

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

Институт ЭНЭО
Направление подготовки Электроэнергетика и электротехника
Кафедра ЭПЭО

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

УДК 62-83-523:697.921.4.001.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г12	Новокрещенных Елена Алексеевна		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов И.И.	к.т.н., старший преподаватель		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2016 г.

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

Институт ИНЭО

Направление подготовки (специальность) Электроэнергетика и электротехника

Кафедра ЭПЭО

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г12	Новокрещенных Елене Алексеевне

Тема работы:

**РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИТОЧНОЙ
ВЕНТИЛЯЦИИ**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

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

Асинхронный электропривод радиального вентилятора ВР132-30 с системой автоматического управления при помощи контроллера LOGO! Siemens.

Производительность $Q = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$,

Напор (давление) = 6000 Па,

КДП = 0,75.

<p><i>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</i></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>	<p><i>Исследование технологического процесса автоматической системы приточной вентиляции котельной. Выбор оборудования. Расчет параметров и характеристик АД.</i></p>
<p><i>Перечень графического материала</i></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p><i>Функциональная схема автоматической системы вентиляции.</i></p>

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Мелик-Гайказян М.В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Романцов И.И.</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
---	--

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г12	Новокрещенных Елена Алексеевна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г12	Новокрещенных Елене Алексеевне

Институт	ИнЭО	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника / Электропривод и автоматика

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

1. <i>Стоимость затрат технического проекта</i>	<i>Затраты на оборудование определяются согласно стоимости оборудования по прейскурантам. Заработная плата определяется исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион.</i>
2. <i>Используемая система налогообложения.</i>	<i>Отчисления во внебюджетные страховые фонды.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, анализу и разработке:

1. <i>Оценка потенциала и перспективности реализации технического проекта с позиции ресурсоэффективности</i>	<i>Потенциал и перспективность реализации проекта оценивается проведением SWOT-анализа, ресурсоэффективность – интегральной оценкой ресурсоэффективности.</i>
2. <i>Планирование и формирование графика работ по реализации технического проекта</i>	<i>Используя оценку трудоемкости работ для каждого исполнителя, составляется ленточная диаграмма Ганта.</i>
3. <i>Составление сметы технического проекта</i>	<i>Составление сметы проводится используя группировки затрат по статьям:</i> <ul style="list-style-type: none"> – затраты на оборудование; – полная заработная плата исполнителей; – отчисления во внебюджетные страховые фонды; – накладные расходы.

Перечень графического материала:

1. Матрица SWOT
2. График выполнения работ исполнителями (диаграмма Ганта)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.02.16
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г12	Новокрещенных Елена Алексеевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г12	Новокрещенных Елене Алексеевне

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника / Электропривод и автоматика

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Территория производственного помещения с главным объектом рассмотрения и исследования – регулируемый электропривод автоматической системы приточной вентиляции. Необходимо поддержание:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Нормативных метеоусловий, уровней вибрации и шума; -Мер обеспечения электро- и пожаробезопасности. -Использование электрооборудования, ПЭВМ, освещение и отопление требуют сжигания топлива, дающего выбросы ЗВ в атмосферу. -Наиболее вероятные ЧС: загорания (пожары), электрический удар, например, при замыкании фазы питания на корпус электрооборудования при нарушенном его заземлении.
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>ГОСТ 12.0.003-74 «ОиВПФ»; ГОСТ 12.2.009-80 «Система безопасности»; ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности»; ГОСТ 12.1.01290 «Вибрационная безопасность»; ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»; ПУЭ, утвержденный министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.; №123-ФЗ» Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»; Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681; Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 29.03.2016); ТСН ЭК 97-«Технические правила и нормы»</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – шум; – вибрации; – возможные ненормативные метеоусловия;
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения) 	<p>Вся электрическая цепь помещения оснащена заземлительным контуром, выполненным в соответствии с ПУЭ от 08.07.2002, №204.Глава 1.7. – в соответствии с выполненным расчетом.</p> <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – опасность электропоражения; – пожаровзрывоопасность.
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); 	<p>Люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681.</p> <p>Оценить масштабы уменьшения выбросов ЗВ от возможной экономии электроэнергии на рабочем месте.</p>
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; 	<p>Разработать мероприятия по предупреждению загораний и электропоражений и мер по ликвидации их последствий.</p>
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; 	<p>Право на условие труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены.</p>
Перечень графического материала:	
<p>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</p>	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры ЭБЖ	Романцов Игорь Иванович	кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г12	Новокрещенных Елена Алексеевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 91 с., 30 рисунков, 26 таблиц, 31 источник.

Ключевые слова: регулируемый электропривод, асинхронный двигатель, радиальный вентилятор, преобразователь частоты, автоматическое управление, LOGO! SIEMENS.

Объектом исследования является регулируемый электропривод вентилятора по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель.

Цель работы – исследование системы регулируемого электропривода асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и разработка автоматической системы управления.

В работе были использованы следующие программы: Microsoft Word, Mathcad, Microsoft Visio, MATLAB R2010.

В результате выполнения работы была осуществлена разработка регулируемого электропривода переменного тока с автоматическим управлением, соответствующая условиям технического задания.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	10
1. Расчет и выбор силового оборудования системы регулируемого электропривода.....	15
1.1. Расчет мощности двигателя и предварительный его выбор.....	15
1.1.1. Расчетные параметры электродвигателя.....	17
1.1.2. Расчетные параметры Т-образной схемы замещения.....	19
1.2. Выбор вентилятора.....	22
1.3. Выбор преобразовательного устройства для системы регулируемого электропривода.....	26
1.4. Расчет и выбор основных элементов системы регулируемого электропривода.....	29
1.4.1. Расчет инвертора.....	29
1.4.2. Расчет охладителя.....	32
1.4.3. Расчет выпрямителя.....	32
1.4.4. Расчет фильтра.....	34
1.4.5. Расчет снаббера.....	35
1.5. Выбор аппаратуры управления.....	36
1.5.1. Выбор автоматического выключателя.....	36
1.5.2. Выбор магнитных пускателей.....	38
1.6. Выбор аппаратуры управления.....	39
1.7. Выбор датчика температуры.....	42
1.8. Расчет и выбор типа и сечения кабеля сети высокого напряжения..	
1.9. Определение расхода электроэнергии за цикл работы, среднецикловых значений КПД и коэффициента мощности электропривода.....	44
2. Расчет статических и динамических характеристик для разомкнутой системы регулируемого электропривода.....	46
2.1. Расчет естественных характеристик $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ системы регулируемого электропривода.....	46
2.2. Расчет искусственных характеристик $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ системы регулируемого электропривода.....	49
3. Расчет параметров и моделирование системы скалярного частотного управления в среде MatLab.....	54
3.1. Расчет коэффициентов усиления и постоянных времени системы..	54
3.2. Расчет электромеханических переходных характеристик $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ при пуске.....	55
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	60
4.1. SWOT-анализ проекта.....	60

4.2. Планирование проведения работ технологического проекта.....	63
4.2.1. Определение трудоемкости выполнения технического проекта.....	63
4.2.2. Разработка графика технического проектирования.....	65
4.3. Составление сметы технического проекта.....	65
4.3.1. Расчет стоимости оборудования.....	68
4.3.2. Полная заработная плата исполнителей темы.....	68
4.3.3. Отчисления во внебюджетные фонды.....	70
4.3.4. Накладные расходы.....	70
4.3.5. Формирование сметы технического проекта.....	70
4.4. Определение конкурентоспособности проекта.....	71
5. Социальная ответственность.....	74
5.1. Анализ вредных факторов.....	74
5.1.1. Микроклимат.....	74
5.1.2. Шум и вибрация.....	75
5.2. Анализ опасных факторов.....	76
5.2.1. Загорание (пожар)	76
5.2.2. Электропоражение.....	77
5.2.3. Механические опасные факторы.....	78
5.3. Защита окружающей среды.....	79
5.4. Предотвращение ЧС и устранение их последствий.....	81
5.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	85
Заключение.....	86
Список использованной литературы и источников.....	89

ВВЕДЕНИЕ

Вентилятор – это механическое устройство, которое предназначено для осуществления воздухообмена в помещениях и удаления теплого, вредного или влажного воздуха [3].

В зависимости от принципа действия и конструкции вентиляторы делятся на осевые и радиальные (центробежные).

Осевой вентилятор состоит из рабочего колеса (РК) 1, на втулке которого закреплены профильные лопатки 2, кожуха 3, спрямляющего аппарата (СА) с неподвижными лопатками 4, коллектора 5, диффузора 6.

Вращающееся рабочее колесо передает энергию привода перемещаемому воздуху. Спрямляющий аппарат обеспечивает плавный переход воздуха от лопаток рабочего колеса к выходу в диффузор или сеть, и частично преобразует динамическое давление в движущемся потоке воздуха в статическое давление.

Схема осевого вентилятора представлена на рисунке 1.

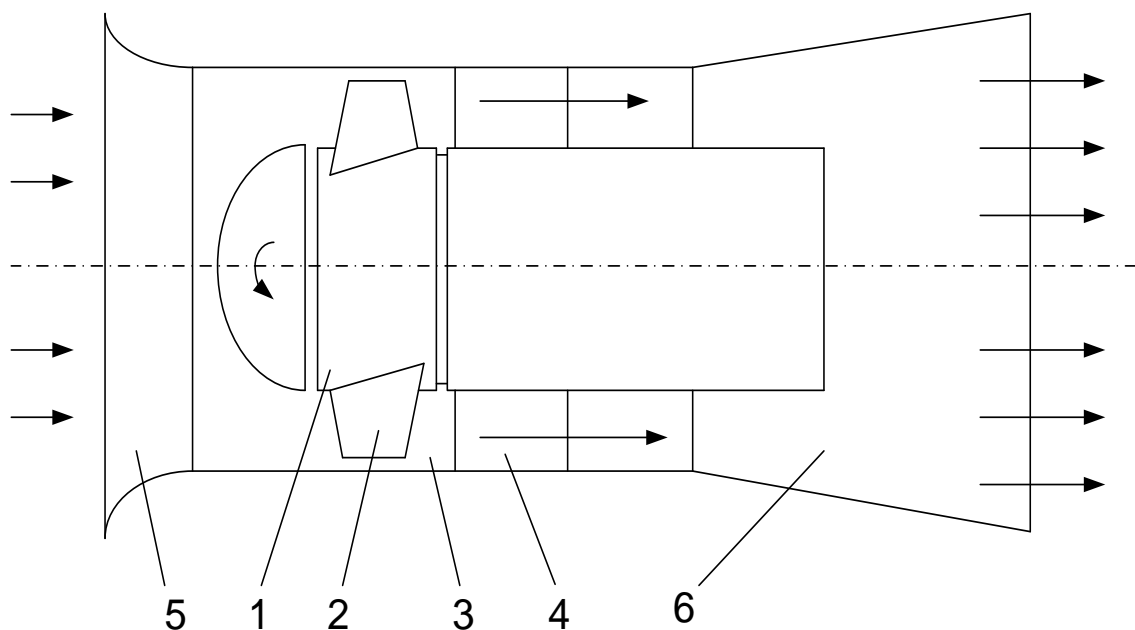


Рисунок 1 – Схема осевого вентилятора: 1 – рабочее колесо; 2 – лопатки рабочего колеса; 3 – кожух; 4 – спрямляющий аппарат; 5 – коллектор; 6 – диффузор

Осевой вентилятор состоит из двух обтекателей, назначение которых - снижение аэродинамических потерь, связанных с резким изменением скоростей движения воздуха. Передний обтекатель устанавливается во входном

коллекторе, перед рабочим колесом или направляющим аппаратом, задний – после спрямляющего аппарата, перед диффузором.

Направление движения воздушного потока совпадает с осью вращения рабочего колеса. Воздух засасывается в коллектор 5, проходит между лопатками вращающегося рабочего колеса, затем поступает в спрямляющий аппарат, оттуда в диффузор 6 и выбрасывается в атмосферу (при работе вентилятора на всасывание).

Осевые вентиляторы бывают одноступенчатыми и двухступенчатыми. Во втором случае в кожухе вентилятора находятся две ступени, которые работают последовательно и каждая ступень имеет свое рабочее колесо.

Промежуточный направляющий аппарат (НА) находится между рабочими колесами. Этот аппарат состоит из неподвижных профильных лопаток или профильных лопаток с регулируемым углом установки. Назначение НА – подача воздуха к рабочему колесу и преобразование части кинетической энергии потока (динамического давления) в потенциальную (статическое давление). Спрямляющий аппарат устанавливается за вторым рабочим колесом по ходу струи. Обе ступени могут находиться на одном валу или на отдельных валах. Наличие двух ступеней позволяет вентилятору развивать более высокое давление.

Основу радиального вентилятора составляет рабочее колесо 1, между передним и задним дисками которого закреплены профильные лопатки таким образом, что их входная кромка располагается на окружности меньшего радиуса, чем выходная хвостовая часть. Назначение рабочего колеса - передавать энергию привода вентилятора перемещаемому воздуху.

Рабочее колесо вращается в спиральном кожухе 2. Улиткообразный кожух предназначен для подачи воздуха в определенном направлении и частичного преобразования динамического давления в потоке воздуха в статическое давление. Воздух поступает в вентилятор через входной коллектор 3, в котором установлены поворачивающиеся, каждая относительно своей оси лопатки 4 направляющего аппарата. Направляющий аппарат предназначен для

подачи воздуха к рабочему колесу с определенной скоростью и под определенным углом, это позволяет регулировать рабочие режимы вентилятора.

Схема центробежного вентилятора представлена на рисунке 2.

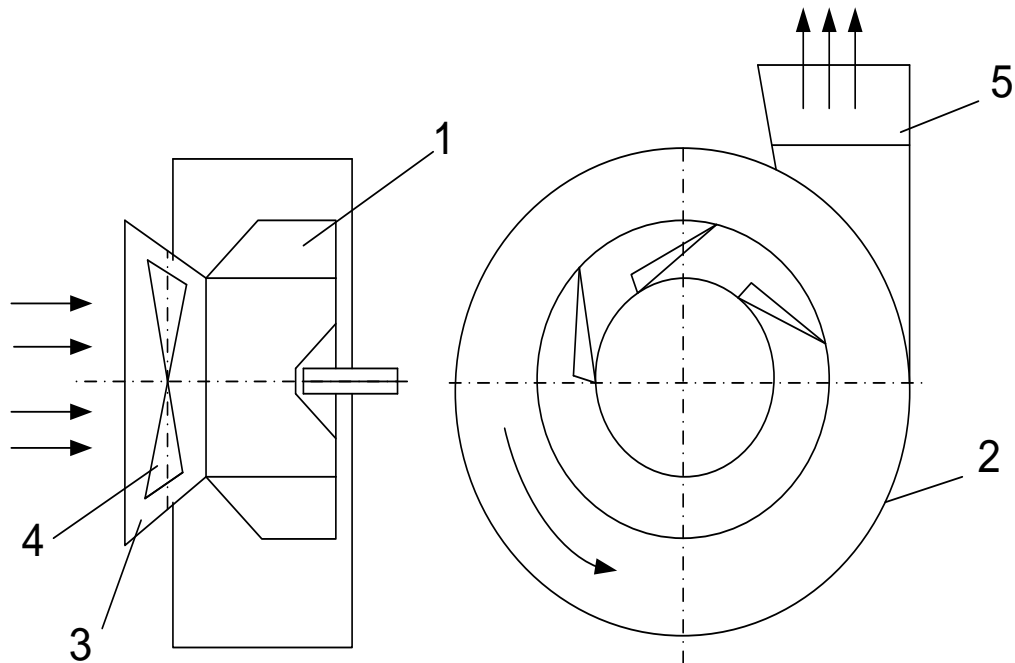


Рисунок 2 – Схема центробежного вентилятора: 1– рабочее колесо;
2 –спиральный кожух; 3 – входной коллектор;
4 – лопатки направляющего аппарата; 5 – диффузор.

Воздух входит в рабочее колесо параллельно оси вала вентилятора, под действием тяги, развиваемой лопатками, и центробежной силы поворачивает на 90° , проходит между лопатками, выбрасывается в периферийную часть кожуха и выходит через диффузор 5 в атмосферу (при работе вентилятора на всасывание). Диффузор является дополнительным преобразователем динамического давления в потоке на выходе из кожуха в давление статическое.

Центробежные вентиляторы получили широкое применение на шахтах, цехах, помещениях с высоким давлением (более 3 кН/м).

Примером использования такого вентилятора может являться система вентиляции помещения котельной.

Вентиляция в котельной должна обеспечивать безопасную работу всего применяемого оборудования, гарантировать подачу необходимого количества воздуха, предоставить комфортные условия для работы обслуживающего персонала.

Нагнетание свежего воздуха будет осуществляться вентилятором, а для отвода воздуха будет достаточно естественной вентиляции через оконные проемы.

Приточная вентиляция является одной из разновидностей принудительной (механической) вентиляции, предназначенной для подачи внутрь здания свежего наружного воздуха. Приточная вентиляция не только охлаждает воздух, но и обогащает помещение чистым и насыщенным кислородом.

Важно обеспечить правильную трассировку вентиляционных воздуховодов. Без надлежащей трассировки невозможно обеспечить комфортную температуру в котельной. Место ввода наружного воздуха должно располагаться как можно дальше от источников тепла и как можно ниже. Поскольку тепло заставляет воздух подниматься вверх, отвод воздуха следует производить в наивысшей точке помещения, предпочтительно рядом с котлом.

Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 допустимая температура на рабочем месте в котельной равна 26°C. При превышении допустимого значения температуры датчик температуры посылает сигнал на модуль программируемого логического контроллера (ПЛК) Siemens LOGO!. Контроллер, в свою очередь, формирует дискретный сигнал задания скорости на преобразователь частоты (ПЧ), после чего на катушку магнитного пускателя КМ1 подается напряжение, и начинает работать асинхронный электродвигатель с вентилятором. Процесс вентиляции продолжается до тех пор, пока в помещении не установится необходимая оптимальная температура, после чего ПЛК формирует сигнал «стоп» на преобразователь частоты. В случае неисправности на ПЧ срабатывает

контактор КМ2, напряжение питания подается на двигатель в обход преобразователя частоты. Электропривод в данном режиме нерегулируемый.

Функциональная схема автоматической системы вентиляции приведена на рисунке 3.

