

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение школы (НОЦ) Отделение электроэнергетики и электротехники

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Асинхронный скалярный электропривод дутьевого вентилятора котла

УДК 62-83-523:621.182.92

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM16	Шевченко Артур Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев И. А.	К.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л. Ю.	К.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Мезенцева И. Л.	-		

По разделу на иностранном языке:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Егорова Ю. И.	К.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Кладиев С.Н.	К.т.н.		

Томск –2023 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ

13.04.02 электроэнергетика и электротехника

Код результата	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла.
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки.
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен выбирать серийные и проектировать новые объекты профессиональной деятельности.
ПК(У)-2	Способен применять методы создания и анализа математических моделей, позволяющих прогнозировать свойства и поведение объектов профессиональной деятельности.
ПК(У)-3	Способен разрабатывать, реализовывать и осуществлять контроль выполнения технических и организационных мероприятий, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности.
ПК(У)-4	Способен формулировать технические задания, анализировать различные варианты и искать компромиссные решения.
ПК(У)-5	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий.

Школа ИШЭ

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

ООП/ОПОП Электропривод и автоматизация технологических комплексов

Отделение школы (НОЦ) электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Кладиев С.Н.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM16	Шевченко Артуру Сергеевичу

Тема работы:

Асинхронный скалярный электропривод дутьевого вентилятора котла

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.).

- номинальный КПД $\eta_n = 84\%$;
- номинальная скорость вращения $n_n = 1450$ об/мин;
- номинальная производительность $Q_n = 11000$ м³/ч;
- номинальное давление $p_n = 1270$ Па

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов

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

1. Технологический процесс.
2. Расчет мощности вентилятора выбор асинхронного электродвигателя.
3. Описание и выбор системы управления ЭП.
4. Расчет схемы замещения и построение естественных и регулировочных характеристик АД.
5. 5. Разработка и исследование имитационной модели «АД», «ПЧ-АД» в среде Matlab.

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Схема замещения АД. 2. Имитационные модели «АД», «ПЧ-АД». 3. Результаты исследований
---	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Любовь Юрьевна
Раздел на иностранном языке	Егорова Юлия Ивановна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение, обзор литературы, конструкция, заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	23.01.2023г.
---	--------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Чернышев Игорь Александрович	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM16	Шевченко Артур Сергеевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM16	Шевченко Артуру Сергеевичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы (НОЦ)	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.03.02 «электротехника и электроэнергетика»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных затрат, оплаты труда, прочие затраты.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>30 % премии 20 % надбавки 16% накладные расходы 13% районный коэффициент</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные социальные фонды – 30 %</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>SWOT - анализ по разработке асинхронного скалярного электропривода дутьевого вентилятора котла</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Формирование плана и графика разработки: - определение структуры работ; -определение трудоемкости работ; -разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: -материальные затраты; -заработная плата (основная и дополнительная); -отчисления на социальные цели; - накладные расходы.</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Определение интегрального показателя ресурсоэффективности</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. Альтернативы проведения НИ 4. График проведения и бюджет НИ 5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM16	Шевченко Артур Сергеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
5AM16		Шевченко Артуру Сергеевичу	
Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» и

Тема ВКР:

Асинхронный скалярный электропривод дутьевого вентилятора котла	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> асинхронный скалярный электропривод дутьевого вентилятора котла <i>Область применения:</i> котельная станция <i>Рабочая зона:</i> производственное помещение <i>Климатическая зона:</i> умеренная <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> Вентилятор, блок управления и электроники, ПК <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> контроль, диагностика, управление отопительной системой, мониторинг информации о топке.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>ПБ 08-624-03. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности; ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности; ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны; ФЗ № 197 «Трудовой кодекс Российской Федерации».</p>
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Опасные факторы: Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов. Движущиеся машины и механизмы. Электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий, включая действие молнии и высоковольтного разряда в виде дуги. Вещества, вызывающие серьезные повреждения или раздражение глаз. Вредные факторы: Повышенный уровень шума. Сенсibiliзирующие (аллергенные) вещества. Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: защитные ограждения, использование защитных костюмов, беруши, наушники, инструктаж, вентиляция (циклон). Расчет: расчет уровня шума</p>
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</p>	<p>Воздействие на селитебную зону: шум Воздействие на литосферу: загрязнение отходами производства (металлическая стружка) Воздействие на гидросферу: загрязнение отходами производства (металлическая стружка) Воздействие на атмосферу: выделение оксидов металлов при обработке (например, оксиды хрома, никеля, алюминия, магния, углерода).</p>

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях <u>при эксплуатации</u>	Возможные ЧС: наводнения, техногенные катастрофы, ураганы, снежные бури, пожары. Наиболее типичная ЧС: пожар.
---	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Мезенцева Ирина Леонидовна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM16	Шевченко Артур Сергеевич		

Школа ИШЭ

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования магистр

Отделение школы (НОЦ) Электроэнергетики и электротехники

Период выполнения (осенний / весенний семестр 2022 /2023 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	Разработка и проектирование контроллера	15
	Написание программного обеспечения	15
	Получение параметров двигателя	10
	Составление модели	5
	Анализ модели	5
	Концепция стартап – проекта	20
	Социальная ответственность	5
	Оформление работы	10
	Итог	15

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Чернышев Игорь Александрович	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кладиев Сергей Николаевич	К.Т.Н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 152 страниц текста, 36 рисунков, 30 таблиц, 23 источника, 1 приложение.

ВЕНТИЛЯТОР РАДИАЛЬНЫЙ, АСИНХРОННЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ.

Объектом выпускной квалификационной работы является электропривод радиального вентилятора. Цель работы – разработка и исследование асинхронного частотно-регулируемого электропривода вентилятора.

В выпускной квалификационной работе был произведён расчет и выбор приводного двигателя; преобразователя частоты, а также определены параметры силовой цепи. Обоснован выбор способа управления, рассчитаны механические и электромеханические характеристики. Методом имитационного моделирования на ЭВМ исследованы переходные процессы в основных режимах работы.

В разделе экономики произведен расчет сметы на пуско-наладочные работы электропривода вентилятора.

В разделе безопасность и жизнедеятельность труда рассмотрены вопросы охраны труда и техники безопасности. Проанализированы опасные и вредные факторы производства.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2003, в работе использованы программы WINDORA, MathCAD, Microsoft Power Point.

Содержание

РЕФЕРАТ	9
Введение	13
1 Вентиляторы общего назначения	18
1.1 Классификация общепромышленных вентиляторов	18
1.2 Конструкции вентиляторов.....	23
1.3 Применяемые электродвигатели.....	25
1.4 Аэродинамические характеристики и параметры	26
1.5 Работа вентилятора в сети	30
1.6 Изменение рабочего режима вентилятора при изменении плотности перемещаемой среды	33
1.7 Изменение рабочего режима вентилятора при увеличении потерь давления в сети.....	34
1.8 Изменение рабочего режима вентилятора при изменении частоты вращения вентилятора	35
1.9 Определение рабочего режима вентилятора в системе	36
с параллельно установленными воздухопроводами.....	36
2 Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода для вентилятора	37
2.1 Особенности выбора частотно-регулируемого электропривода	39
2.2 Дополнительные устройства при комплектовании.....	43
частотно-регулируемого электропривода	43
2.3 Достигаемые с технологической и экономической точки зрения преимущества.....	44
3 Выбор вентилятора и приводного двигателя	46
3.1 Аэродинамические характеристики и параметры	46
вентилятора ВР 80-75-6,3	46
3.2 Выбор приводного двигателя.....	52
3.2.1 Расчетные параметры электродвигателя.....	53
3.2.2 Расчетные параметры схемы замещения электродвигателя.....	54
3.3 Механические характеристики вентилятора	56
3.4 Предельные характеристики разомкнутой системы.....	59
преобразователь – двигатель.....	59
3.5 Проверка обеспечения заданной области работы электропривода	64

4	Выбор преобразователя частоты и способа управления	65
4.1	Выбор преобразователя частоты	65
4.2	Выбор закона частотного регулирования	67
4.3	Расчет статических характеристик системы	68
	преобразователь – двигатель при частотном регулировании	68
4.3.1	Закон частотного регулирования $U1f12 = const$	68
5	Имитационное моделирование асинхронного частотно-регулируемого электропривода	78
5.1	Структурная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и вентиляторной нагрузкой	78
5.2	Имитационная модель силового канала электропривода	81
5.2	Прямой пуск электродвигателя	89
5.3	Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением	95
5.4	Имитационная модель асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением	96
5.7	Имитационные исследования частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением.....	102
6.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	106
6.1	Портрет потенциальных потребителей	106
6.2	Анализ конкурентных технических решений.....	107
6.2	SWOT-анализ проекта	110
6.3.	Инициация проекта	114
6.4	Планирование научно-исследовательских работ	116
6.4.1	Структура работ в рамках научного исследования	116
6.4.2	Определение трудоемкости выполнения технического проекта	118
6.4.3	Разработка графика проведения научного исследования	120
6.5.1	Расчет материальных затрат проекта	125
6.5.3	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	132
6.5.6	Формирование бюджета НИИ.....	133
6.5.7	Определение ресурсоэффективности проекта	134
6.6	Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	135
7.	Социальная ответственность	136
7.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	136

7.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства	136
7.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	137
7.2 Производственная безопасность	138
Удельное сопротивление грунта на участке, где сооружается заземлитель, 60 Ом·м.	143
7.2.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия	145
7.3 Экологическая безопасность	146
7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	150
Список используемой литературы	151
Приложение А	154
(справочное)	154

Введение

Россия - одна из ведущих экономических держав в мире. Однако, по сравнению с другими странами, она по-прежнему сталкивается с проблемой высокого энергопотребления. Исследования показывают, что до 30% потребляемой в стране энергии расходуется на производственные процессы. В этой статье мы рассмотрим причины сложившейся ситуации и предложим решение, которое поможет снизить энергозатраты - внедрение регулируемого электропривода.

Существует несколько причин, объясняющих высокий уровень энергопотребления в России. Во-первых, многие предприятия до сих пор используют устаревшее оборудование, которое не соответствует современным стандартам энергоэффективности. Это приводит к чрезмерному потреблению энергии при выполнении производственных операций.

Во-вторых, отсутствие эффективной системы энергоменеджмента и мер по энергосбережению способствует неоптимальному использованию энергии на предприятиях. Многие компании не располагают средствами для мониторинга и контроля потребления энергии, что приводит к ее чрезмерному использованию.

Потребности промышленности и домохозяйств в электроэнергии из электросетей продолжают расти, что все больше затрудняет обеспечение пиковых тепловых и электрических нагрузок в осенне-зимний период. Строительство и ввод в эксплуатацию новых объектов для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию в кВт*ч - непростая задача. Однако внедрение энергосберегающего оборудования, в частности регулирующих электроприводов, оказывается более экономичным решением для достижения того же количества кВт*ч и

получения экономии. Во всем мире, включая Россию, электроприводы для механической работы потребляют около 20 процентов всей электроэнергии. Асинхронные электродвигатели в основном используются в промышленном и коммунальном секторах, на их долю приходится 50-55 процентов общего потребления энергии.

Регулируемый электропривод является эффективным решением для снижения энергопотребления в различных отраслях промышленности. Это позволяет регулировать скорость и мощность электропривода в соответствии с требованиями технологического процесса. Таким образом, достигается оптимальное использование энергии и снижается нагрузка на электросеть.

Распределение асинхронных электродвигателей по мощности и потреблению электроэнергии подробно представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение асинхронных двигателей по мощностям и потреблению электроэнергии

Мощность, кВт	Процент от общего количества	Процент к общему потреблению электроэнергии
до 1	10	5
от 1 до 5	60	40
от 5 до 20	20	30
от 20 до 100	9	20
свыше 100	1	5

Асинхронные двигатели, которые являются одним из наиболее распространенных типов двигателей, имеют мощность до 30 комплектов. Они потребляют примерно 80% электрической энергии и эффективно преобразуют ее в механическую. Максимальная мощность этих двигателей ограничена 100 комплектами, что составляет 80% от всех двигателей.

Большая часть энергопотребления приходится на различные механизмы, такие как насосы и вентиляторы. На долю этих механизмов приходится более половины от общего числа действующих механизмов (таблица 2).

Таблица 2 –Распределение асинхронных электродвигателей по механизмам

Механизмы	Процент от общего количества	Механизмы	Процент от общего количества
Вентиляторы	37,7	Смесители	5,5
Транспортеры	19,9	Механизмы перемещения	4,0
Насосы	17,0	Затворы, задвижки	3,7
Станки обрабатывающие	7,0	Компрессоры	2,8

Широкое использование электродвигателей с большим запасом мощности в различных отраслях экономики часто приводит к неоправданному потреблению энергии. Несмотря на то, что даже в часы пик они работают всего 15-20 часов, эти двигатели потребляют значительное количество энергии, иногда превышая требуемое количество до 60 кВт. Для решения этой проблемы и достижения значительной экономии энергии чрезвычайно важно широко внедрять энергоэффективные электроприводы.

Для перекачки газа или нефти, в различном грузовом и промышленном оборудовании для карьеров, в шахтах используются вентиляторы для подачи воздуха, в шахтах также используются электрические лифты. Кроме того, они используются в насосных и вентиляторных установках тепловых электростанций, котельных, тепловых сетях и других системах.

В промышленности и сельском хозяйстве также используются электроприводы с возможностью регулирования. Они играют важную роль в различных смесительных устройствах, насосах, пневматических компрессорах. Они также используются в электроприводах обрабатывающих станков, электрических транспортерах, транспортировщиках, печах, мельницах и другом оборудовании.

В таблице 3 представлена информация об эффективности использования регулируемого электропривода в конкретных механизмах.

Таблица 3 – Экономия электроэнергии при использовании регулируемого электропривода в различных механизмах

Механизмы	Экономия электроэнергии
Насосы	на 25%-30%;
Компрессоры	на 40%;
Вентиляторы	на 30%;
Центрифуги	на 50%.
Дымососы	от 30% до 80%

Регулируемый электропривод обеспечивает широкий спектр преимуществ, включая снижение эксплуатационных расходов и увеличение срока службы оборудования. Этот тип привода помогает снизить пусковые токи, устраняет необходимость в использовании дросселей и клапанов, а также снижает динамические нагрузки на оборудование, что приводит к снижению затрат и риска аварий.

В развитых индустриальных странах до 90% производимых электроприводов регулируются из-за высокой рентабельности такого выбора. Внедрение регулируемых электроприводов рассматривается как перспективное решение с точки зрения энергосбережения. Российский

рынок преобразователей частоты обладает значительным потенциалом для развития и расширения.

Использование регулируемого электропривода обеспечивает следующие преимущества:

Снижение потребления энергии (электроэнергии, воды, топлива) на 15-20%, 10-12% и 8-10% соответственно.

Снижение затрат за счет снижения энергопотребления.

Увеличение срока службы оборудования.

Развитие отечественной промышленности регулируемых электроприводов.

Поддержка квалифицированного научного и производственного персонала.

Дополнительные поступления в бюджет предприятий от налогов.

Внедрение регулируемого электропривода окупается менее чем за 1,0 года. Экономические выгоды, полученные от первоначальных мер по энергосбережению, могут быть использованы для финансирования последующих проектов. Учитывая растущую тенденцию к удорожанию энергии, этот эффект становится еще более значительным. Опыт внедрения регулируемого электропривода в России подтверждает его эффективность в области энергосбережения и увеличения срока службы оборудования.

1 Вентиляторы общего назначения

1.1 Классификация общепромышленных вентиляторов

Вентиляторы радиальные низкого давления ВР 80-75.

Вентиляторы общего назначения (общепромышленные) используются в системах вентиляции и кондиционирования, а также в технологических установках [1].

Роторы вентилятора состоят из 12 лопастей, которые имеют изогнутую конфигурацию и расширяемую поверхность. Лопасти имеют различные углы входа по всей ширине колеса. Вентиляторы оснащены конической входной трубой с тороидальным выходным участком. Это обеспечивает равномерную нагрузку на лопасти и высокий максимальный КПД вентиляторов (84%). Общий внешний вид вентилятора показан на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Вентилятор радиальный
низкого давления ВР 80-75

Вентиляторы изготавливаются восьми различных типоразмеров, непосредственно подключаемых к двигателю в соответствии с 1-й конструктивной схемой. Эти размеры охватывают номинальные диаметры ротора $D_n = 250 - 1250$ мм. Кроме того, существует девять стандартных типоразмеров вентиляторов с ременным приводом, основанных на 5-й конструктивной схеме, с номинальным диаметром ротора $D_n = 250-1600$ мм.

В случае 1-й конструктивной схемы вентиляторы этих стандартных размеров демонстрируют вариации с промежуточными диаметрами ротора, отклоняющимися на 5% и 10% от номинального диаметра ($D/D_n = 0.9, 0.95, 1.05, 1.1$). Важно отметить, что размеры подключения и установки этих вариантов соответствуют вентиляторам с номинальным диаметром ротора.

Широкий ассортимент доступных вентиляторов обладает широкими аэродинамическими характеристиками, обеспечивая равномерное и компактное распределение по всему спектру режимов

работы, охватывающих производительность 1000÷100 000 м³/ч, а также общее давление 100 ÷1800 Па.

В пределах этого диапазона при выборе вентилятора с повышенной эффективностью для определенного режима нет необходимости в чрезмерном запасе мощности, что приводит к снижению энергопотребления, а также уменьшению габаритов и веса вентиляторного агрегата.

Этот тип вентиляторов используется в системах, где требуется невысокий уровень шума, а также большая эффективность, а также в системах с параллельной работой нескольких вентиляторов. Общие характеристики вентиляторов ВР 80-75 представлены в таблице 1.1.

Кроме того, существуют радиальные вентиляторы умеренного давления, обозначаемые как ВЦ 14-46. Семь типоразмеров вентиляторов с номинальными диаметрами роторов изготавливаются по 1-й конструктивной схеме: $D_n = 200\div 800$ мм. В соответствии с 5-й конструктивной схемой выпускается девять типоразмеров вентиляторов с номинальными диаметрами ротора: $D_n = 200\div 1250$ мм.

Существуют также радиальные вентиляторы для высокого давления, обозначенные как ВР 125-28. Выпускаются вентиляторы четырех типоразмеров с номинальными диаметрами ротора: $D_n = 500, 630, 800$ и 1000 мм. Вентиляторы изготавливаются как по 1-й, так и по 5-й конструктивным схемам.

Таблица 1.1 – Общие характеристики вентиляторов ВР 80-75

Обозначение вентилятора	№№	Конструктивная схема исполнения	D/D _n	Исполнение по назначению											
									взрывозащищенные						
				обычные	теплостойкие	коррозионно-стойкие	коррозионно-теплостойкие	северное	взрывозащищенные	теплостойкие	коррозионно-стойкие	коррозионно-теплостойкие	северное		
ВР 80-75	2,5	1	0,9 0,95 1,0 1,05 1,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
	3,15	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
	4	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
	5	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
	6,3	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
	8	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
	10	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
	12,5	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
	2,5	5	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
	3,15	5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
	4	5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
	5	5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
	6,3	5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
	8	5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
	10	5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
	12,5	5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
16	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>										

Вентиляторы ВЦП 7-40, предназначенные для радиального пылеулавливания, предлагаются в различных типоразмерах. Доступные варианты бывают двух размеров с номинальными диаметрами крыльчатки который равен 500 мм и 800 мм, а также модифицированную версию с диаметром колеса $V = 0,95 \text{ кВт} = 600 \text{ мм}$, полученную путем уменьшения номинального диаметра. Эти вентиляторы изготовлены в соответствии с 5-й конструктивной схемой, включающей в себя систему ременного привода для работы.

С другой стороны, вентиляторы ВО 12-303, которые являются осевыми вентиляторами, подходящими для различных применений, доступны в шести стандартных типоразмерах. Эти размеры охватывают номинальные диаметры крыльчатки $D_n = 400 \text{ мм}, 500 \text{ мм}, 630 \text{ мм}, 800 \text{ мм}, 1000 \text{ мм}$ и 1250 мм . Процесс изготовления этих вентиляторов

соответствует 1-й конструктивной схеме, которая предполагает прямое подключение к двигателю для работы.

