышает в пять раз номинальный ток. В данном проекте асинхронный двигатель предназначен для вращения радиального вентилятора. Вентиляторы по своим характеристикам имеют большой момент инерции, превышающий момент инерции приводного двигателя, что затрудняет их пуск. Для обеспечения устойчивого пуска вентилятора необходимо обеспечить повышенный пусковой момент, а следовательно и больший пусковой ток. В результате двигатель оказывается под влиянием больших перегрузок, которые ведут к сокращению срока его эксплуатации.

По условию технологического процесса перегрузки электропривода вентилятора недопустимы, так как он предназначен для поддержания требуемых климатических условий в машинном отделении судна, где

располагаются ответственные потребители электрической энергии. Нарушение условий эксплуатации оборудования машинного зала может привести к неправильной работе машин и механизмов вплоть до выхода их из строя, что в свою очередь может повлечь за собой угрозу для жизни и здоровья экипажа судна.

Применение преобразователя частоты позволяет обеспечить плавный пуск электропривода вентилятора и, как следствие, снизить нагрузку на двигатель. Кроме того, частотный преобразователь обеспечивает защиты электродвигателя, что исключает его работу в ненормальном режиме. Так же, в проектируемой автоматической системе вентиляции машинного отделения применяется программируемый логический контроллер, который позволяет полностью автоматизировать процесс управления и сделать систему вентиляции автономной.

Данные мероприятия ведут к повышению надежности системы вентиляции за счет продления срока эксплуатации двигателей, а также обеспечения непрерывного контроля и автоматического дистанционного управления системой. В дополнение к этому, применение преобразователя частоты и контроллера позволяет сократить количество защитного и релейно-коммутационного оборудования, что делает систему вентиляции максимально простой и удобной в эксплуатации.

Специально подобранное оборудование автоматической системы вентиляции является продуктами отечественного рынка с характеристиками, не уступающими зарубежным аналогам, а в вопросах стоимости существенно дешевле зарубежных.

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Данный раздел посвящен вопросам обеспечения нормативных условий труда (санитарно-гигиенические условия, защита от опасных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросам экологической безопасности и обеспечение безопасности в ЧС.

Рассмотрение данных вопросов отвечает требованиям международного стандарта ICSSR-26000:2011 к деятельности организаций в области социальной ответственности по тем разделам его модулей, по которым должны быть приняты указанные проектные решения.

6.1. Анализ вредных факторов

На участке управления электроприводом вентилятора необходимо учитывать наличие и возможность воздействия следующих вредных производственных факторов:

1. Повышенная температура в рабочей зоне;
2. Повышенный уровень шума и вибрации.

Источниками повышенного тепловыделения в машинном отделении являются котлы.

Для обеспечения нормального микроклимата в соответствии с СанПиН 2.2.4.548 – 96 предусматривается следующее [25]:

- приточно-вытяжная система вентиляции согласно СНиП 2.04.05 – 91* [26]
- установка центробежных вентиляторов с кратностью воздухообмена 1;
- установка систем местных отсосов для удаления вредных, пожароопасных и взрывоопасных веществ от мест их образования и выделения по СНиП 2.04.05 – 91* [26];
- герметизация технологического оборудования.

Допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне машинного отделения судна в соответствии с СанПиН 2.5.2.703-98 [2] приведены в таблице 21.

Таблица 21 – микроклиматические условия в машинных помещениях, оборудованных системами отопления и вентиляции

Помещение	Холодный период			Теплый период	
	Температура воздуха, °С	Скорость воздуха, м/с	Относительная влажность, %*	Температура воздуха выше наружной расчетной, °С	Скорость Воздуха, м/с
на рабочих площадках в машинных и котельных отделениях	не ниже 12 при неработающих механизмах	0,3 – 0,5 в рабочей зоне	40 – 60	не более чем на 8	1 – 1,5 в рабочей зоне
в ЦПУ	19 – 21	до 0,3 в рабочей зоне	40 – 60	не более чем на 5	до 0,7

Все воздухозаборные устройства должны располагаться в местах, исключающих попадание в них загрязненного воздуха, газов и воды. Взаимное расположение приточных и вытяжных вентиляционных отверстий не должно допускать попадания удаляемого воздуха в приточные устройства системы вентиляции.

Воздуховоды приточной вентиляции должны располагаться на удалении от нагреваемых поверхностей. При прокладке воздуховодов в помещениях с повышенной температурой, во избежание вредного нагрева воздуха, они должны быть теплоизолированы.

Источниками повышенного уровня шума в рабочей зоне являются дизель-генераторы. Шум на рабочем месте оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека и результаты его деятельности

Для защиты от шума по СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96 [27] и вибрации по СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96 [28] предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице 22 [2].

Таблица 22 – предельно допустимые уровни шума

Рабочее место	Уровни звукового давления в дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами в Гц									Уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Машинное отделение	110	99	98	87	83	80	78	76	74	85 ³

6.2. Анализ опасных факторов

К опасным факторам, возможным на территории машинного отделения относятся:

- образование пожароопасных смесей газов, опасность пожара;
- опасность электропоражения;

Пожар – это неконтролируемый процесс горения, который чреват большими материальными издержками, а часто и человеческими жертвами.

Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного производственного помещения. Согласно «техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности» [29] машинное отделение относится к категории Г. Минимальная допустимая степень защиты оболочек электрических машин для данной пожароопасной зоны обозначается IP44. Использование данной степени защиты – одно из направлений профилактики, оно должно быть установлено на объектах, где воздействие опасных факторов пожара может привести к травматизму или гибели людей .

Согласно «Правилам классификации и постройки морских судов» [21] машинное отделение судна должно быть оснащено автоматической системой пожаротушения, которая помимо выполнения функции пожаротушения выполняет функцию оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей.

Электропоражение персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках. При разработке коллективных и индивидуальных средств защиты от электропоражения необходимо, согласно правилам устройства электроустановок, рассмотреть следующие вопросы:

- обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;
- требования к электрооборудованию;
- анализ соответствия реального положения на производстве перечисленным требованиям;
- мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий;
- обоснование мероприятий и средств защиты, работающих от поражения электрическим током.

Рассматриваемое помещение не имеет характеристик, свойственных особо опасным помещениям в части поражения электрическим током. Необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты: изоляция проводов и её непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; защитное заземление и защитное отключение.

Также, используются индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000 В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками.

6.3. Охрана окружающей среды

Работа на данном участке сопряжена с образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов.

Газообразные отходы, загрязняющие воздух: естественные выделения - углекислый газ, пары воды, летучие органические соединения - ЛОС (альдегиды, кетоны), азотистые соединения и др. органов дыхания человека; бытовая пыль; ЛОС, выделяющиеся в процессе эксплуатации отделочных материалов, лакокрасочных покрытий мебели и др. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения. Жидкие отходы - бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки помещений, при пользовании водопроводом, туалетом и т.п., сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцовокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцовокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из неабсорбирующего ртуть материала (винипласта).

6.4. Защита в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации машинном зале – возникновение пожара и электропоражение.

Основными причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования.

Согласно [29], пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м³.

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности; разработка схемы действия администрации и работающих в случае пожара и организация эвакуации людей; организация внештатной пожарной дружины.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефону 01 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

План эвакуации приведен на рисунке 55.