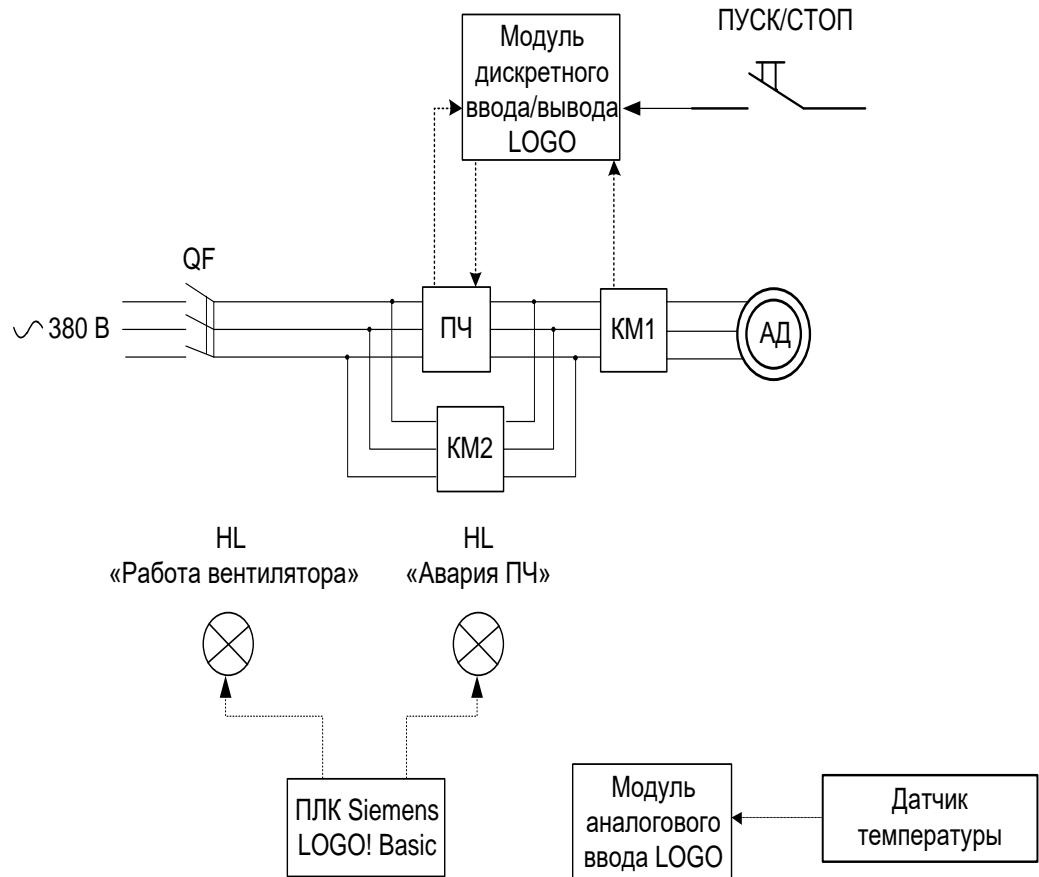


Рисунок 3 – Функциональная схема автоматической системы вентиляции

1. РАСЧЕТ И ВЫБОР СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Расчет мощности и предварительный выбор двигателя

Исходные данные к работе:

Производительность $Q = 0,2 \text{ м}^3 / \text{с}$;

Напор (давление) $H = 6000 \text{ Па}$;

КПД $\eta_B = 0,75$.

Мощность вентилятора:

$$P_e = \frac{Q \cdot H}{\eta_e} \cdot 10^{-3} = \frac{0,2 \cdot 6000}{0,75} \cdot 10^{-3} = 1,6 \text{ кВт}$$

В соответствии с таблицей 1.1 принимается коэффициент запаса K_3

Таблица 1.1

P_B , кВт	до 1,0	1..2	2..5	более 5
K_3	2	1,5	1,25..1,3	1,1...1,15

Принимаем коэффициент запаса $K_3 = 1,5$.

Расчетная мощность электропривода:

$$P_{op} = K_3 \cdot \frac{Q \cdot H}{\eta_e \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot \frac{0,2 \cdot 6000}{0,75 \cdot 0,9} \cdot 10^{-3} = 2,6 \text{ кВт},$$

где η_n – КПД механической передачи.

При отсутствии данных принимается $\eta_n = 0,88...0,92$. Принимаем

$\eta_n = 0,9$.

По каталогу [4] выбираем двигатель типа АИР90L2 с номинальной мощностью $P_H = 3 \text{ кВт}$.

$3 \text{ кВт} \geq 2,6 \text{ кВт}$ – условие выполняется.



Рисунок 4 – Внешний вид асинхронного двигателя

Основные технические параметры двигателя приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Основные технические параметры двигателя

P _{ном} , кВт	n _н , об/мин	При номинальной нагрузке			J, кг·м ²
		s _н , %	cosφ _н	η _н , %	
3	2860	5	0,88	84,5	0,0035

Таблица 2 (продолжение)

$m_{п} = \frac{M_{пуск}}{M_{н}}$	$m_{к} = \frac{M_{макс}}{M_{н}}$	$m_{м} = \frac{M_{мин}}{M_{н}}$	$k_{i_{дв}} = \frac{I_{пуск}}{I_{н}}$	Степень защиты
2	2,2	1,6	7	IP55

Число полюсов p = 1,

Класс изоляции «F».

Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя представлены в таблице 3.

Таблица 3- Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя

Тип двигателя	Габаритные размеры, мм			Установочные и присоединительные размеры, мм						
	d ₂₄	L ₃₀	h ₃₁	b ₁	b ₁₀	d ₁	d ₁₀	d ₂₀	d ₂₂	d ₂₅
АИР90L2	250	380	245	8	140	24	10	215	15	180

Таблица 3 (продолжение)

Установочные и присоединительные размеры, мм								
h	h ₁	h _s	L ₁	L ₁₀	L ₁₁	L ₂₀	L ₃₁	d ₃₀
90	7	35	50	100	170	4	56	195

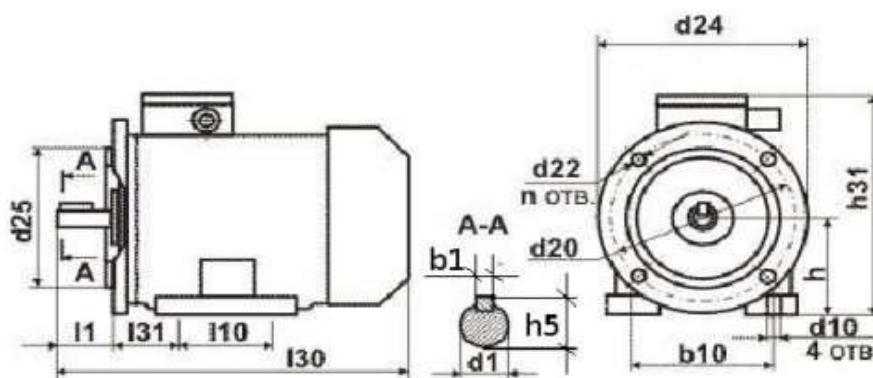


Рисунок 5 – Габаритные и установочно-присоединительные размеры двигателя

1.1.1. Расчетные параметры электродвигателя

Синхронная скорость вращения:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_{1н}}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об / мин},$$

где $f_{1н}$ – частота сети, p – число полюсов.

Синхронная угловая скорость вращения:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с}$$

Номинальное скольжение:

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{3000 - 2860}{3000} = 0,047 \text{ отн.ед.}$$

Номинальная угловая скорость вращения:

$$\omega_{\text{двн}} = (1 - s_n) \cdot \omega_0 = (1 - 0,047) \cdot 314 = 299,3 \text{ рад/с}$$

Номинальный момент:

$$M_{\text{двн}} = \frac{P_{\text{двн}}}{\omega_{\text{двн}}} = \frac{3000}{299,3} = 10,024 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальное фазное напряжение:

$$U_{1н} = \frac{U_{\text{фн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$$

Номинальный ток статора:

$$I_n = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \phi \cdot \eta_n} = \frac{3000}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,845} = 6,113 \text{ А}$$

Ток статора двигателя при частичной нагрузке:

$$I_{11} = \frac{p_{\text{ж}} \cdot P_n}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_{\text{рж}} \cdot \eta_{\text{рж}}} = \frac{0,75 \cdot 3000}{3 \cdot 220 \cdot 0,818 \cdot 0,845} = 4,932 \text{ А,}$$

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

$$\cos \varphi_{\text{рж}} = 0,818;$$

$$\eta_{\text{рж}} = \eta_n = 0,845.$$

Ток холостого хода:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_{\text{ж}} \cdot I_n \cdot \frac{1 - s_n}{1 - p_{\text{ж}} \cdot s_n} \right)^2}{1 - \left(p_{\text{ж}} \cdot \frac{1 - s_n}{1 - p_{\text{ж}} \cdot s_n} \right)^2}} = \sqrt{\frac{4,933^2 - \left(0,75 \cdot 6,113 \cdot \frac{1 - 0,047}{1 - 0,75 \cdot 0,047} \right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1 - 0,047}{1 - 0,75 \cdot 0,047} \right)^2}} = 2,912 \text{ А}$$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске:

$$I_{1\text{макс}} = k_{i\text{дв}} \cdot I_{1н} = 7 \cdot 6,113 = 42,791 \text{ А}$$

Критический момент:

$$M_k = m_k \cdot M_{\text{двн}} = 2,2 \cdot 10,024 = 22,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске:

$$M_{\text{двпуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{двн}} = 2 \cdot 10,024 = 20,048 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

1.1.2. Расчет параметров Т-образной схемы замещения

Для расчета механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя необходимо воспользоваться его математической моделью, которая в общем случае представляется разными схемами замещения. Наиболее удобной и простой для расчета асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения:

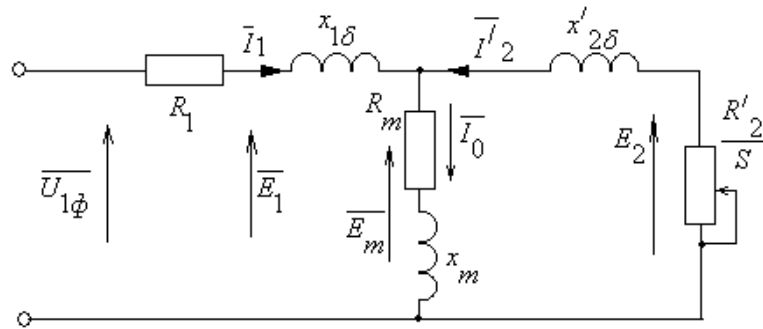


Рисунок 6 – Т-образная схема замещения двигателя

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

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.

Для определения значений приведенного активного сопротивления ротора и активного сопротивления статора найдем коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1n}} = 1 + \frac{2,912}{2 \cdot 7 \cdot 6,113} = 1,034;$$

$$A_1 = m \cdot U_{1n}^2 \cdot \frac{1 - s_n}{2 \cdot C_1 \cdot m_k \cdot P_n} = 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{1 - 0,047}{2 \cdot 1,034 \cdot 2,2 \cdot 3000} = 10,138,$$

где $m = 3$ – число фаз,

I_0 – ток холостого хода.

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) \cdot C_1} = \frac{10,138}{\left(1 + \frac{1}{0,222}\right) \cdot 1,034} = 1,78 \text{ Ом},$$

где $\beta = 1$;

s_k – критическое скольжение.

Критическое скольжение находим по формуле Клосса:

$$s_k = s_n \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$
$$= 0,047 \cdot \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - [1 - 2 \cdot 0,047 \cdot 1 \cdot 2,5(2,2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,047 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)} = 0,222 \text{ о.е.}$$

Активное сопротивление статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,034 \cdot 1,78 \cdot 1 = 1,841 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 4,395 \cdot 1,034 \cdot 1,78 = 8,09,$$

$$\text{где } \gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,222^2} - 1^2} = 4,395$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$X'_{2н} = 0,58 \cdot \frac{X_{кн}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{8,09}{1,034} = 4,538 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$X_{1н} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 8,09 = 3,398 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение:

$$s_{к1} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} = \frac{1,034 \cdot 1,78}{\sqrt{1,841^2 + 8,09^2}} = 0,222 \text{ о.е.}$$

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

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

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

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,88 - 1,841 \cdot 6,113)^2 + (220 \cdot 0,475 - 3,398 \cdot 6,113)^2} = 200,649 \text{ В},$$

где $\varphi = \arccos(\cos \varphi) = 0,495$,

$$\sin \varphi = \sin(\varphi) = 0,475.$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_{\mu н} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{200,649}{2,912} = 68,898 \text{ Ом}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1н}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{3,398}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 10,82 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Приведенное значение индуктивности обмотки ротора, обусловленной потоком рассеяния:

$$L_{2\sigma} = \frac{X'_{2н}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{4,538}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 14,45 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Индуктивность контура намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu н}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{68,898}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,219 \text{ Гн}$$

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
1,841	3,398	$10,82 \cdot 10^{-3}$	68,898	0,219	1,78	4,538	$14,45 \cdot 10^{-3}$	8,09

1.2 Выбор вентилятора

В соответствии с технологическим процессом рекомендовано выбрать вентилятор центробежной (радиальной) конструкции высокого давления. По данным двигателя выбираем радиальный вентилятор ВР 132-30[5], внешний вид которого представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Внешний вид радиального вентилятора ВР 132-30.

Габаритные и присоединительные размеры вентилятора представлены на рисунке 7 и в таблице 4.

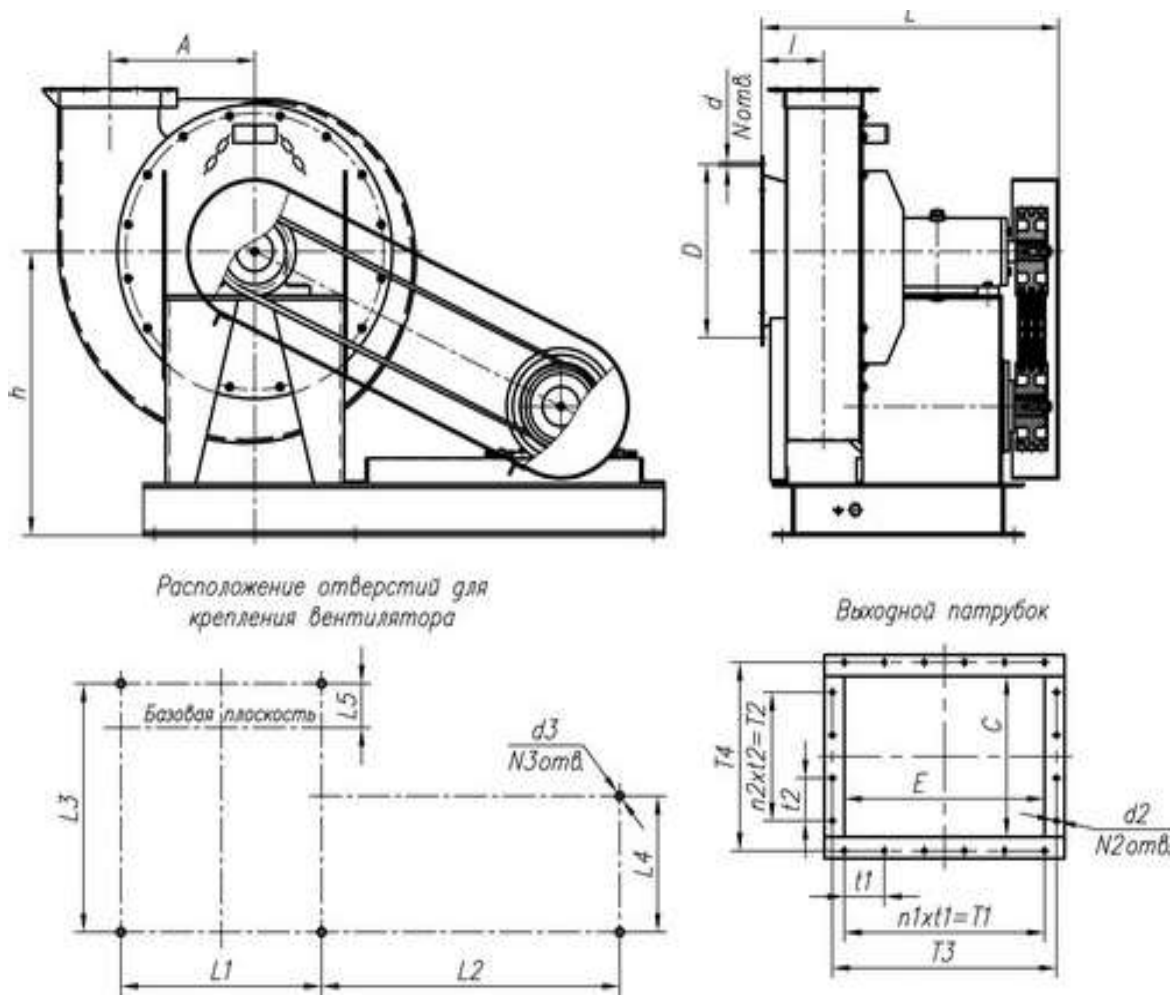


Рисунок 7 – Габаритные и присоединительные размеры

Таблица 4- Габаритные и присоединительные размеры

Размеры, мм											
h	A	L	E	C	I	D	L1	L2	L3	L4	L5
550	300	695	200	150	115	250	410	570	580	346	100

Таблица 4 (продолжение)

Размеры, мм										
d	d ₂	d ₃	t1	t2	T1	T2	T3	T4	n1	n2
9	9	15	100	100	200	100	242	194	2	1

Радиальные вентиляторы высокого давления ВР 132-30 предназначены для перемещения неагрессивного газа или воздуха с температурой не более 80°С и запыленностью не более 100 мг/м³, не содержащего липких и волокнистых веществ. Такие вентиляторы применяются в системах кондиционирования воздуха, в системах вентиляции производственных, общественных и жилых зданий, в технологических процессах.

Вентиляторы эксплуатируются в условиях умеренного (У) и тропического (Т) климата второй и третьей категории размещения по ГОСТ 15150-69 [18]. Температура окружающей среды от -40 °С до +40 °С.