Номенклатура вентиляторов, рекомендуемые области применения и условия эксплуатации приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Исполнение и условия эксплуатации общепромышленных вентиляторов

Исполнение	Материал	Обозначение	Эксплуатация	Группа взрывоопасной смеси, согласно ГОСТ 12.1.011	Температура перемещаемых смесей, °С	Примечание
общего назначения	сталь	—	Допустимое содержание пыли и других твердых примесей в перемещаемых средах не более 0,1 г/м ³ . Наличие липких, волокнистых и абразивных материалов не допускается. Агрессивность перемещаемых газозвудушных смесей к стали обыкновенного качества и стали 12Х18Н10Т не должна вызывать коррозию со скоростью более 0,1 мм в год.		-40...80	
общего назначения теплостойкие	сталь	Ж			-40...200	
общего назначения коррозионно-стойкие	нержавеющая сталь	К1			-40...80	
общего назначения коррозионно-теплостойкие	нержавеющая сталь	К1Ж			-40...200	
северное	нержавеющая сталь					-40...40
взрывозащищенные	разнородные металлы	В	Для перемещения газопаровоздушных взрывоопасных смесей IIА, IIВ категорий, Допустимое содержание пыли и других твердых примесей в перемещаемых средах не более 0,1 г/м ³ . Наличие липких, волокнистых, абразивных и взрывчатых веществ не допускается. Агрессивность перемещаемых газозвудушных смесей к стали обыкновенного качества, стали 12Х18Н10Т и алюминиевым сплавам не должна вызывать коррозию со скоростью более 0,1 мм в год. Не применимы для перемещения газопаровоздушных смесей от технологических установок, в которых взрывоопасные вещества нагреваются выше температуры их самовоспламенения или находятся под избыточным давлением.	T1, T2, T3	-40...80	
взрывозащищенные теплостойкие	разнородные металлы	ВЖ		T1, T2	-40...200	
				T1, T2, T3	-40...150	
взрывозащищенные коррозионно-стойкие	алюминий	ВК3		T1, T2, T3	-40...80	за исключением: смесей воздуха и коксового газа, окиси пропилена, окиси этилена, формальдегида, этилхлорсилана, винилтрихлорсилана, этилдиохлорсилана,
взрывозащищенные коррозионно-стойкие	нержавеющая сталь	ВК1		T1, T2, T3	-40...80	
взрывозащищенные коррозионно-теплостойкие	нержавеющая сталь	ВК1Ж		T1, T2	-40...200	
				T1, T2, T3	-40...150	
северное взрывозащищенное	нержавеющая сталь		T1, T2, T3		-40...40	

1.2 Конструкции вентиляторов

Корпуса вентиляторов изготавливаются путем изготовления сварных конструкций с использованием углеродистой и окисленной стали.

Корпуса для вентиляторов небольшого размера могут изготавливаться с использованием уплотнительных швов или оцинкованного листового металла, независимо от типа вентиляции. Эти корпуса изготовлены из высококачественного материала для обеспечения герметичности и предотвращения утечки воздуха.

Корпуса вентиляторов, оснащенные соединительными фланцами, такими как уголки или ленты, облегчают вход и выход воздуха. Кроме того, задняя стенка корпуса снабжена приваренными болтами по окружности, что обеспечивает гибкую установку в различных положениях относительно опорной конструкции при сохранении заданного наклона.

Что касается вращения, вентиляторы предлагают два варианта: правое или левое направление. Когда вентилятор вращается в правильном направлении, он движется по часовой стрелке, в то время как вентилятор, вращающийся в левом направлении, движется против часовой стрелки, если смотреть со стороны впуска.

Спиральный корпус обладает подвижностью, что позволяет рассеивать воздух от вентилятора в разных направлениях. Его расположение имеет прямую зависимость от угла поворота по отношению к нулевой точке, т.о. создавая вертикальный вращательный поток воздуха по направлению к колесу.

Корпуса осевых вентиляторов изготовлены из цилиндрической углеродистой стали и оснащены прочными фланцами. Колеса вентилятора, в свою очередь, изготавливаются из сварной углеродистой и нержавеющей стали и могут быть оснащены лопастями для установки с задним, передним или заднеприводным приводом.

Кроме того, задний диск надежно крепится к ступице колеса. Чтобы снизить вибрацию, все рабочие колеса подвергаются динамической балансировке, в результате чего среднеквадратичное значение составляет 6,3 мм.

Для изготовления колес осевых вентиляторов используется углеродистая сталь. Колеса состоят из трех лопастей, приваренных к щиту и образующих листовые пластины. Для того чтобы смонтировать колеса к агрегату применяют конструкционные подшипники.

В соответствии с пятой конструктивной схемой стойки с промежуточными валами монтируются на раме, состоящей из профилированного проката. Одновременно двигатель, сопровождаемый шкивом, находит свое место на этой самой раме. Клиновой ремень облегчает соединение между шкивом промежуточного вала и шкивом двигателя. Крайне важно убедиться в том, что шкивы надежно установлены под опорой подшипника. Обычно шкивы состоят из рамы и съемной конической втулки, которые соединены между собой винтами, прочно закрепленными внутри корпуса и вставок. Кроме того, для натяжения ремней используется натяжное устройство, прикрепленное к раме.

Колесо осевого вентилятора, расположенное рядом с двигателем, установлено на стойке, образующей неотъемлемую часть круглого корпуса. Для облегчения крепления колеса и шасси валы изготовлены из

легированной стали, обладающей в 40 раз увеличенной прочностью на вращение, и имеют шпоночные пазы на соответствующих концах.

1.3 Применяемые электродвигатели

Для установки вентиляторов используется асинхронный трехфазный односкоростной двигатель с коротким замыканием. Он предназначен для работы в сетях переменного тока частотой 50 Гц и напряжением от 220 до 380 В. Вентиляторы, которые используются в промышленности и устойчивы к коррозии, оснащаются двигателями серий 4А, AIR, RA и других [4]. Для вентиляторов, предназначенных для работы во взрывоопасных средах, используются вентиляционные двигатели V, 2V, AIM и других типов. Кроме того, также могут использоваться двигатели альтернативных серий и типов, которые обладают сопоставимыми техническими характеристиками и соответствуют требованиям к установке с точки зрения мощности, скорости вращения и напряжения. Это дает возможность гибко выбирать двигатели, соответствующие тем же техническим характеристикам.

Всего имеется пять конструктивных схем вентиляторов, в которых можно заменять ЭП обладающей той же мощностью и скоростью

В частности, для вентиляторов, предназначенных для перемещения взрывоопасных смесей, подпадающих под категории 2А и 2В, а также группы Т1, Т2, ТЗ и Т4, необходимо внедрение двигателя, соответствующего более высокой категории PV и группе Т4. В этом случае двигатель должен иметь маркировку НТ1, указывающую на более высокий класс и группу [5]. На конструкцию двигателя влияют климатические условия эксплуатации, указанные в заказе.

Для повышения эксплуатационной экономичности каждый двигатель оснащен несколькими двигателями с различными настройками мощности. Выбор этих настроек зависит от режима работы Q, PV и мощности N.

1.4 Аэродинамические характеристики и параметры

Параметры воздуха при нормальных атмосферных условиях:

$P_n = 101320 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ — барометрическое давление;

$t_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ — температура воздуха;

$T_n = 293 \text{ }^\circ\text{K}$ — абсолютная температура воздуха;

$\phi_n = 50\%$ — относительная влажность.

На рисунке 3.1 показаны аэродинамические характеристики вентиляторов низкого давления, демонстрирующие их свойства в логарифмическом масштабе. Стоит отметить, что все режимы работы вентилятора с эквивалентными значениями КПД удобно расположены на одной прямой линии.

Номинальный режим соответствует максимальному значению общего КПД, $h_{\text{макс}}$, в то время как эксплуатационные возможности каждого вентилятора зависят от его конкретных характеристик прочности. В случае 1-й конструкции дискретные значения частоты вращения колеса совпадают с соответствующими значениями частоты вращения двигателя. Примечательно, что кривые давления, представленные на диаграмме, представляют относительные значения асинхронной частоты вращения из-за различий в проскальзывании между двигателями, изготовленными разными заводами, несмотря на одинаковую установочную мощность.

Для 5-й конструкции вентилятор может использоваться с несколькими скоростями вращения за счет использования шкивов различного диаметра. Эта универсальная функция обеспечивает большую гибкость в работе вентилятора.

Рядом с кривыми полного давления (изображенными толстыми линиями) находятся линии, представляющие постоянные значения установочной мощности двигателей N_y (показаны тонкими линиями) на графике аэродинамических характеристик. При определении этих значений мощности, N_y , учитывается потребляемая вентилятором мощность, N , с учетом коэффициента запаса.

Двигатели с указанным значением N_y , указанным на диаграмме, могут адекватно поддерживать режимы работы вентиляторов, расположенные ниже соответствующей кривой N_y . Однако, если кривая мощности $N_y = \text{const}$ пересекается с кривой давления $p_v(Q)$, крайне важно использовать вентилятор, оснащенный этим двигателем, в диапазоне производительности, который не превышает скорость потока в точке пересечения этих кривых.

Кроме того, графическое представление включает в себя дополнительные горизонтальные шкалы, показывающие значения скорости, V , и динамического давления, p_{dv} , на выходном участке вентиляторной зоны, F_b . Эти параметры вычисляются с использованием приведенных ниже формул

$$V = \frac{Q}{F_b}; \quad p_{dv} = \frac{\rho V^2}{2}; \quad (1.1)$$

Кроме того, значения динамического давления, предусмотренные для вентилятора, могут быть использованы в качестве приблизительного показателя для оценки потерь давления, возникающих в элементах

нагнетательной сети, расположенных в непосредственной близости от выходной секции вентилятора.

В сценариях, когда сеть, в которой предназначен для работы вентилятор, установлена на стороне всасывания, выбор подходящего вентилятора зависит от величины статического давления, p_{sv} , создаваемого вентилятором. Это статическое давление определяется как разница между общим давлением и динамическим давлением, как указано в уравнении (1.2).

$$p_{sv} = p_v - p_{dv} \quad (1.2)$$

Пересчет характеристик вентилятора становится необходимым, когда он функционирует в режиме подачи газовой смеси, характеризующейся плотностью ρ' , которая отличается от стандартной плотности воздуха ρ_n . Во время этого процесса повторной калибровки необходимо учитывать, что производительность Q и КПД η вентилятора остаются постоянными без каких-либо изменений. Однако в ответ на изменение плотности наблюдаются пропорциональные изменения как давления, создаваемого вентилятором, обозначаемого как p_v , так и потребляемой мощности, представленной как

$$N \cdot Q' = Q; \eta' = \eta; p'_v = p_v \frac{\rho'}{\rho_n}; N' = N \frac{\rho'}{\rho_n}; \quad (1.3)$$

где параметры вентилятора со штрихом соответствуют перемещению смеси с плотностью ρ' .

Плотность ρ' может быть рассчитана по формуле

$$\rho' = \rho_n \frac{p' \cdot 293}{101320 \cdot (273 + t')} \quad (1.4)$$

где p', t' — соответственно абсолютное давление и температура, характеризующие перемещаемую среду на входе в вентилятор.

Если вентиляторы будут эксплуатироваться при частоте вращения n' , отличной от приведенной частоты вращения n , то пересчет параметров вентиляторов должен осуществляться по формулам:

$$Q' = Q \left(\frac{n'}{n} \right); p'_v = p_v \left(\frac{n'}{n} \right)^2; N' = N \left(\frac{n'}{n} \right)^3; \eta' = \eta; \quad (1.5)$$

где параметры со штрихом соответствуют частоте вращения n' .

В контексте достижения полного геометрического сходства между двумя вентиляторами одного типа, но разных размеров, можно использовать данные характеристики серийных вентиляторов в качестве основы для расчета характеристик проектируемых вентиляторов. Этот процесс включает в себя использование формул преобразования, специально разработанных для облегчения расчетов, необходимых для установления желаемого сходства между вентиляторами.

$$Q' = Q \left(\frac{D'}{D} \right); p'_v = p_v \left(\frac{D'}{D} \right)^2; N' = N \left(\frac{D'}{D} \right)^3; \eta' = \eta; \quad (1.6)$$

где параметры со штрихом соответствуют диаметру рабочего колеса D' .

Аэродинамические характеристики вентиляторов представлены на рисунке 1.4.1.

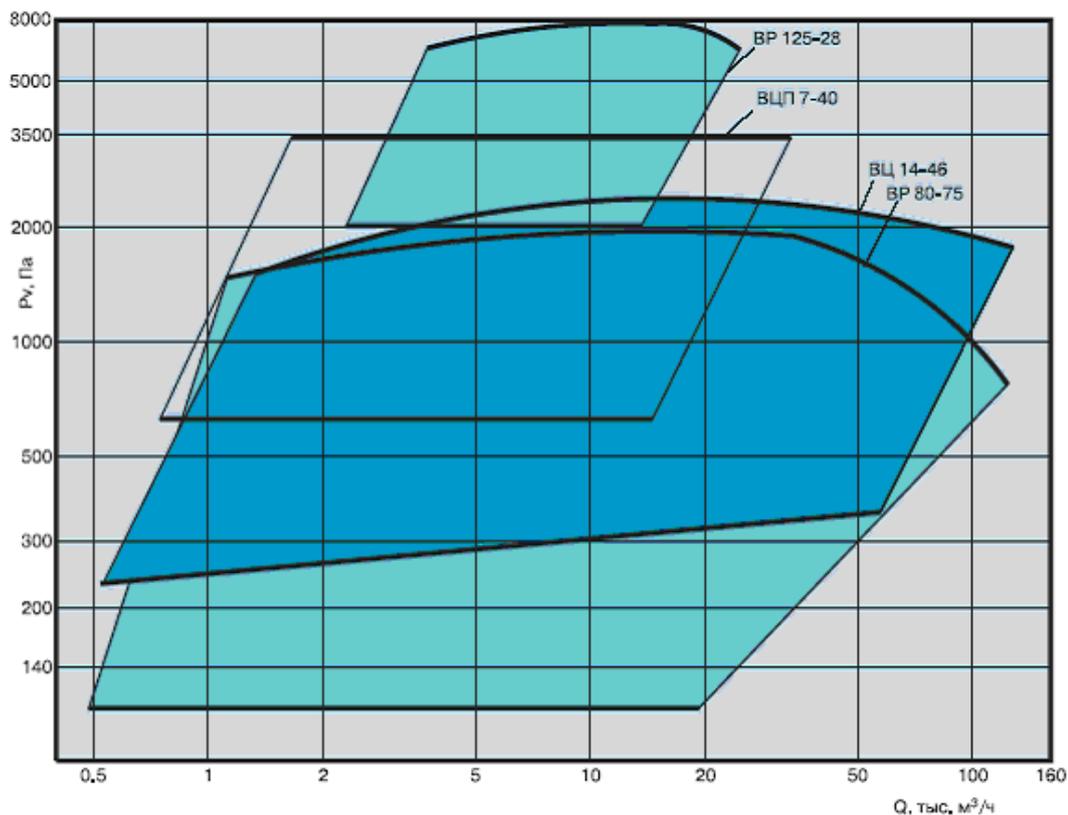


Рисунок 1.4.1– Аэродинамические характеристики вентиляторов

1.5 Работа вентилятора в сети

Вентиляторы работают в сложных сетях, состоящих из различных воздуховодов, компонентов и воздухораспределительных устройств. Вентилятор передает энергию вытесняемому газу, направляя его на преодоление гидравлического сопротивления по всей сети, что соответствует совокупным потерям давления во встроенных элементах.

Характеристика сети, часто определяемая как отношение между общими потерями давления (Δp) и объемным расходом (Q) среды, проходящей через сеть, зависит от таких влиятельных факторов, как плотность среды (ρ), скорость потока (V) и сложная конфигурация элементов сети. Как правило, это соотношение имеет квадратичную параболическую форму, обозначаемую $\Delta p = k Q^2$ (1.7), где коэффициент (k) зависит от формы участка сети, длины и плотности среды. На логарифмических графиках аэродинамических характеристик парабола (1.7) проявляется в виде прямой, параллельной линии, представляющей постоянные значения КПД.

Определение характеристик проектируемой сети требует вычислительного анализа, в то время как характеристики реальных систем устанавливаются эмпирически путем измерения потерь давления на путях всасывания и нагнетания или сравнения суммарных давлений на входе и выходе вентилятора.

При отборе вентилятора предпочтительно выбирать режим функционирования, который максимально приближен к номинальному режиму с максимальной продуктивностью, с тем чтобы минимизировать возникновение шума и расход энергии. Этот режим определяется пересечением характеристики вентилятора ($p_v(Q)$) и сетевой характеристики ($\Delta p(Q)$), представляя собой равновесие, при котором давление, создаваемое вентилятором, соответствует совокупным потерям давления в сети.

Установка вентилятора внутри сети может быть выполнена в трех различных конфигурациях: в одной сетевые элементы расположены исключительно на стороне всасывания, что облегчает работу вентилятора в условиях всасывания; в другой сетевые элементы

расположены исключительно на стороне нагнетания, что указывает на то, что вентилятор работает в режиме нагнетания. Ориентированная на пользователя настройка; и, наконец, комбинированный сетевой сценарий, в котором сетевые элементы распределены как по всасывающей, так и по нагнетательной сторонам, что приводит к работе вентилятора в гибридной среде.

Для вентилятора, работающего в объединенной сети, общее давление, которое обозначается как p_v , распределяется для компенсации потерь давления, возникающих во всасывающей секции сети (Δp_1), потерь давления, возникающих в нагнетательной секции сети (Δp_2), и динамического давления, присутствующего в выпускном сечении выпускного сегмента (Δp_d). В случае вентилятора, это общее давление создается для компенсации указанных потерь давления в сети.

$$p_v = p_{sv} + p_{dv} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_d. \quad (1.8)$$

При работе вентилятора на нагнетание величина $\Delta p_1 = 0$ и

$$p_v = p_{sv} + p_{dv} = \Delta p_2 + \Delta p_d. \quad (1.9)$$

При работе вентилятора на всасывание величина $\Delta p_2 = 0$ и динамическое давление Δp_d в выходном сечении нагнетательного участка равно динамическому давлению вентилятора $\Delta p_d = p_{dv}$. Формула (1.8) приводится к виду

$$p_{sv} = \Delta p_1. \quad (1.10)$$

В данном сценарии выбор подходящего вентилятора на основе заданных параметров требует тщательного учета значения статического давления вместо общего давления с использованием дополнительной шкалы динамического давления, обозначаемой как p_{dv} , изображенной на графиках, иллюстрирующих аэродинамические характеристики вентиляторов. Крайне важно определить статическое давление для

каждого режима работы, используя формулу (1.2), которая предполагает вычисление разницы между полным давлением и динамическим давлением, создаваемым вентилятором.

При подключении вентилятора к сети необходимо уделять особое внимание стратегическому расположению фасонных элементов сети, чтобы избежать потенциальных нарушений равномерности воздушного потока. Чрезвычайно важно обеспечить позиционирование этих элементов на расстоянии не менее четырех гидравлических диаметров от входного раздела вентилятора и поддерживать безопасный промежуток не менее двух гидравлических диаметров от его выходного раздела. Любое нарушение этого условия может привести к значительному ухудшению аэродинамических характеристик вентиляторов, причем наиболее серьезное ухудшение происходит, когда эти элементы находятся в непосредственной близости от стен или включают поворотные секции, такие как отводы или диффузоры с большими углами раскрытия, превышающими 30° . В случаях, когда возникает необходимость в установке этих элементов в непосредственной близости от вентилятора, первостепенное значение приобретает использование вентиляторов, специально разработанных для размещения таких элементов, с тщательным учетом связанных с ними скорректированных характеристик.

1.6 Изменение рабочего режима вентилятора при изменении плотности перемещаемой среды

Эффективность и производительность вентилятора, согласно уравнениям (1.6.1), не подвержены влиянию плотности переносимой среды. Однако давление, порождаемое самим вентилятором, и

энергопотребление напрямую зависят от плотности, что иллюстрируется на рисунке 1.6.1. При изменении плотности среды в m раз, потери давления в системе будут соответствующим образом скорректированы с коэффициентом m . Следовательно, как давление, создаваемое вентилятором, так и потребление энергии будут пропорционально изменяться с коэффициентом m . Вывод: производительность и эффективность вентилятора не зависят от плотности среды, но давление и энергопотребление напрямую пропорциональны плотности

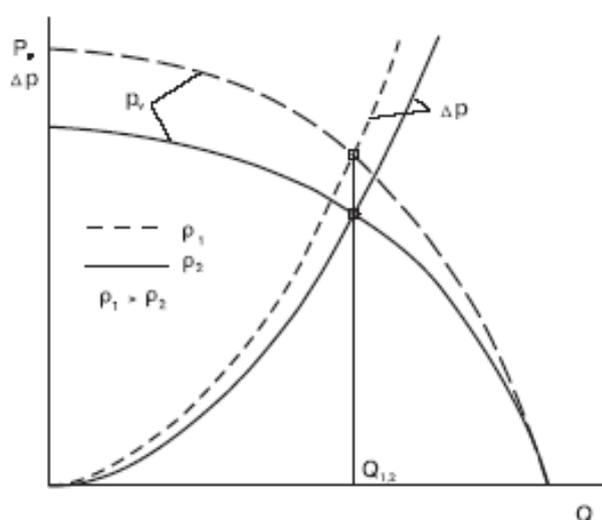


Рисунок 1.6.1 – зависимость производительности от плотности перемещаемой среды.