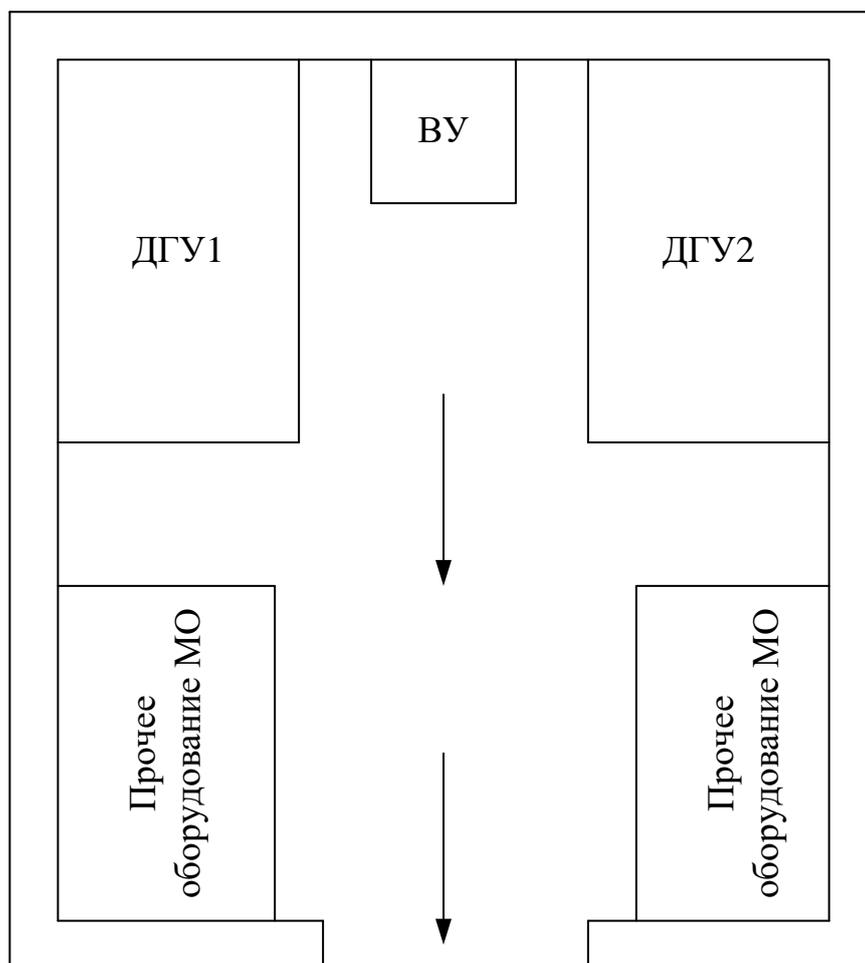


Рисунок 55 – План эвакуации из машинного отделения

Современная система электробезопасности обеспечивает защиту от поражения в двух наиболее вероятных и опасных случаях:

- при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования;
- при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением понимается прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в нормальном режиме (исправном состоянии) электроустановки отсутствует электрический потенциал, но при каких-либо неисправностях, вызвавших нарушение изоляции или ее пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям, согласно [3] служат изоляция токоведущих частей, применение ограждений и

оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются: защитное заземление и защитное зануление.

Даже если при электропоражении работающий внешне сохранил формат нормального самочувствия, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья, т.е. пострадавшему должна быть обеспечена скорая медицинская помощь. Предварительно пострадавший должен быть освобожден от действия электрического тока. Если при этом отключить напряжение быстро невозможно, освобождение от электричества пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

Для предотвращения от поражения электрическим током при прикосновении к корпусам электроустановок, находящихся под напряжением при пробое изоляции или в других случаях, необходимо рассчитать и установить защитное заземление.

Защитным заземлением называют преднамеренное электрическое соединение металлическим проводником какого-либо электрического устройства с землей или ее эквивалентом (металлическим корпусом судна).

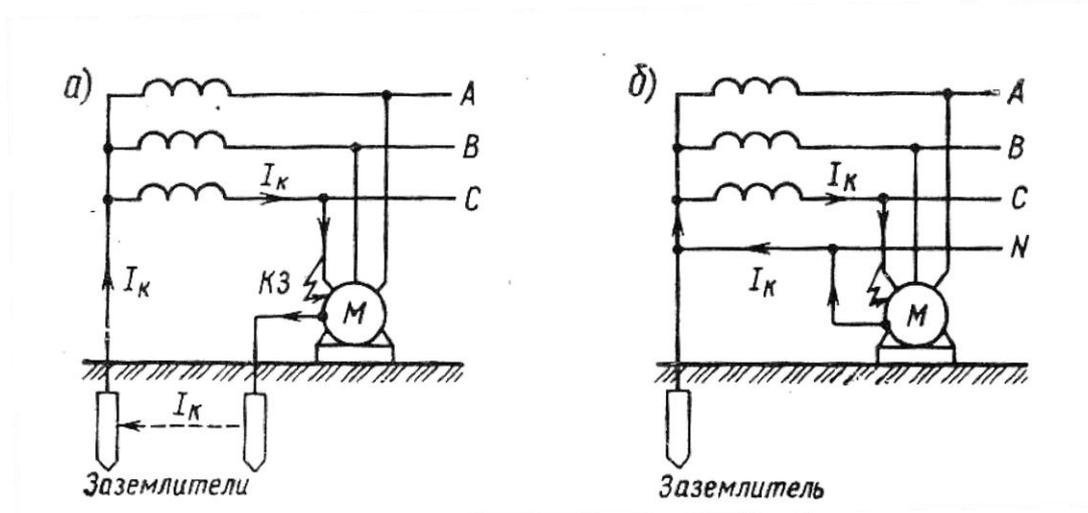


Рисунок 56 а) – Схема защитного заземления

б) – Схема защитного зануления

Заземлению подлежат все нетоковедущие металлические части судового электрооборудования, которые вследствие повреждения изоляции могут оказаться под напряжением. Прикосновение к металлическим частям оборудования, оказавшимся под напряжением и не имеющим непосредственного контакта с землей, так же опасно, как и прикосновение к не изолированной токоведущей части цепи (фазе).

На судах заземляются корпуса электрических машин, их пуско-регулирующая аппаратура, корпуса трансформаторов, металлорежущих станков, распределительных устройств, кожухи рубильников, коммутационная и защитная аппаратура, светильники, измерительная аппаратура и приборы управления судном, металлические оболочки кабелей, ручной электроинструмент, предназначенный для работы при напряжениях выше 24 В постоянного и 12 В переменного тока.

Заземляющим устройством называют совокупность металлического заземлителя, находящегося в непосредственном контакте с землей или ее эквивалентом, и заземляющих проводов, служащих для соединения заземлителей и металлических частей электрооборудования. Заземляющие соединения выполняются из меди или другого немагнитного эквивалентного ей металла.

Правилами Регистра определяются сечения заземляющих проводов в зависимости от мощности электрогенераторов. Минимальное сечение заземляющего провода от 2,5 мм² (для мелких приборов) до 4 мм². Сила тока, проходящего через тело человека, определяется сопротивлением защитного заземления, чем меньше сопротивление заземления, тем ниже эта величина, т. е. вероятность поражения электротоком снижается.

Сопротивление защитного заземления нормируется. Так, для установок напряжением до 1000 В оно не должно превышать 4 Ом, в установках напряжением свыше 1000 В с малыми токами замыкания на землю и без компенсации емкостных токов — не более 10. Расчет и нормирование сопротивлений заземляющих устройств производится исходя из условий безопасности при случайном прикосновении человека к оборудованию, оказавшемуся под напряжением. В судовых цепях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью нормированное наибольшее напряжение прикосновения $U_{np} = 40 В$ считается безопасным.