Технические характеристики вентилятора представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Технические характеристики вентилятора

Типоразмер		АИР90L2
Производительность, 10 ³ ·м ³ /час		2,55-3,4
Давление, Па		1900-2000
Мощность, кВт		3
Частота вращения рабочего колеса, об/мин		2860
Масса, кг		42
Виброизоляторы	Тип	ДО38
	Количество	5

Аэродинамическая характеристика вентилятора ВР 132-30 представлена на рисунке 7.

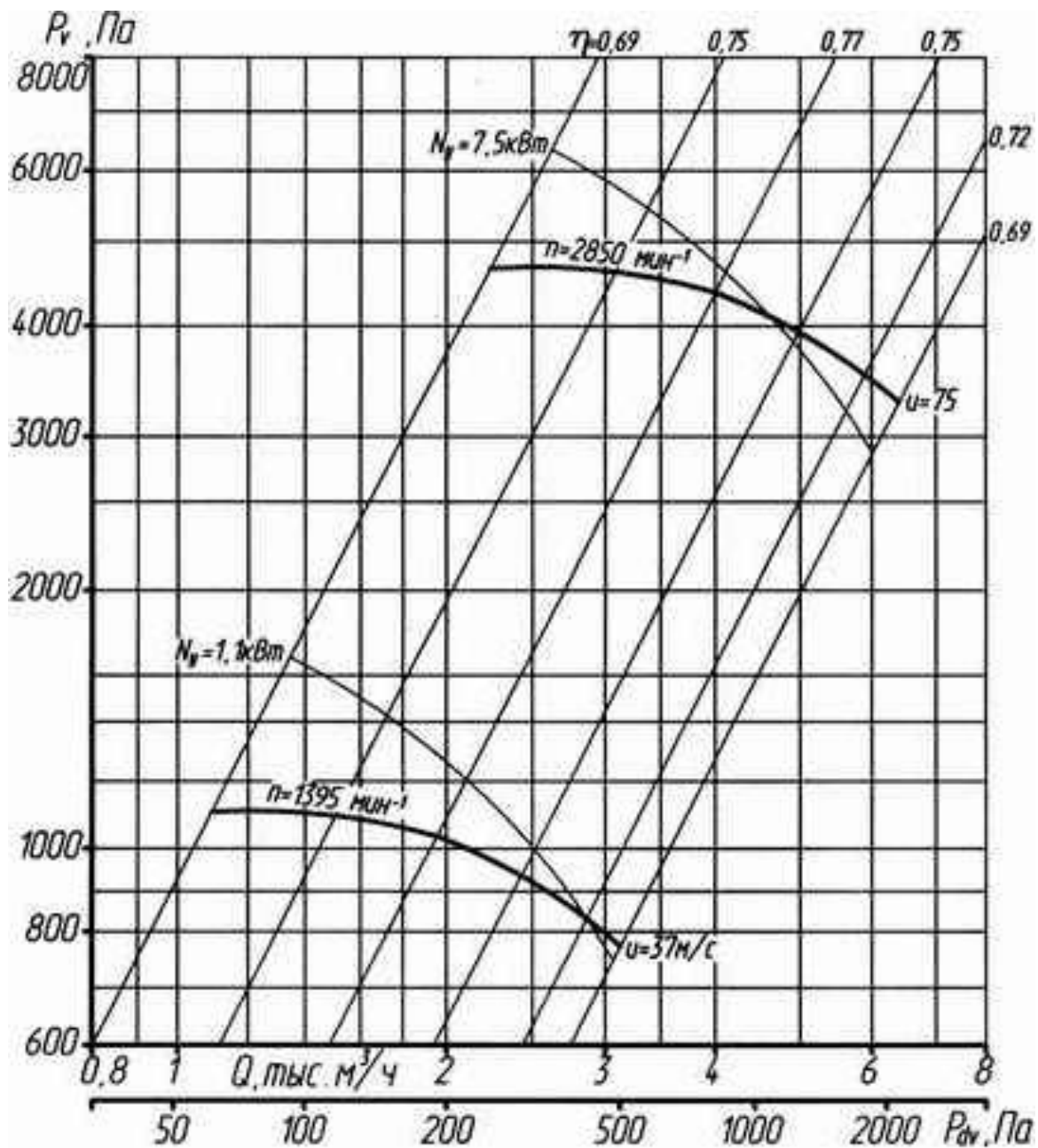


Рисунок 7 – Аэродинамическая характеристика вентилятора ВР 132-30

1.3 Выбор преобразовательного устройства для системы регулируемого электропривода

Преобразователь частоты (ПЧ) применяется для плавного регулирования скорости асинхронного электродвигателя, благодаря созданию на выходе ПЧ напряжения заданной частоты. Преобразователь частоты состоит из выпрямителя, преобразующего переменный ток в постоянный, и инвертора, преобразующего постоянный ток в переменный ток, требуемой частоты и амплитуды [1].

В соответствии с условием:

$$I_{\text{и макс}} \geq I_{\text{дв н}} = 6,113 \text{ А,}$$

где $I_{\text{и макс}}$ – максимальный ток инвертора;

$I_{\text{дв н}}$ – номинальный ток двигателя;

выбираем преобразователь частоты модели Веспер ЕЗ-8100 [6]. Данная модель отличается высокой производительностью, при небольших габаритах и низкой цене. Параметры ПЧ приведены в таблице 6.

Таблица 6- Параметры преобразователя частоты

Модель	Число фаз на входе	$U_{\text{н}}, \text{В}$	$I_{\text{ин}}, \text{А}$	Рекомендуемая мощность двигателя, кВт
ЕЗ-8100-005Н	3	380~460	8	3,7

Технические данные преобразователя частоты серии ЕЗ-8100:

Выходные характеристики:

- полная мощность: 5 кВА;
- номинальный выходной ток: 8 А;
- максимальное выходное напряжение: 3-фазное 380В;
- максимальная выходная частота: 400 Гц.

Источники питания:

- номинальные входное напряжение: 3-фазное 380~460В;
- номинальная частота: 50/60 Гц;

- допустимое отклонение напряжения: -15% ... +10%;
- допустимое отклонение частоты: $\pm 5\%$.

Защитные функции:

- электронная тепловая защита двигателя от перегрузки;
- температурный контроль радиатора;
- защита ПЧ от короткого замыкания на клеммах двигателя;
- защита от потери фазы отключением преобразователя;
- постоянный контроль напряжения промежуточной цепи постоянного тока;
- защита от неисправности заземления на клеммах двигателя.

Параметры внешней среды на высоте до 1000 м над уровнем моря:

- влажность: не более 90%;
- температура воздуха: открытая установка -10 °С ...+ 45 °С;
- температура хранения: от -20 °С до +60 °С;

Степень защиты корпуса преобразователя IP 20.

Внешний вид преобразователя частоты представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид преобразователя частоты

Схема подключения преобразователя частоты приведена на рисунке 9.

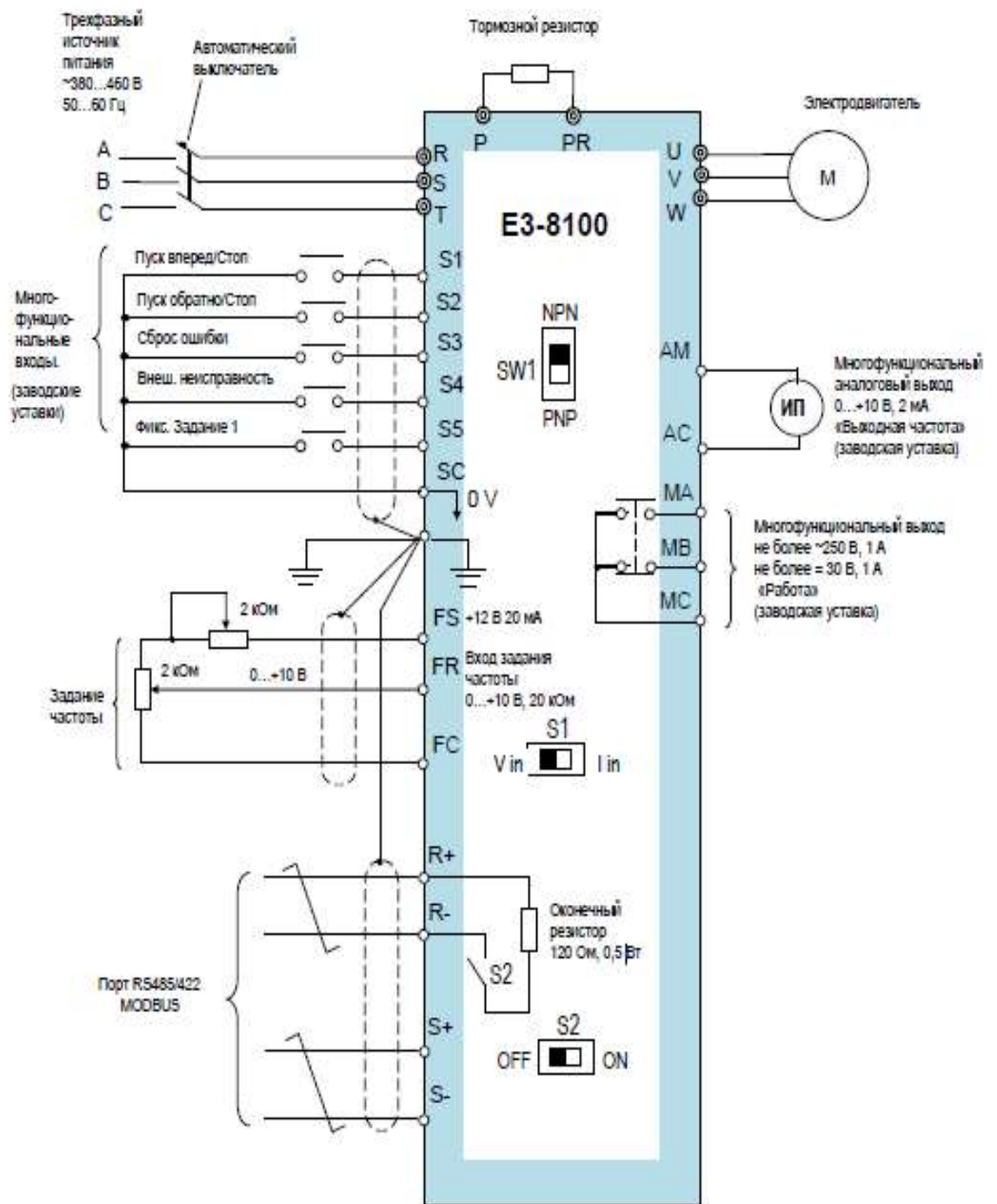


Рисунок 9 – Схема подключения преобразователя частоты

1.4 Расчет и выбор основных силовых элементов системы регулируемого электропривода

В состав силовой части преобразователя частоты входят следующие основные компоненты [1]:

1. Неуправляемый выпрямитель, формирующий пульсирующее выпрямленное напряжение.
2. Промежуточная цепь, представляющая собой фильтр, содержащий в случае использования инвертора напряжения только конденсатор, и сглаживающая выпрямленное напряжение. Индуктивность L в цепи постоянного тока представляет собой коммутационный, а не сглаживающий дроссель.
3. Инвертор, формирующий выходное напряжение с необходимыми значениями амплитуды и частоты.

Схема силовой части преобразователя частоты представлена на рисунке 10.

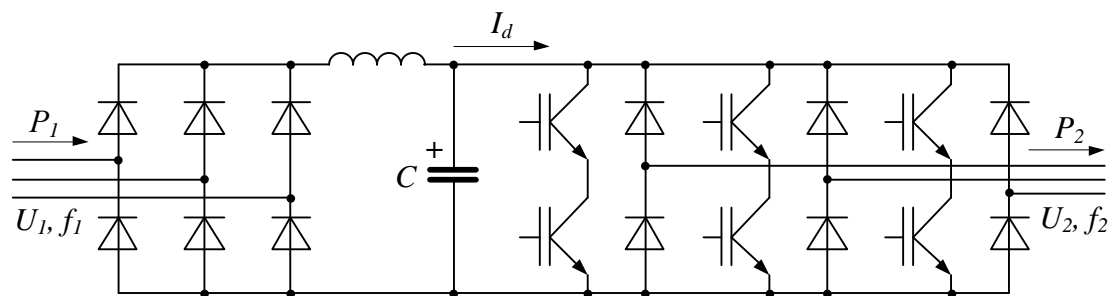


Рисунок 10 – Схема силовой части преобразователя частоты

Выходной каскад инвертора выполнен на основе *IGBT*-модулей и методом высокочастотной широтно-импульсной модуляции осуществляет преобразование постоянного напряжения в систему переменных трехфазных напряжений.

1.4.1 Расчет инвертора

Максимальный ток через ключи инвертора [2]:

$$I_{c\max} = \frac{P_H \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta_{дв} \cos \phi \sqrt{3} U_{л}} = \frac{3000 \cdot 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,2}{0,845 \cdot 0,88 \cdot \sqrt{3} \cdot 380} = 14,563 \text{ А,}$$

где $k_1 = 1,3$ – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току;

$k_2 = 1,2$ – коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока.

Тип транзистора выбираем по справочнику с постоянным током $I_C \geq I_{C,max}$ и постоянным напряжением $U_{CЭ} \geq U_d$. Выбираем модуль (полумост) IGBT фирмы Mitsubishi CM35MХА-24S [7], с параметрами приведенными в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры модуль IGBT

Тип прибора	Предельные параметры			Электрические характеристики					
	$U_{CES},$ В	$I_C,$ А	$P_C,$ Вт	$U_{CE(sat)},$ В		$C_{ies},$ нФ	$C_{oes},$ нФ	$C_{res},$ нФ	$t_{d(on)},$ нс
				типовое	максимальное				
CM35MХА-24S	1200	35	355	1,8	2,25	3,5	0,7	0,06	300

Таблица 7 (продолжение)

Электрические характеристики			Обратный диод		Тепловые и механические параметры			
$t_r,$ нс	$t_{d(off)},$ нс	$t_f,$ нс	$U_f,$ В	$t_{rr},$ нс	$R_{ch(c-f)},$ °С/Вт	IGBT $R_{ch(j-c)},$ °С/Вт	Диод $R_{ch(j-c)},$ °С/Вт	Масса, г
200	600	300	2,25	300	0,15	0,42	0,69	

U_{CES} – максимальное напряжение коллектор – эмиттер;

I_C – максимальный ток коллектора;

P_C – максимальная рассеиваемая мощность;

$U_{CE(sat)}$ – напряжение коллектор – эмиттер во включенном состоянии;

C_{ies} – входная емкость;

C_{oes} – выходная емкость;

C_{res} – емкость обратной связи;

$t_{d(on)}$ – время задержки включения;

t_r – время нарастания;

$t_{d(off)}$ – время задержки выключения;

t_f – время спада;

U_f – прямое падение напряжения на обратном диоде транзистора;

t_{rr} – время восстановления обратного диода при выключении;

$R_{th(c-f)}$ – тепловое сопротивление корпус – охладитель;

$R_{th(f-c)}$ – тепловое сопротивление переход – корпус.

Потери в IGBT в проводящем состоянии:

$$P_{SS} = \frac{I_{c\max}}{k_1} \cdot U_{ce(sat)} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \phi \right) = \frac{35}{1,3} \cdot 2,25 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{3 \cdot \pi} \cdot 0,88 \right) = 12,95 \text{ Вт},$$

где $D = 0,95$ – максимальная скважность;

Потери в IGBT при коммутации:

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi \sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cp} \cdot U_{cc} \cdot f_{sw} (t_{c(on)} + t_{c(off)})}{2} = \frac{1}{3,14 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{11,202 \cdot 513 \cdot 10^4 (5 \cdot 10^{-7} + 9 \cdot 10^{-7})}{2} = 18,108 \text{ Вт},$$

где $I_{cp} = I_{c\max}/k_1 = 11,202 \text{ А}$,

$t_{c(on)}$ – время включения IGBT ключа:

$$t_{c(on)} = t_r + t_{d(on)} = 200 \cdot 10^{-9} + 300 \cdot 10^{-9} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 0,5 \text{ мкс},$$

$t_{c(off)}$ – время выключения IGBT ключа:

$$t_{c(off)} = t_f + t_{d(off)} = 300 \cdot 10^{-9} + 600 \cdot 10^{-9} = 9 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 0,9 \text{ мкс},$$

$U_{cc} = U_d = 513 \text{ В}$,

$f_{sw} = 10000 \text{ Гц}$ – частота коммутации ключей.

Суммарные потери IGBT:

$$P_Q = P_{SS} + P_{SW} = 12,95 + 18,108 = 31,058 \text{ Вт}.$$

Потери диода в проводящем состоянии:

$$P_{DS} = I_{cp} \cdot U_{ec} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \phi \right) = 31,058 \cdot 2,25 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{3 \cdot \pi} \cdot 0,88 \right) = 14,934 \text{ Вт},$$

где $U_{ec} = 2,25 \text{ В}$ – прямое падение напряжения на диоде (в проводящем состоянии).

Потери диода при восстановлении запирающих свойств:

$$P_{DR} = \frac{1}{8} \cdot U_{cc} \cdot I_{cp} \cdot t_{tr} \cdot f_{sw} = \left(\frac{1}{8} \cdot 513 \cdot 11,202 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 \right) = 2,155 \text{ Вт},$$

Суммарные потери диода:

$$P_D = P_{DS} + P_{DR} = 14,934 + 2,155 = 17,089 \text{ Вт}$$

Результирующие потери в IGBT с обратным диодом:

$$P_T = P_Q + P_D + P_{SS} + P_{SW} + P_{DS} + P_{DR} = 31,058 + 17,089 + 12,95 + 18,108 + 14,934 + 2,155 = 96,294 \text{ Вт.}$$

1.4.2 Расчет охладителя

Тепловое сопротивление структуры охладитель – окружающая среда [2].

$$R_{th(f-a)} \leq \frac{T_c - T_a}{P_T} - R_{th(c-f)} = \frac{90 - 48}{96,294} - 0,15 \approx 0,286 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт},$$

где $R_{th(f-a)}$ – тепловое сопротивление, используемое по аналогии с понятием электрическое сопротивление для проведения тепловых расчетов,

$T_c = 90 \div 110 \text{ } ^\circ\text{C}$ – рекомендуемая температура охлаждающей пластины,

$T_a = 45 \div 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ – температура воздуха внутри корпуса ПЧ.

Температура кристалла обратного диода должна соответствовать условию:

$$T_{jd} \leq 125 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{jd} = T_c + P_D \cdot R_{th(j-c)d} = 90 + 17,089 \cdot 0,69 = 101,791 \text{ } ^\circ\text{C} \leq 125 \text{ } ^\circ\text{C} - \text{условие}$$

выполняется.