1.7 Изменение рабочего режима вентилятора при увеличении потерь давления в сети

В случае увеличения потерь давления в сети, что может произойти вследствие дросселирования или засорения фильтров, режим работы вентилятора претерпевает заметный сдвиг вдоль его характеристической кривой в сторону диапазона, характеризующегося уменьшением расхода

энергии. Эта настройка режима сопровождается соответствующим повышением величины давления, создаваемого вентилятором, в сочетании с сопутствующим снижением энергопотребления, как показано на визуальном изображении, представленном на рис. 1.4.

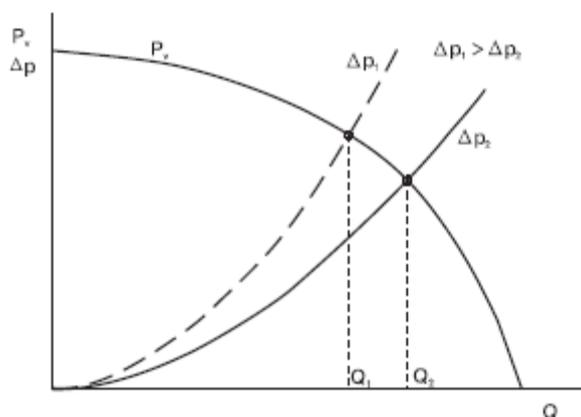


Рисунок 1.7.1 – зависимость характеристики потерь давления в сети.

1.8 Изменение рабочего режима вентилятора при изменении частоты вращения вентилятора

При изменении частоты вращения вентилятора, работающего в заданной сети, рабочий режим вентилятора смещается вдоль характеристики сети. В соответствии с формулами (1.5) при изменении частоты вращения в n раз, производительность вентилятора изменится в n раз, создаваемое давление - в n^2 раз, потребляемая мощность - в n^3 раз. КПД вентилятора остается неизменным (рисунок 1.5). Данный способ регулирования является наиболее экономически выгодным.

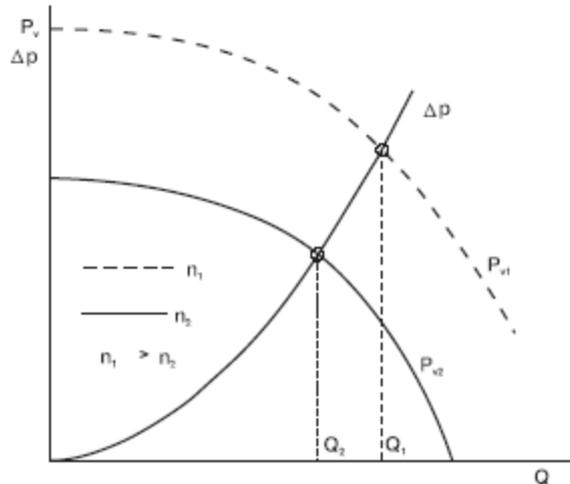


Рисунок 1.8.1 – зависимость рабочего режима от частоты вращения вентилятора.

1.9 Определение рабочего режима вентилятора в системе с параллельно установленными воздуховодами

В сценарии, когда вентилятор активно задействован в обширной сети, охватывающей множество параллельных секций, первоочередной задачей является тщательное вычисление отличительных характеристик, связанных с каждой из этих отдельных секций. После этого важного шага последующий план действий требует определения общей характеристики сети, процесса, который влечет за собой суммирование значений расхода, соответствующих каждому участку, и все это выполняется при заранее определенном уровне потери давления. Следовательно, именно благодаря такому тщательному объединению этих значений расхода в разрезе успешно устанавливается окончательный режим работы вентилятора, точно определяемый в точке пересечения, где его характеристики совпадают с общими характеристиками сети в целом. Важно подчеркнуть тот факт, что

количество воздушного потока, проходящего через каждую соответствующую секцию в сети, работает по принципу обратной пропорциональности по отношению к величине потери давления, испытываемой в указанной секции, визуальное представление, которое точно и искусно изображено на иллюстративном и содержательном рисунке 1.6.

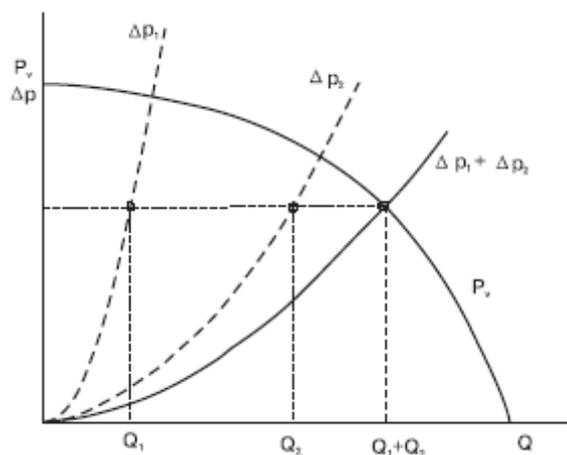


Рисунок 1.9.1 – зависимость характеристики от количества параллельных участков.

2 Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода для вентилятора

Вентиляторы, которые занимают важное место в области санитарно-технического применения, оказывают значительное влияние на облегчение кондиционирования воздуха в промышленных и технических помещениях, как подчеркивается в руководстве [2]. Следует подчеркнуть, что вентиляторы, в том числе с относительно небольшой мощностью, особенно в диапазоне до 100 кВт, в совокупности

способствуют значительному уровню энергопотребления, как указано в ссылке [3].

В случае увеличения диаметра рабочего колеса вентилятора становится необходимым соответствующее снижение его номинальной частоты вращения, что обусловлено ограничениями, налагаемыми допустимой скоростью вращения наконечников лопастей. Вентиляторы, кроме того, обладают моментом инерции, который часто превышает момент инерции приводного двигателя. Эта особенность может вызывать проблемы при запуске вентилятора и, в определенных ситуациях, требовать применения механизмов торможения двигателя для быстрого отключения. Таким образом, значительный момент инерции является неотъемлемой характеристикой вентиляторов, которая создает сложности в процессе запуска и может потребовать использования тормозных механизмов для немедленного отключения.

Вентиляторы регулируются путем изменения угла поворота направляющих лопаток. Этот метод аэродинамического управления широко используется для центробежных вентиляторов. Когда лопасти поворачиваются, поперечное сечение входного канала уменьшается, и поток сжимается перед крыльчаткой. Однако регулирование вентилятора с помощью таких средств приводит к существенному снижению его эффективности, что создает проблему с точки зрения достижения оптимальной производительности. Регулировка направляющих лопаток, являющаяся важным аспектом управления вентилятором, может выполняться либо вручную, в соответствии с конкретными требованиями, либо автоматически с помощью исполнительного двигателя. Тем не менее, в практических приложениях использование устройств, предназначенных для изменения угла наклона

направляющего механизма в автоматизированных системах управления, применяется редко из-за присущих им сложностей, связанных с их эксплуатацией, и преобладающих опасений относительно их надежности.

Альтернативный подход, хотя и менее экономичный, предполагает использование управления заслонкой для регулирования сечения выходного канала вентилятора, напоминающего управление дроссельной заслонкой, обычно используемое в насосах. В этом сценарии характеристики вентилятора не изменяются, как это наблюдается в вышеупомянутом способе, хотя основные характеристики системы претерпевают отчетливые изменения.

В свете этих соображений внедрение регулируемого электропривода приобретает первостепенное значение для вентиляторов, особенно учитывая убедительные данные, свидетельствующие о том, что эффективность вентилятора в среднем на 12% выше при использовании регулируемого электропривода по сравнению с нерегулируемым [4]. Это заметное повышение эффективности не только приводит к повышению производительности, но и дает возможность упростить конструкцию турбомашин. Кроме того, использование регулируемого привода облегчает одновременную работу двух или более вентиляторов, тем самым обеспечивая большую гибкость и универсальность в практическом применении.

2.1 Особенности выбора частотно-регулируемого электропривода

Вентиляторы работают в условиях длительной нагрузки в течение всего года, обеспечивая постоянную нагрузку на вал двигателя без какого-либо чрезмерного напряжения. Диапазон регулирования

скорости, необходимый для вентиляторов, как правило, остается в пределах скромного соотношения 2:1, при этом более глубокое регулирование редко применяется из-за кубической корреляции между потребляемой мощностью и частотой вращения.

Для всестороннего удовлетворения этих требований оптимальным решением является использование частотно-регулируемого асинхронного электропривода, в идеале сопровождаемого простыми и экономичными системами регулирования частоты [5]. На рисунке 2.1 представлена функциональная схема, иллюстрирующая конфигурацию такого частотно-регулируемого электропривода.

Для обеспечения требуемого крутящего момента при запуске становится необходимым предусмотреть возможность регулировки вольт-частотной характеристики и регулирования времени разгона и замедления. Это влечет за собой определение параметров вольт-частотной характеристики, которые соответствуют более низким частотам, присвоение им значений напряжения, превышающих те, которые предписаны выбранным законом регулирования. Следовательно, управление временем ускорения и замедления осуществляется с помощью регулятора интенсивности.

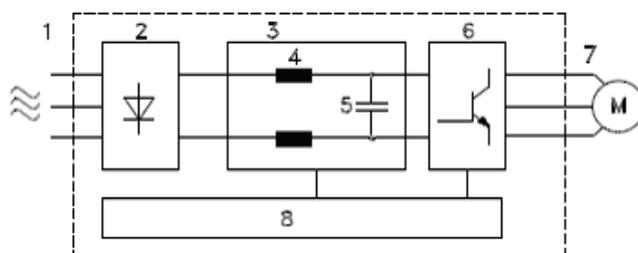


Рисунок 2.1.1 – Функциональная схема частотно-регулируемого электропривода

Используя торможение накатом, привод вентилятора избавляет от необходимости во вспомогательных компонентах, таких как тормозные резисторы или устройства, поглощающие инерцию, что делает его упрощенным и эффективным решением.

Преобразователь плавно работает в рамках традиционной схемы управления, где регулировка скорости легко интегрируется с помощью аналогового сигнала, в то время как дискретные сигналы служат для выбора режима и контроля состояния преобразователя. Такая тщательно продуманная схема управления устраняет необходимость в дополнительных устройствах, тем самым оптимизируя общую архитектуру системы.

Говоря об экономических и технических предпосылках перехода к частотно-регулируемому электроприводу, обычно ограничиваются преимуществами асинхронного двигателя: низкая стоимость, невысокие эксплуатационные затраты, высокая надежность и т.д. Однако важно учитывать, что вышеупомянутые преимущества, связанные с асинхронной машиной, не в полной мере учитывают последствия ее взаимодействия с преобразователем частоты. Неспособность распознать и должным образом учесть определенные аспекты этого сотрудничества, которые могут быть восприняты как ограничения или несоответствия, потенциально может привести к неоптимальному использованию привода или, в более серьезных случаях, к ошибочному выбору привода в целом. Таким образом, становится чрезвычайно важным обладать всесторонним пониманием и добросовестно принимать во внимание эти влиятельные факторы, которые существенно влияют не только на энергоэффективность системы, но и на точное определение

соответствующей мощности привода, которая будет использоваться в таких сценариях.

Когда асинхронные двигатели используются совместно с преобразователями частоты, наблюдается тенденция к снижению их КПД примерно на 2-3%, в то время как коэффициент мощности, обозначаемый как $\text{COS}\phi$, может снижаться до 5%. Это снижение КПД и коэффициента мощности может быть объяснено наличием дополнительных высокочастотных потерь, которые вызваны использованием несинусоидальных форм сигналов напряжения. Следовательно, эти потери способствуют увеличению тепловыделения двигателя и последующему снижению полезной выходной мощности на валу двигателя, что приводит к общему снижению до 25% [7]. Примечательно, что эти дополнительные потери в первую очередь возникают в обмотках двигателя и стальных компонентах его магнитопровода из-за высших гармоник, присутствующих как в токе, так и в магнитном потоке. Следовательно, при использовании асинхронных приводов в сочетании с частотным регулированием становится необходимым внедрение различных мер, направленных на улучшение гармонического состава внутри системы. Эти меры могут включать установку дополнительных устройств, регулировку настроек преобразователя или другие соответствующие решения для эффективного смягчения неблагоприятных последствий гармонических искажений.

2.2 Дополнительные устройства при комплектowaniu частотно-регулируемого электропривода

Преобразователи частоты рекомендуют использовать совместно с дополнительными, или иначе опциональными устройствами. Опциональные устройства, в зависимости от их назначения, устанавливаются как в силовые цепи преобразователя, так и в цепи управления. К устройствам, устанавливаемым в силовую цепь, относятся: реакторы переменного и постоянного тока, входные и выходные фильтры, тормозные резисторы (рисунок 2.2.1).

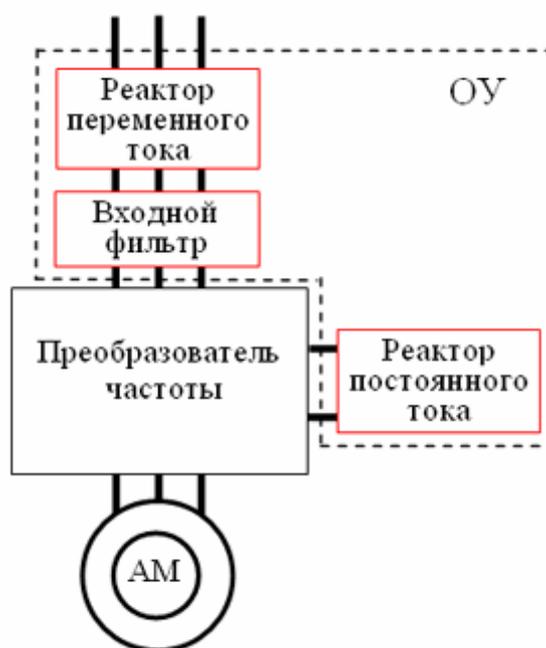


Рисунок 2.2.1 – Дополнительные устройства частотно-регулируемого электропривода

Установка входных фильтров зависит от требований к электромагнитной совместимости. Если отсутствуют нормативные предписания или нежелательное воздействие шума от преобразователя на остальные компоненты системы, то установка фильтра может быть

необязательной. Таким образом, решение о необходимости фильтрации определяется требованиями к электромагнитной совместимости и отсутствием негативных последствий шума на систему.

Одновременное применение реакторов переменного и постоянного тока совместно содействует оптимальному воздействию на гармонический спектр. Это явление обусловлено высокой эффективностью, проявляемой реакторами переменного и постоянного тока в подавлении высших гармоник с различными частотами.

2.3 Достигаемые с технологической и экономической точки зрения преимущества

Высокая эффективность применения частотно-регулируемого электропривода для регулирования параметров и оптимизации режимов работы вентиляторов достигается за счет энерго- и ресурсосбережения, снижения эксплуатационных затрат, повышения надежности и удобства автоматизации.

Энергосберегающий эффект.

Как правило, в большинстве технологических систем промышленности, сферы коммунального хозяйства и других отраслей установлены двигатели в расчете на максимальную производительность оборудования, в то время как часы пиковой нагрузки, то есть время работы оборудования с максимальной производительностью, составляют всего 10-15% общего времени работы оборудования [8]. По данным [2] использование регулируемого электропривода для вентиляторов позволяет экономить до 30-50% электроэнергии. Учитывая, что этот тип механизмов составляет значительную долю (37,7%) от общего

количества используемых электроприводов, данное направление является актуальным.

Ресурсосберегающий эффект.

Ресурсосберегающий эффект регулируемого электропривода основан на его регулирующей способности и способности обеспечивать плавное включение и выключение вентиляторов.

Достижение вышеупомянутых преимуществ обусловлено следующими ключевыми факторами: преимущественно сниженными скоростями вращения, при которых работают механизмы, что приводит к уменьшению циклических динамических и вибрационных нагрузок, оказываемых на подшипники, уплотнения, крепежные детали, фундаменты и электродвигатели, что впоследствии приводит к соответствующему увеличению их долговечности и траектории восстановления.. Кроме того, уменьшение механических и электродинамических нагрузок во время пусков и переходных фаз приводит к достижению более мягкого режима эксплуатации. Кроме того, устранение скачков тока в выводах электродвигателей во время пусков приводит к соответствующему снижению начальных уровней тока, которые гармонично соответствуют предписанным номинальным значениям.

Исключение регулирующих заслонок и направляющих устройств из эксплуатации и демонтажа вентиляционных установок, поскольку эти компоненты значительно снижают как надежность, так и эффективность систем.

В рамках международных конвенций экономическое преимущество, получаемое за счет повышения надежности, увеличения срока службы оборудования и сокращения интервалов технического

обслуживания оборудования (включая насосные и вентиляционные установки, клапаны и электрические коммутационные аппараты) за счет внедрения щадящих режимов эксплуатации, превосходит финансовые преимущества, возникающие исключительно за счет экономии электроэнергии. В ходе опроса, проведенного Институтом энергетики США (EPRI), было обнаружено, что 83,7% пользователей определили "надежность" всей технологической системы и оборудования, а также повышение "эффективности процесса" в качестве основных стимулов для внедрения регулируемых приводов. Только 7,5% были привлечены исключительно достоинствами "энергоэффективности" [2].

Повышение уровня автоматизации и оптимизация режимов работы.

Эффективность внедрения частотно-регулируемого электропривода определяется не только экономией электроэнергии, повышением надежности работы оборудования и снижением эксплуатационных затрат. Важным достоинством является возможность оптимизации режимов работы, повышение уровня автоматизации, а также удобство и простота внедрения.

3 Выбор вентилятора и приводного двигателя

3.1 Аэродинамические характеристики и параметры

вентилятора ВР 80-75-6,3

Вентилятор, обозначенный как ВР 80-75-6.3, имеет радиальную конфигурацию и диаметр рабочего колеса, обозначенный как колеса $D = D_n = 630$ мм, а также частоту вращения 1450 об/мин, что обеспечивает прямую механическую связь с электродвигателем. В системе

вентиляторов момент инерции вентилятора, обозначаемый как $J_{\text{вент}} = 0,16 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Чтобы обеспечить полное представление о рабочих характеристиках вентилятора, на рисунке 3.1.1 представлена область аэродинамических характеристик, охватывающая массив данных. В дополнение к полным кривым давления аэродинамические характеристики включают в себя контурные линии, иллюстрирующие постоянные значения установочной мощности, известные как N_y , для двигателей, работающих в диапазоне номинальной мощности. Эти контурные линии очерчены пунктирными узорами, что помогает визуализировать диапазон номинальной мощности.

Характеристики вентилятора приведены для параметров воздуха при нормальных атмосферных условиях:

$p_n = 101320 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ — барометрическое давление (760 мм рт.ст.);

$t_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ — температура воздуха;

$\phi_n = 50\%$ — относительная влажность.

Аэродинамические свойства вентилятора зависят от исходной плотности воздуха, обозначаемой как $\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 1,2 \text{ "кг/" "м" }^3$, которая служит фундаментальной основой. Тем не менее, следует признать, что изменения температуры воздуха могут привести к изменениям его плотности. Крайне важно подчеркнуть, что эти модификации сами по себе не оказывают прямого влияния на производительность вентилятора; тем не менее, они оказывают влияние на создаваемое давление и потребляемую мощность. Особое значение имеет наблюдение о том, что как давление, так и мощность напрямую зависят от плотности воздуха.