Согласно Правилам устройства электроустановок в цепях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью наибольшая возможная сила тока замыкания на землю I_{ym} не превышает 10 А. Тогда минимальное сопротивление заземления R_3 , обеспечивающее снижение напряжения прикосновения до безопасной величины, будет:

$$R_3 = U_{np}/I_y = 40/10 = 4 \text{ Ом}$$

Практически же сила токов утечки не превышает 4 – 6 А, поэтому при величине нормированного сопротивления заземления $R_3 = 4 \text{ Ом}$ напряжение прикосновения еще более снижается:

$$U_{np} = I_{ym} \cdot R_3 = 6 \cdot 4 = 24 \text{ В.}$$

6.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Безопасность труда на морских судах регулируется в соответствии с «Правилами техники безопасности на судах морского флота» [30].

Командный состав судов (включая первых помощников капитана и судовых врачей) обязан изучить настоящие Правила и проходить ежегодную проверку знаний настоящих Правил.

Весь личный состав судов должен пройти инструктаж и обучение по технике безопасности.

Ответственность за правильную организацию и качество инструктажа по технике безопасности членов экипажей на рабочем месте (первичного, повторного и внеочередного) возлагается на капитанов судов. Контроль за качеством инструктажа и соблюдением правил техники безопасности на судах возлагается на работников пароходства (порта, управления морского пути) по технике безопасности, капитанов-наставников, механиков-наставников, групповых механиков и инженеров электрорадионавигационных камер.

Рядовой состав судов обязан изучить инструкции по технике безопасности в соответствии со своей профессией и выполняемой работой. При поступлении на судно знания проверяют: у членов палубной команды и обслуживающего персонала - старший помощник капитана, у членов машинной команды - старший механик; повторно проверки знаний производятся не реже двух раз в год.

К самостоятельной работе на судне и обслуживанию механизмов допускаются лица не моложе восемнадцати лет. Они должны:

- иметь удостоверение (свидетельство) о прохождении квалификационной комиссии и медицинскую книжку с отметкой или свидетельство о пригодности к работе по состоянию здоровья, выдаваемые бассейновой или портовой поликлиникой;
- твердо знать инструкции по технике безопасности и обслуживанию поручаемых им механизмов;
- уметь правильно пользоваться защитными и предохранительными приспособлениями, необходимыми в процессе работы;
- уметь оказывать первую помощь при несчастных случаях.

Ни один вновь поступающий член экипажа рядового состава не может быть направлен на судно, если он не прошел вводный инструктаж по технике безопасности, лица командного состава - без проверки знаний Правил техники безопасности и других руководящих документов по охране труда, проводимой в комиссиях при пароходствах.

Без первичного инструктажа на рабочем месте и проверки знаний по профессии пришедший на судно член экипажа рядового состава не может быть допущен к выполнению судовых работ.

Примечание. Первый помощник капитана и судовой врач при поступлении на работу должны пройти вводный инструктаж, а по приходе на судно – получить от капитана общий инструктаж о специфике и характере работы судна.

Все члены экипажа судна должны быть проинструктированы по безопасной работе на прачечном оборудовании (стиральных машинах, центрифугах и др.) и прочем бытовом оборудовании, предназначенном для самообслуживания.

Обо всех замеченных неисправностях оборудования, систем, различных устройств, трапов и т.п., представляющих опасность, а также обо всех нарушениях правил и инструкций по технике безопасности каждый член экипажа судна обязан немедленно сообщить своему непосредственному начальнику.

Работники Министерства, парокондуктов, портов, морских путей, а также научно-исследовательских, проектно-конструкторских, инспектирующих и всех других организаций, связанные с необходимостью посещения судов, обязаны изучить настоящие Правила применительно к занимаемой должности, выполняемым работам и строго соблюдать их при посещении судов, а также при разработке организационно-технических мероприятий на флоте.

Все совершеннолетние члены семей моряков, прибывающие на судно, должны быть ознакомлены с Инструкцией по технике безопасности для членов семей моряков, прибывающих на судно, и расписаться в этом у вахтенного помощника капитана, который обязан напомнить им о необходимости твердого знания и тщательного соблюдения требований техники безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе была спроектирована автоматическая система вентиляции машинного отделения судна на базе асинхронного частотно-регулируемого электропривода, отвечающая высоким требованиям в отношении надежности работы.

Автоматическое управление системой осуществляется программируемым логическим контроллером в соответствии с разработанным алгоритмом работы.

Контроллер осуществляет управление двумя взаимозаменяемыми электроприводами. Сигнал задания скорости на электропривод формируется при превышении температуры в машинном отделении плюс 40 °С. Остановка выполнения команды задания производится при достижении температуры плюс 25 °С. Управление тем или иным электроприводом осуществляется в зависимости от наличия неисправностей на частотных преобразователях, которые обеспечивают: защиты от перегрузки и перегрева преобразователя, времятоковую защиту электродвигателя, защиты от понижения и повышения напряжения в звене постоянного тока, защиту от пропадания фазы на входе или выходе преобразователя.

Температура в машинном отделении регистрируется аналоговым преобразователем температуры WIKA T91.10.104, который преобразует значение текущей температуры в напряжение. Диапазон выходного сигнала составляет 0..10 В, что соответствует диапазону температур 0..100 °С. С датчика температуры сигнал поступает на аналоговый вход контроллера. Управляющий сигнал контроллера – сигнал типа «открытый коллектор», поступающий с дискретного выхода ПЛК на дискретный вход преобразователя частоты. Сигнал о неисправности или аварии преобразователя формируется релейным контактом и поступает на

дискретный вход контроллера. Помимо автоматического управления системой вентиляции программируемый логический контроллер выполняет функцию телесигнализации о текущем состоянии системы. Связь контроллера с верхним уровнем осуществляется посредством интерфейса Ethernet.

Разработанный алгоритм был реализован в программной среде CoDeSys на языке структурированного текста. На опытном образце контроллера Элсима-M01-220P-GSM и преобразователе частоты ESD-TCL производства компании АО «ЭлеСи» была произведена проверка и отладка разработанного кода управления. В качестве нагрузки использовался асинхронный электродвигатель АИР112М2 с номинальной мощностью 7,5 кВт.

Для машинного отделения был произведен расчет необходимого воздухообмена, на основании которого был выбран радиальный вентилятор низкого давления ВР 80-75, который обеспечивает: давление $P = 800 \text{ Па}$, производительность $Q = 22000 \text{ м}^3/\text{ч}$. КПД радиального вентилятора 84 %.

По установочной мощности вентилятора был произведен выбор асинхронного двигателя АИР160S8 с синхронной скоростью вращения $n_0 = 750 \text{ об/мин}$.

К электроприводу вентилятора не предъявляются требования к обеспечению большого диапазона регулирования скорости и к высокой точности регулирования, однако, по условию технологического процесса, перегрузки электропривода недопустимы. В соответствии с этим в программной среде Matlab Simulink была разработана имитационная модель частотно-регулируемого электропривода со скалярной системой управления и положительной обратной связью по току статора. В системе управления используется квадратичный закон регулирования $U/f^2 = const$.

Имитационная модель содержит регулятор ограничения тока, блоки IR-компенсации и компенсации скольжения. Регулятор ограничения тока ограничивает максимального допустимый ток электропривода на уровне, равном 20 А. Момент нагрузки при этом ограничивается значением 126 Н·м. IR-компенсация позволяет обеспечить устойчивую работу привода на малых частотах. Компенсация скольжения обеспечивает повышение перегрузочной способности привода.