Температура кристалла транзистора должна соответствовать условию:

$$T_{jt} = T_c + P_Q \cdot R_{th(j-c)t} = 90 + 31,058 \cdot 0,42 = 103,044 \leq 125 \text{ } ^\circ\text{C} - \text{условие}$$

выполняется.

1.4.3 Расчет выпрямителя

Среднее выпрямленное напряжение [2]:

$$U_d = k_{c.n.} \cdot U_n = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В},$$

где $k_{c.n.} = 1,35$ – коэффициент трехфазной мостовой схемы для номинальной нагрузки.

Максимальное значение выпрямленного тока:

$$I_{dm} = \frac{\cos \phi \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \frac{I_{cmax}}{\sqrt{2}} + n \cdot P_T}{U_d} = \frac{0,88 \cdot \sqrt{3} \cdot 380 \cdot \frac{14,563}{\sqrt{2}} + 6 \cdot 96,294}{513} = 12,752 \text{ А},$$

где $n = 6$ – количество пар IGBT/FWD в инверторе.

Максимальный ток диода:

$$I_{vm} = k_{cc} \cdot I_{dm} = 1,045 \cdot 12,752 = 13,326 \text{ A},$$

где $k_{cc} = 1,045$ для мостовой трехфазной схемы при оптимальных параметрах Г-образного LC-фильтра, установленного на выходе выпрямителя.

Максимальное обратное напряжение диода:

$$U_{vm} = k_{з.н.} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{л} \cdot k_{с.н.} \cdot k_c + \Delta U_n = 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,35 \cdot 1,1 + 100 = 1058 \text{ B},$$

где $k_{з.н.} = 1,2$ – коэффициент запаса по напряжению,

$k_c = 1,1$ – коэффициент допустимого повышения сети,

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

Вентили выбираются по постоянному рабочему току и по классу напряжения. Выбираем диодный модуль RM100DZ-24 [8] со средним прямым током $I_{FAV} = 100 \text{ A}$ и импульсным повторяющимся обратным напряжением $U_{RRM} = 1200 \text{ B}$. Из трех диодных модулей реализуется мостовая схема трехфазного выпрямителя.

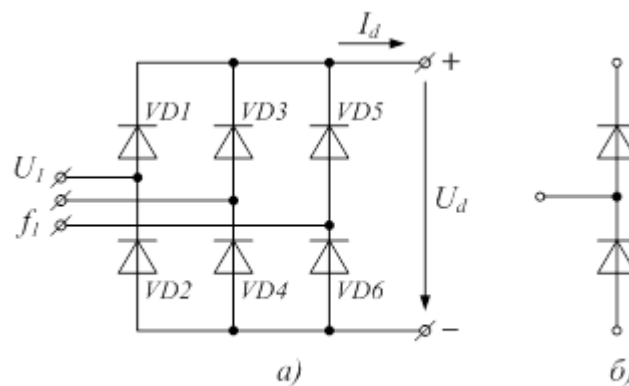


Рисунок 11 а – Мостовая схема трехфазного выпрямителя,

б – диодный модуль

Расчет потерь в выпрямителе для установившегося режима работы ЭП:

$$P_{Dv} = m_v \cdot k_{cs} \cdot \frac{I_{dm}}{k_1} = 6 \cdot 0,577 \cdot \frac{12,752}{1,3} = 33,96 \text{ Вт},$$

где $m_v = 6$ – число полупроводниковых приборов в схеме,

$k_{cs} = 0,577$ для трехфазной мостовой схемы.

Тепловое сопротивление охладителя:

$$R_{th(f-a)} \leq \frac{T_c - T_a}{P_{DV}} - R_{th(c-f)} = \frac{90 - 48}{33,96} - 0,15 \approx 0,541^\circ\text{C} / \text{Вт}$$

При установке модулей (выпрямитель, инвертор) на общий охладитель требуемое сопротивление определяется аналогично суммарному сопротивлению при параллельном включении резисторов:

$$R_{th(f-a)} = \frac{R_{th(f-a)1} \cdot R_{th(f-a)2}}{R_{th(f-a)1} + R_{th(f-a)2}} = \frac{0,289 \cdot 0,541}{0,289 + 0,541} = 0,188^\circ\text{C} / \text{Вт}.$$

1.4.4 Расчет фильтра

Схема фильтра приведена на рисунке 12.

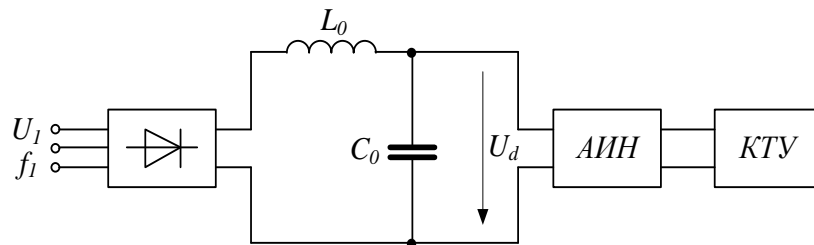


Рисунок 12 – Схема фильтра

Принимаем коэффициент сглаживания пульсаций $S = (3 \div 12)$. Чем больше S , тем больше габариты фильтра, исходя из этого выбираем $S = 3$ [2].

Коэффициент пульсаций на входе фильтра:

$$q_{\text{вх}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057,$$

где $m = 6$ – пульсность трехфазной мостовой схемы выпрямления.

Найдем произведение:

$$L_0 \cdot C_0 = \frac{S + 1}{(2 \cdot \pi \cdot m \cdot f_s)^2} = \frac{3 + 1}{(2 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 30)^2} = 3,127 \cdot 10^{-6},$$

где $f_s = 30$ Гц – минимальная частота ПЧ,

L_0 – индуктивность дросселя для обеспечения коэффициента мощности на входе выпрямителя $K_M \approx 0,95$, определяется по следующим условиям:

$$L_0 \geq 3 \cdot \frac{0,013 \cdot U_{л1}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{min}} \cdot I_{dm}} = 3 \cdot \frac{0,013 \cdot 380}{2 \cdot 3,14 \cdot 30 \cdot 73,968} = 6,17 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Выбираем стандартное значение $L_0 = 6,5$ мГн

Амплитуда тока в фазе двигателя:

$$I_{sm1} = \sqrt{2} \cdot I_{1n} = 1,41 \cdot 6,113 = 8,619 \text{ A}$$

Емкость конденсатора, необходимая для протекания реактивного тока нагрузки инвертора:

$$C_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{sm1} \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_1}{2} - \frac{\pi}{12}\right)}{2 \cdot U_d \cdot f_{sw} \cdot q_{1bx}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 8,619 \cdot \sin^2\left(\frac{0,495}{2} - \frac{\pi}{12}\right)}{2 \cdot 513 \cdot 10^4 \cdot 0,057} = 3,154 \cdot 10^{-7} = 0,32 \text{ мкФ},$$

где $\varphi_1 = \arccos(\cos\varphi) = 0,495$.

Амплитуда тока через конденсатор:

$$I_{c0m} = q_{1bx} \cdot U_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot m \cdot f_{sw} \cdot C_0 = 0,057 \cdot 513 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 10^4 \cdot 0,32 \cdot 10^{-6} = 3,528 \text{ A}.$$

Из соображений приемлемой стоимости, удобства размещения конденсаторов в преобразователе частоты отдается предпочтение батарее из «мелких» конденсаторов (4 конденсатора по 0,1 мкФ).

1.4.5 Расчет снаббера

Схема снаббера представлена на рисунке 13:

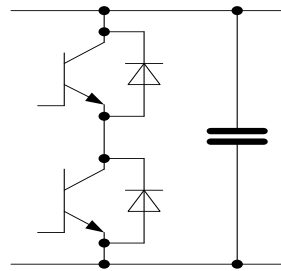


Рисунок 13– Схема снаббера

Данная схема обладает малым числом элементов, малыми пульсациями тока через электролитический конденсатор [2].

Сопротивление резистора зависит от частоты коммутации IGBT f_{sw} и емкости конденсатора C .

Расчетная формула для выбора резистора цепи снаббера:

$$P = 0,5 \cdot C_{sn} \cdot \Delta U_m^2 \cdot f_{sw} = 0,5 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \cdot 10^4 = 0,3 \text{ Вт},$$

где $\Delta U_m^2 = 60 \text{ В}$ – перенапряжение,

$C_{sn} = 1 \text{ мкФ}$ – принятое значение емкости снаббера, исходя из величины тока, коммутируемого транзистором IGBT $I_{c \text{ max}} = 14,563 \text{ А}$. Стандартное значение емкости снаббера составляет 1 мкФ на 100 А.

Сопротивление снаббера:

$$R_{sn} = 2 \sqrt{\frac{L_{sn}}{C_{sn}}} = 2 \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-9}}{1 \cdot 10^{-6}}} = 0,2 \text{ Ом},$$

где $L_{sn} = 10 \text{ нГн}$.

По величине мощности и сопротивления реализуется резистор снаббера из четырнадцати двухваттных сопротивлений типа МЛТ 2 Ом $\pm 10\%$ [9], которые соединены параллельно, для получения эквивалентного сопротивления 0,2 Ом мощностью 30 Вт.

1.5 Выбор аппаратуры защиты

1.5.1 Выбор автоматического выключателя

Для защиты двигателей от токов перегрузки, токов короткого замыкания применяются автоматические выключатели [11].

Выбор автоматического выключателя для двигателя вентилятора ($I_H = 6,113 \text{ А}$)

1. Определяем пусковой ток:

$$I_{ПУСК} = 5 \cdot I_H = 5 \cdot 6,113 = 30,565 \text{ А}$$

2. Определяем кратковременный ток:

$$I_{КР} = 1,25 \cdot I_{ПУСК} = 1,25 \cdot 30,565 = 38,206 \text{ А}$$

3. Ток электромагнитного расцепителя должен быть больше кратковременного тока:

$$I_{ЭМ} \geq I_{КР}.$$

По время-токовой характеристике отключения выбираем уставку электромагнитного расцепителя, равную 5.

$$I_{ЭМ} = 5 \cdot I_{НАВ} = 5 \cdot 8 = 40 \text{ А},$$

где $I_{НАВ} = 8 \text{ А}$ – номинальный ток автоматического выключателя.

$$40 \geq 38,206 \text{ А}.$$

4. Ток теплового расцепителя должен быть больше номинального тока электроприемника:

$$I_{Т.Р.} \geq I_{Н}, \text{ т.е. } 8 \text{ А} \geq 6,113 \text{ А}.$$

Выбираем автоматический выключатель ВА 47-29 (8А) [10], представленный на рисунке 14.



Рисунок 14 – Автоматический выключатель ВА 47-29 (8 А)

1.5.2 Выбор магнитных пускателей

Электромагнитный пускатель является коммутационным электрическим аппаратом и относится к семейству электромагнитных контакторов. Магнитный пускатель предназначен для пуска, остановки и защиты трехфазных асинхронных электродвигателей, непосредственным подключением обмоток статора к сети и разрывом тока в них, без предварительного ввода в цепь дополнительных сопротивлений.

К пускателям предъявляются высокие требования по износостойкости. Пускатели выпускаются в трех классах коммутационной износостойкости (А, Б, В).

Выбираем магнитные пускатели серии KNL.

Магнитный пускатель серии KNL 8 представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 - Магнитный пускатель серии KNL 8

Основные технические характеристики магнитного пускателя представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Технические характеристики магнитного пускателя

Тип магнитного пускателя	$I_{\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	Исполнение по назначению и наличию реле	$U_{\text{пит}}$ катушек
KNL8	8А	380 В	нереверсивный, без реле	24В

1.6 Выбор аппаратуры управления

Управление технологическим процессом выполнено на базе контроллера Siemens LOGO! (логический модуль LOGO! Basic).

Логические модули LOGO! – это программируемые модули, которые предназначены для построения простейших устройств автоматического управления. Эти логические модули могут использоваться автономно или дополняться каким-либо необходимым набором модулей расширения. Приемлемая стоимость, компактные размеры, простота эксплуатации, монтажа и программирования позволяют получать на основе модулей LOGO! множество рентабельных решений для разных областей промышленного производства и автоматизации зданий.

Каждый модуль оснащен:

- Памятью программ, которая рассчитана на использование до 200 встроенных функций на программу.
- Клеммами для подключения цепей питания, входных и выходных цепей.
- Интерфейсом:
 - для установок опционального модуля памяти, модуля буферной батареи или комбинированного модуля памяти / батареи.
 - подключения к компьютеру с программным обеспечением LOGO!SoftComfort через соединительный кабель USB для PC LOGO!
 - подключения к аналоговому модему через модемный кабель и создании связи с компьютером, оснащенный программным обеспечением LOGO! SoftComfort.
- Интерфейсом внутренней шины для подключения модулей расширения.
- Интерфейсом подключения внешнего текстового дисплея LOGO! TD (только в модификациях ... 0BA6).

- Кодировочными пазами, которые исключают возможность подключения модулей расширения, не допускаемые для подключения к данному логическому модулю.

- Дополнительно в модулях LOGO! Basic:
 - дисплей, который используется для программирования модуля и отображения сообщений в процессе работы;
 - клавиатура для программирования и оперативного управления работой модуля.

В зависимости от модификации логического модуля, напряжение питания может составлять =12/24/115/230 В или ~24/115/230 В. Напряжением питания модуля определяется так же напряжение питания его входных цепей (исключая аналоговые входы). Все логические модули оснащены 8 входными и 4 выходными дискретными каналами.

Из линейки логических модулей LOGO! Basic выбираем логический модуль LOGO! 24 RC. Модуль обладает следующими техническими данными, представленными в таблице 9.

Таблица 9 - Технические данные логического модуля LOGO! 24 RC

Напряжение питания/входное напряжение, В	~24/= 24
Дискретные входы	
Количество (группы)/ тип	8 (1x8)/ Общий плюс или минус для всех входов
Входное напряжение: <ul style="list-style-type: none"> • низкого уровня, не более • высокого уровня, не менее 	~5/= 5 ~12/= 12
Дискретные выходы	
Количество (группы)/тип	4 (4x1)/замыкающие контакты реле
Импульсный ток выхода, А	30
Длительно допустимый ток выхода, А	10

Для реализации управления процессом необходимо дополнить логический модуль LOGO! 24 RC модулем дискретного ввода/вывода и модулем аналогового ввода сигнала. Выбираем модуль расширения ввода/вывода дискретных сигналов LOGO! DM8 24R, имеющего по 4 дискретных входа и выхода. Также выбираем модуль аналогового ввода сигнала LOGO!AM2.

Технические данные модуля расширения ввода/вывода дискретных сигналов LOGO! DM8 24R представлены в таблице 11

Таблица10- Технические данные модуля LOGO! DM8 24R

Напряжение питания/входное напряжение, В	~24/= 24
Дискретные входы	
Количество (группы)/ тип	4 (1x4)/ нет гальванического разделения между входами
Входное напряжение:	
• низкого уровня, не более, В	~5/= 5
• высокого уровня, не менее, В	~12/= 12
Дискретные выходы	
Количество (группы)/тип	4 (4x1)/замыкающие контакты реле
Импульсный ток выхода, А	30
Длительно допустимый ток выхода, А	5

Модули LOGO! AM2 позволяют заводить в ПЛК аналоговые сигналы по току или напряжению принятых стандартов. Технические данные модуля LOGO! AM2 представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Технические данные модуля LOGO! AM2

Напряжение питания/входное напряжение, В	~24/= 24
Аналоговые входы	
Количество (группы)/ тип	2, нет гальванического разделения цепей
Диапазон измерения входов	0...10 В 0...20 мА

1.7 Выбора датчика температуры

В соответствии с технологическим процессом ПЛК должен формировать сигнал на пуск преобразователя частоты после того, как допустимая температура превысится. А сигнал на стоп преобразователя после того, как необходимая температура установится. Значения температуры окружающей среды фиксирует датчик температуры, который имеет аналоговый выход, соединенный с контроллером при помощи модуля аналогового ввода сигнала LOGO! AM2.

Выбираем в качестве датчика температуры трехпроводной аналоговый преобразователь температуры WKA T91.10.104, выходной сигнал которого составляет 0...10 В, а напряжение питания – постоянное 24В.

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

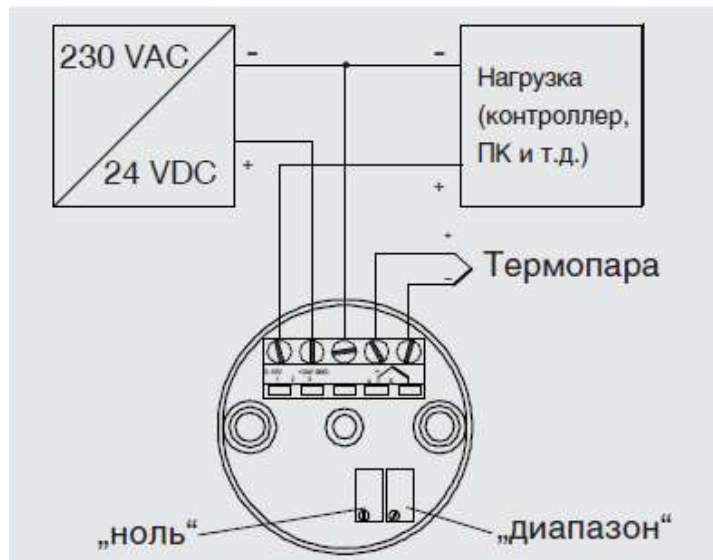


Рисунок 16 – Схема подключения датчика температуры
 Внешний вид датчика температуры представлен на рисунке 17.



Рисунок 17 – Внешний вид датчика температуры WIKAI T91.10.104

1.8. Расчет и выбор типа и сечения кабеля сети высокого напряжения

Выбор конструкции сети и типа проводников осуществляется с ориентацией на окружающую среду помещений цехов. В цеховых сетях до 1000 В наиболее широкое распространение получили электропроводки, кабельные линии, комплектные шинопроводы. Выбор способа прокладки питающей сети

производится с учётом характера окружающей среды и возможных условий места прокладки [11].

Выбираем питающую сеть высокого напряжения: трёхжильные кабельные линии с алюминиевыми жилами с резиновой изоляцией типа АНРГ, проложенные в коробах (для удобства монтажа и демонтажа).