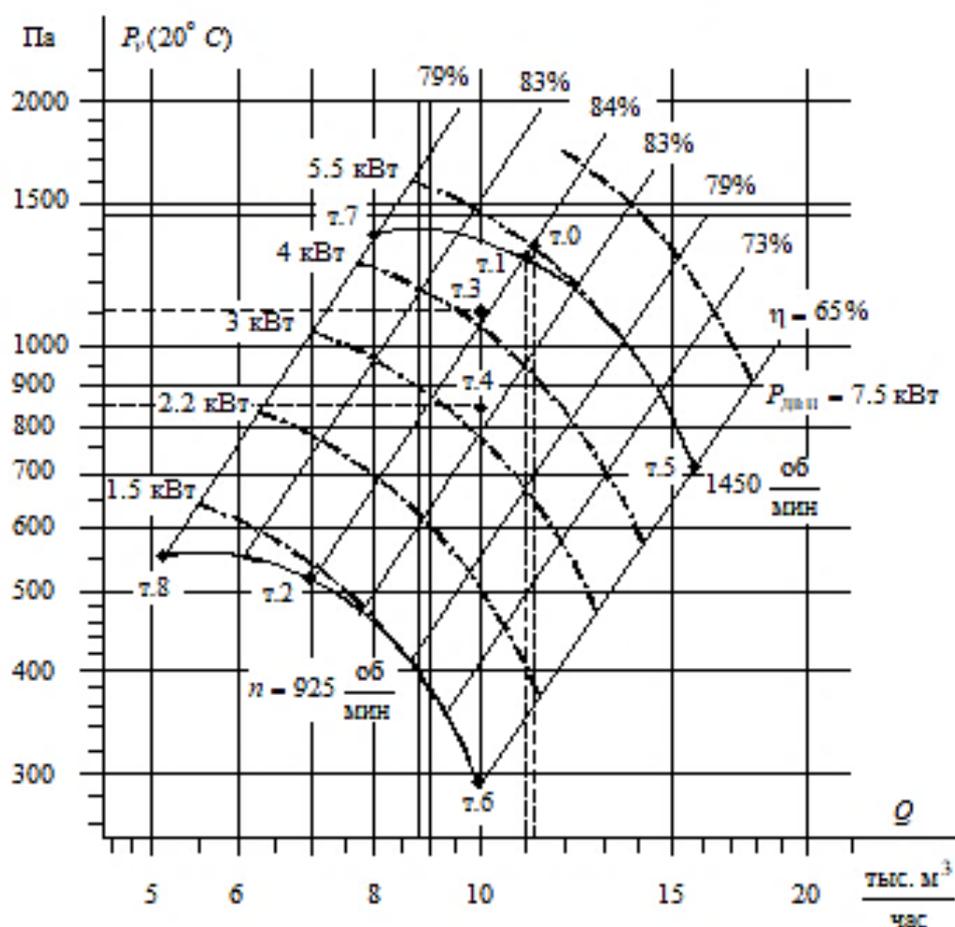


Рисунок 3.1.1. Область аэродинамических характеристик вентилятора ВР 80-75-6,3

Работа вентилятора, а также создаваемое им давление и его эффективность в конкретной рабочей точке i неразрывно связаны с его аэродинамическими характеристиками. Эти характеристики имеют значительное значение при оценке производительности вентилятора и играют важную роль в расчете общей и полезной мощности, общего и полезного крутящего момента на валу вентилятора и частоты вращения приводного двигателя. Этот вычислительный процесс основан на хорошо зарекомендовавшей себя методологии.

Выбор контрольной точки является начальным этапом, где известна либо мощность, либо частота вращения приводного двигателя. Если мощность известна, может быть использована общая контрольная точка, в то время как для каждой рабочей точки i устанавливается индивидуальная контрольная точка для определения частоты вращения двигателя. Эта особая точка находится на кривой, где КПД вентилятора имеет постоянное значение, и пересекается с точкой i на характеристической кривой. Таким образом, в начальном этапе осуществляется выбор контрольной точки, определение мощности или частоты вращения приводного двигателя, и установление индивидуальных и общих контрольных точек на кривой КПД вентилятора

Расчетные выражения имеют следующий вид:

$$N_{\text{вал}i} = N_{\text{баз}} \cdot \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}} \cdot \frac{p_i}{p_{\text{баз}}} \cdot \frac{\eta_{\text{баз}}}{\eta_i} \quad (3.1.1)$$

– полная мощность на валу вентилятора, кВт;

$$N_{\text{пол}i} = N_{\text{вал}i} \cdot \eta_i \quad (3.1.2)$$

– полезная мощность на валу вентилятора, кВт;

$$\omega_i = \omega_{\text{баз}} \cdot \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}} \quad \text{или} \quad \omega_i = \omega_{\text{баз}} \cdot \sqrt{\frac{p_i}{p_{\text{баз}}}} \quad (3.1.3)$$

– скорость вращения приводного двигателя в выбранной точке работы, рад/с;

$$M_{\text{вал}i} = N_{\text{вал}i} / \omega_i \quad (3.1.4)$$

– полный момент нагрузки на валу вентилятора, $H \cdot м$;

$$M_{\text{пол}i} = N_{\text{пол}i} / \omega_i \quad (3.1.5)$$

– полезный момент нагрузки на валу вентилятора, $H \cdot м$.

Вентиляторы проявляют выдающиеся характеристики прочности и функционируют в заданном диапазоне скоростей вращения. Если вентилятор работает с применением непосредственного привода, то скорость вращения его колеса соответствует частоте вращения двигателя. Однако эффективность работы вентилятора также зависит от нагрузки, которая определяется характеристиками воздуховода и режимом функционирования вентиляционной системы. Кроме того, особенно важно осуществлять проектирование вентиляционной системы таким образом, чтобы обеспечить оптимальную работу вентилятора в заданном диапазоне. Таким образом, функциональность вентилятора определяется его прочностными свойствами, скоростью вращения, нагрузкой и специальным проектированием системы вентиляции

Оптимальный режим работы вентилятора, который соответствует достижению максимальной суммарной эффективности, считается наиболее благоприятным. В рамках технического задания определены предельные значения аэродинамических характеристик, соответствующие различным режимам работы вентилятора. Изменение частоты вращения вентилятора в условиях максимальной эффективности, эквивалентной 84%, является предпочтительным методом регулирования его производительности. В рамках этого режима работы вентилятора устанавливаются соответствующие предельные

значения, ограниченные допустимым диапазоном регулирования скорости.

Точка 1 – вентилятор работает в номинальном режиме, обозначаемом как Т. 1, при этом в действие вступают конкретные параметры, определяемые его аэродинамическими характеристиками. Эти параметры включают Q_n , представляющий скорость воздушного потока при $11000 \text{ м}^3/\text{ч}$, p_n , обозначающий общее давление при 1270 Па , η_n , представляющий КПД при 84% , и n_n , символизирующий скорость вращения при 1450 об/мин или $\omega_n = 151,84 \text{ рад/с}$. И наоборот, параметры базовой точки, обозначаемые как Т. 0, служат универсальным ориентиром для расчета мощности во всех рабочих точках вентилятора. В пределах Т. 0, мы находим $N_{\text{баз}}$, обозначающих полную мощность в $5,5 \text{ кВт}$, $Q_{\text{баз}}$, представляющих скорость воздушного потока в $11100 \text{ м}^3/\text{ч}$, $p_{\text{баз}}$, указывающих общее давление в 1310 Па , и η_n , представляющих КПД в 84% . Кроме того, конструктивные параметры Т. 1 включают полную мощность и полезную мощность, а также полный крутящий момент и полезный крутящий момент, прилагаемый к валу вентилятора.

$$N_{\text{вал.н}} = 5,5 \cdot \frac{11000}{11100} \cdot \frac{1270}{1310} \cdot \frac{0,84}{0,84} = 5,3 \text{ кВт};$$

$$N_{\text{полн}} = 5,3 \cdot 0,84 = 4,45 \text{ кВт};$$

$$M_{\text{вал.н}} = \frac{5,3 \cdot 1000}{151,84} = 34,9 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{пол.н}} = \frac{4,45 \cdot 1000}{151,84} = 29,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Точка 2 – точка работы вентилятора с номинальным КПД и минимальной скоростью вращения. Параметры т. 2 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора: $Q_{\text{т.2}} = 7000 \text{ м}^3/\text{ч}$; $p_{\text{т.2}} = 510 \text{ Па}$; $\eta_n = 84 \%$; $n_{\text{т.2}} = 925 \text{ об/мин}$ или $\omega_{\text{т.2}} = 96,86 \text{ рад/с}$. Расчетные параметры т. 2:

$$N_{\text{валт.2}} = 5,5 \cdot \frac{7000}{11100} \cdot \frac{510}{1310} \cdot \frac{0,84}{0,84} = 1,35 \text{ кВт};$$

$$N_{\text{пол т.2}} = 1,35 \cdot 0,84 = 1,134 \text{ кВт};$$

$$M_{\text{валт.2}} = \frac{1,35 \cdot 10^3}{96,86} = 13,94 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{пол т.2}} = \frac{1,134 \cdot 10^3}{96,86} = 11,71 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3.2 Выбор приводного двигателя

Для обеспечения оптимальной работы вентилятора в широком диапазоне технологических режимов крайне важно поддерживать приводной двигатель с номинальной мощностью, равной или немного превышающей мощность, передаваемую на вал вентилятора. В процессе настройки производительности вентилятора ключевая точка, известная как точка 1, которая представляет максимальную потребляемую мощность, указывает на выходную мощность 5,3 кВт на валу вентилятора. И наоборот, в ситуациях, когда необходимо поддерживать производительность при отрицательных температурах воздуха, точка 3 демонстрирует выходную мощность 4,2 кВт на валу вентилятора.

Согласно ссылке [3], электродвигатель 4A112M4 превосходит другие доступные варианты благодаря своей замечательной выходной мощности в 5,5 кВт и синхронной скорости вращения в 1500 об/мин. Двигатель 4A112M4 обладает характеристиками, которые делают его наилучшим выбором для применения в вентиляторах. Он обеспечивает оптимальную работу вентилятора во всем диапазоне его аэродинамических характеристик при нормальных атмосферных условиях. Подробные технические характеристики электродвигателя 4A112M4 можно найти в таблице 3.2.1. В этой таблице также содержится полная информация о параметрах, связанных с заменой этого двигателя.

Таким образом, выбор двигателя 4А112М4 обеспечивает оптимальную работу вентилятора, а необходимые данные можно найти в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1 - Технические данные электродвигателя

Типо-размер	n_0 , об/ми	$U_{1н}$, В	$P_{двн}$, кВт	При номинальной нагрузке			s_k , %	$J_{дв}$, кг · м ²
				s_n , %	$\cos\phi_n$	η_n , %		
4А112М4 У3	1500	380	5,5	3,6	0,85	85,5	25,0	0,017
$m_n = \frac{M_{пуск}}{M_n}$	$m_k = \frac{M_{макс}}{M_n}$	$m_m = \frac{M_{мин}}{M_n}$	$k_{идв} = \frac{I_{пуск}}{I_n}$	Степень защиты				
2,0	2,2	1,6	7,0	IP44				

Таблица 3.2.2 - Параметры схемы замещения электродвигателя

X'_μ , о.е.	R'_1 , о.е.	X'_1 , о.е.	R''_2 , о.е.	X''_2 , о.е.
2,8	0,054	0,078	0,041	0,13

В соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора ВР 80-75-6,3 (рисунок 1.2.1) рациональный интервал изменения скорости вращения приводного двигателя лежит в пределах от $n_{эп.макс} = n_n = 1450$ об/мин до $n_{мин} = 925$ об/мин (от $\omega_{эп.макс} = 151,84$ рад/с до $\omega_{эп.мин} = 96,86$ рад/с), что определяет диапазон регулирования скорости приводного двигателя

$$D_\omega = \frac{1450}{925} = 1,57 \quad (3.2.1)$$

3.2.1 Расчетные параметры электродвигателя

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,1 \text{ рад/с} \quad (3.2.2)$$

Номинальная частота вращения двигателя

$$n_{двн} = (1 - s_n) \cdot n_0 = (1 - 0,036) \cdot 1500 = 1446,0 \text{ об/мин} \quad (3.2.3)$$

или

$$\omega_{двн} = (1 - s_n) \cdot \omega_0 = (1 - 0,036) \cdot 157,1 = 151,4 \text{ рад/с} \quad (3.2.4)$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{двн} = \frac{P_{двн}}{\omega_{двн}} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{151,4} = 36,3 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.2.5)$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный и линейный ток статора:

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220, \text{ В} ; \quad (3.2.6)$$

$$I_{1фн} = I_{1лн} = \frac{P_{двн}}{3 \cdot U_{1фн} \cdot \cos \phi_n \cdot \eta_n} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,855} = 11,47 \text{ А} \quad (3.2.7)$$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске

$$I_{1\text{макс}} = k_{i_{дв}} \cdot I_{1лн} = 7,0 \cdot 11,47 = 80,3 \text{ А} \quad (3.2.8)$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике

$$M_k = m_k \cdot M_{двн} = 2,2 \cdot 36,3 = 79,9 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.2.9)$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске

$$M_{дв\text{пуск}} = m_n \cdot M_{двн} = 2 \cdot 36,3 = 72,6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.2.10)$$

3.2.2 Расчетные параметры схемы замещения электродвигателя

Параметры Т-образной схемы замещения рассчитываются по методике, изложенной в [13].

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = R'_1 \cdot \frac{U_{1фн}}{I_{1фн}} = 0,054 \cdot \frac{220}{11,47} = 1,036 \text{ Ом} \quad (3.2.11)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_{1\sigma} = X_1' \cdot \frac{U_{1\text{фн}}}{I_{1\text{фн}}} = 0,078 \cdot \frac{220}{11,47} = 1,497 \text{ Ом} \quad (3.2.12)$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{1,497}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 4,764 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.2.13)$$

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора

$$R_2' = R_2'' \cdot \frac{U_{1\text{фн}}}{I_{1\text{фн}}} = 0,041 \cdot \frac{220}{11,47} = 0,787 \text{ Ом} \quad (3.2.14)$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$X_{2\sigma}' = X_2'' \cdot \frac{U_{1\text{фн}}}{I_{1\text{фн}}} = 0,13 \cdot \frac{220}{11,47} = 2,494 \text{ Ом} \quad (3.2.15)$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{2\sigma}' = \frac{X_{2\sigma}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{2,494}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 7,939 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.2.16)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания при номинальном режиме

$$X_{\text{кн}} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' = 1,497 + 2,494 = 3,991 \text{ Ом} \quad (3.2.17)$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление)

$$X_{\mu} = X_{\mu}' \cdot \frac{U_{1\text{фн}}}{I_{1\text{фн}}} = 2,8 \cdot \frac{220}{11,47} = 53,721 \text{ Ом} \quad (3.2.18)$$

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

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{53,721}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,171 \text{ Гн.} \quad (3.2.19)$$

Полученные параметры Т-образной схемы замещения электродвигателя 4А112М4 сведены в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1 - Параметры схемы замещения электродвигателя 4А112М4

R_1 Ом	$X_{1\sigma}$ Ом	$L_{1\sigma}$ Гн	X_{μ} Ом	L_{μ} Гн	R'_2 Ом	$X'_{2\sigma}$ Ом	$L'_{2\sigma}$ Гн	$X_{кн}$ Ом
1,03 6	1,497	4,764 $\cdot 10^{-3}$	53,72 1	0,171	0,787	2,494	7,939 $\cdot 10^{-3}$	3,991

3.3 Механические характеристики вентилятора

Номинальный режим работы вентилятора соответствует максимальному значению полного КПД и характеризуется следующими параметрами (рисунок 3.1, т.1):

- номинальный КПД $\eta_n = 84\%$;
- номинальная скорость вращения $n_n = 1450$ об/мин или $\omega_n = 151,84$ рад/с;
- номинальная производительность $Q_n = 11000$ м³/ч;
- номинальное давление $p_n = 1270$ Па.

Выражение для механической характеристики вентилятора при работе с постоянным значением КПД η_i имеет следующий вид

$$M_{с\text{ вент } i}(\omega) = a_i \cdot M_{пол i} + (1 + b_i) \cdot M_{пол i} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^x, \quad (3.3.1)$$

где a_i и b_i – коэффициенты постоянных и переменных потерь вентилятора в режиме работы с постоянным значением η_i ;

$$a_i \cdot M_{\text{полн } i} = \Delta M_{\text{пост}} = \text{const} \quad (3.3.2)$$

– момент постоянных потерь на валу вентилятора.

Механическая характеристика вентилятора в режиме работы с номинальным КПД $\eta_n = 0,84$ (точки т. 1 – т. 2)

Из условия равенства постоянных и переменных потерь вентилятора в номинальном режиме работы (т. 1) определим значения коэффициентов потерь при работе вентилятора с $\eta_n = 0,84$ (точки работы т.1 – т.2) [14]

$$a_n = b_n = \frac{1-\eta_n}{2 \cdot \eta_n} = \frac{1-0,84}{2 \cdot 0,84} = 0,095. \quad (3.3.3)$$

Тогда момент постоянных потерь на валу вентилятора

$$\Delta M_{\text{пост}} = a_n \cdot M_{\text{полн } n} = 0,095 \cdot 29,3 = 2,78 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.3.4)$$

Из условия

$$M_{\text{вал т.2}} = \Delta M_{\text{пост}} + (1 + b_n) \cdot M_{\text{полн}} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{т.2}}}{\omega_n} \right)^x \quad (3.3.5)$$

после подстановки численных значений

$$13,94 = 2,78 + (1 + 0,95) \cdot 29,3 \cdot \left(\frac{96,86}{151,84} \right)^x \quad (3.3.6)$$

и решения уравнения относительно x определим значение показателя степени механической характеристики вентилятора при регулировании производительности с номинальным значением КПД $\eta_n = 0,84$

$$x = 2,35.$$

В результате получаем общее выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с номинальным значением КПД $\eta_n = 0,84$

$$M_{c \text{ вент}}(\omega) = 2,78 + (1 + 0,095) \cdot 29,3 \cdot \left(\frac{\omega}{151,84}\right)^{2.35} \quad (3.3.7)$$

Механические характеристики вентилятора, рассчитанные по выражению (1.1) приведены на рисунке 3.3.1.

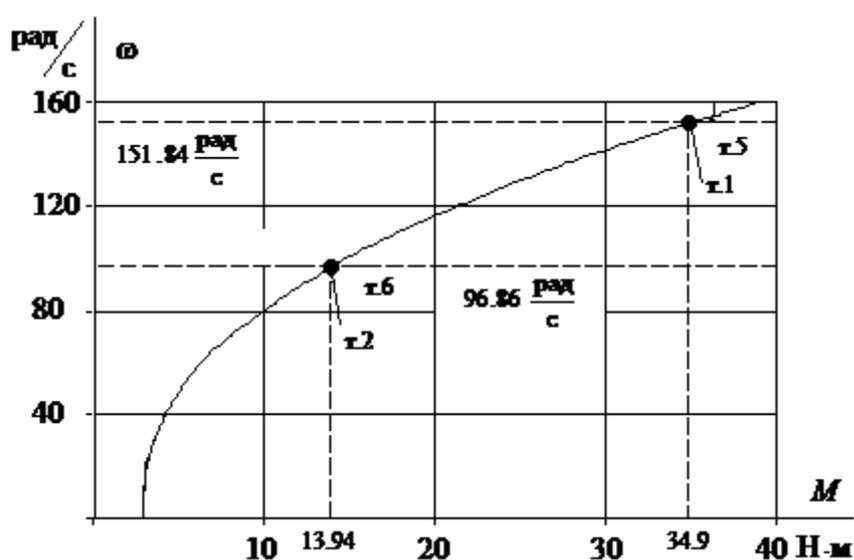


Рисунок 3.3.1 - Механические характеристики вентилятора

$$M_{c \text{ вент}} = f(\omega)$$

Эквивалентный момент инерции электропривода

$$J_{\text{э}} = 1,1 \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{вент}} = 1,1 \cdot 0,017 + 0,16 = 0,179 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

(3.3.8)

3.4 Предельные характеристики разомкнутой системы

преобразователь – двигатель

Границы, определяющие рабочий диапазон электропривода, устанавливаются ограничительными характеристиками, присущими системе преобразователь-электродвигатель. Эти характеристики, действующие как ограничения, определяют степень работы электропривода, охватывая как максимально достижимую или допустимую скорость, так и долговременные или кратковременные токи в электрической системе или моменты в механической системе электропривода.

В системе преобразователь частоты с разомкнутой цепью - асинхронный электродвигатель внутренние механические и электромеханические характеристики приводного двигателя играют роль ограничивающих атрибутов. Эти атрибуты, служащие ограничениями, регулируют работу электропривода и определяют его возможности в отношении максимально допустимой или достижимой скорости, а также допустимых значений токов в электрической системе или моментов в механической системе электропривода.

Естественная механическая характеристика двигателя

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя $\omega(M)$ рассчитывается по выражениям:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1н}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} =$$
$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,787}{157,1 \cdot s \cdot \left[3,991^2 + \left(1,036 + \frac{0,787}{s} \right)^2 + \left(\frac{1,036 \cdot 0,787}{s \cdot 53,721} \right)^2 \right]}; \quad (3.4.1)$$

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

Естественная механическая характеристика $\omega(M)$ электродвигателя 4А112М4 приведена на рисунке 3.4.1.

Механическая характеристика полной нагрузки на валу двигателя

Для точного определения механических характеристик двигателя становится необходимым учитывать электромагнитный крутящий момент, а также учитывать полную нагрузку, оказываемую на вал двигателя, которая включает в себя не только внешние силы, но и присущий двигателю крутящий момент трения. Важнейшее предположение, которое можно сделать, заключается в том, что момент, вызванный силами трения, действующими на вал электродвигателя, остается постоянным и равномерным во всех режимах работы, что позволяет проводить согласованные расчеты и прогнозы.

$$M_{сдв} = M_{эмн} - M_{двн} = 37,4 - 36,3 = 1,1 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.4.2)$$

где

$$\begin{aligned} M_{эмн} &= \frac{3 \cdot U_{1\phi н}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_n \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_n \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,787}{157 \cdot 0,036 \cdot \left[3,991^2 + \left(1,036 + \frac{0,787}{0,036} \right)^2 + \left(\frac{1,036 \cdot 0,787}{0,036 \cdot 3,991} \right)^2 \right]} \\ &= 37,4 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

– номинальный электромагнитный момент двигателя.