Время переходного процесса скорости определяется постоянной времени задатчика интенсивности, которая составляет 2 с. Применение задатчика интенсивности с S-образной кривой позволяет ограничить темп нарастания динамической момента электропривода и тем самым повысить плавность переходных процессов. Перерегулирование отсутствует.

Преобразователи частоты и программируемый логический контроллер являются продуктами отечественного рынка, которые по своим характеристикам не уступают зарубежным аналогам, а в вопросах стоимости существенно дешевле.

Электрическая схема соединений системы вентиляции машинного отделения представлена в приложении А.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ МАГИСТРАНТА

1. THE CONTROLLED ELECTRIC DRIVE OF THE AUTOMATIC COOLING SYSTEM OF THE ENGINE ROOM ON A VESSEL, опубликовано в MATEC Web of Conferences, Том 91, 2017, входящий в список Scopus.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрид Е.Г. Устройство судна: Учебник. – 5-е изд., стереотип: - Л.: Судостроение, 1989. - 344 с.
2. Санитарные нормы и правила: СанПиН 2.5.2.703-98. Суда внутреннего и смешанного (река-море) плавания: нормативно-технический материал. – Взамен «Санитарные правила для речных судов СССР» № 4058-85. – Москва: [б.и.], 1998. – 77 с.
3. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. – 2002. – 363 с
4. Медведев Г.Г. Насосы, вентиляторы, компрессоры. Введение в курс: Конспект лекций / Г.Г. Медведев, А.Р. Дорохов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 1998. – 64 с.
5. D. Bevz, L. Payuk, N. Voronina MATEC Web of Conferences 91, 01037 (2017) doi: 10.1051/matecconf/20179101037
6. Бакаев В.В. Тепловой баланс производственных помещений. Организация и расчет систем вентиляции в производственных помещениях: учебное пособие / В.В. Бакаев, В.М. Смирнова, И.Г. Трунова, Е.Г. Ивашкин. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2015. – 101 с.
7. Удут Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин; Томский политехнический университет. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 648 с.
8. Чернышев А.Ю. Расчет характеристики электроприводов переменного тока. Часть 1. Асинхронный двигатель: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, И. А. Чернышев – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2005.–136 с.

9. Чернышев А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю.Чернышев, Ю.Н.Дементьев, И.А.Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
10. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 152 с.
11. Черных И. В. Моделирование электрических устройств в *MATLAB*, *SimPowerSystems* и *Simulink* – СПб. ; М. : Питер : ДМК Пресс, 2008. — 288 с.
12. Удут Л.С. Ограничение тока в скалярных электроприводах с асинхронными двигателями / Л.С. Удут, Чернышев А.Ю, Чернышев И.А. // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 2. – С. 120-133.
13. Каталог продукции компании ООО «Завод Вентилятор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ventilator.spb.ru/>
14. Каталог продукции группы компаний «Электромотор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electronpo.ru/>
15. Блок управления и защиты электродвигателя ESD-TCL: Руководство по эксплуатации. Часть 1. – 2016. – 97 с.
16. Контроллер программируемый логический Элсима: Руководство по эксплуатации. – 2016. – 149 с.
17. Каталог продукции группы компаний «IEK» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iek.ru/>
18. Аналоговые нормирующие преобразователи модели Т91.10 / Т91.20: Руководство по эксплуатации. – 2006. – 4с.
19. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М., «Энергия», 1972. – 240 с.

20. Гусев Н.В. Автоматизация технологических комплексов и систем в промышленности: учебное пособие / Н.В.Гусев, С.В.Ляпушкин, М.В.Коваленко – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 198 с.
21. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XV Автоматизация. – 2016. – 47с.
22. ГОСТ 12.0.003-74. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – Москва: Изд-во стандартов, 1976. – 120 с.
23. ГОСТ 12.1.003-83. Шум. Общие требования безопасности. – Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 10 с.
24. ГОСТ 12.1.012-90. ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования. – Москва – Изд-во стандартов, 1990. – 70 с.
25. Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: нормативно-технический материал. – Москва [б.и.], 1996 – 95 с.
26. Строительные нормы и правила: СНиП 2.04.05-91*. Отопление, вентиляция и кондиционирование: нормативно-технический материал. – Москва [б.и.], 1997. – 124 с.
27. Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах: нормативно-технический материал. – Москва [б.и.], 1996. – 19 с.
28. Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий: нормативно-технический материал. – Москва [б.и.], 1996 – 25 с.
29. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ.

30. Правила техники безопасности на судах морского флота: нормативно-технический материал. – Москва [б.и.], 1992 – 62 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

THE VESSEL ENGINE ROOM AUTOMATIC COOLING SYSTEM THE CONTROLLED ELECTRIC DRIVE

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Бевз Денис Владиславович		

Консультант кафедры ЭПЭО

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Краснов Иван Юрьевич	К.Т.Н.		

Консультант кафедры ИЯЭИ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Баластов Алексей Владимирович			

INTRODUCTION

The engine room is designed to accommodate machines and mechanisms for its moving.

The Engine room includes:

- the central control post, where is located all automation systems, control and alarm systems
- main engine, which rotates the rowing screw;
- electric motors, intended to generate electricity for lighting, heating, operation of various devices and mechanisms;
- pumps for supplying oil, liquid fuel, cooling water;
- separators intended for clarification fuel and oil from impurity; compressors, which compress air supplied for engines starting;
- steam boiler intended for heating, heating of liquid cargo, for technological needs.

The engine room is presented in the figure 1.



Figure 1 – The engine room

The engine room cooling system has two main objectives:

- provide such an environment that will allow machines and mechanisms work reliably;
- provide comfortable working conditions for staff.

Air exchange in the engine room is carried out by natural exhaust and artificial ventilation. The air required for heat removal is supplied by a radial fan, that is directly connected to an induction motor.

Automatic cooling system functional diagram is presented in figure 2.

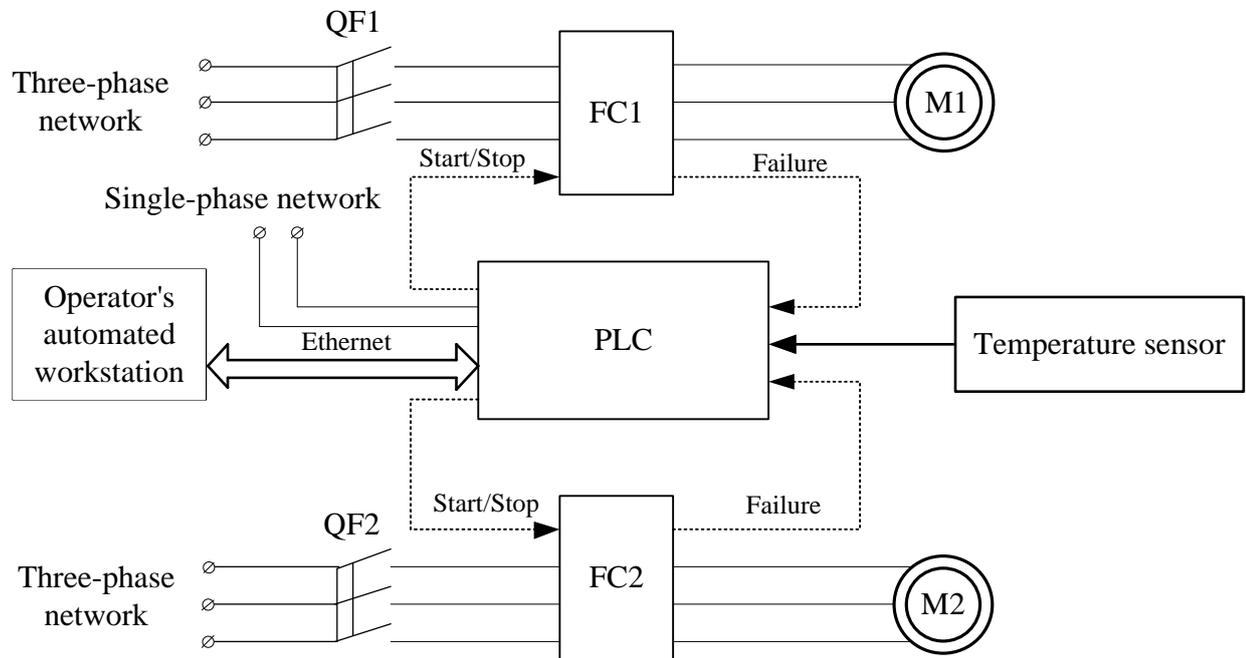


Figure 2 – Automatic cooling system functional diagram:

QF1,2 – the automatic circuit breaker, PLC – the programmable logic controller, FC1 – the main frequency converter, FC2 – the reserve frequency converter, M1 – the main induction motor, M2 – the reserve induction motor.

The automatic system has two frequency-controlled electric drives of radial fans. One of them is the main electric drive (FC1 – M1) and the second one is reserve (FC2 – M2). The reserve electric drive is designed to work in case of failure of the main electric drive.

The frequency converter (FC) provides smooth start-up of the induction motor, which decrease the starting current of the motor. The starting current at the direct starting of the motor exceeds rated current at 3 - 5 times, which decrease lifetime of the motor. Also, the frequency converter provides a set of induction motor protections, which excludes the motor working at the emergency modes.

Programmable logic controller (PLC) makes it possible to automate the control process of the cooling system, which makes the cooling system is autonomous or, if it necessary, to provide remote control of the system.

PLC is designed to generate a task for the speed of the electric drive and to generate a stop signals.

These signals are “open collector” type signals. They come from the PLC digital output to the frequency converter digital input.

The PLC digital input receives fault and alarm signals from the frequency converters digital outputs.

In addition, the controller provides tele-signaling about current state of the system.

The temperature sensor is an analog temperature converter, which has analog output in the range 0...10V which corresponds to a temperature range from 0 to 100 degrees Celsius. Temperature sensor analog output connects to PLC analog input.

The PLC generates control actions on the frequency converters depending on the temperature value and malfunctions in the system.

The connection between the controller and the operator's automated workstation (operator's workstation), which is the upper level of the automated control system, is carried on the Ethernet interface.

1. THE SCALAR FREQUENCY CONTROL SYSTEM SIMULATION IN MATLAB

The electric drive speed range is 1:10. It means that it is enough to use scalar control system.

The frequency-controlled electric drive simulation model consists of:

- two-phase asynchronous motor in a fixed coordinate system;
- voltage source inverter;
- scalar control system;
- ramp generator.

Ramp generator provides smooth start of the asynchronous motor, which limits electromagnetic torque of the motor at starting and braking modes. This allows excluding mechanical overloads of the fan electric drive. Ramp generator has S-shaped acceleration curve and response time = 2 seconds.

Scalar control system generates control voltage to the inverter in accordance with control law U/f^2 . The control system also includes the following units:

- stator current sensors;
- current limiting regulator;
- IR-compensation;
- slip compensation.

The current limiting regulator limits the maximum permissible current of the electric drive and the motor torque at an acceptable level. The output signal of the regulator simultaneously affects the frequency and voltage control channels.

The IR-compensation with the slip compensation makes it possible to increase overload factor of the asynchronous motor.

In the process of the simulation experiments were considered the following modes of the electric drive operation:

- starting the electric drive at the minimum operating speed ($f = 20 \text{ Hz}$);
- starting the electric drive at the maximum operating speed ($f = 50 \text{ Hz}$);
- starting the electric drive from the minimum operating speed to the maximum;
- braking of the electric drive from the maximum operating speed to the minimum;
- stop the electric drive;
- limitation of the maximum permissible current of the electric drive.

The speed, torque and current transients at starting the electric drive at the minimum operating speed are presented in figure 3.

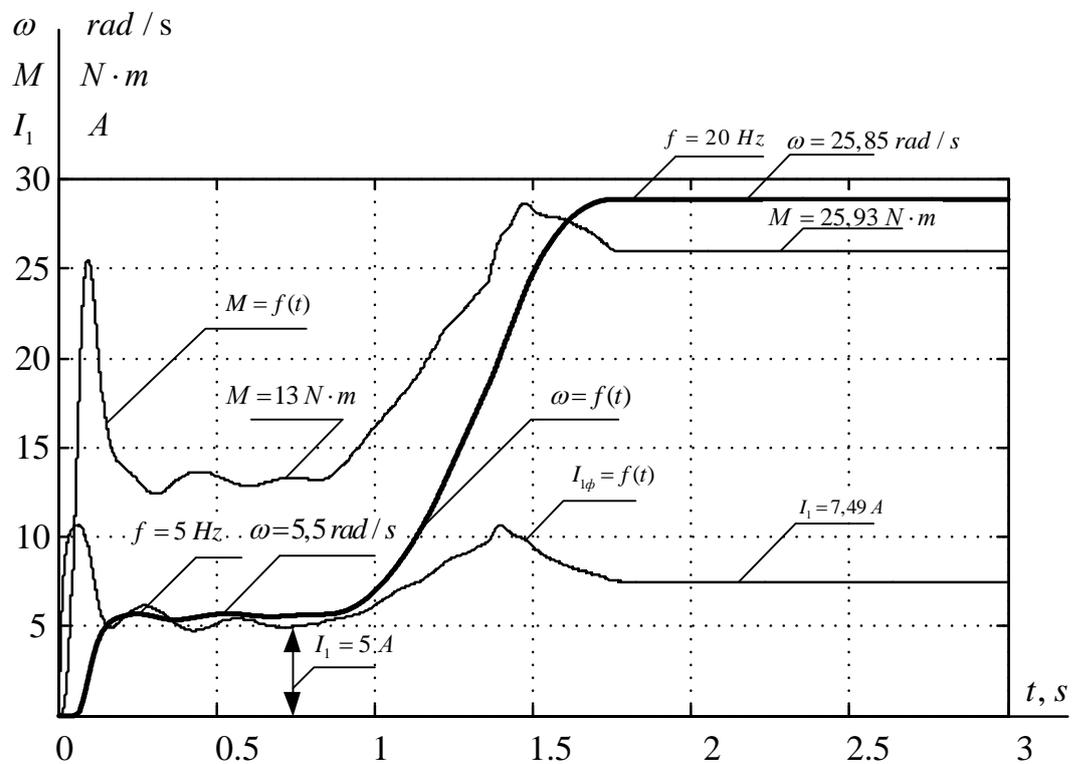


Figure 3 – The speed, torque and current transients at starting the electric drive to $f = 20 \text{ Hz}$

The speed, torque and current transients at starting the electric drive at the minimum operating speed are presented in figure 4.