Выбор типа и сечения кабеля цепи питания двигателя выбирается следующим образом: ток цепи $I_H = I_{дв. н} = 6,113$ А. Выбираем четырехжильный кабель по справочнику марки АВВГ 1х2,5 сечением жилы $S = 2,5$ мм².

1.9. Определение расхода электроэнергии за цикл работы, среднецикловых значений КПД и коэффициента мощности электропривода

При номинальном режиме

Полная мощность:

$$\Delta P_H = P_H \left(\frac{1}{\eta_H} - 1 \right) = 3000 \cdot \left(\frac{1}{0,845} - 1 \right) = 550,3 \text{ Вт}$$

Переменная составляющая потери мощности:

$$\Delta P_{V.H} = M_H (\omega_0 - \omega_H) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = 10,024 \cdot (314 - 299,3) \cdot \left(1 + \frac{1,841}{1,78} \right) = 299,8 \text{ Вт}$$

Постоянная составляющая потери мощности:

$$\Delta P_{C.H} = \Delta P_H - \Delta P_{V.H} = 550,3 - 299,8 = 250,5 \text{ Вт}$$

Коэффициент потерь мощности:

$$a = \frac{\Delta P_{C.H}}{\Delta P_{V.H}} = \frac{250,5}{299,8} = 0,837$$

Активная энергия

Полезный расход энергии (механическая работа):

$$A_2 = M_C \cdot \omega_C \cdot t_C = 10,024 \cdot 299,3 \cdot 0,15 = 450,027 \text{ Вт} \cdot \text{с} ,$$

где ω_C , t_C – соответственно угловая скорость и время установившегося режима.

Постоянная составляющая потери энергии:

$$\Delta A_C \approx \Delta P_{\text{сн}} \cdot \left(\frac{\omega_c}{\omega_H}\right)^2 \cdot t_c = 250,5 \cdot \left(\frac{299,3}{314}\right)^2 \cdot 0,15 = 34,139 \text{ Вт} \cdot \text{с}$$

Приведенный фазный ток ротора в установившемся режиме:

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S_C}\right)^2 + (X_K)^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(1,841 + \frac{1,78}{0,047}\right)^2 + 8,09^2}} = 5,43 \text{ А}$$

Переменная составляющая потери энергии:

$$\Delta A_V = 3 \cdot [I_0^2 \cdot R_1 + (I_2')^2 \cdot (b \cdot R_1 + R_2')] \cdot t_c,$$

где b – поправочный коэффициент

$$b = 1 + \frac{2 \cdot I_0 \cdot X_K}{U_1} = 1 + \frac{2 \cdot 2,912 \cdot 8,09}{220} = 1,214$$

$$\Delta A_V = 3 \cdot [2,912^2 \cdot 1,841 + 5,43^2 \cdot (1,214 \cdot 1,841 + 1,78)] \cdot 0,15 = 60,3 \text{ Вт} \cdot \text{с}$$

Потребляемая из сети энергия:

$$A_1 = A_2 + \Delta A_C + \Delta A_V = 450,027 + 34,139 + 60,3 = 544,47 \text{ Вт} \cdot \text{с}$$

Реактивная энергия

Потребление реактивной энергии за цикл:

$$\begin{aligned} \sum A_p &= \sum_{i=1}^n 3[I_0^2 \cdot (X_1 + X_\mu) + (I_{2i}')^2 \cdot (X_1 + X_2')] \cdot t_{c,i} = \\ &= 3 \cdot (2,912^2 \cdot (3,398 + 68,898) + 5,43^2 \cdot (3,398 + 4,538)) \cdot 0,15 = 381,17 \text{ В} \cdot \text{А} \end{aligned}$$

Энергетический (среднецикловой) КПД электропривода:

$$\eta_s = \frac{\sum A_2}{\sum A_1} \cdot 100\% = \frac{450,027}{544,47} \cdot 100\% = 82,65\%$$

где $\sum A_2$ – суммарный расход полезной энергии за цикл;

$\sum A_1$ – суммарное потребление энергии из сети за цикл;

Энергетический коэффициент мощности электропривода:

$$\cos \varphi_s = \frac{\sum A_1}{\sqrt{(\sum A_1)^2 + (\sum A_p)^2}} = \frac{544,47}{\sqrt{544,47^2 + 381,17^2}} = 0,82$$

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

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

Примем значение скольжения $s = 0..1$, тогда можно рассчитать зависимость приведенного тока ротора от скольжения по формуле [1]:

$$I'_2(s) = \frac{U_n}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H}}\right)^2}},$$

Зависимость тока статора от скольжения:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_2(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(s) \cdot \sin \left(\frac{X_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2}} \right)}.$$

Значения угловой скорости можно получить из следующей зависимости:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s).$$

Результаты расчетов представлены в таблице 12.

Таблица 12- Значения приведенного тока ротора и тока статора от скольжения

s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
I'_2, A	15,06	21,74	25	26,74	27,78	28,91	29,24	29,49	29,68	29,85
I_1, A	16,41	23,48	26,91	28,74	29,83	31,01	31,36	31,61	31,81	31,97

Естественные электромеханические характеристики АД приведены на рисунке 18.

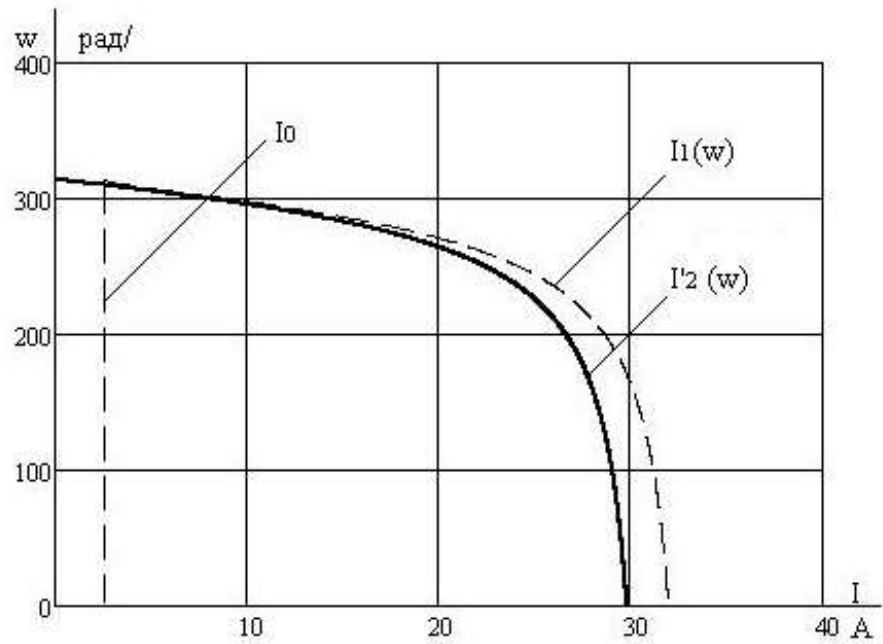


Рисунок 18 – Естественные электромеханические характеристики асинхронного двигателя

Механическую характеристику вентилятора можно рассчитать по выражению:

$$M_c(s) = M_n \cdot 0,05 + M_n \left(\frac{\omega(s)}{\omega_n} \right)^2$$

Результаты расчета представлены в таблице 13.

Таблица 13

s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
ω, рад/с	282,74	254,47	226,19	197,92	169,65	113,1	84,82	56,55	28,27	0
M _c , Н·м	22,89	18,77	15,1	11,85	9,03	4,7	3,19	2,1	1,46	1,24

Механическая характеристика вентилятора приведена на рисунке 22.

Механическую характеристику асинхронного двигателя можно рассчитать по выражению:

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

Результаты расчета представлены в таблице 14.

Таблица 14

s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
ω , рад/с	282,74	254,47	226,19	197,92	169,65	113,1	84,82	56,55	28,27	0
M_c , Н·м	25,19	27,645	24,8	21,485	18,645	14,51	13,015	11,785	10,755	9,885

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя приведена на рисунке 19

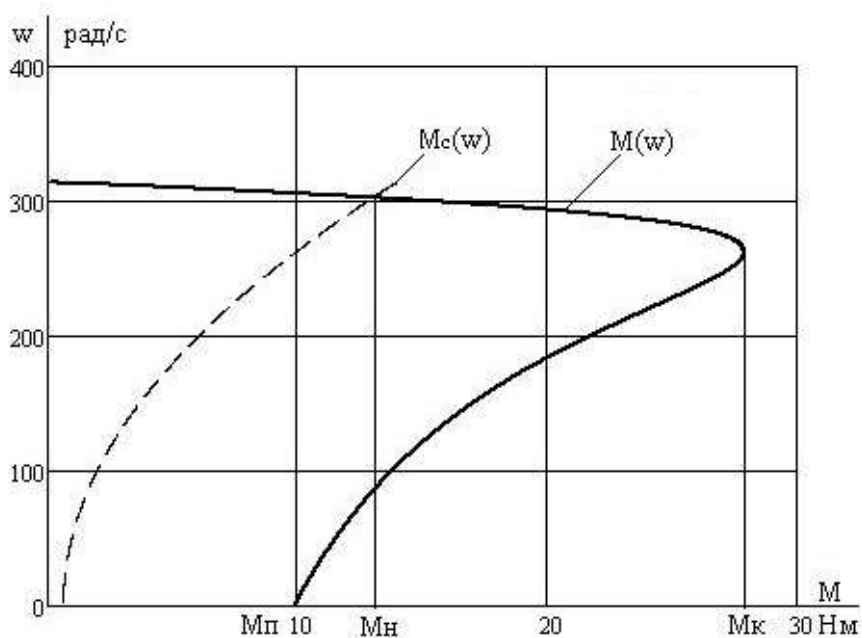


Рисунок 19 – Естественные механические характеристики асинхронного электродвигателя

2.2. Расчет искусственных характеристик $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ регулируемого электропривода

Для регулирования скорости электропривода вентилятора применяют следующие законы регулирования – $U/f = const$ или $U/f^2 = const$, так как вентилятор не обладает большим диапазоном регулирования скорости и не требует обеспечения высокой кратности пускового и максимального моментов. Чаще всего для вентиляторной нагрузки применяется закон регулирования $U/f^2 = const$, однако, при его использовании, на низких частотах равных $5 \div 10$ Гц статический момент на валу двигателя был больше пускового момента, в результате чего двигатель не мог запуститься. В связи с этим был выбран закон регулирования $U/f = const$, который обеспечивает устойчивую работу двигателя как на малых, так и на больших частотах. В соответствии этим законом искусственные (регулируемые) характеристики рассчитываются для нескольких выбранных значений частот питающего напряжения $f_{1н1}$, $f_{1н2}$, $f_{1н3}$, $f_{1н4}$.

Примем $f_{1н1} = 50$ Гц, $f_{1н2} = 25$ Гц, $f_{1н3} = 10$ Гц, $f_{1н4} = 5$ Гц.

Относительные значения частот питающего напряжения соответственно равны:

$$f_{1ж1} = \frac{f_{1н1}}{f_{1н}} = \frac{50}{50} = 1;$$

$$f_{1ж2} = \frac{f_{1н2}}{f_{1н}} = \frac{25}{50} = 0,5;$$

$$f_{1ж3} = \frac{f_{1н3}}{f_{1н}} = \frac{10}{50} = 0,2;$$

$$f_{1ж4} = \frac{f_{1н4}}{f_{1н}} = \frac{5}{50} = 0,1.$$

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

$$U_{1n1} = Zp \cdot f_{1n1} = 4,4 \cdot 50 = 220 \text{ В};$$

$$U_{1n2} = Zp \cdot f_{1n2} = 4,4 \cdot 25 = 110 \text{ В};$$

$$U_{1n3} = Zp \cdot f_{1n3} = 4,4 \cdot 10 = 44 \text{ В};$$

$$U_{1n4} = Zp \cdot f_{1n4} = 4,4 \cdot 5 = 22 \text{ В};$$

где $Zp = U_{1H}/f_{1H} = 4,4$.

Значения синхронных угловых скоростей:

$$\omega_{01} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1n1}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314,159 \text{ рад / с};$$

$$\omega_{02} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1n2}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 25}{1} = 157,08 \text{ рад / с};$$

$$\omega_{03} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1n3}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10}{1} = 62,832 \text{ рад / с};$$

$$\omega_{04} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1n4}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5}{1} = 31,416 \text{ рад / с}.$$

Значения угловых скоростей находятся из выражений:

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

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

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

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

Задавшись значениями скольжения $s = 0..1$, можно рассчитать и построить электромеханические характеристики, которые определяют зависимость приведенного тока ротора от скольжения по выражениям [1]:

$$I'_{21}(s) = \frac{U_{1n1}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1\lambda c1}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu n} \cdot f_{1\lambda c1}}\right)^2}};$$

$$I'_{22}(s) = \frac{U_{1n2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1\lambda c2}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu n} \cdot f_{1\lambda c2}}\right)^2}};$$

$$I'_{23}(s) = \frac{U_{1n3}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1\lambda c3}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu n} \cdot f_{1\lambda c3}}\right)^2}};$$

$$I'_{24}(s) = \frac{U_{1n4}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1\lambda c4}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu n} \cdot f_{1\lambda c4}}\right)^2}}.$$

Электромеханические характеристики приведены на рисунке 20.

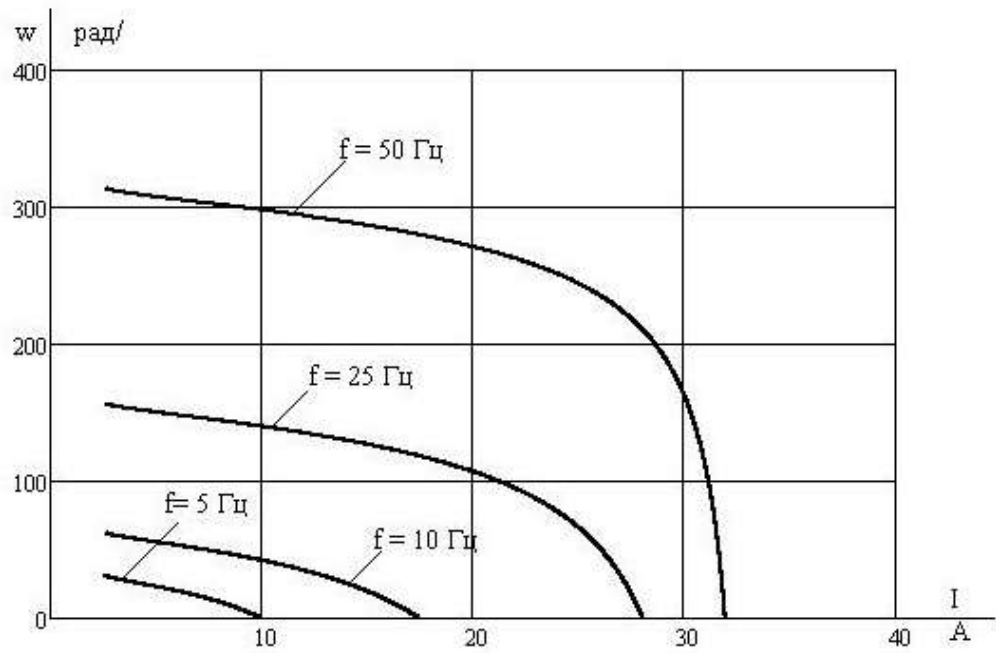


Рисунок 20– Электромеханические характеристики $\omega = f(I_2)$

Электромеханические характеристики, определяющие зависимость тока статора от скольжения можно рассчитать и построить по следующим выражениям:

$$I_{11}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{21}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{21}(s) \cdot \sin \frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c1}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c1}^2}}};$$

$$I_{12}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{22}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{22}(s) \cdot \sin \frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c2}^2}}};$$

$$I_{13}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{23}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{23}(s) \cdot \sin \frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c3}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c3}^2}}};$$

$$I_{14}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{24}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{24}(s) \cdot \sin \frac{X_{KH} \cdot f_{1\lambda c4}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1\lambda c4}^2}}}.$$

Электромеханические характеристики приведены на рисунке 21.

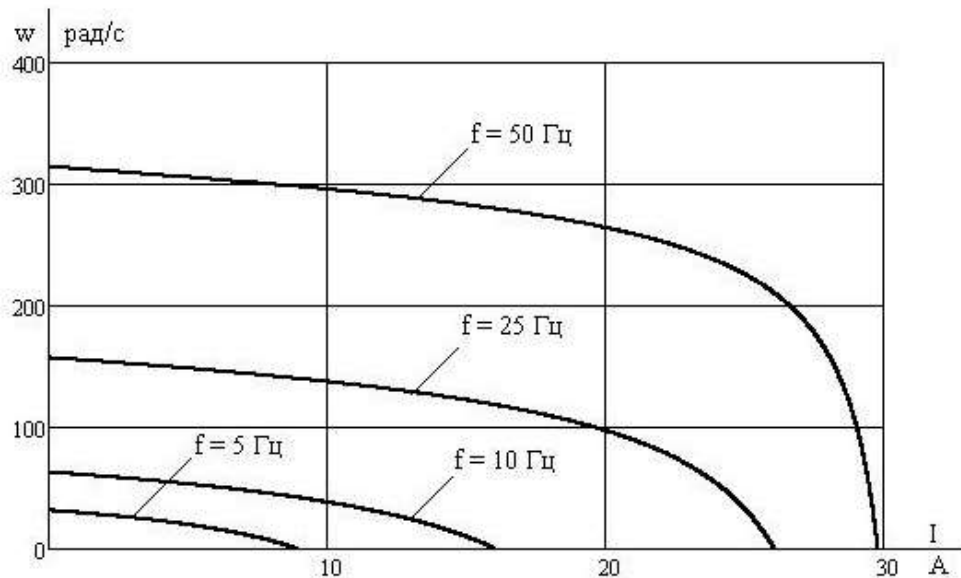


Рисунок 21 – Электромеханические характеристики $\omega = f(I_1)$

Расчет и построение механических характеристик производятся по выражениям:

$$M_1(s) = \frac{3 \cdot U_{1n}^2 \cdot R'_2}{\omega_{01} \cdot s \cdot \left[X_{кн}^2 \cdot f_{1жс1}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\muн} \cdot f_{1жс1}} \right)^2 \right]};$$

$$M_2(s) = \frac{3 \cdot U_{1n2}^2 \cdot R'_2}{\omega_{02} \cdot s \cdot \left[X_{кн}^2 \cdot f_{1жс2}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\muн} \cdot f_{1жс2}} \right)^2 \right]};$$

$$M_3(s) = \frac{3 \cdot U_{1n3}^2 \cdot R'_2}{\omega_{03} \cdot s \cdot \left[X_{кн}^2 \cdot f_{1жс3}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\muн} \cdot f_{1жс3}} \right)^2 \right]};$$

$$M_4(s) = \frac{3 \cdot U_{1n4}^2 \cdot R'_2}{\omega_{04} \cdot s \cdot \left[X_{кн}^2 \cdot f_{1жс4}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\muн} \cdot f_{1жс4}} \right)^2 \right]}.$$

Механические характеристики приведены на рисунке 22.