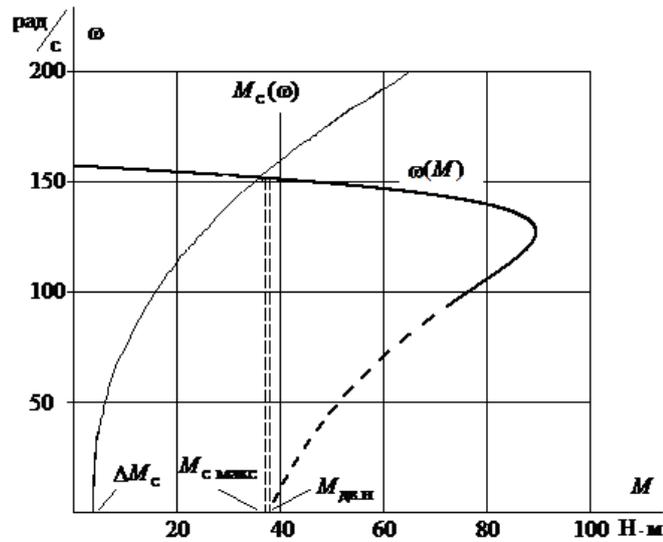


Рисунок 3.4.1 - Естественная механическая характеристика двигателя $\omega(M)$ и характеристики полного момента сопротивления на валу двигателя: $M_c(\omega)$: $M_{эм.н} = 37,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{эм.макс} = 89,58 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $s_k = 19\%$; $M_{эм.пуск} = 37,78 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{c \text{ макс}} = 37,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $\Delta M_c = 3,88 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

Тогда выражение для механической характеристики полного момента сопротивления на валу электродвигателя в общем случае имеет вид

$$M_{ci}(\omega) = \Delta M_c + (1 + b_i) \cdot M_{пол i} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^{x_i}, (3.4.3)$$

где $\Delta M_c = M_{c \text{ дв}} + \Delta M_{\text{пост}} = 1,1 + 2,78 = 3,88 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – момент сопротивления от сил трения, приведенный к валу двигателя.

На изображении 3.3 семейство механических характеристик полного момента сопротивления на валу двигателя, которые соответствуют механическим характеристикам вентилятора, изображенным на рисунке 3.2.

Для дальнейших расчетов мы ограничимся только одной механической характеристикой вентилятора, которая соответствует режиму регулирования производительности с номинальным значением КПД.

$$\eta_{\text{н}} = 0.84 \text{ (рисунок 1.2, точки г. 1 – г. 2)}$$

$$M_c(\omega) = 3.88 + (1 + 0.095) \cdot 29.3 \cdot \left(\frac{\omega}{151.84}\right)^{2.35}. \quad (3.4.4)$$

Естественные электромеханические характеристики двигателя

Естественная электромеханическая характеристика $I'_2 = f(\omega)$ двигателя рассчитывается по выражениям:

$$\begin{aligned} I'_2(s) &= \frac{U_{1\text{фн}}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} = \\ &= \frac{220}{\pm \sqrt{\left(1,036 + \frac{0,787}{s}\right)^2 + 3,991^2 + \left(\frac{1,036 \cdot 0,787}{s \cdot 53,721}\right)^2}}; \quad (3.4.5) \end{aligned}$$

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

Естественная электромеханическая характеристика $I_1 = f(\omega)$ двигателя рассчитывается по выражениям

$$\begin{aligned} I_1(s) &= \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \phi_2(s)} = \\ &= \sqrt{4,895^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot 4,895 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \phi_2(s)} \quad (3.4.6) \end{aligned}$$

$$\text{где } I_0 = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{1,036^2 + (1,497 + 53,721)^2}} = 3,984 \text{ A,}$$

$$\sin \phi_2(s) = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2}} = \frac{3,132}{\sqrt{\left(1,036 + \frac{0,787}{s}\right)^2 + 3,991^2}};$$

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

Естественные электромеханические характеристики двигателя $I_1 = f(\omega)$ и $I_2' = f(\omega)$ приведены на рисунке 3.4.2.

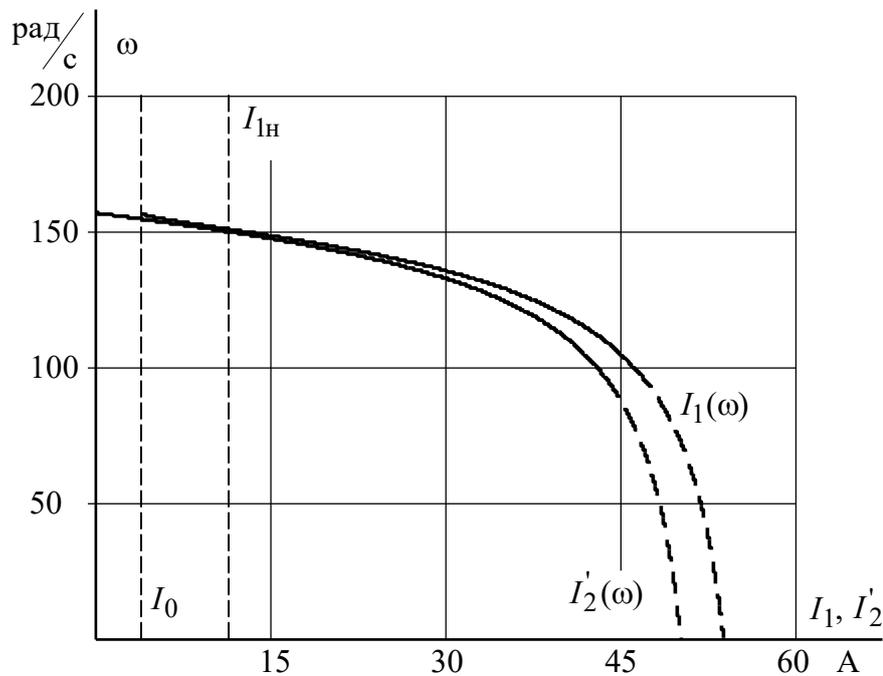


Рисунок 3.4.2. - Естественные электромеханические характеристики двигателя $I_1 = f(\omega)$ и $I_2' = f(\omega)$: $I_{\text{смакс}} = 10,6 \text{ A}$; $I_0 = 3,984 \text{ A}$; $I_{1\text{н}} = 10,88 \text{ A}$; $I_{1\text{макс}} = 53,79 \text{ A}$;

Оценка достоверности расчетных характеристик двигателя

В результате расчета естественных характеристик двигателя получены следующие параметры для их характерных точек: $s_{\text{н}} = 3,6\%$;

$$s_k = 19\%; I_{1H} = 10,88 \text{ A}; I_{1\text{макс}} = 53,79 \text{ A}; I_{1\text{макс}}/I_{1H} = 4,94; M_{\text{эм.н}} = 37,4 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_{\text{эм.макс}} = 89,58 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_{\text{эм.макс}}/M_{\text{эм.н}} = 2,39; M_{\text{эм.пуск}} = 37,78 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_{\text{эм.пуск}}/M_{\text{эм.н}} \approx 1.$$

Справочные и расчетные параметры двигателя: $s_H = 3,6\%$; $s_k = 25\%$; $I_{\text{дв.н}} = 11,47 \text{ A}$; $I_{\text{дв.макс}}/I_{\text{дв.н}} = 7$; $M_{\text{дв.н}} = 36,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{дв.макс}}/M_{\text{дв.н}} = 2,2$; $M_{\text{дв.пуск}}/M_{\text{дв.н}} = 2$. Из сравнения расчетных параметров характеристик двигателя со справочными параметрами следует, что расчетные характеристики с допустимой точностью (погрешность в пределах $\pm 10\%$) совпадают только на участке скольжения от $s = 0$ до $s = s_k$.

3.5 Проверка обеспечения заданной области работы электропривода

Из представленных на рисунках 3.4.1 и 3.4.2 характеристик следует, что электродвигатель 4A112M4 демонстрирует все необходимые параметры для обеспечения требуемых результатов. Он обеспечивает достижение заданного значения максимальной скорости вентилятора ВР 80-75-6,3, что составляет $\omega_n = 151,84$ "рад/с". Кроме того, данный электродвигатель способен работать стабильно и длительно при максимальном моменте нагрузки, а также обладает перегрузочной способностью, превышающей двукратное значение момента.

Выводы. 1. Двигатель с выбранным по диаграмме рисунком 3.1 значением постоянной мощности $N_y = \text{const}$ может при нормальных атмосферных условиях обеспечить все режимы работы вентилятора в заданной области аэродинамических характеристик вентилятора, располагаемые ниже этой кривой. Тогда для нормальных атмосферных

условий номинальную мощность приводного двигателя вентилятора достаточно выбрать из условия

$$P_{\text{дв.н}} = N_y. \quad (3.5.1)$$

2. При отличии фактической температуры воздуха на входе вентилятора от нормальной температуры плотность воздуха так же будет отличаться от нормальной плотности, что сопровождается изменением потребляемой двигателем энергии при неизменной производительности вентилятора и тогда мощность двигателя при $t_{\text{факт}} < t_n$ необходимо увеличить, а при $t_{\text{факт}} > t_n$ может оказаться возможным уменьшить в соответствии с условием

$$P_{\text{дв.н}} \geq N_y \cdot \frac{273+t_n}{273+t_{\text{факт}}}.$$

4 Выбор преобразователя частоты и способа управления

4.1 Выбор преобразователя частоты

В соответствии с рекомендациями, изложенными в справке [6], настоятельно рекомендуется использовать преобразователи серии VLT 2855 компании Danfoss для создания сложной и адаптируемой системы привода асинхронных электрических вентиляторов.

В соответствии с условием

$$I_{\text{щк}} \geq I_{1\text{лн}} = 11.47 \text{ A} \quad (4.1.1)$$

выбираем преобразователь частоты модели VLT 2855, параметры которого приведены в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1 - Параметры преобразователя частоты

Модель	Число фаз на входе	$U_{in}, В$	$I_{ном}, А$	$I_{max}, А$	Рекомендуемая мощность двигателя, кВт
2855	3	380 ± 480	12	19.2	5,5

Общие технические данные преобразователя частоты серии VLT2855:

- несущая частота 3000–14000 Гц;
- частотный диапазон 0,2–132 Гц;
- разрешение по выходной частоте 0,013 Гц;
- питающая сеть: 380–480В±10%; 48–62 Гц, 3 фазы;
- коэффициент мощности 0,9/1 при номинальной нагрузке;
- перегрузка по току: 160% в течение 1 минуты и 180% в течение 0,5 с;
- диапазон регулирования в разомкнутой системе 1:10.

Защиты:

- электронная тепловая защита двигателя от перегрузки;
- температурный контроль радиатора;
- защита преобразователя 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:

- максимальная относительная влажность 5% – 93%;
- максимальная температура 45 °С,
- максимальная средняя температура за 24 часа 40 °С;
- минимальная температура при работе с максимальной производительностью 0 °С.

Степень защиты корпуса преобразователя IP 20.

Схема подключения преобразователя частоты приведена на рисунке 4.1.1.

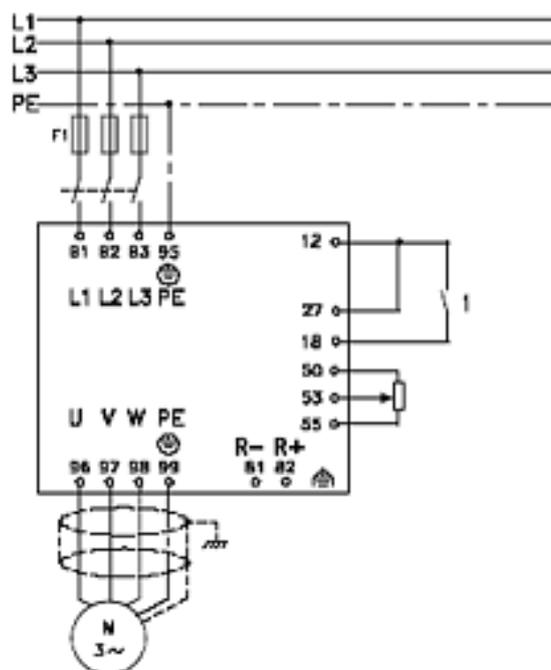


Рисунок 4.1.1. - Схема подключения преобразователя частоты

4.2 Выбор закона частотного регулирования

Чтобы учесть ограниченный диапазон регулирования скорости в вентиляторных системах и отсутствие необходимости в повышенных пусковых и максимальных моментах в таких механизмах, предлагается использовать следующие законы управления: $U_1/f_1 = const$ и $U_1/f_1^2 = const$. Хотя второй закон требует более сложной реализации, он эффективно снижает энергопотребление за счет дополнительного снижения напряжения от источника питания. Чтобы облегчить достижение требуемого пускового момента на более низких скоростях, крайне важно обладать возможностью точной настройки вольт-частотной характеристики. При определении параметров этой характеристики важно учитывать, что более низкие частоты соответствуют значениям напряжения, которые превышают те, которые предусмотрены выбранным законом регулирования.

4.3 Расчет статических характеристик системы

преобразователь – двигатель при частотном регулировании

4.3.1 Закон частотного регулирования $U_1/f_1^2 = const$

Вольт-частотная характеристика преобразователя при законе регулирования $U_1/f_1^2 = const$, рассчитанная по выражению

$$U_1(f_1) = U_{1\text{фн}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2, \quad (4.3.1)$$

приведена на рисунке 4.3.1 (характеристика 1).

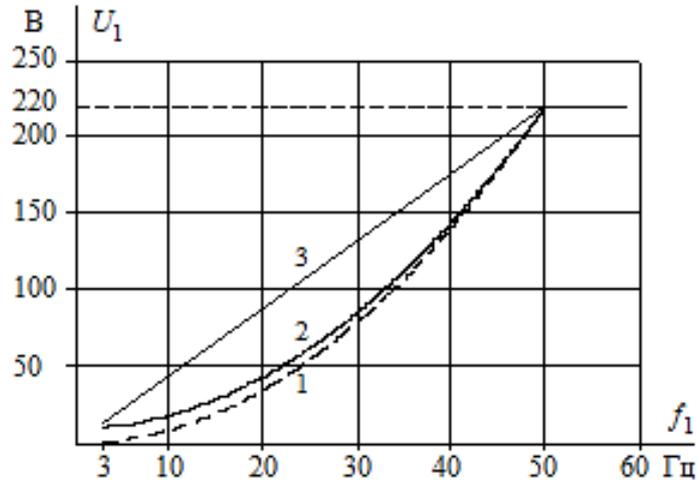


Рисунок 4.3.1. Вольт-частотная характеристика преобразователя: 1 - при законе регулирования $U_1/f_1^2 = const$; 2 - при законе регулирования $U_1/f_1^2 = const$ в соответствии с (4.3.4); 3 - при законе регулирования $U_1/f_1 = const$

Определение интервала частот инвертора

Чтобы определить верхнюю частоту инвертора, которая соответствует номинальному режиму работы вентилятора, представленному t.1 на рис. 3.1, проводится серия вычислений, чтобы убедиться, что вентилятор достигает заданной номинальной частоты вращения $\omega_n = 151.84$ рад/с. Эта попытка требует одновременного решения уравнений, определяющих механические характеристики двигателя и нагрузки (3.4.4), с целью определения значения частоты f_1 .

$$\begin{aligned}
 & \frac{3 \cdot [U_1(f_1)]^2 \cdot R_2'}{\left(\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} - \omega \right) \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} - \omega} \cdot \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 \right]} = \\
 & = \Delta M_c + (1 + b_n) \cdot M_{пол.н} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^{2.35}, \quad (4.3.2)
 \end{aligned}$$

Чтобы установить соответствующие значения частоты для инвертора, мы проводим ряд расчетов и соображений. Во-первых, максимальная частота инвертора, обозначаемая как $f_{u\text{макс}}$ и представленная $f_{1н}$, определяется путем выбора ближайшего целого значения, которое в данном случае равно 50 Гц. Аналогично, минимальная частота инвертора, обозначаемая как $f_{p\text{мин}}$ получается путем решения уравнения (4.3.2) с учетом минимальной рабочей скорости вентилятора, представленной $\omega_{p\text{мин}}$ и $\omega_{т.2}$ соответственно, что приводит к значению 33 Гц. Кроме того, чтобы обеспечить желаемую пусковую характеристику, мы устанавливаем минимальную частоту инвертора как $f_{u\text{мин}} = 5$ Гц..

Переходя к механическим характеристикам системы преобразователь-двигатель, мы рассмотрим закон регулирования $U_1/f_1^2 = const$. В пределах определенного диапазона значений выходной частоты, от 5 до 50 Гц, мы переходим к расчету механических характеристик разомкнутой системы, состоящей из преобразователя частоты и асинхронного двигателя, обозначаемых $\omega(M)$. Эти расчеты выполняются с использованием набора формул, специально разработанных для этой цели.

$$M(s, f_1) = \frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} \cdot s \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1н}}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot 0,787}{157,1 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot s \cdot \left[\left(3,99 \cdot \frac{f_1}{50} \right)^2 + \left(1,036 + \frac{0,787}{s} \right)^2 + \left(\frac{1,036 \cdot 0,787}{s \cdot 53,721 \cdot \frac{f_1}{50}} \right)^2 \right]}, \quad (4.3.3)$$

$$\text{где } U_1(f_1) = U_{1\phi_n} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2 = 220 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2;$$

$$\omega(s, f_1) = 157,1 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot (1 - s).$$

Благодаря всестороннему изучению механических характеристик системы преобразователь-двигатель при колебаниях частоты был скрупулезно сконструирован обширный набор этих характеристик, что привело к появлению разнообразного семейства кривых. Эти характерные кривые, визуально изображенные на рисунке 4.3.2, дают бесценную информацию о сложном поведении и взаимодействии внутри системы. Тем не менее, было установлено, что применение закона регулирования $U_1/f_1^2 = const$ представляет собой серьезную проблему при попытке запустить электропривод, в частности, когда начальная частота инвертора, обозначаемая как $f_{и.мин}$ была установлена на уровне 5 Гц. Этот бросающийся в глаза вывод наглядно проиллюстрирован на рисунке 4.3, где представлен всесторонний анализ механических характеристик электропривода в сочетании с соответствующей нагрузкой.

Следовательно, для достижения двукратного пускового момента был применен разумный и основанный на опыте процесс выбора для определения оптимальных параметров для начального сегмента вольт-частотной характеристики преобразователя. Этот тщательный процесс выбора позволил получить конкретные параметры для начальной секции, как визуально показано на рисунке 4.3.2: $U_{1мин}$ было намеренно установлено на 10 В, в то время как $f_{и.мин}$ было точно обозначено как 3 Гц. В результате результирующая вольт-частотная характеристика по своей сути воплощает функциональную зависимость, полученную в

результате процедуры эмпирического выбора параметра для начального сегмента вольт-частотной характеристики преобразователя.

$$U_1(f_1) = U_{1\text{мин}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{мин}}) \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2 \quad (4.3.4)$$

и приведена на рисунке 4.3.2 (характеристика 2).

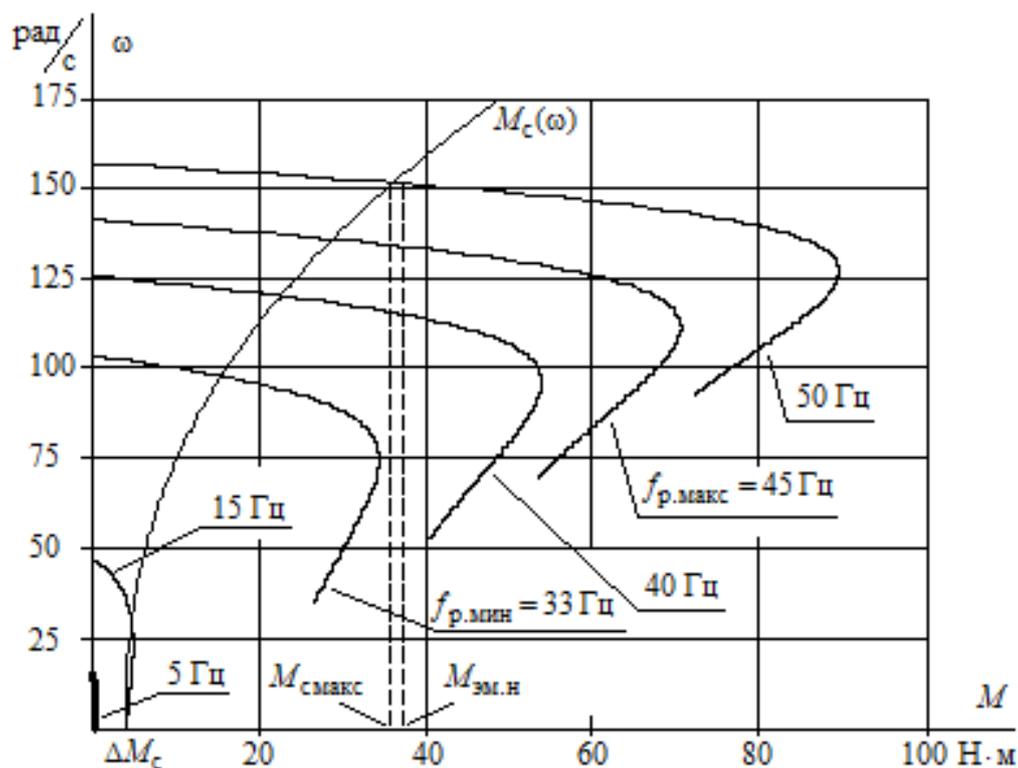


Рисунок 4.3.2. Механические характеристики $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$: $\Delta M_c = 3,88 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{смакс}} = 36 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{эм.н}} = 37,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Механические характеристики системы ПС - ЭП, полученные в результате настройки вольт частотной характеристики в соответствии с выражениями (4.3.3) и методом, описанным в (4.3.4), представлены на рисунке 4.3.3.