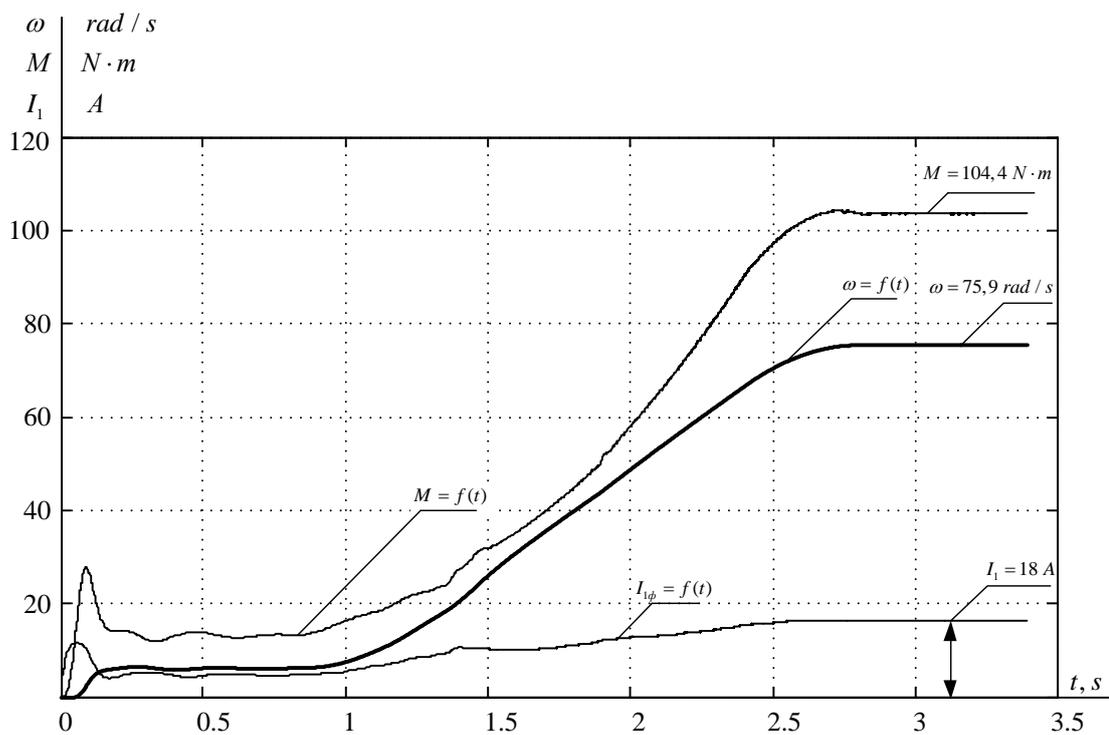


Figure 4 – The speed, torque and current transients at starting the electric drive to $f = 50 \text{ Hz}$

The speed, torque and current transients when the electric drive operates in accordance with a given cycle are presented in figure 5.

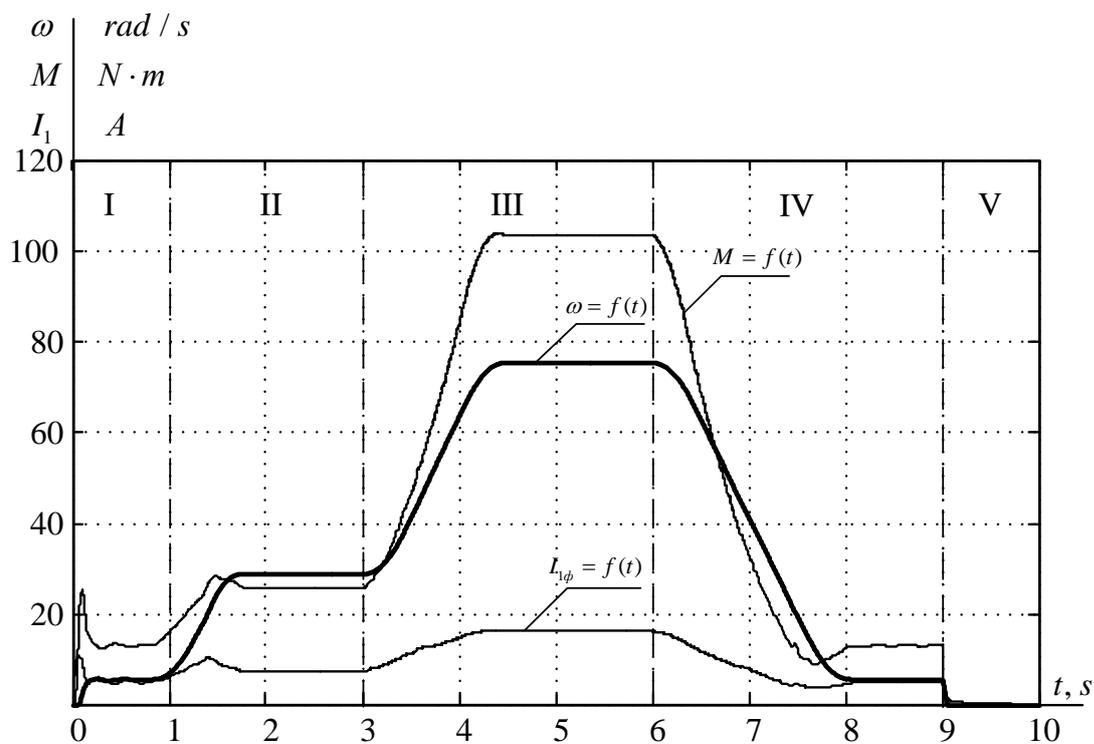


Figure 5 – The speed, torque and current transients when the electric drive operates in accordance with a given cycle

The speed, torque and current transients with the limitation of the maximum permissible current of the electric drive are presented in figure 6.

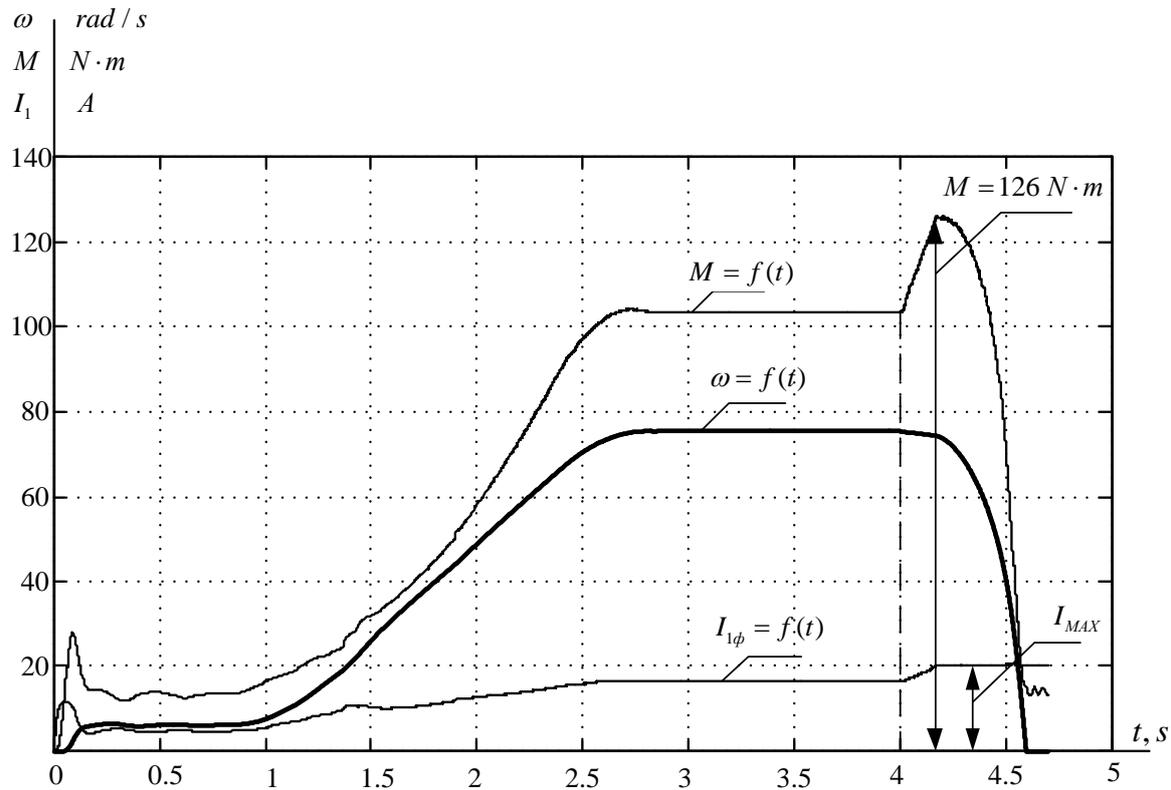


Figure 6 – The speed, torque and current transients with the limitation of the maximum permissible current of the electric drive