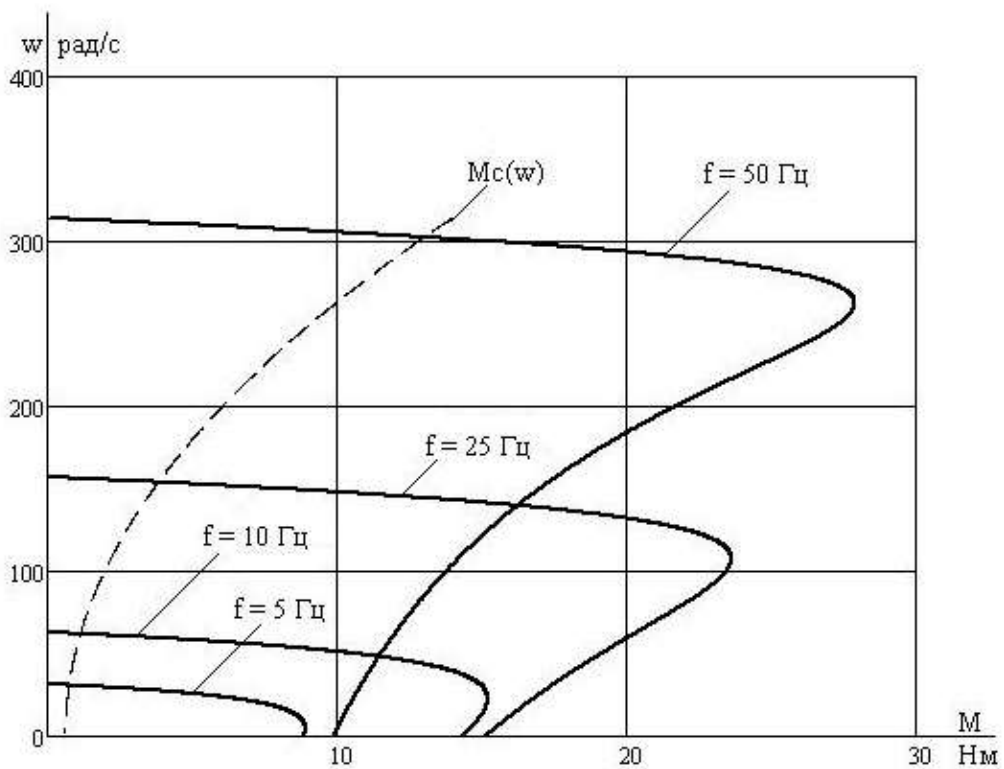


Рисунок 22 – Семейство механических характеристик $\omega = f(M)$

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

3.1. Расчет коэффициентов усиления и постоянных времени системы

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя:

$$k_H = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\Phi H}}{U_{УП.МАКС}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,27,$$

где $U_{УП.МАКС}$ - максимальное значение напряжения управления.

Принимаем $U_{УП.МАКС} = 10В$

Эквивалентная постоянная времени преобразователя:

$$T_H = \frac{1}{f_{ШИМ}} = \frac{1}{5000} = 2 \cdot 10^{-4} с.$$

Эквивалентные индуктивности обмоток:

-статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{\mu} = 0,01082 + 0,125 = 0,136 Гн,$$

-ротора

$$L_2 = L'_{2\sigma} + L_{\mu} = 0,01445 + 0,125 = 0,139 Гн,$$

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,125^2}{0,136 \cdot 0,139} = 0,173,$$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R'_2 \frac{L_{\mu}^2}{L_2^2} = 1,841 + 1,78 \cdot \frac{0,125^2}{0,139^2} = 3,28 Ом,$$

Электромагнитные постоянные времени:

$$T_{\Sigma} = \frac{\sigma L_1}{R_{\Sigma}} = \frac{0,173 \cdot 0,136}{3,28} = 0,007173 с,$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R'_2} = \frac{0,139}{1,78} = 0,078 с.$$

3.2. Расчет электромеханических переходных характеристик

$$\omega = f(t), M = f(t) \text{ при пуске}$$

Структурная схема системы скалярного частотного управления приведена на рисунке 23.

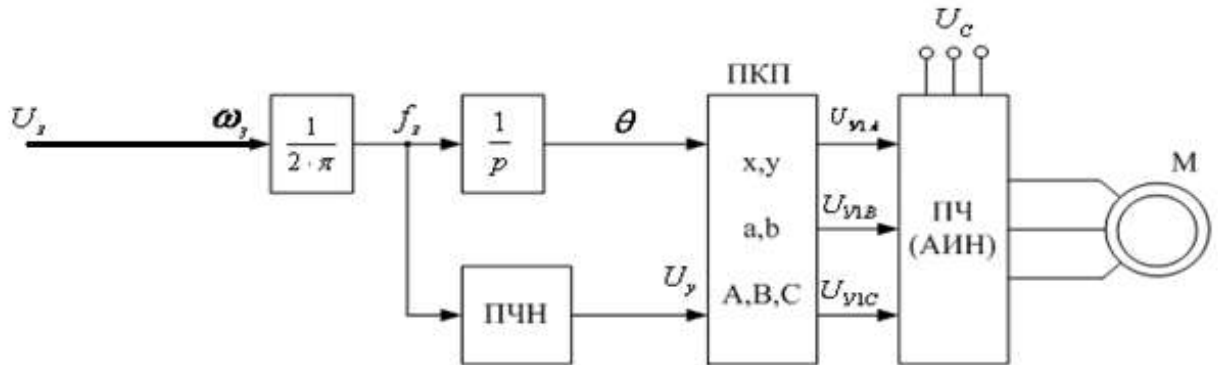


Рисунок 23 - Структурная схема системы скалярного частотного управления

При управлении электроприводом сигналом задания скорости является задающее напряжение U_3 . Ему соответствует задающая частота f_3 местного управления, в этом случае управление пуском и остановкой двигателя производится с панели преобразователя. Блок “преобразователь частота-напряжение” ПЧН формирует требуемую зависимость скалярного управления между частотой и напряжением преобразователя, чем и устанавливается принятый закон частотного регулирования.

Сигнал управления является входным для прямого координатного преобразователя (ПКП), на выходе которого формируется три синусоидальных напряжения управления U_{1yA} , U_{1yB} , U_{1yC} сдвинутые относительно друг друга на угол $\pm 2\pi/3$, с амплитудами пропорциональными напряжению управления. Сигналы U_{1yA} , U_{1yB} , U_{1yC} формируют фазные напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН).

Для исследования переходных процессов при частотном регулировании используется метод имитационного моделирования, и в качестве средства моделирования электромеханических систем примем программу *MATLAB 2010*.

Схема имитационной модели прямого пуска асинхронного двигателя в MATLAB 2010 представлена на рисунке 24.

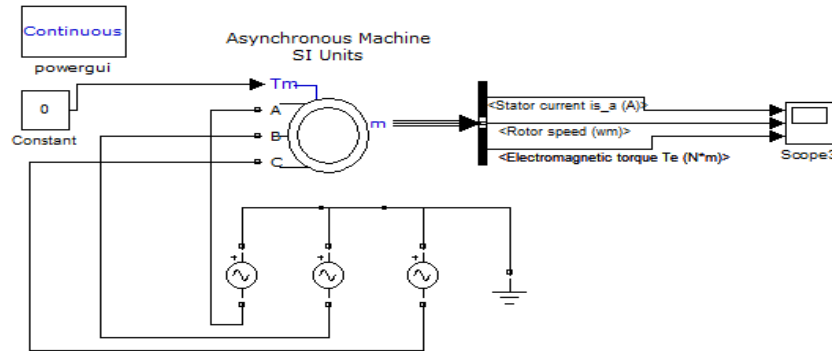


Рисунок 24 – Схема имитационной модели прямого пуска асинхронного двигателя в MATLAB 2010

Переходные характеристики скорости и момента при пуске АД без нагрузки представлены на рисунке 25. Пуск происходит за время $t_{nm} = 0,08 \text{ с}$.

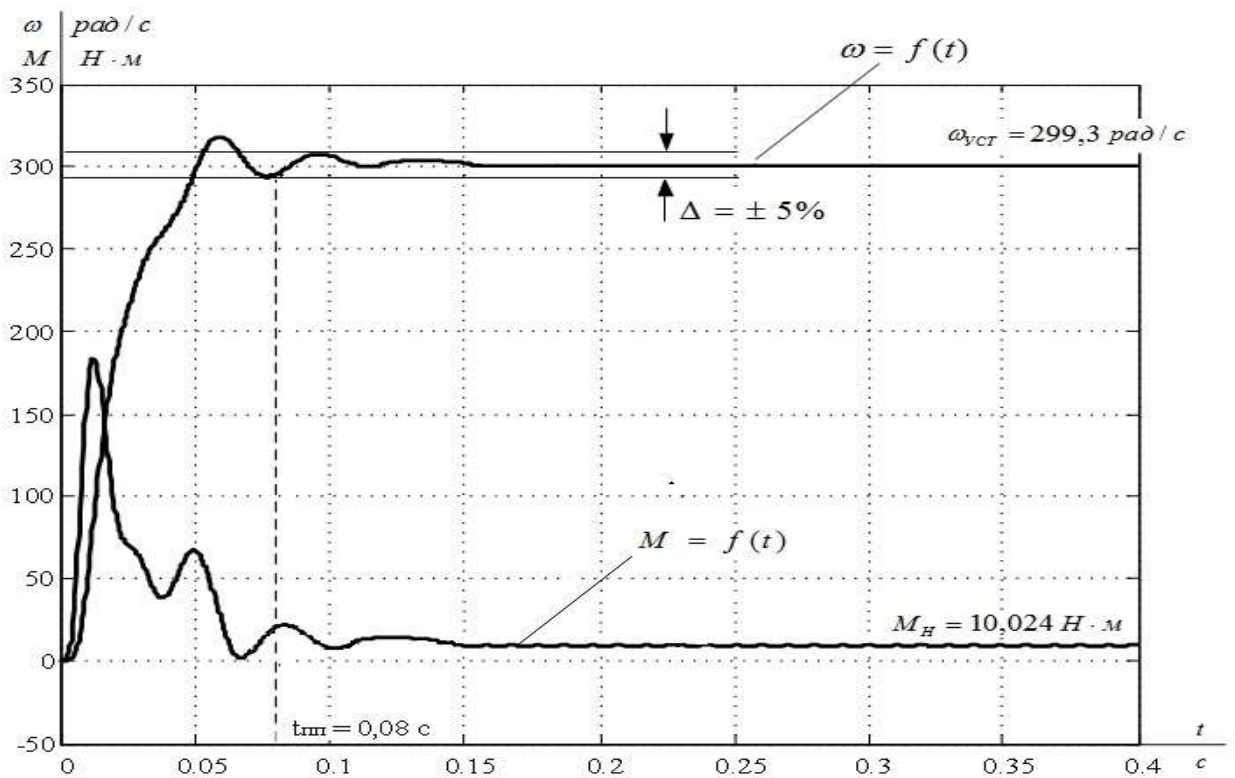


Рисунок 25– Переходные характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$ при прямом пуске.

Имитационная модель разомкнутой системы преобразователя частоты асинхронного двигателя с IR-компенсацией представлена на рисунке 24.

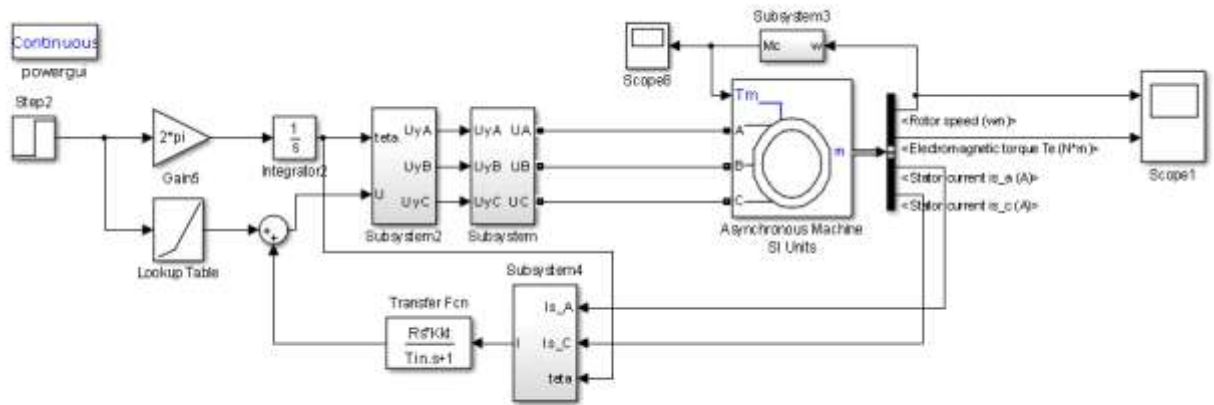


Рисунок 26 – Имитационная модель разомкнутой системы ПЧ – АД с IR-компенсацией

Переходные процессы при мгновенном изменении задания с частоты питающей сети $f = 50 \text{ Гц}$ до частоты $f = 40 \text{ Гц}$ представлены на рисунке 27. Время переходного процесса $t_{пп} = 0,055 \text{ с}$. Установившиеся значения скорости и момента соответственно $\omega_{уст} = 242,4 \text{ рад/с}$, $M_{уст} = 6,3 \text{ Н·м}$.

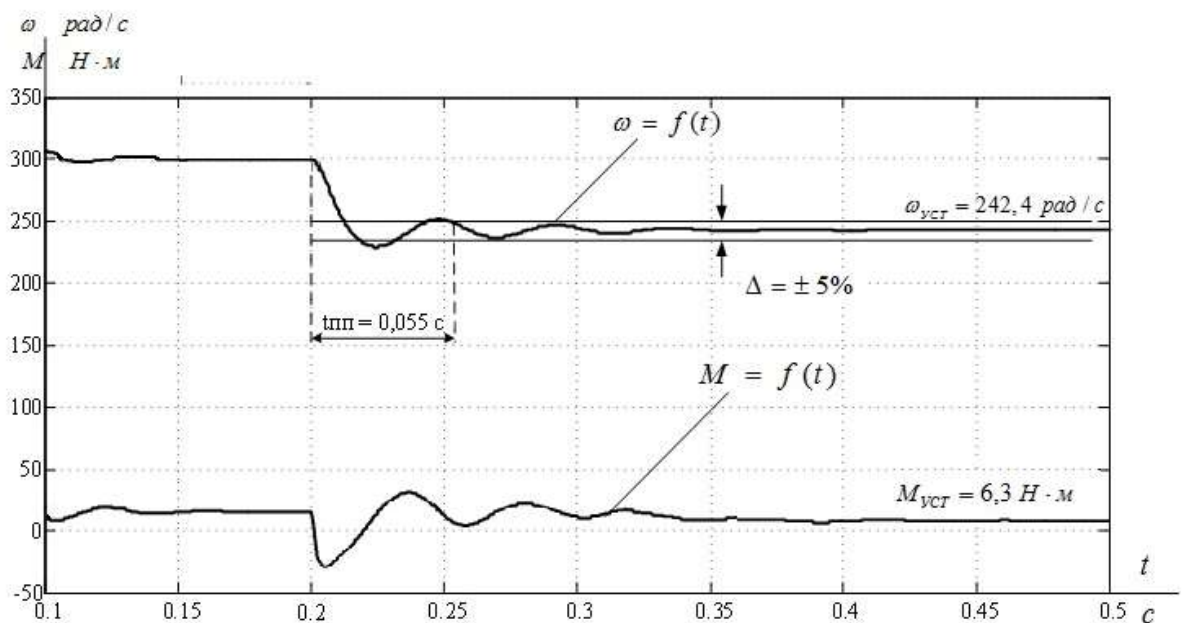


Рисунок 27 – Переходные характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$ при мгновенном изменении задания

На рисунке 28 приведены переходные характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$ при набросе нагрузки. Установившиеся значения скорости и момента составили $\omega_{уст} = 297 \text{ рад/с}$, $M_{уст} = 15,75 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

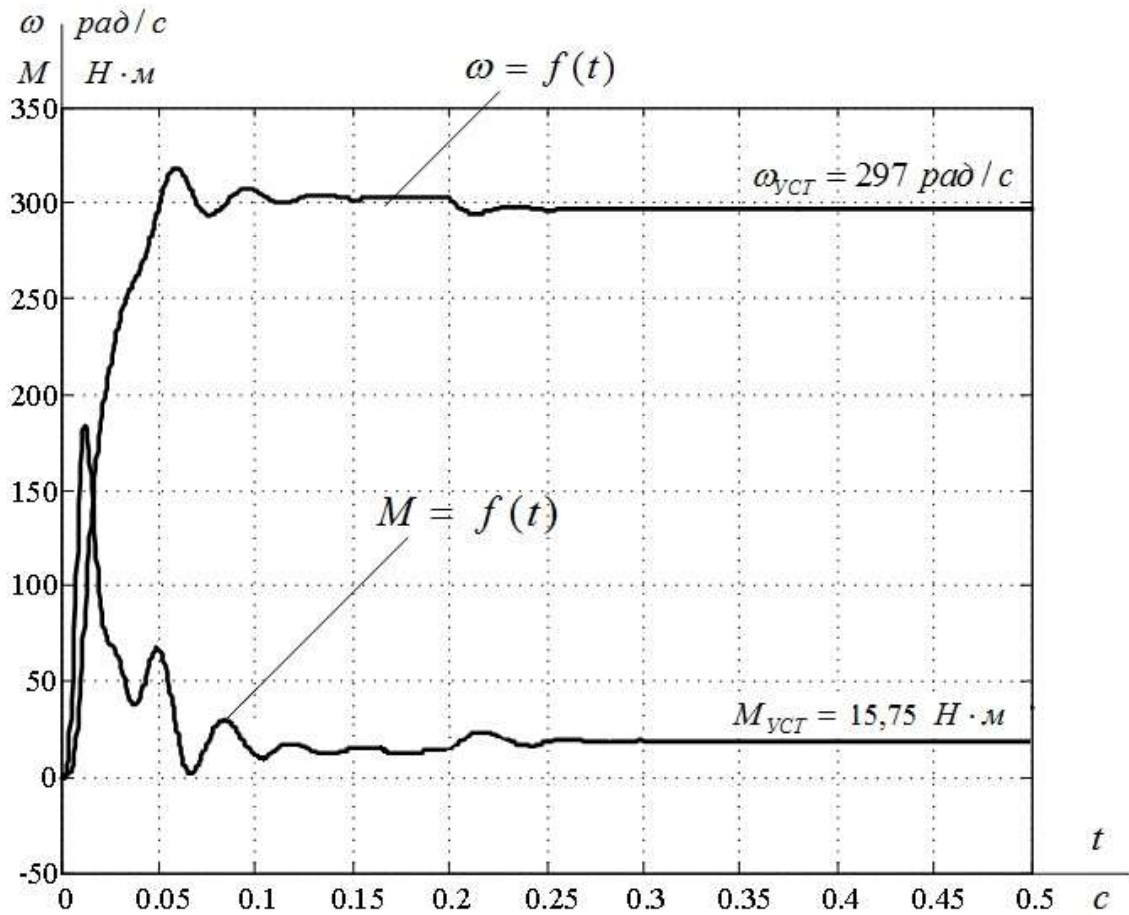


Рисунок 28 – Переходные характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$ при набросе нагрузки

Переходные характеристики при набросе и сбросе нагрузки приведены на рисунке 29.