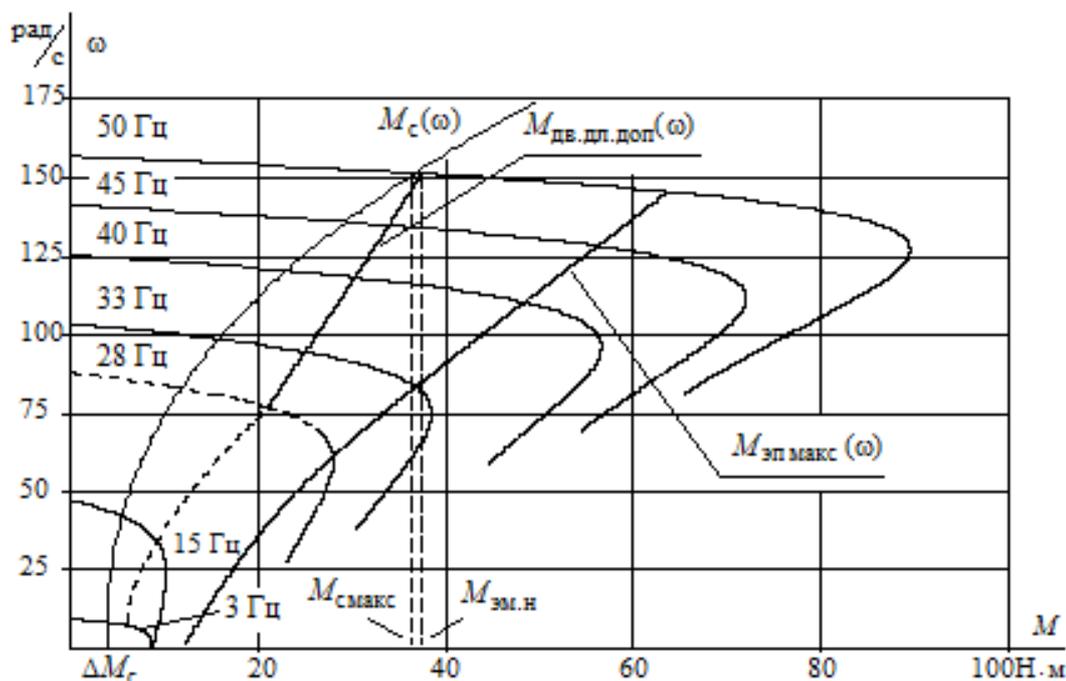


Рисунок 4.3.3. Механические характеристики $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с (4.3.4): $\Delta M_c = 3,88 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{с макс} = 36 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{эм.н} = 37,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Поведение системы преобразователь-двигатель, с точки зрения ее электромеханических свойств, определяется законом регулирования, обозначаемым как $U_1/f_1^2 = const$. Как только частотно-напряженная характеристика преобразователя будет точно настроена в соответствии с уравнением (1.7), электромеханические характеристики $I_1 = f(\omega)$ системы разомкнутый преобразователь частоты -асинхронный двигатель могут быть получены путем вычисления зависимости между током I_1 и угловой скоростью ω для заданных значений частоты. Эти характеристики могут быть математически выражены с помощью ряда уравнений, которые точно описывают взаимозависимость между током I_1 и угловой скоростью ω .

$$I_1(s, f_1) = \sqrt{I_0^2(f_1) + I_2'^2(s, f_1) + 2 \cdot I_0(f_1) \cdot I_2'(s, f_1) \cdot \sin \phi_2(s, f_1)}; \quad (4.3.5)$$

$$I_0(f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{1,036^2 + (1,497 + 53,721)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}}; \quad (4.3.6)$$

$$I_2'(s, f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(1,036 + \frac{0,787}{s}\right)^2 + \left(3,99 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{1,036 \cdot 0,787}{s \cdot 53,721 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}\right)^2}}; \quad (4.3.7)$$

$$\sin \phi_2(s, f_1) = \frac{X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{3,99 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}{\sqrt{\left(1,036 + \frac{0,787}{s}\right)^2 + \left(3,99 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}}, \quad (4.3.8)$$

где

$$U_1(f_1) = U_{1\text{мин}} + (U_{1\phi_H} - U_{1\text{мин}}) \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 = 10 + (220 - 10) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2,$$

$$\omega(s, f_1) = 157,1 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot (1 - s).$$

С использованием результатов расчета, на рисунке 4.3.4 было построено семейство электромеханических характеристик $I_1 = f(\omega)$ для системы преобразователь-двигатель.

Определение области работы электрифицированного агрегата

На рисунке 4.3.5 дополнительно построена характеристика длительно допустимого тока двигателя $I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$:

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{двн}} \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{двн}}} \right) \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{двн}};$$

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{двн}} \text{ при } \omega > 0,5 \cdot \omega_{\text{двн}}, \quad (4.3.9)$$

а на рисунке 4.3.5 в области рабочих скоростей вентилятора построена соответствующая ей зависимость длительно допустимого момента двигателя $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$.

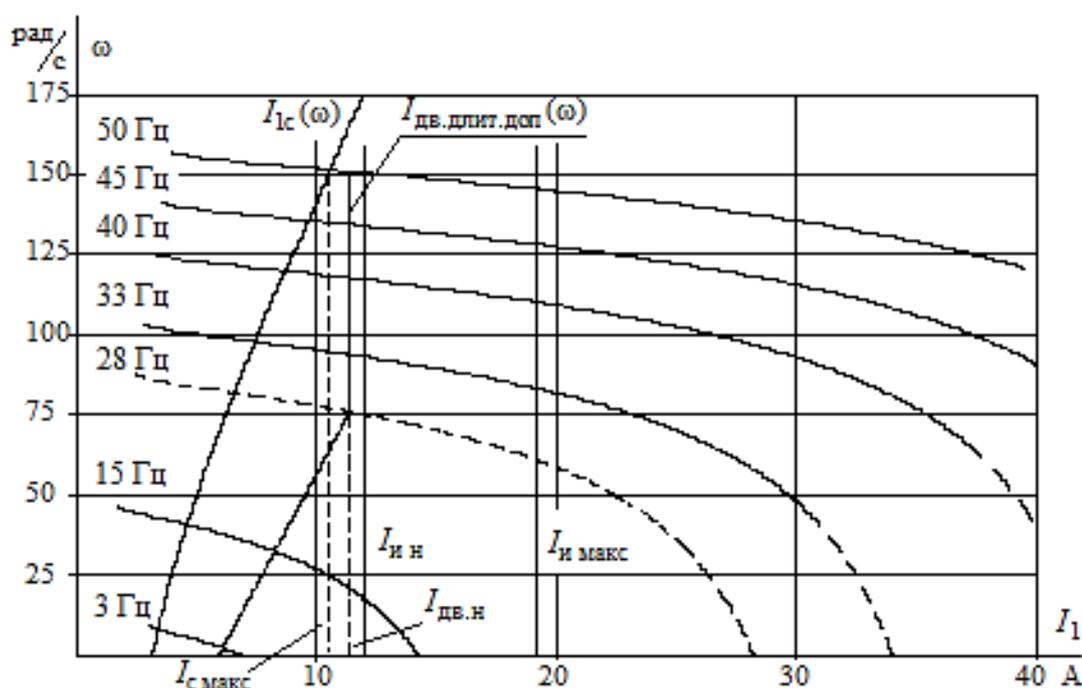


Рисунок 4.3.4- Электромеханические характеристики электропривода $I_1 = f(\omega)$ при скалярном управлении после настройки вольт-частотной характеристики в соответствии с (3.6): $I_{\text{смакс}} = 10,6 \text{ A}$; $I_{\text{дв.н}} = 11,47 \text{ A}$; $I_{1\text{н}} = 10,88 \text{ A}$; $I_{\text{лнн}} = 12 \text{ A}$; $I_{\text{лмакс}} = 19,2 \text{ A}$

Для её построения для ряда значений частоты в интервале $f_1 = f_{и.мин} \div f_{и.макс}$ произведено совместное относительно скольжения s численное решение уравнений:

$$I = \sqrt{I_0^2(f_1) + \frac{U_1^2(f_1)}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1н}}}\right)^2}} \times \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{X_{кн} \cdot f_1}{f_{1н}}\right)^2}} \cdot \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{X_{кн} \cdot f_1}{f_{1н}}\right)^2}}; \quad (4.3.10)$$

$$I = I_{двн}, \quad (4.3.11)$$

Используя определенные значения скольжения, вычисляются соответствующие долгосрочные допустимые значения крутящего момента двигателя в диапазоне скоростей $0.5 \cdot \omega_{дв.н} \leq \omega \leq \omega_{дв.н}$ с использованием уравнения (4.3.3). Эти вычисления крутящего момента основаны на совместном численном решении уравнений, определяющих механические характеристики двигателя и нагрузки, обеспечивающие точные значения скольжения.

Характерное поведение суммарного момента нагрузки $m_c(\omega)$ визуально показано на рисунке 4.4, иллюстрирующем его общую тенденцию. Одновременно на рисунке 4.5 представлена соответствующая зависимость тока статической нагрузки $I_c(\omega)$, вычисленная с помощью выражений (4.3.5) – (4.3.8), в диапазоне частот $f_1 = f_{и.мин} \div f_{и.макс}$. Эти вычисления выполняются с использованием идентифицированных скользких значений s , которые были получены в ходе вышеупомянутого процесса совместного численного решения.

$$\begin{aligned}
& \frac{3 \cdot U_1^2(f) \cdot R_2'}{\left(\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_H} \right) \cdot s \cdot \left[\left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_H} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_H}} \right)^2 \right]} = \\
& = \Delta M_c + (1 + b_H) \cdot M_{\text{пол.н}} \cdot \left[\frac{\omega_0 \cdot \frac{f_1 \cdot (1-s)}{f_H}}{\omega_H} \right]^{2.35} \quad (4.3.12)
\end{aligned}$$

Кроме того, на рисунке 4.3.5 построена зависимость $M_{\text{эл.макс}}(\omega)$, соответствующая максимальному току преобразователя $I_{\text{и.макс}}$. Для этого в интервале частот $f_1 = f_{\text{и.мин}} \div f_{\text{и.макс}}$ определены значения скольжения s , соответствующие совместному численному решению уравнения (1.13) и уравнения $I = I_{\text{и.макс}} = 19.2$ А. Для найденных значений скольжения s по выражению (4.3.3) определены соответствующие значения максимального момента электропривода.

При изучении рисунков 4.3.5 и 4.3.6 углубленный анализ электропривода и характеристик нагрузки позволяет сделать важные выводы. Реализуя закон регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и тщательно регулируя частотно-напряженную характеристику, как указано в уравнении (4.3.4), система асинхронного привода демонстрирует похвальные возможности. Примечательно, что это демонстрирует возможность запуска вентилятора при начальной частоте инвертора, $f_{\text{и.мин}} = 3$ "Гц". Кроме того, он демонстрирует заданный диапазон для точного регулирования скорости, позволяя оптимально регулировать частоту вращения вентилятора. Кроме того, система асинхронного привода доказывает свою устойчивость, выдерживая нагрузку, превышающую максимальный порог минимум в два раза во всем диапазоне регулирования скорости, что подчеркивает ее надежность и адаптивность.

Проведём моделирование переходных процессов для закона регулирования.

5 Имитационное моделирование асинхронного частотно-регулируемого электропривода

5.1 Структурная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и вентиляторной нагрузкой

В стремлении решить проблемы, связанные с проектированием и последующим исследованием асинхронного электропривода вентилятора, было принято решение использовать комплексную структурную схему. Эта структурная схема, визуально изображенная на рис. 5.1.1, охватывает эквивалентный двухфазный асинхронный электродвигатель с герметичным коротким ротором, работающий в стационарной системе координат. Примечательно, что эта структурная схема включает в себя не только сам электродвигатель, но и нагрузку на вентилятор, что обеспечивает целостное представление взаимосвязанных компонентов, задействованных в системе.

На рисунке 5.1.1 можно увидеть расположение компонентов данной структурной схемы, которая представляет собой неподвижную систему. Важными входными величинами на этой схеме являются фазовые напряжения обмоток статора двухфазного электродвигателя переменного тока. Эти напряжения играют ключевую роль в функционировании электропривода и его взаимодействии с вентиляторной нагрузкой.

Таким образом, выбранная структурная схема двухфазного асинхронного электродвигателя с замкнутым коротким ротором в неподвижной системе координат представляет собой основу для решения

поставленных задач, связанных с проектированием и исследованием электропривода вентилятора.

$$u_{1\alpha}(t) = U_{1m} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t); \quad u_{1\beta}(t) = U_{1m} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) \quad (5.1.1)$$

Параметры звеньев структурной схемы двигателя

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{\mu} = 4.764 \cdot 10^{-3} + 0.171 = 0.17576 \text{ Гн} \quad (5.1.2)$$

– ротора

$$L_2 = L'_{2\sigma} + L_{\mu} = 7.939 \cdot 10^{-3} + 0.171 = 0.17894 \text{ Гн} \quad (5.1.3)$$

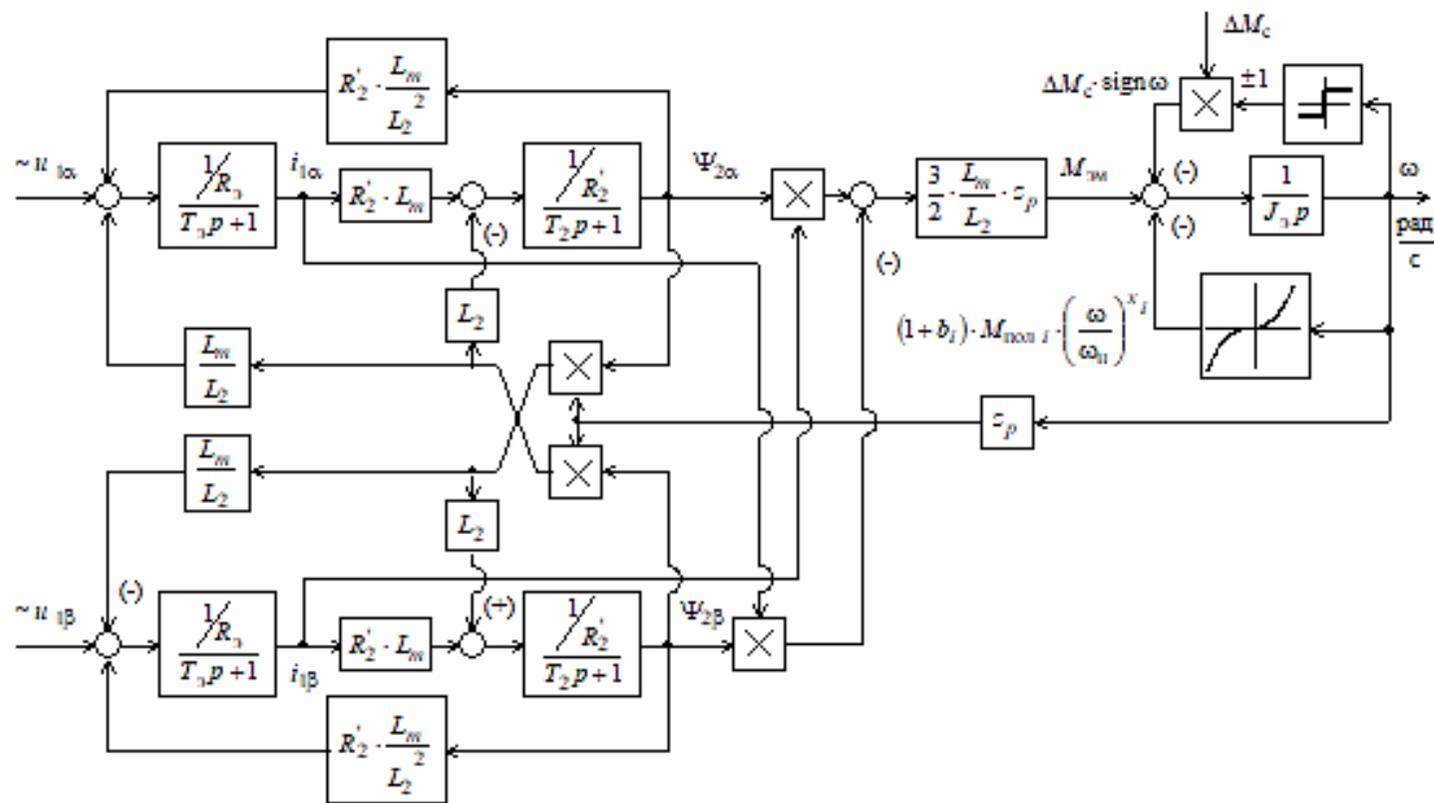


Рисунок 5.1.1 Структурная схема асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора α, β с вентиляторной нагрузкой

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0.171^2}{0.1758 \cdot 0.1789} = 0.07 \quad (5.1.4)$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2} = 1.036 + 0.787 \cdot \frac{0.171^2}{0.1789^2} = 1.754 \text{ Ом} \quad (5.1.5)$$

Электромагнитные постоянные времени

$$T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3} = \frac{0.07 \cdot 0.1758}{1.754} = 0.007 \text{ с} \quad (5.1.6)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0.1789}{0.787} = 0.2275 \text{ с} \quad (5.1.7)$$

Для проведения исследований процессов, связанных с частотным регулированием, мы применяем метод имитационного моделирования. Эти исследования проводятся как в самом электродвигателе, так и в системе регулируемого электропривода вентилятора. Для моделирования электромеханических систем мы используем программную среду Matlab/Simulink, которая является основным инструментом в нашей работе [3, 4, 10].

5.2 Имитационная модель силового канала электропривода

Схема набора имитационной модели силового канала электропривода с двухфазным асинхронным двигателем и вентиляторной нагрузкой приведена на рисунке 5.2.1.

В состав имитационной модели рисунке 5.2 входят:

- суперблок формирователя фазных напряжений;
- суперблок двухфазного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат α, β ;
- суперблок одномассовой механической системы;

– блок формирования нагрузки вентиляторного характера, реализованный с помощью стандартного блока *Fcn* библиотеки *Simulink/User-Defined Function*.

Имитационная модель формирователя фазных напряжений

По данным выражениям происходит формирование напряжений статорных обмоток. Все происходит в неподвижной системе координат.

Схема, изображающая процесс формирования фазных напряжений, представлена на рисунке 5.3. Эта схема является основой для имитационной модели формирователя фазных напряжений, которая служит инструментом для визуализации и анализа данного процесса

$$\begin{aligned} u_{1\alpha}(t) &= \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t); \\ u_{1\beta}(t) &= \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t), \end{aligned} \quad (5.2.1)$$

где значение напряжения U_1 определяется в соответствии с выбранной настройкой вольт-частотной характеристики.

Вольт-частотная характеристика формируется с помощью стандартного блока *Lookup Table* или блока *Fcn* в соответствии с выражениями:

$$U_{1\text{нач}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{нач}}) \cdot \frac{f_1^2}{f_{1н}^2} = 10 + (220 - 10) \cdot \frac{x^2}{50^2} \text{ В} \quad (5.2.2)$$

– при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с (4.3.4);

Параметры блоков формирования синусоидальной функции имитационной модели рисунок 5.3:

Sine Wave Function:

– *Amplitude* 1

– *Frequency, rad/sec* 1,

– *Phase, rad* 0;

Sine Wave Function1:

– *Amplitude* 1,

– *Frequency, rad/sec* 1,

– *Phase, rad* $90 \cdot \frac{\pi}{180}$.