At time $t = 4$ seconds was started a smooth increase of the motor torque until it was completely stopped. The electromagnetic torque was limited to 126 $\text{N}\cdot\text{m}$ by current cutoff. The final shutdown occurs when the time protection is activated.

2. THE COOLING SYSTEM AUTOMATIC CONTROL DEVELOPING

The developed automatic control algorithm is shown in the figure 7.

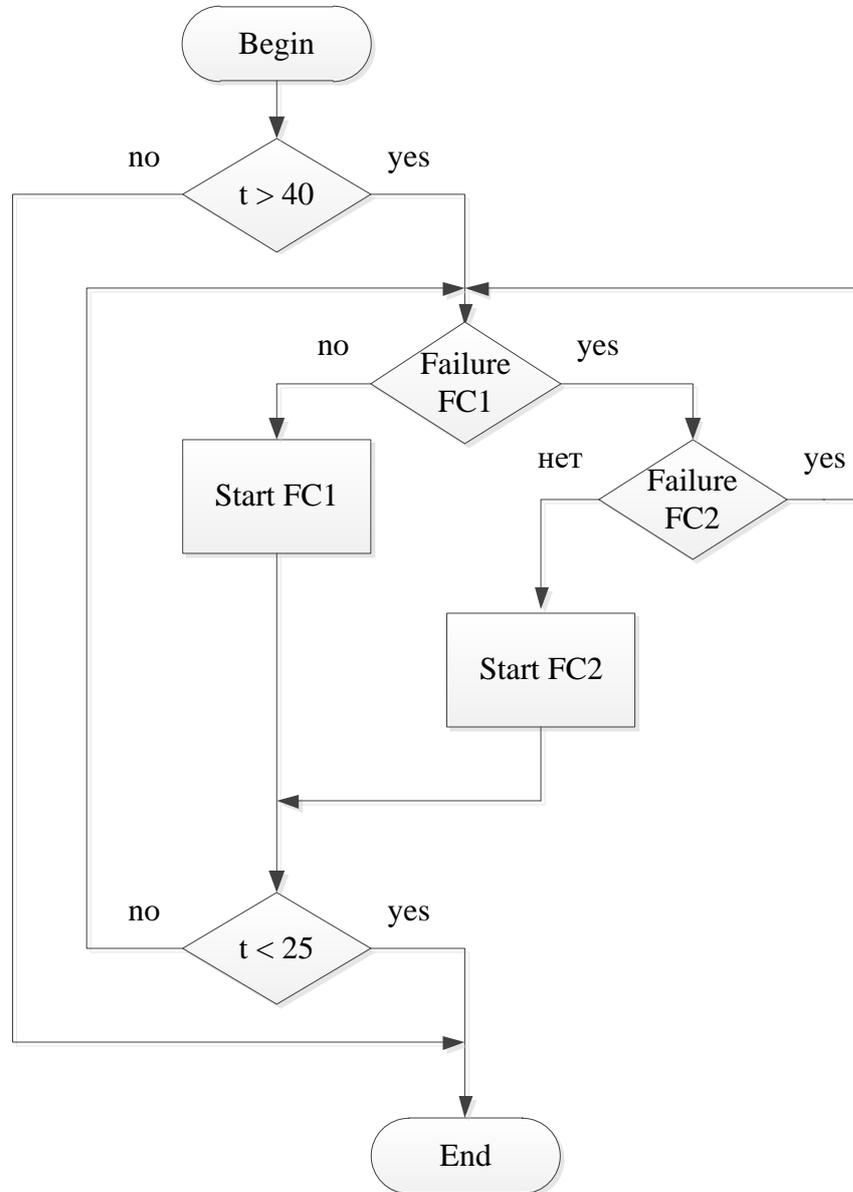


Figure 7 – Automatic control algorithm

The developed algorithm provides work of the system of cooling in 3 modes:

1. start the main motor when the temperature exceeds the set value;
2. start the backup motor if there is an accident at the first frequency inverter and the temperature exceeds the set value;

3. stop the electric drive when the temperature is reached a set value.

The controller software is based on the CoDeSys development system of "3S-Smart Software Solutions" (Germany) and is intended for programming controllers in languages in accordance with the IEC-61131-3 standard.

The basic structure of the CoDeSys complex includes two systems: a development system and a execution system. The development system functions on the computer and is a tool for designing, configuring the system and creating the code of the control program for the PLC. The execution system functions in the controller and provides download of the application program code to the controller, execution of the control program and execution of the debugging functions.

Development of application programs in the CoDeSys provides:

5. A single environment for configuring, developing programs and debugging;
6. the possibility of developing programs in the five programming languages IEC 61131-3:
 - IL (Instruction List);
 - ST (Structured Text);
 - FBD (Functional Block Diagram);
 - LD (Ladder Diagram);
 - SFC (Sequential Function Chart);
7. direct generation of machine code, which provides high-speed of control programs;
8. the ability to debug the program without involving hardware devices due to the presence of a built-in emulator.

The communication with the controller is established on the Ethernet interface. Interaction of the development environment with the controller execution system is carried out through a special application - Gateway. The window with the display of communication with the PLC is shown in figure 8.

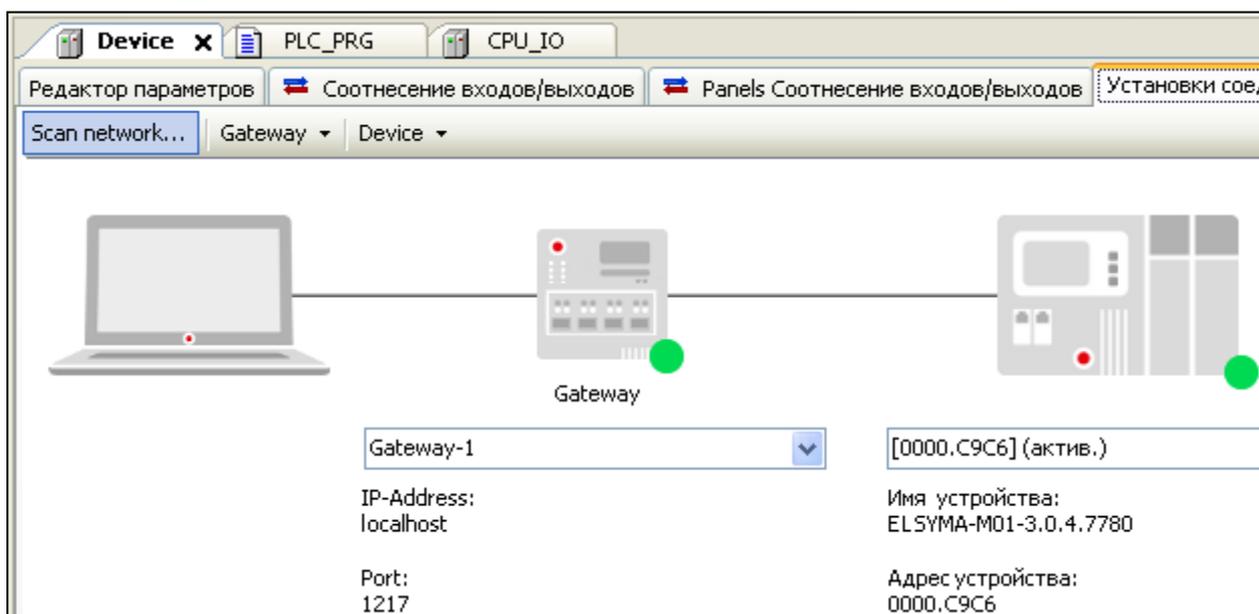


Figure 8 – Communication with the PLC

The active controller is selected in the list of gateway devices. The window with the choice of devices connected to the public network is shown in figure 9.