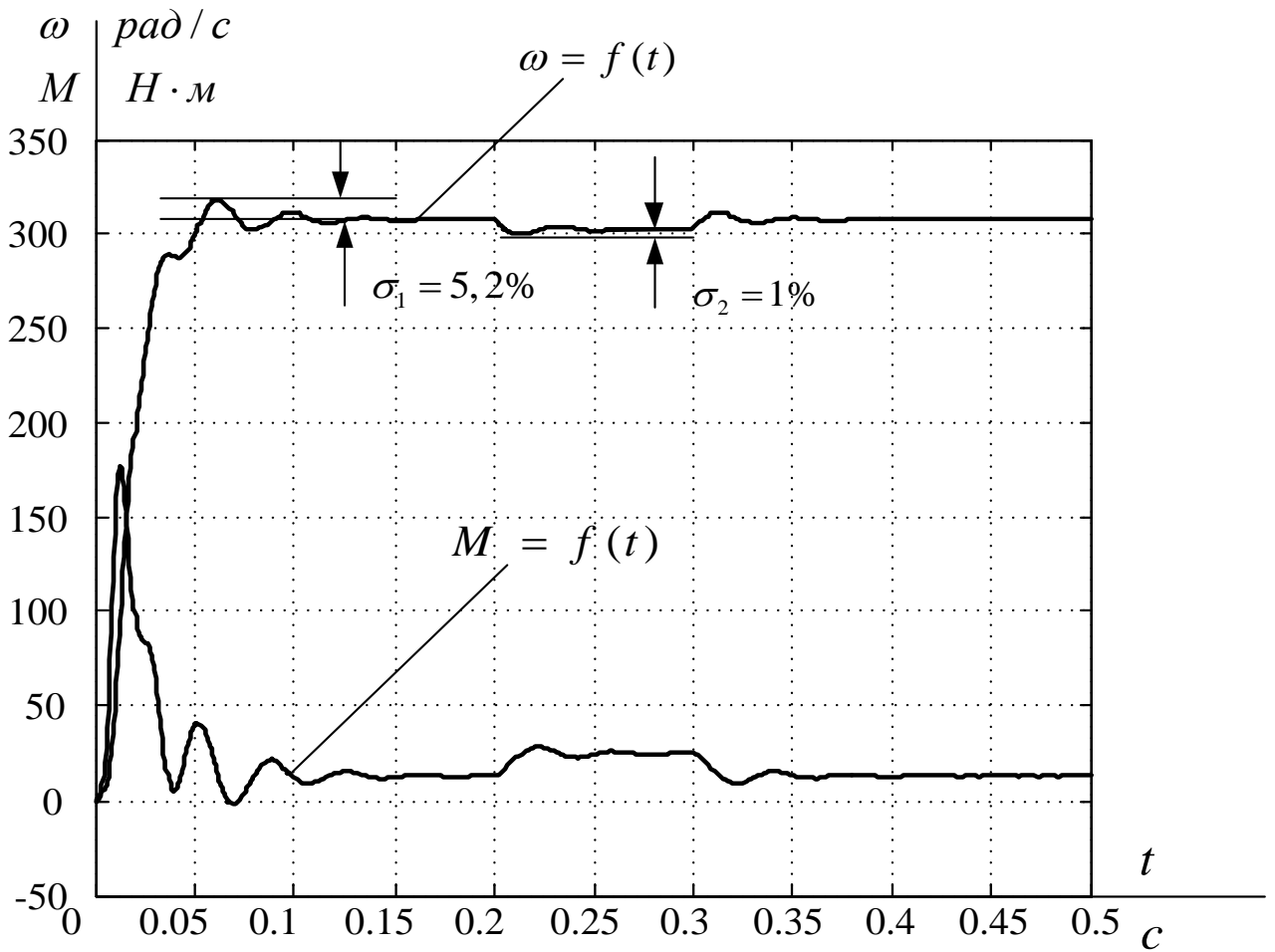


Рисунок 29 – Переходные характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$ при набросе и сбросе нагрузки

Как видно по рисункам 26, 27 и 28 двигатель устойчиво работает как при мгновенном изменении задания, так и при набросе, набросе-сбросе нагрузки.

Перерегулирование при пуске АД без нагрузки составляет $\sigma_1 = 5\%$, а при набросе нагрузки $\sigma_2 = 1\%$.

4. Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность

Целью раздела является определение целесообразности выпускной квалификационной работы в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка потенциала и перспективности реализации технического проекта с помощью SWOT - анализа;
- планирование и формирование графика работ;
- Определение ресурсоэффективности проекта.

4.1 SWOT-анализ технического проекта

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента. Представляет собой комплексное исследование технического проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [14].

Применительно к проектируемой частотно-регулируемой системе электропривода, SWOT-анализ позволит оценить сильные и слабые стороны технического проекта, а также его возможности и угрозы.

- Сильные стороны – факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции.
- Слабые стороны – недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей.
- Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта.
- Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют

разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

Данные SWOT-анализа технического проекта приведены в таблице 15.

При составлении матрицы SWOT использованы следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта; Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности; У – угрозы.

Таблица 15 – SWOT-анализ технического проекта

	Сильные стороны проекта: С1. Высокая энергоэффективность и энергосбережение технологи. С2. Экологичность технологии. С3. Квалифицированный персонал. С4. Повышение безопасности производства С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования	Слабые стороны проекта: Сл1. Трудность монтажа системы Сл2. Дороговизна оборудования Сл3. Сложность эксплуатации электрооборудования
Возможности: В1. Увеличение производительности электрооборудования В2. Появление дополнительной автоматизированной системы управления В3. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые на производстве. В4. Появление более простых универсальных электрических систем внутризаводской сети	В1С1С2С3С4; В2С1С5; В3С5; В4С1С4С5;	 В2Сл1Сл2; В3Сл2; В4Сл1Сл2Сл3;
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологии производства У2. Ограничения на экспорт технологии У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции	У1С3; У3С5;	У1Сл1Сл2; У3Сл2;

Соответствие сильных и слабых сторон технического проекта возможностям и угрозам, приведено в таблице 16. При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

«+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие.

Таблица 16– Интерактивная матрица технического проекта

Возможности	Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	+	+	-
	B2	+	-	-	-	+
	B3	-	-	-	-	+
	B4	+	-	-	+	+
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2		Сл3	
	B1	-	-		-	
	B2	+	+		-	
B3	-	+		-		
B4	+	+		+		
Угрозы	Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	-	-	+	-	-
	У2	-	-	-	-	-
	У3	-	-	-	-	+
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2		Сл3	
	У1	+	+		-	
	У2	-	-		-	
	У3	-	+		-	

Анализ интерактивной матрицы, приведенной в таблице 4.2, показывает сильные стороны проекта, такие как: высокая энергоэффективность, экологичность технологии, повышение безопасности производства. Выявлены возможности и угрозы для реализации проекта, которые появились или могут появиться в его внешней среде. Угрозы имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта.

4.2 Планирование проведения работ технического проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках технического проектирования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика технического проектирования.

Перечень этапов работы, распределение исполнителей по видам работ приведен в табл. 17.

4.2.1 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула [14]:

$$t_{ожі} = \frac{3 \times t_{мини} + 2 \cdot t_{максі}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел–дн.;

$t_{мини}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел–дн.;

$t_{максі}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел–дн. Временные показатели проведения технического проектирования сведены в таблицу 18.

Таблица 17– Перечень этапов работ

Основные этапы	№ работ	Содержание работ
1. Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания
2. Подбор литературы	2	Подбор материалов по теме изучение литературы источников.
3. Описание объекта автоматизации	3	Анализ технологического процесса. Описание и основные технические характеристики насоса. Обоснование применения частотно–регулируемого электропривода.
4. Расчет параметров, выбор двигателя и преобразователя частоты	4.1	Выбор приводного электродвигателя. Расчет параметров электродвигателя. Определение параметров схемы замещения. Расчет естественных характеристик вентилятора. Расчет механических и электромеханических характеристик электродвигателя.
	4.2	Выбор преобразователя частоты.
	4.3	Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала.
	4.4	Разработка электрической схемы привода.
5. Моделирование и исследование работы электропривода	5.1	Разработка имитационной модели электропривода со скалярным управлением.
	5.2	Исследование нелинейной САУ ЭП асинхронного привода с частотным управлением.
	5.3	Исследование нелинейной САУ ЭП в заданных режимах работы.
6. Составление раздела "Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение"	6.1	SWOT-анализ технического проекта.
	6.2	Планирование работ технического проекта.
	6.3	Составление сметы технического проекта.
	6.4	Определение ресурсоэффективности технического проекта.
7. Составление раздела "Социальная ответственность"	7	Анализ опасных и вредных факторов. Техника безопасности. Производственная санитария. Пожарная безопасность. Охрана окружающей среды. Защита при ЧС.
8. Оформление пояснительной записки	8.1	Объединение, систематизация и оформление согласованных и утвержденных разделов ВКР в пояснительную записку.
	8.2	Оформление пояснительной записки, окончательная проверка руководителем, устранение замечаний.
9. Проверка и утверждение ВКР	9	Размещение пояснительной записки на ЭБС-ресурсе ТПУ для проверки, утверждение руководителем.
10. Сдача проекта	10	Подготовка к защите, защита ВКР.

4.2.2 Разработка графика технического проектирования

При выполнении ВКР, удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения работ в форме диаграммы Ганта – на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

На основе таблицы 18 строится план-график, таблица 19, с разбивкой по месяцам и декадам за период подготовки ВКР.

По план-графику видно, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная с третьей декады февраля и заканчивая второй декадой июня. Продолжительность выполнения технического проекта составляет 104 рабочих дня, из них:

- 103 дня – продолжительность выполнения работ дипломником;
- 7 дней – продолжительность выполнения работ руководителем.

4.3 Составление сметы технического проекта

При планировании сметы технического проекта, должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования сметы используется группировка затрат по следующим статьям:

- затраты на оборудование;
- полная заработная плата исполнителей;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

Таблица 18 – Временные показатели проведения технического проектирования, чел–дн.

Наименование работ	Время минимальное		Время максимальное		Время ожидаемое	
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
1. Разработка технического задания	1	–	1	–	1	–
2. Подбор литературы	–	14	–	29	–	20
3. Описание объекта автоматизации	–	9	–	14	–	10
4. Расчет параметров, выбор двигателя и преобразователя частоты	1	9	1	14	1	10
5. Разработка и исследование электропривода с частотным скалярным управлением	1	11	1	19	1	15
6. Составление раздела "Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение"	1	8	1	13	1	10
7. Составление раздела "Социальная ответственность"	–	7	–	12	–	10
8. Оформление пояснительной записки	–	14	–	29	–	20
9. Проверка и утверждение ВКР	1	3	3	8	2	5
10. Сдача проекта	1	2	1	5	1	3
Итого, дн.					7	103

Таблица 19 – Календарный план-график

Вид работ	Исполнитель	Продолжительность работ, дн.	Продолжительность выполнения работ											
			Февраль	Март			Апрель			Май			Июнь	
			3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1. Разработка технического задания	Р	1	-											
2. Подбор литературы	Д	20	■	■	■									
3. Описание объекта автоматизации	Д	10			■	■								
4. Расчет параметров, выбор двигателя и ПЧ	Р	1					-							
	Д	10				■	■							
5. Разработка и исследование работы ЭП	Р	1												
	Д	15					■	■	■					
7. Составление раздела "Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение"	Р	1												
	Д	10							■	■				
9. Составление раздела "Социальная ответственность"	Д	10								■	■			
11. Оформление пояснительной записки	Д	20										■	■	■
12. Проверка и утверждение ВКР	Р	2												■
	Д	5												■
13. Сдача проекта	Р	1												■
	Д	3												■

4.3.1 Расчет стоимости оборудования

Данная статья включает стоимость технических средств. Стоимость проектируемого оборудования приведена в таблице 20.

Таблица 20 – Стоимость оборудования

Наименование оборудование	Кол-во, шт.	Цена, руб.
Электродвигатель АИР90L2 (3кВт)	1	3,67
Преобразователь частоты Веспер ЕЗ-8000	1	159,4
Итого		163,1

Первоначальная стоимость оборудования рассчитывается по формуле:

$$C_{об} = k_T \cdot C_{об} ,$$

где $C_{об}$ – цена приобретения единицы оборудования (руб./шт.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы,
 $k_T = 1,2$.

$$C_{об} = 1,2 \cdot 160 = 190 \text{ тыс. руб.}$$

4.3.2 Полная заработная плата исполнителей темы

В настоящем разделе рассчитывается основная и дополнительная заработная плата всех исполнителей, участвующих в выполнении работ. Величина расходов по заработной плате находится исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Расчет полной заработной платы производим по формуле:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} ,$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата .

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) работника рассчитывается по формуле:

$$Z_{осн} = Z_{зд} \cdot T_p ,$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{тс}} + Z_{\text{допл}} + Z_{\text{рк}}}{F_{\text{д}}},$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$Z_{\text{допл}}$ – доплаты и надбавки, руб.;

$Z_{\text{рк}}$ – районная доплата, руб. ;

$F_{\text{д}}$ – количество рабочих дней в месяце.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 21.

Таблица 21 – Расчёт основной заработной платы исполнителей

Работники	Оклад, руб.	Доплаты и надбавки, руб.	Районная доплата, руб.	Зарплата месячная, руб	Среднедневная заработная плата, руб.	Продолжительность работ, раб. дн.	Основная заработная плата, руб.
Руководитель	23 264	2 200	7 639	33 103	1 273	7	8 900
Дипломник	7 864	–	2 359	10 223	393	103	40 500
Итого							49 400

Расчёт полной заработной платы представлен в таблице 22.

Таблица 22 – Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	Коэффициент дополнительной заработной платы	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Полная заработная плата, руб.
Руководитель	0,15	8 900	1 300	10 000
Дипломник	0,12	40 500	4 900	45 000
Итого		49 400	6 200	55 000

4.3.3 Отчисления во внебюджетные страховые фонды

В данном разделе расходов описаны обязательные отчисления по установленным законодательством РФ нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда [14].

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доб}),$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды, ($k_{внеб} = 30,2\%$ в условиях ТПУ).

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$З_{внеб} = 0,302 \cdot 55,0 = 16,6 \text{ тыс. руб.}$$

4.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы необходимы для того чтобы учесть прочие затраты организации, не включенные в предыдущие расходы: печать, ксерокопирование, оплата услуг связи, электроэнергии и т.д.

Величину накладных расходов принимаем в размере 16% от общей суммы затрат.

4.3.5 Формирование сметы технического проекта

Величина затрат технического проекта является основой для формирования сметы проекта. Смета включает в себя затраты на оборудование, затраты на заработную плату, а также отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы.

Затраты на технический проект приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Смета технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
Затраты на спец.оборудование	190,0	61
Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	55,0	18
Отчисления во внебюджетные фонды	16,6	5
Накладные расходы	48,4	16
Итого	310,0	100

Исходя из приведенной сметы, можно сделать вывод, что сумма затрат на выполнение технического проекта составляет 310 тыс.руб.

4.4 Определение ресурсоэффективности проекта

Ресурсоэффективность технического проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности [14]:

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

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Оценку характеристик проекта проведем на основе критериев, соответствующих требованиям к системе электроснабжения промышленных предприятий:

1. Экономичность: оптимизация затрат на электрическую часть предприятия на стадии проектирования приводит к их уменьшению на доли процентов, в абсолютном измерении - экономия значительных средств.
2. Гибкость: возможность частых изменений в технологиях производства и развития предприятия.
3. Безопасность: обеспечение безопасности работ для всего персонала, как для электротехнического, так и для не электротехнического;

4. Обеспечение надлежащего качества электроэнергии: качество электроэнергии, удовлетворяющее требованиям ГОСТ 13109-97.
5. Надежность: бесперебойное снабжение электроэнергией в пределах допустимых показателей ее качества и исключение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.
6. Простота и удобство в эксплуатации: возможность использования персоналом более доступного, автоматизированного и адаптивного по конструкции техническим характеристикам электрооборудования на предприятии.
7. Энергоэффективность: использование меньшего количества энергии для обеспечения установленного уровня потребления энергии в зданиях либо при технологических процессах на производстве.

Критерии ресурсоэффективности технического проекта и их количественные характеристики приведены в таблице 24.