Постоянная времени преобразователя

$$T_u = \frac{1}{f_u} = \frac{1}{8 \cdot 10^3} = 0.000125 \text{ с} \quad (5.2.4)$$

На вход 1 схемы рис. 5.2.3 подается значение начальной частоты $f_{\text{и.нач}}$, на вход 2 – сигнал задания скорости (частоты) $N_{\text{зс}}$.

Коэффициент преобразования сигнала задания $N_{\text{зс}}$ в частоту выходного напряжения инвертора $f_{\text{и.зад}} = f_{1 \text{ зад}}$ определяется соотношением

$$k_{Nf} = \frac{f_{\text{и.макс}} - f_{\text{и.мин}}}{N_{\text{зс.макс}}} = \frac{50 - 0}{1} = 50, \text{ Гц}, \quad (5.2.5)$$

где принято $N_{\text{зс.макс}} = 1$.

Имитационная модель двухфазного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат

На основе структурной схемы рисунок 5.1.1 мы разработали имитационную модель двухфазного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат α, β . Данная модель была воплощена в виде рисунка 5.2.2, который отображает все основные аспекты этого двигателя и его функционирования.

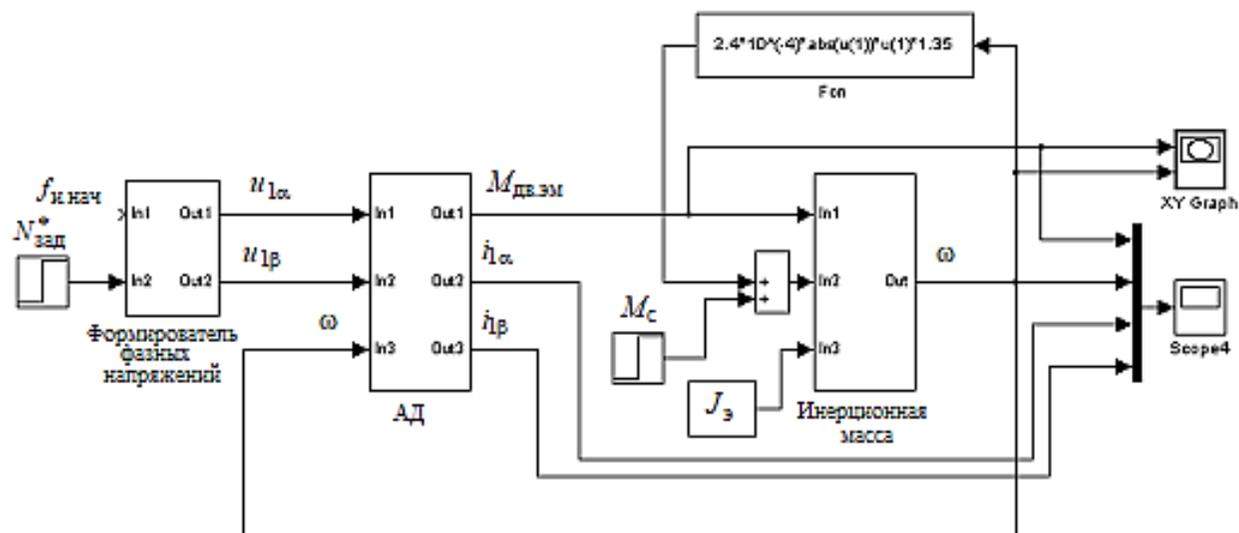


Рисунок 5.2.1 Имитационная модель силового канала электропривода с двухфазным асинхронным двигателем в неподвижной системе координат, одномассовой механической системой и вентиляторной нагрузкой

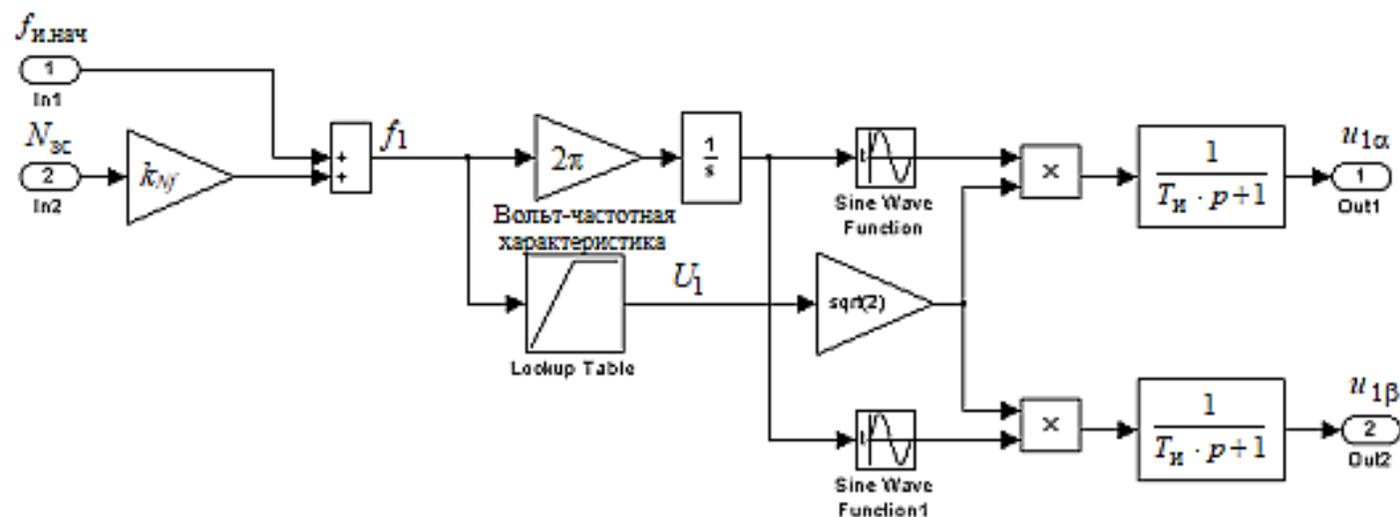


Рисунок. 5.2.3 Имитационная модель формирователя фазных напряжений статорных обмоток двухфазного двигателя в неподвижной системе координат α, β

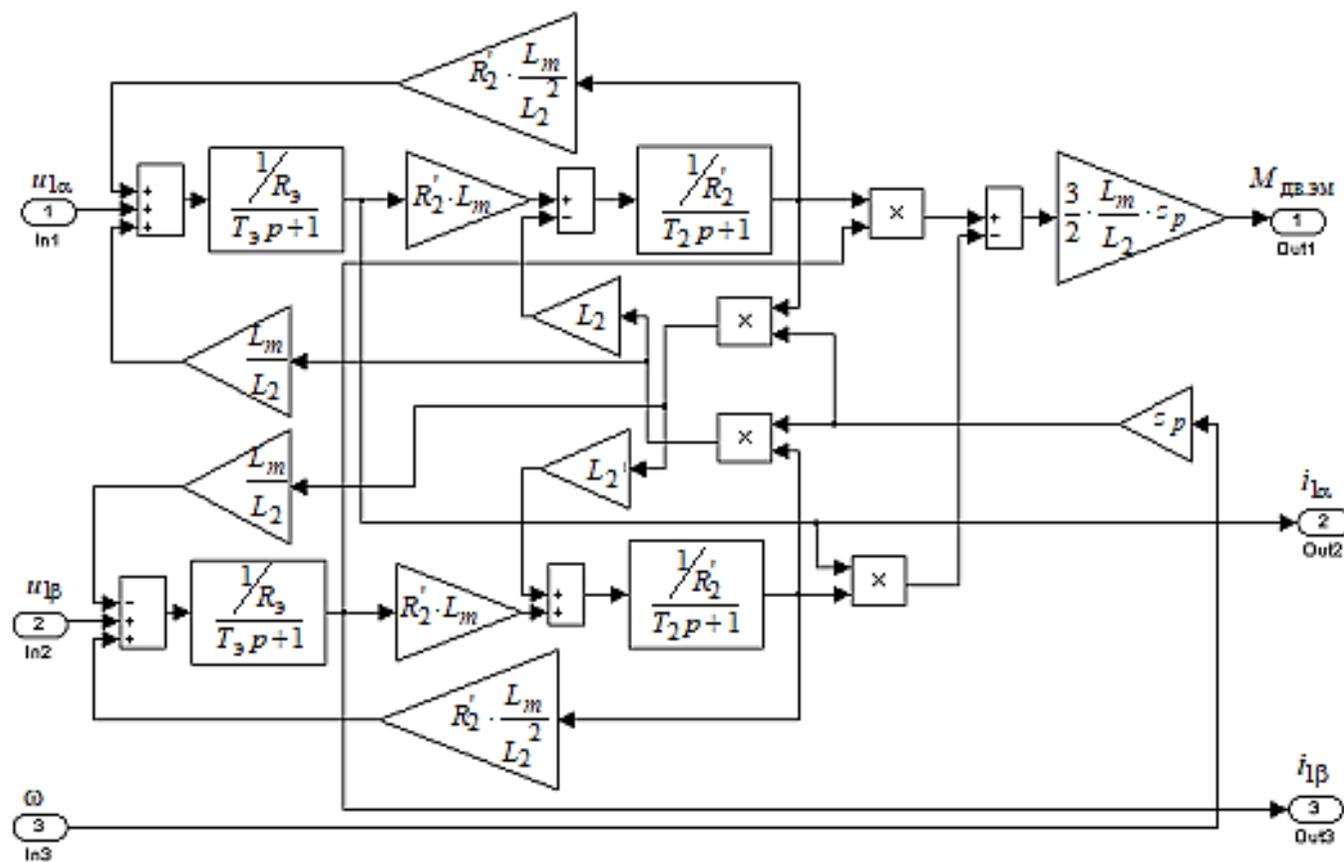


Рисунок 5.2.4 Имитационная модель двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат

Имитационная модель одномассовой механической системы с реактивной нагрузкой

Схема, представленная на рисунке 5.2.5, является наглядным образцом процесса формирования имитационной модели одномассовой механической системы при наличии реактивной нагрузки. Эта схема позволяет увидеть визуальное представление шагов, необходимых для создания такой модели и анализа ее характеристик. Важно отметить, что данный подход к моделированию позволяет более точно исследовать поведение системы и оценивать влияние реактивного характера нагрузки на ее работу.

Параметры настройки модели механической системы:

— момент сопротивления от сил трения, приведенный к валу двигателя;

$$\Delta M_c = M_{c \text{ дв}} + \Delta M_{\text{пост}} = 3.88 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.2.6)$$

— эквивалентный момент инерции.

$$J_9 = 0.179 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.2.7)$$

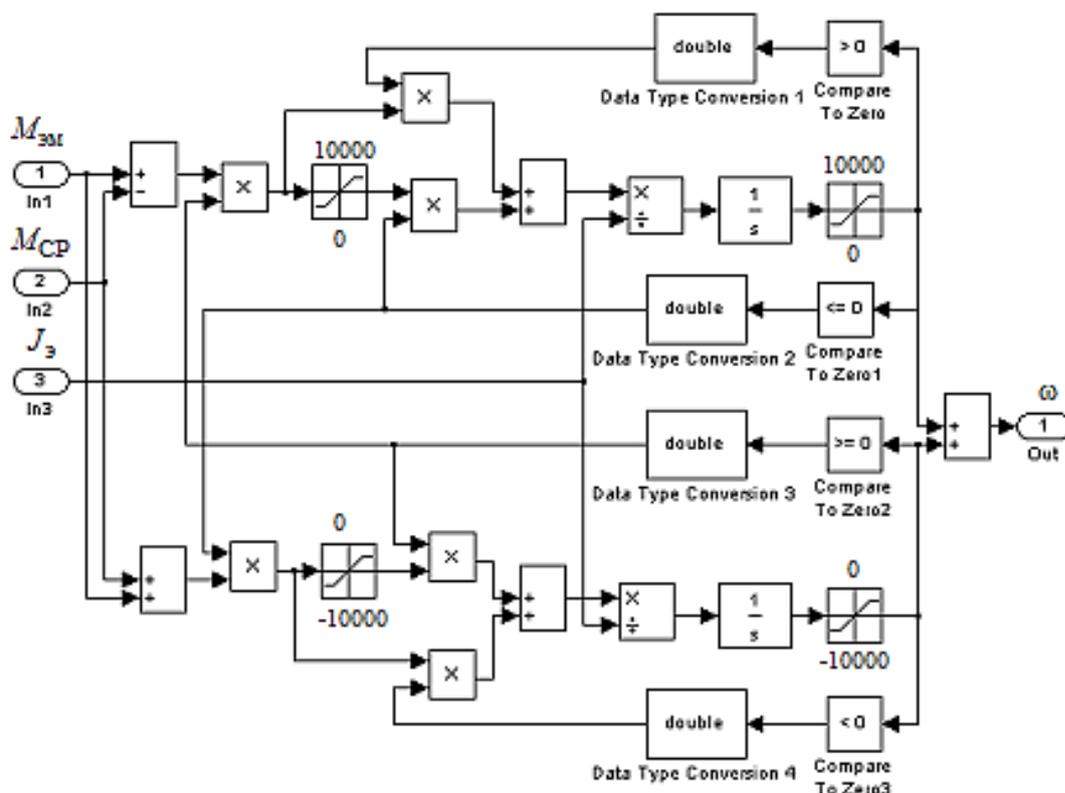


Рисунок 5.2.5 Имитационная модель одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера

Для моделирования одномассовой механической системы с вентиляторной нагрузкой и моментом сухого трения используются два блока: суперблок, представляющий одномассовую механическую систему с реактивным моментом нагрузки (см. рисунок 5.2.5), и стандартный блок F_{cp} , который формирует вентиляторную нагрузку.

Параметры настройки блока F_{cp} :

$$\left[(1 + b_H) \cdot \frac{M_{пол.н}}{\omega_H^{2.35}} \right] \cdot \text{abs}(x) \cdot x^{2.35} = 2.4 \cdot 10^{-4} \cdot \text{abs}(x) \cdot x^{2.35}, \quad (5.2.8)$$

где $b_H = 0.095$, $M_{пол.н} = 29.3 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\omega_H = 151.84 \text{ рад/с}$,

что соответствует симметричной характеристике $M_c(\omega)$ вентилятора при смене направления вращения.

5.2 Прямой пуск электродвигателя

Шаг интегрирования при моделировании переходных процессов выбирается из условия $\Delta t \leq \frac{T_{и}}{10}$ (при условии $T_{и} < T_{э}$). В качестве метода решения принят метод Эйлера с постоянным шагом $\Delta t = 1 \cdot 10^{-5}$ с. Результаты моделирования визуально наблюдаются с помощью осциллографа и двухкоординатного графопостроителя (*XY-Graf*).

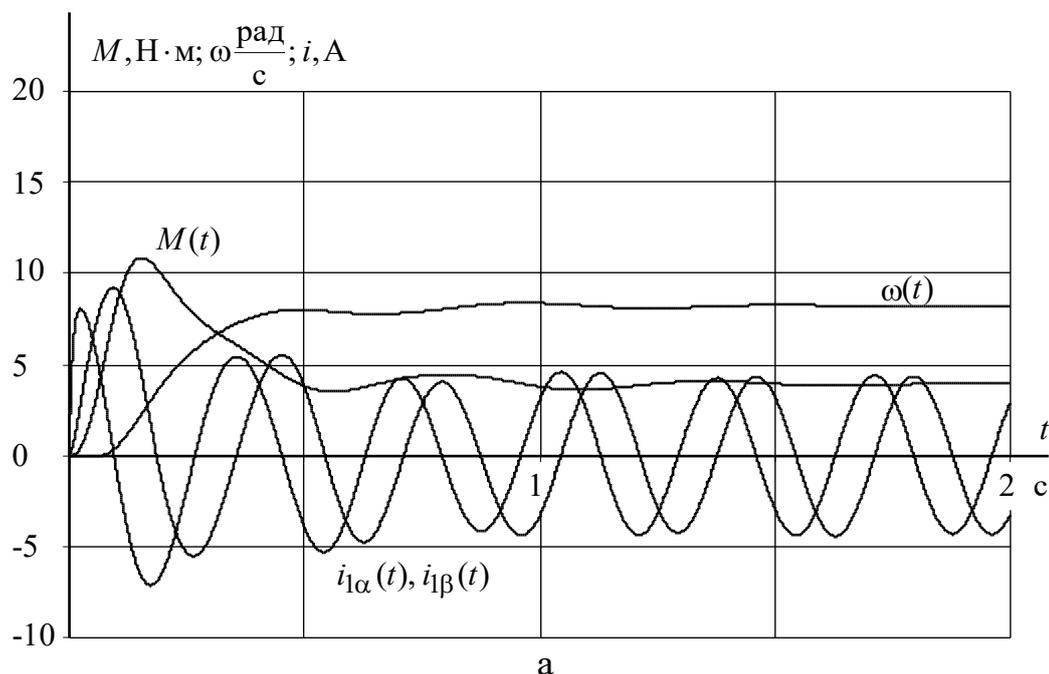
Закон регулирования $U_1/f_1^2 = const$ и настройка вольт-частотной характеристики в соответствии с (4.3.4)

Имитационные исследования, проведенные для анализа прямого запуска электродвигателя, дали важные результаты, как показано на рис. 5.6, рис. 5.7 и рис. 5.8. На этих рисунках показаны результаты, полученные при запуске электродвигателя на различных частотах, а именно $f_{и. мин} = 3$ Гц, $f_{р. мин} = 33$ Гц и $f_{1н} = f_{р макс} = 50$ Гц. Зависящие от времени графики на этих рисунках отображают такие важные параметры, как фазные токи статора, обозначаемые как $I_{1\alpha}(t)$, $I_{1\beta}(t)$, электромагнитный момент, обозначаемый как $M(t)$, угловая скорость вращения, обозначаемая как $\omega(t)$, и продемонстрированные динамические механические характеристики на $ом(M)$ электродвигателя. Изучая эти графики, можно получить ценную информацию о поведении и производительности электродвигателя во время операций прямого пуска.

Результаты моделирования представлены на рисунке 5.5 и визуализируются с помощью осциллографа и двухкоординатного графопостроителя (*XY-Graf*).

Для достижения требуемой вольт-частотной характеристики и регулирования сигнала $U_1/f_1^2 = const$ был применен закон регулирования, соответствующий выражению (4.3.4).

Результаты имитационных исследований прямого пуска электродвигателя представлены на рисунках 5.4.1, 5.4.2 и 5.4.3. Эти результаты отражают временные зависимости фазных токов статора $I_{1\alpha}(t)$, $I_{1\beta}(t)$, электромагнитного момента $M(t)$, угловой скорости вращения $\omega(t)$ и динамической механической характеристики $\omega(M)$ электродвигателя. Исследования проводились для различных значений частоты, включая начальную частоту инвертора $f_{и. мин} = 3$ Гц., частоту номинального режима, $f_{р. мин} = 33$ Гц и максимальную частоту $f_{1н} = f_{р макс} = 50$ Гц.