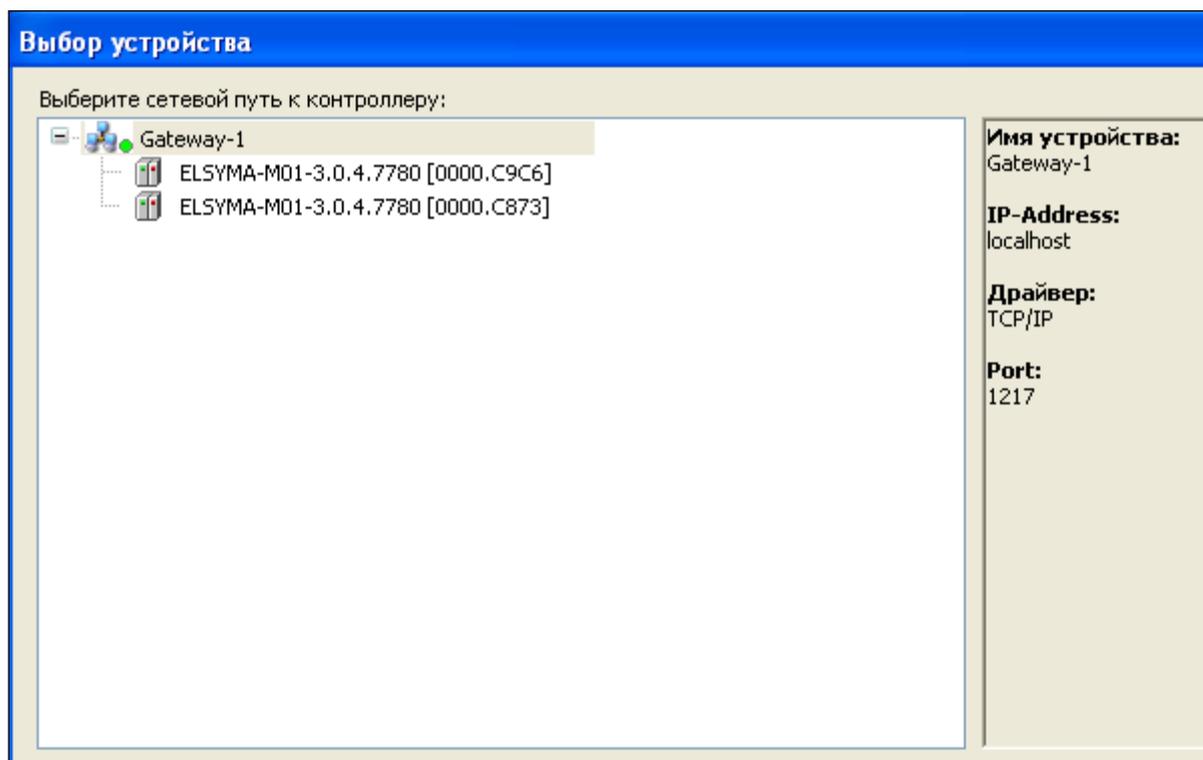


Figure 9 – The gateway devices list

The controller switches to online mode when the program starts. The monitoring of variables is used to debug a control program and provides:

- view the list of variables;

- recording and fixing the values of variables;
- monitoring the process of executing code in real time.

The control program code is implemented in the language of structured text in accordance with the algorithm of the automatic cooling system. The window with the program code is presented in figure 10.

```

1  PROGRAM PLC_PRG
2  VAR
3      AIn:REAL; //Аналоговый вход 0..10 В (0..100 С)
4      DigIn1:BOOL; //Дискретный вход 1
5      DigIn2:BOOL; //Дискретный вход 2
6      Relay1:BOOL; //Релейный выход 1
7      Relay2:BOOL; //Релейный выход 2
8      Relay3:BOOL; //Релейный выход 3
9      Relay4:BOOL; //Релейный выход 4
10     DigOut1:BOOL; //Дискретный выход 1
11     DigOut2:BOOL; //Дискретный выход 2
12 END_VAR

2  IF AIn<=2 THEN DigOut1:=0; DigOut2:=0;
3      END_IF
4      //команда ТУ на пуск ПЧ1.
5  IF AIn>=4 AND (DigIn1=0 AND DigIn2=0) THEN
6      DigOut1:=1; DigOut2:=0;
7      END_IF
8      //команда ТУ на пуск ПЧ2.
9  IF AIn>=4 AND (DigIn1=1 AND DigIn2=0) THEN
10     DigOut1:=0; DigOut2:=1;
11     END_IF
12     //команда ТУ на стоп ПЧ1 и ПЧ2 при наличии аварий
13  IF AIn>=4 AND (DigIn1=1 AND DigIn2=1) THEN
14     DigOut1:=0; DigOut2:=0;
15     END_IF
16  IF DigIn1=1 THEN Relay1:=1; //ТС "Авария ПЧ1".
17     ELSE Relay1:=0;
18     END_IF
19  IF DigIn2=1 THEN Relay2:=1; //ТС "Авария ПЧ2".
20     ELSE Relay2:=0;
21     END_IF
22  IF DigOut1=1 THEN Relay3:=1; //ТС "Работа ПЧ1".
23     ELSE Relay3:=0;
24     END_IF
25  IF DigOut2=1 THEN Relay4:=1; //ТС "Работа ПЧ2".
26     ELSE Relay4:=0;
27     END_IF

```

Figure 10 – The control program code

3. RESULTS ANALYSING

Radial fans have a large inertia torque, exceeding the induction motor inertia torque, which makes difficult to start. There is necessary to provide an increased starting torque and a higher starting current for the fan stable start. As a result, the motor is under the large overloads influence, which leads to a shortening lifetime.

The fan electric drive overload is impossible, as it designed to keep required climatic conditions in the engine room of the vessel, where the responsible consumers of electric energy are located. Violation of the operating conditions of the machines and mechanism located in the engine room can lead to their incorrect working up to their failure. This can entail to a threat to the life and health of the vessel's crew.

The development of automatic control of the cooling system increases the reliability of the system by:

- providing continuous monitoring and diagnostic of the system;
- providing automatic or remote control of the system;
- using frequency converters as a motors control and protections devices.

The use of a frequency converter with a PLC reduces the number of protective and relay-switching equipment, which makes a cooling system simple and easy to use.

The specially selected equipment of the automatic cooling system are the products of the Russian market with a characteristics that are not inferior to foreign analogues, and in matters of cost significantly cheaper than foreign ones.