Таблица 24 – Показатели ресурсоэффективности

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1.Повышение производительности труда	0.20	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5
3. Энергоэкономичность	0,20	5
4. Надежность	0,20	5
5. Уровень шума	0,10	4
6. Безопасность	0,15	5
Итого:	1,00	

Интегральный показатель ресурсоэффективности составит:

$$I_{pi} = 0,20 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,20 \cdot 5 + 0,20 \cdot 5 + 0,10 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 = 4,70 .$$

Показатель ресурсоэффективности имеет высокий показатель (по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности использования технического проекта.

В результате выполнения поставленных задач по данному разделу, можно сделать следующие выводы:

- при проведении SWOT-анализа, определены сильные и слабые стороны технического проекта;
- разработан план-график исполнителей технического проекта, с помощью которого можно скоординировать работу;
- рассчитана смета затрат на выполнение технического проекта;
- найден показатель ресурсоэффективности проекта, который равен 4,7, что имеет высокое значение по 5-балльной шкале.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

5.1. Анализ вредных факторов

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

- отклонение параметров микроклимата от нормативных;
- повышенного уровня шума и вибраций;
- недостаточной освещенности рабочей зоны;
- повышенной запыленности.

5.1.1. Микроклимат

Помещение котельной характеризуется:

- повышенной запыленностью;
- скоростью движения воздуха;
- пониженной температурой.

Допустимые и оптимальные нормы микроклимата в рабочей зоне помещений на производстве представлены в таблице 25.

Таблица 25 - Оптимальные и допустимые нормы микроклимата

Сезон года	Категория работ	Температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		По ГОСТ 12.1.005 – 88	Фильтровальный зал	По ГОСТ 12.1.005 – 88	Фильтровальный зал	По ГОСТ 12.1.005 – 88	Фильтровальный зал
Холодный	Средней тяжести	17 – 19	15 – 21	40 – 60	70 – 30	0,3	0,2
Тёплый со значительным избытком тепла	Средней тяжести	20 – 22	16 – 27	40 – 60	60 – 30	0,2 – 0,5	0,5

Для обеспечения нормального микроклимата предусматривается, в соответствии с Сан ПиН 2.2.4.548 – 96(1), следующее:

- вентиляция приточно-вытяжная по СНиП 2.04.05 – 91* (28.11.91) установка центробежных вентиляторов. Кратность воздухообмена 1;
- установка систем местных отсосов по СНиП 2.04.05 – 91* для удаления вредных, пожароопасных и взрывоопасных веществ от мест их образования и выделения;

- герметизация технологического оборудования.

Предусмотренные мероприятия обеспечивают параметры микроклимата в соответствии с нормами представленными в таблице 28.

В соответствии с Сан ПиН 2.2.4.548 – 96(1) значения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха устанавливаются, для рабочей зоны производственных помещений, в зависимости от категории тяжести выполняемой работы, величины явного избытка тепла выделяемого в помещении и периода года.

5.1.2. Шум и вибрация

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом, — это работа вентилятора главного проветривания и др.. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности.

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

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты (ГОСТ 12.4.011 – 89);
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице 26.

Таблица 26 - Предельно допустимые уровни шума

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Машинное отделение	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
Щит управления	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65

Технические нормы вибрации представлены в таблице 27.

Таблица 27 – Технические нормы вибрации

Вид вибрации	Среднеквадратичная частота, Гц									
	Логарифмический уровень виброскорости									
	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500
Машинное отделение	-	103	100	101	106	112	118	-	-	-

5.2. Анализ опасных факторов

- образования пожароопасных смесей газов, опасность загорания (пожара);
- опасность электропоражения работающего в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;
- движущихся элементов оборудования;
- падающих предметов и инструментов.

5.2.1. Загорание (пожар)

Пожары – неконтролируемый процесс горения, которые чреваты большими материальными издержками, а часто и человеческими жертвами.

Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного участка. Согласно классификации производств по пожарной опасности (ППБ-03) рассматриваемое помещение относится к классу Б (наличие горючих волокон или пыли рассматриваемого участка): источником взрыва может послужить короткое замыкание или из - за нарушения электроизоляции. Кроме взрывоопасных зон (В-II) имеется пожароопасная зона класса П-II. Для этих

зон используется специальное оборудование во взрывозащищенном или пожаро–защищенном исполнении. Использование электрооборудование во взрыво–пожарозащищенном исполнении – одно из направлений профилактики, другое направление установка систем взрыва и пожаро-сигнализации. Такие системы должны быть установлены на объектах, где воздействие опасных факторов взрыва и пожара может привести к травматизму или гибели людей, этого требует «технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Участок должен быть оснащен такой системой, которая включает систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей. Это другое направление профилактики загораний.

Выбор систем взрывоподавления и пожаротушения для участка требует специального рассмотрения и расчетов.

5.2.2. Электропоражение

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 (ПУЭ), рассмотреть следующие вопросы:

- а) обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;
- б) требования к электрооборудованию;
- в) соответствие реального положения на производстве предъявляемым требованиям;
- г) мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий;
- д) 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.

5.2.3 Механический опасный фактор

К опасным механическим производственным факторам можно отнести движущиеся или падающие элементы оборудования и инструментов. Возможно получение механических травм, при отсутствии на оборудовании ограждений или при работе на неисправном оборудовании. Должны быть предусмотрены устройства блокировки. Для того, чтобы избежать опасного соприкосновения работника с движущимися элементами оборудования и инструментами. Также для локализации рабочих зон применяют защитные устройства. В соответствии с ГОСТ 12.2.009–80 защитные устройства не должны ограничивать технологических возможностей станка и вызывать неудобства при работе, уборке или наладке. Кроме того, защитные устройства должны надёжно защищать рабочего от воздействия на него движущегося инструмента или случайно вылетевшей из оборудования детали.

5.3. Защита окружающей среды

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

Газообразные отходы, которые загрязняют воздух: естественные выделения - углекислый газ, летучие органические соединения и т.д.. Перед выбросом вне помещения воздух подвергается тщательной очистке в фильтровентиляционных системах, что в свою очередь предотвращает загрязнение атмосферы. Жидкие отходы - это бытовые отходы, которые образуются 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.

При обращении с твердыми отходами в помещении, моделирующий участок управляемого электропривода вентилятора автоматической системы вентиляции (бытовой мусор: отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014) [28]: бытовой мусор после предварительной сортировки складировается в специальные контейнеры для бытового мусора; старое офисное оборудование передают специальным службам для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах. Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681 [29]. Люминесцентные лампы, которые применяются для искусственного освещения, содержат ртуть. Поэтому относятся к 1 классу опасности. Ртуть способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна при разгерметизации колбы, поэтому главным требованием экологической безопасности является целостность

ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы принято помещать в защитную упаковку, которая предотвращает повреждение стеклянной колбы. Далее эти лампы передают в специализированную организацию для обезвреживания и переработки. При разбитии ртутьсодержащих ламп осколки необходимо собирать щеткой в герметичный металлический контейнер и плотно закрыть крышкой, наполненный раствором марганцевокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из неадсорбирующего ртуть материала (винипласта).

К сфере защиты ОС и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Реальным вкладом здесь может стать экономия электрической и тепловой энергии на территории рассматриваемого производственного участка.

Во-первых, это улучшает экономические показатели деятельности предприятия (уменьшение расходов на электротепловую энергию). Во-вторых, экономия энергии означает уменьшение газа, мазута, угля, сжигаемого в топках котлов ТЭС и электроустановок (котельных) промпредприятий города Томска и области и одновременное уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Несмотря на кажущуюся малость вклада в энергосбережение и в защиту атмосферного воздуха от загрязнения массовое движение в этом направлении, в том числе, в быту, принесет значимый эффект.

5.4. Предотвращение ЧС и устранение их последствий

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации в котельной – возникновение пожара и электропоражение.

Основные причины пожара-это перегрузка проводов или короткое замыкание, большое переходное сопротивление в электрических цепях, электрическая дуга или неисправность оборудования.

Согласно [30], 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.

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

- прямое прикосновение к токоведущим частям электрооборудования;
- косвенное прикосновение.

Косвенное прикосновение - это контакт человека с открытыми проводящими частями оборудования, которые в нормальном режиме электроустановки не имеют на себе электрический потенциал, но при неисправностях, которые вызвали 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 [31] п.412. служат изолированность токоведущих частей, применение ограждений вокруг опасного объекта, либо оболочек, либо установка барьеров, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются: защитное заземление и защитное зануление [31].

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.

Защитное заземление – это преднамеренное электрическое соединение металлическим проводником какого-либо электрического устройства с землей.

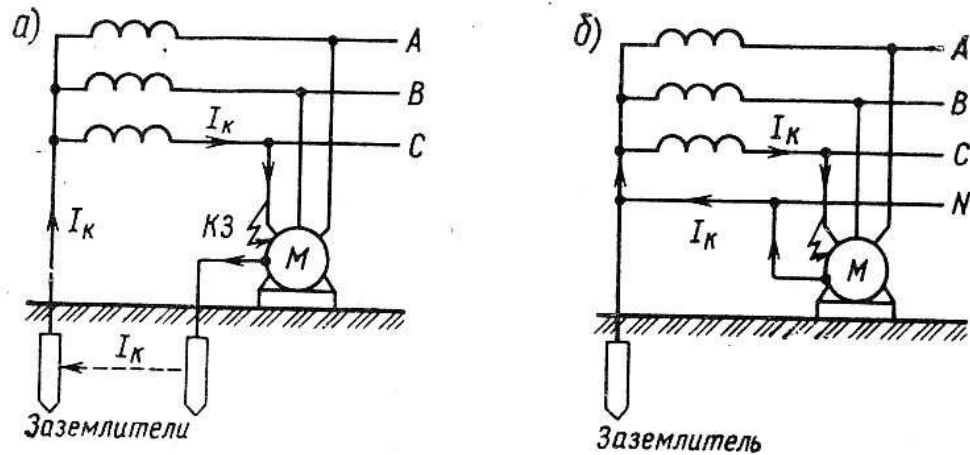


Рисунок 30 а – Схема защитного заземления

б – Схема защитного зануления

Заземлению подлежат все нетоковедущие металлические части 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).

В котельных заземляются корпуса металлорежущих станков, электрических машин, их пуско-регулирующая аппаратура, распределительных устройств, коммутационная и защитная аппаратура, светильники, металлические оболочки кабелей. Ручной электроинструмент, предназначенный непосредственно для работы при напряжениях выше 24 В постоянного и 12 В переменного тока, так-же необходимо заземлять.

Заземляющее устройство - это совокупность металлического заземлителя, который находится в непосредственном контакте с землей, и заземляющих проводов, служащих для соединения заземлителей и металлических частей электрооборудования. Заземляющие соединения

принято выполнять 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 производятся исходя из условий безопасности при случайном прикосновении человека к оборудованию, оказавшемуся под напряжением. В цепях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью нормированное наибольшее напряжение прикосновения $U_{пр} = 40$ В считается безопасным.

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

$$R_3 = U_{пр}/I_{yT} = 40/10 = 4 \text{ Ом},$$

Практически же сила токов утечки не превышает 4 – 6 А, поэтому при величине нормированного сопротивления заземления $R_3 = 4$ Ом напряжение прикосновения еще более снижается $U_{пр} = I_{yT} \cdot R_3 = 6 \cdot 4 = 24$ В.

Практически при наличии малых сопротивлений и напряжение прикосновения будет несколько больше фазного, но меньше линейного.

5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

На основании Федерального Закона № 116 от 21.07.1997 г., котельная относится к категории опасный производственный объект.

Котельная, предназначена для теплоснабжения учебных зданий, общежитий и других сооружений. В качестве топлива используется каменный уголь. Отвод продуктов сгорания предусматривается через дымовую трубу, высотой 30 м, диаметром 1 м.

Режим работы котельной – круглосуточно. С мая, август, сентябрь – работа осуществляется 2 раза в неделю, июнь-июль-котельная не работает.

В соответствии со СНиП 2.04.05 – 91 п4.55. В производственных помещениях приточный воздух необходимо подавать в рабочую зону из воздухораспределителей:

а) горизонтальными струями, которые выпускают в пределах или выше рабочей зоны, в том числе при вихревой вентиляции;

б) наклонными (вниз) струями, которые выпускают на высоте более 2м от пола;

в) вертикальными струями, которые выпускают на высоте более 4м от пола.

При небольших избытках теплоты приточный воздух в производственные помещения рекомендуется подавать из воздухораспределителей, которые расположены в верхней зоне, струями: вертикальными, направленными сверху вниз, горизонтальными или наклонными (вниз).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате был спроектирован регулируемый электропривод радиального вентилятора ВР132-30 по системе ПЧ-АД для вентиляции помещения котельной, а также была разработана автоматическая система управления.

В соответствии с расчетной мощностью электропривода был подобран асинхронный электродвигатель АИР90L2 с номинальной мощностью $P_n = 3$ кВт, был произведен расчет параметров схемы замещения электродвигателя и расчет с дальнейшим построением естественных электромеханической и механической характеристик. В программной среде MATLAB2010 была создана имитационная модель прямого пуска данного двигателя, и были получены переходные характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$ для пуска без нагрузки, пуска при набросе и набросе-сбросе нагрузки, и при мгновенном изменении задания.

При пуске асинхронного двигателя без нагрузки время переходного процесса $t_{mn} = 0,08$ с, перерегулирование $\sigma_1 = 5, \%$. Установившиеся значения скорости и момента $\omega_{уст} = 299,3$ рад/с, $M_{уст} = 10,024$ Н·м.

При мгновенном изменении задания частоты питающей сети с $f = 50$ Гц на $f = 40$ Гц время переходного процесса $t_{mn} = 0,055$ с. Установившиеся значения скорости и момента: $\omega_{уст} = 242,4$ рад/с, $M_{уст} = 6,3$ Н·м.

При осуществлении наброса нагрузки установившиеся значения скорости и момента составили: $\omega_{уст} = 297$ рад/с, $M_{уст} = 15,75$ Н·м. Перерегулирование $\sigma_2 = 1 \%$.

Во всех вышеперечисленных переходных процессах значения скорости и момента, спустя время переходного процесса, принимают установившиеся значения. Это означает, что двигатель работает устойчиво.

Используемый вентилятор имеет радиальную конструкцию, которая наиболее оптимально подходит для технологического процесса, и обеспечивает необходимое высокое давление (напор).

Регулирование скорости осуществляется с помощью преобразователя частоты, применение которого позволяет экономить электроэнергию, автоматизировать технологический процесс, а также исключить влияние «человеческого фактора». По значениям номинальной мощности и тока двигателя был выбран преобразователь частоты фирмы Веспер ЕЗ-8000. Данная модель отличается своей высокой производительностью при небольших габаритах и относительно небольшой стоимостью. В качестве закона регулирования скорости был выбран скалярный закон управления $U/f = const$, так как он обеспечивает устойчивую работу электродвигателя на всех принятых значениях частоты.

В качестве аппаратуры защиты были выбраны автоматический выключатель серии ВА 47-29 на номинальный ток 8 А, который должен быть больше номинального тока двигателя равного 6,113 А и два магнитный пускателя серии KNL8.

Управление электроприводом осуществляется с помощью программируемого логического контроллера Siemens!LOGO, который реализуется в трех модулях – логический модуль LOGO 24RC, модуль дискретного ввода/вывода сигнала LOGO DM 24R и модуль аналогового ввода сигнала LOGO AM2. Модули ПЛК фирмы Siemens имеют компактные размеры, низкую стоимость, простоту программирования и монтажа.

К модулю аналогового ввода сигнала подключается датчик температуры, в качестве которого был выбран аналоговый преобразователь температуры WIKA Т91.10.104. При превышении установленного допустимого значения температуры равного 26° С ПЛК формирует сигнал на

включение ПЧ, от которого начинает работать асинхронный электродвигатель и вентилятор. Процесс вентиляции будет продолжаться, пока в котельной не установится необходимая оптимальная температура, после чего контроллер сформирует сигнал на выключение ПЧ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ

1. 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. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.
2. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 4. Использование электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 9-е изд., стер. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 696 с.
3. Медведев Г.Г., Дорохов А.Р. Введение в курс Насосы, вентиляторы, компрессоры. – Конспект лекций. Томск: Изд. ТПУ, 1998. – 64 с.
4. Каталог продукции ООО «НПО Сибэлектромотор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sibelektromotor.ru/docs/2014Kat.pdf>
5. Каталог продукции ЗАО «Электроагрегат» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elagr.ru/uploaded/images/ventil/003/5.pdf>
6. Каталог продукции компании «Веспер» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vesper.ru/catalog/invertors/e3-8100>
7. Каталог IGBT модулей компании «Mitsubishi Electric» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/php/eSearch.php?FOLDER=/product/powermod/powmod/igbtmod>
8. Каталог диодных модулей компании «Mitsubishi Electric» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/php/eSearch.php?FOLDER=/product/powermod/powmod/diodemod>

9. Каталог резисторов МЛТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fotorele.net/pdf/rezistor_mlt.pdf
10. Каталог продукции ЗАО «МашЭлектроСервис» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mashelservis.ru/file/katalog/53.pdf>
11. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
12. М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В. М. Терехов, А.В. Шинянский Основы автоматизированного электропривода. Учеб. Пособие для вузов. М., «Энергия», 1974. – 568 с.
13. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М., «Энергия», 1972. – 240 с.
14. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
15. ГОСТ 12.0.003-74 (СТ СЭВ 790-77). “Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.”
16. ГОСТ 12.1.005-88 “Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.”
17. СНиП 23-05-95* “Строительные нормы и правила РФ. Естественное и искусственное освещение”.
18. ГОСТ 15150-69 “Нормы по климатическому исполнению и категории для машин, приборов и других технических изделий”.
19. ГОСТ 12.1.003-83 “Шум. Общие требования безопасности.”
20. ГОСТ 12.1.012-90 “Вибрационная безопасность. Общие требования.”
21. СанПиН 2.2.4.1191-03 “Электромагнитные поля в производственных условиях.”

22. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 “Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы.”
23. Правила устройства электроустановок, ПУЭ, утвержденные Министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.
24. №123-ФЗ “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” от 22.07.2008 (с изменениями и дополнениями).
25. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
26. СП 5.13130.2009 “Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.”
27. СП 9.13130.2009 “Техника Пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации.”
28. Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009, №1116 (с изменениями от 24.12.2014) “Об организации сбора, вывоза, утилизации и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования "Город Томск".
29. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 “Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств.”
30. ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т “Пожарная безопасность. Общие требования.”
31. ГОСТ Р 50571.3-94 “Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защиты от поражения электрическим током.”