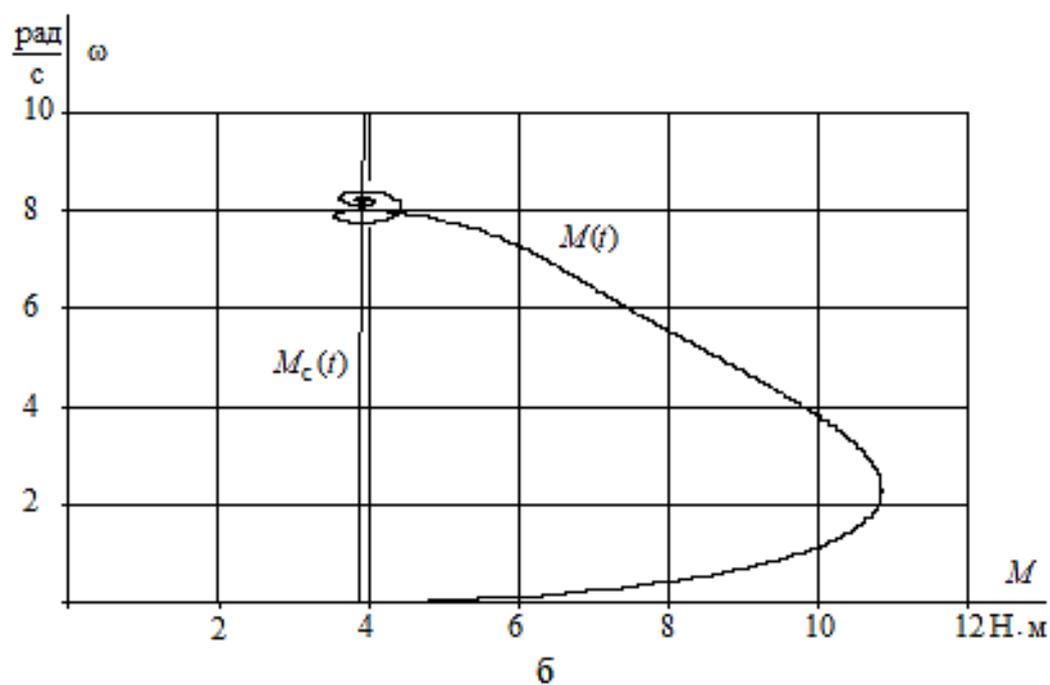
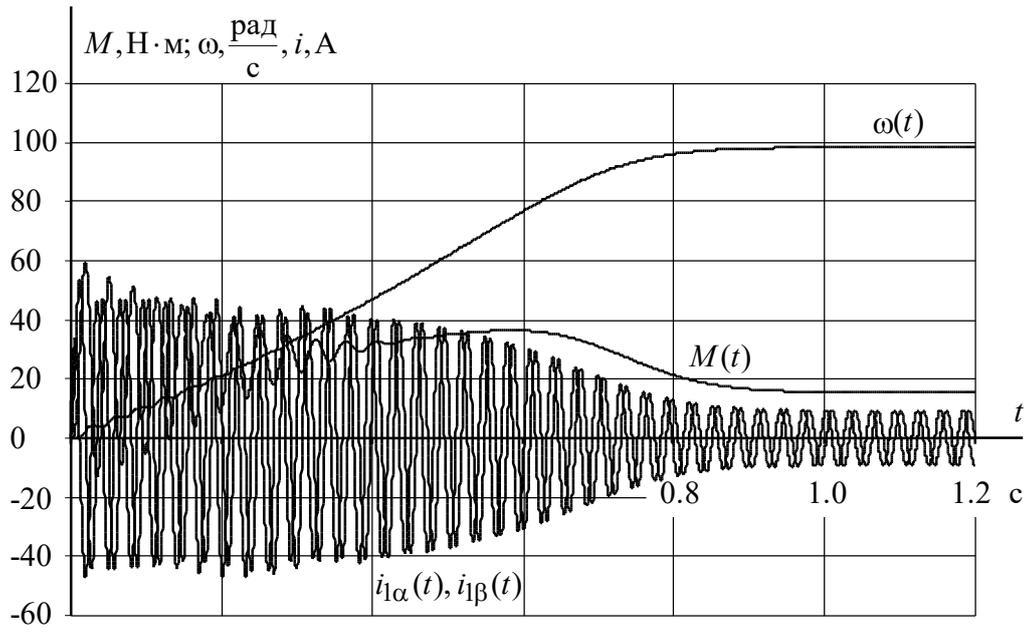
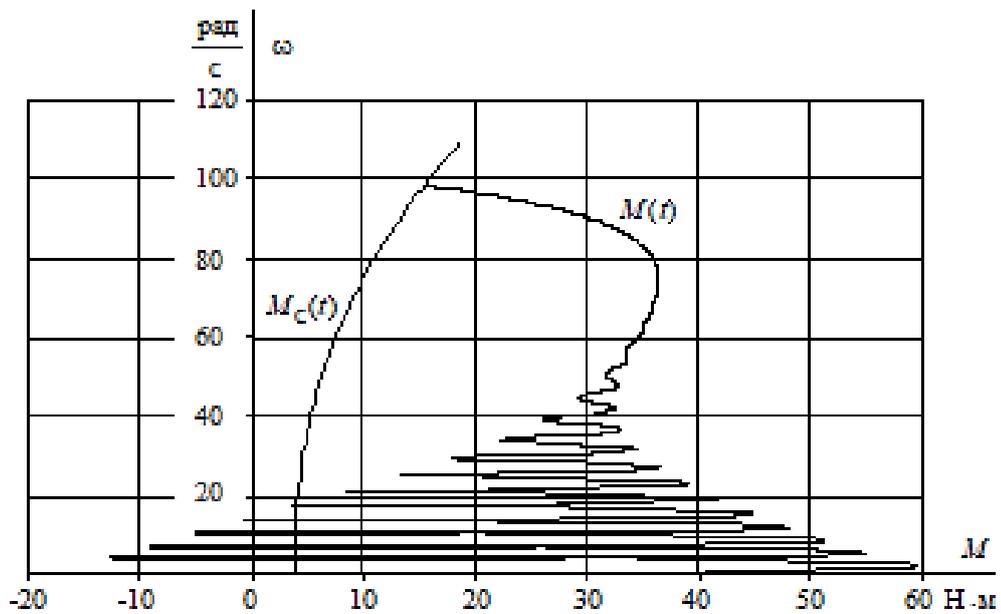


Рисунок 5.4.1 Прямой пуск двигателя при настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с (4.3.4) и значении частоты $f_{\text{н. мин}} = 3$ Гц: а – временные характеристики; б – динамическая механическая характеристика

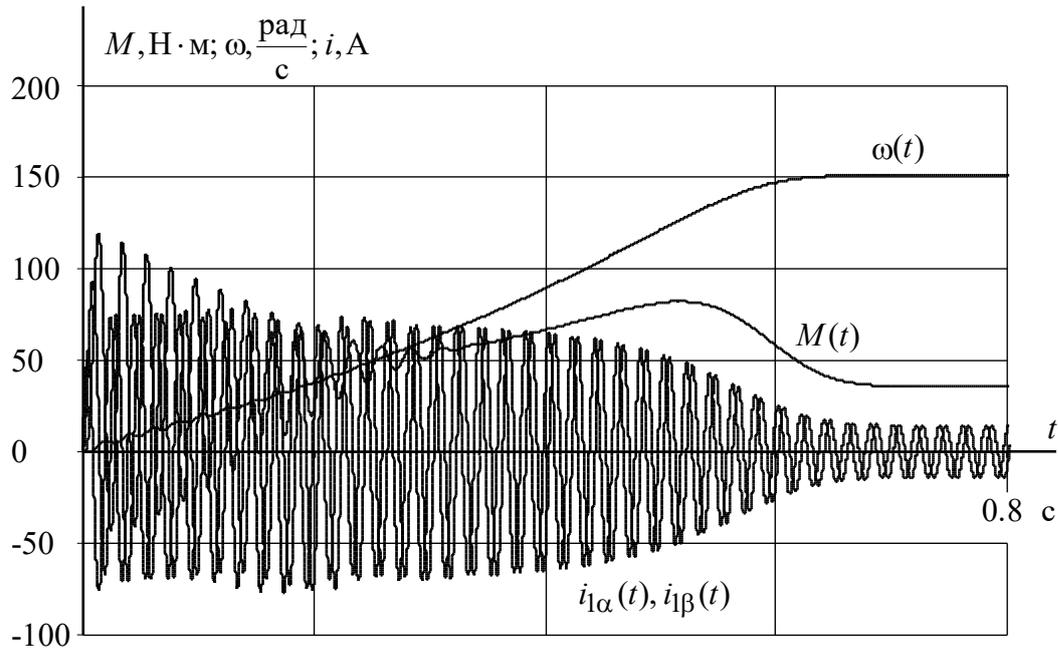


а

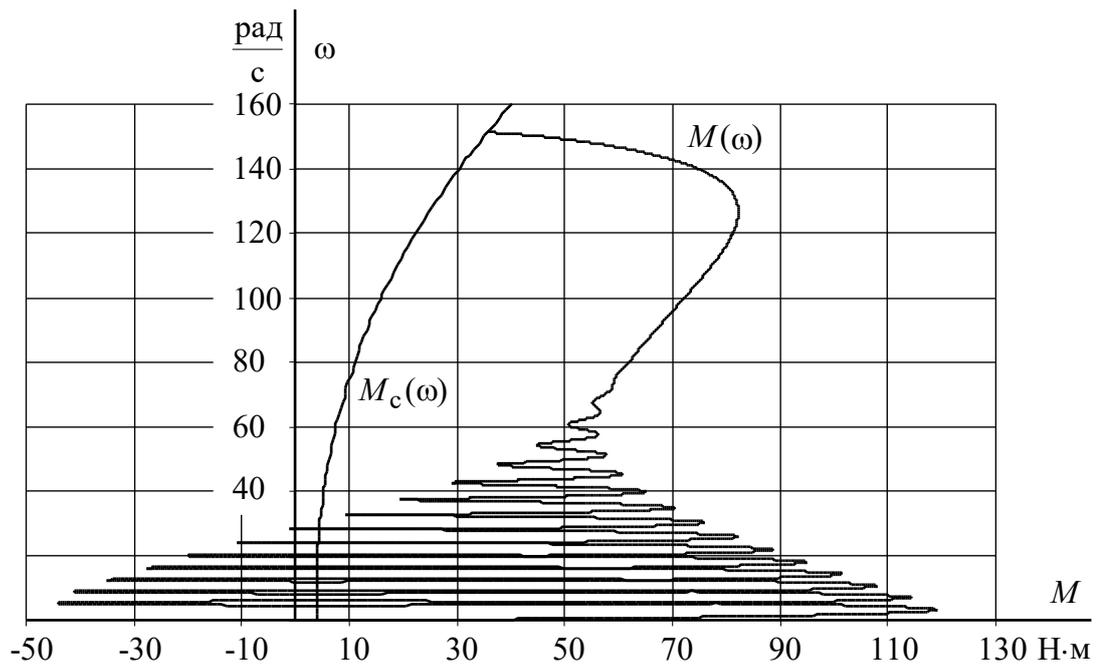


б

Рисунок 5.4.2 Прямой пуск двигателя при настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с (4.3.4) и значении частоты $f_{\text{радикал}} = 33$ Гц: а – временные характеристики; б – динамическая механическая характеристика



а



б

Рисунок 5.4.3 Прямой пуск двигателя при значении частоты $f_{p.макс} = f_{1н} = 50$ Гц: а – временные характеристики; б – динамическая механическая характеристика

Выводы. Запуск асинхронного двигателя непосредственно в системе преобразователя частоты, который демонстрирует заметные колебания электромагнитного момента двигателя и значительный пусковой момент и ток статора, потенциально может привести к нежелательным перегрузкам компонентов привода, тем самым оказывая неблагоприятное воздействие на электродвигатель, преобразователь и вентиляторный механизм, что, следовательно, снижает их эффективность. долговечность эксплуатации. Следует отметить, что фактические перегрузки, возникающие при непосредственном запуске двигателя, вероятно, превысят прогнозируемые значения из-за присущей неточности моделирования асинхронного двигателя и его параметров в области эксплуатации, охватывающей значительные значения проскальзывания. Результаты исследования показывают, что метод прямого пуска не обеспечивает удовлетворительных переходных характеристик, что требует внедрения схемы плавного запуска вентилятора, сопровождающейся ограничением величины и улучшением временного профиля динамического крутящего момента, проявляемого электроприводом.

Одна из методик, используемых для уменьшения крутящего момента двигателя во время процедуры запуска в системах с управляемым электроприводом, предполагает использование регулятора интенсивности вращения во входной цепи управления. Среди доступных опций наиболее простым выбором является линейный регулятор скорости, обеспечивающий постоянное увеличение или уменьшение скорости, что соответствует постоянному ускорению или замедлению привода при одновременном поддержании постоянного уровня динамического крутящего момента. Величина электромагнитного

крутящего момента электродвигателя и его максимальное значение зависят от статического крутящего момента нагрузки. Дополнительное ограничение второй производной скорости и, следовательно, скорости, с которой увеличивается динамический момент, может быть достигнуто за счет использования регулятора интенсивности вращения, характеризующегося S-образным профилем, что способствует повышению плавности хода на переходных этапах в электроприводе.

Включение регулятора интенсивности вращения является простым и эффективным методом ограничения динамических нагрузок в электроприводах, особенно в сценариях, где механические перегрузки в рабочих режимах считаются неприемлемыми. Это особенно актуально в системах, использующих вентиляторы.

5.3 Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением

Функциональная схема, представленная на рис. 5.11, иллюстрирует схематическое изображение системы асинхронного электропривода с частотным управлением, работающей на основе принципов скалярного управления. В рамках этой конфигурации системы электропривода основными компонентами являются преобразователь частоты VLT 2855, асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором 4A112M4 и радиальный вентилятор низкого давления, обозначаемый как ВР 80-75-6.3. Процесс настройки системы электропривода включает в себя рассмотрение различных параметров, таких как тип и характеристики устройства настройки интенсивности вращения (VMS), минимальное значение частоты преобразователя, обозначаемое как $f_{\text{мин}}$, закон

регулирования, обозначаемый как U_1/f_1^2 , и реализация коррекции вольт-частотной характеристики.

5.4 Имитационная модель асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением

Схема набора имитационной модели асинхронного частотно-регулируемого электропривода вентилятора со скалярным управлением приведена на рисунке 5.6.2.

В состав имитационной модели рисунок 5.6.2 входят:

- суперблок формирователя фазных напряжений рисунок 5.6.2;
- суперблок двухфазного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат α, β рисунок 5.6.3;
- суперблок одномассовой механической системы рисунок 5.6.4;
- блок формирования нагрузки вентиляторного характера, реализованный с помощью стандартного блока Fcn ;
- суперблок задатчика интенсивности скорости рисунок 5.6.3, б;
- суперблок преобразования токов статора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя рисунок 5.6.4;
- суперблок вычислителя действующего значения тока статора трехфазного двигателя рисунок 5.6.5.

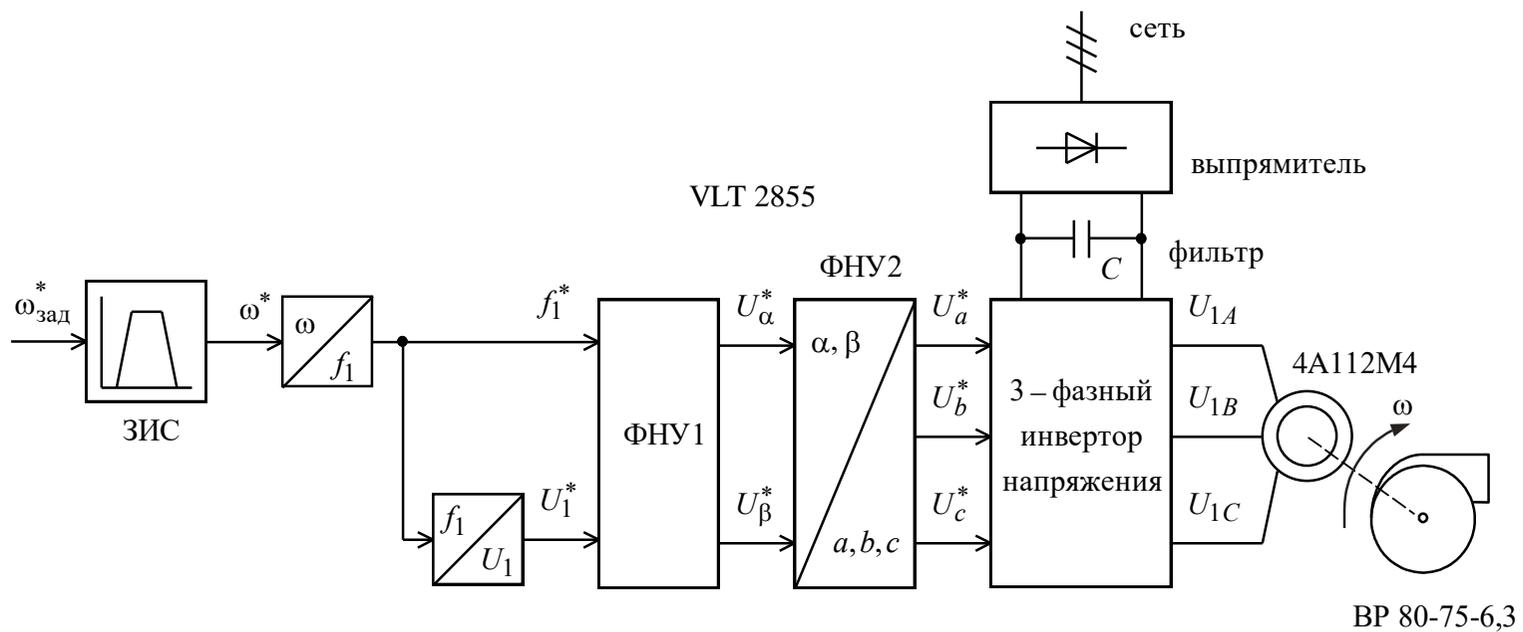


Рисунок 5.6.1 Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением

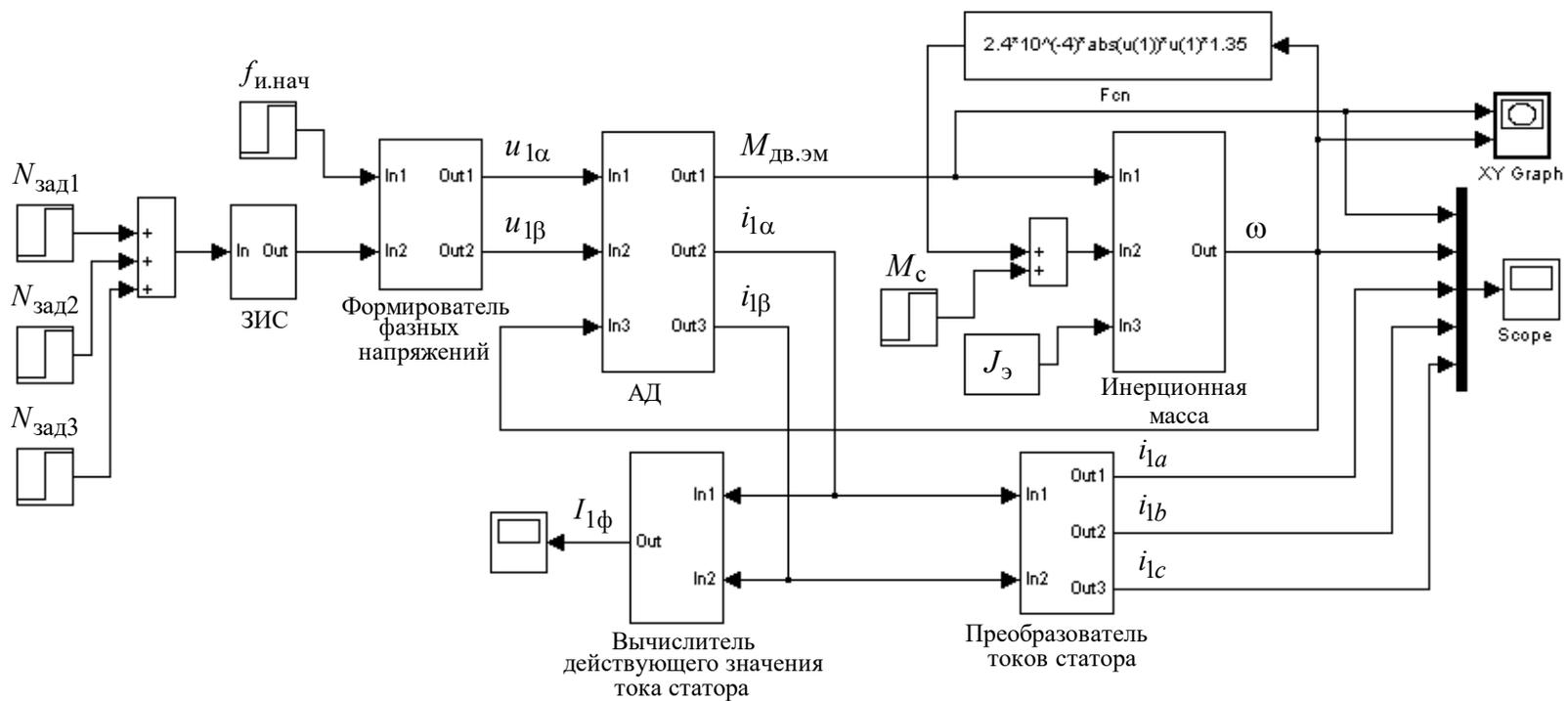
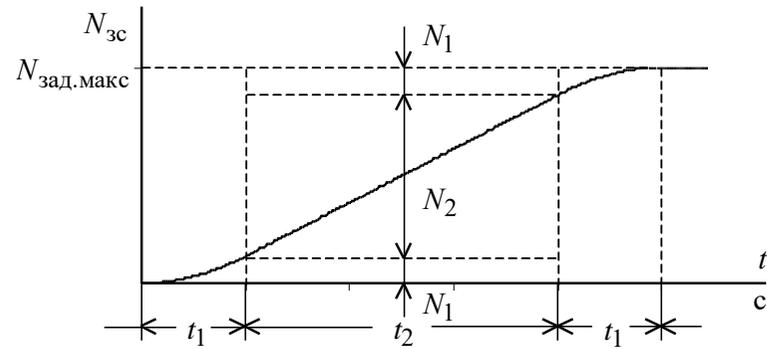
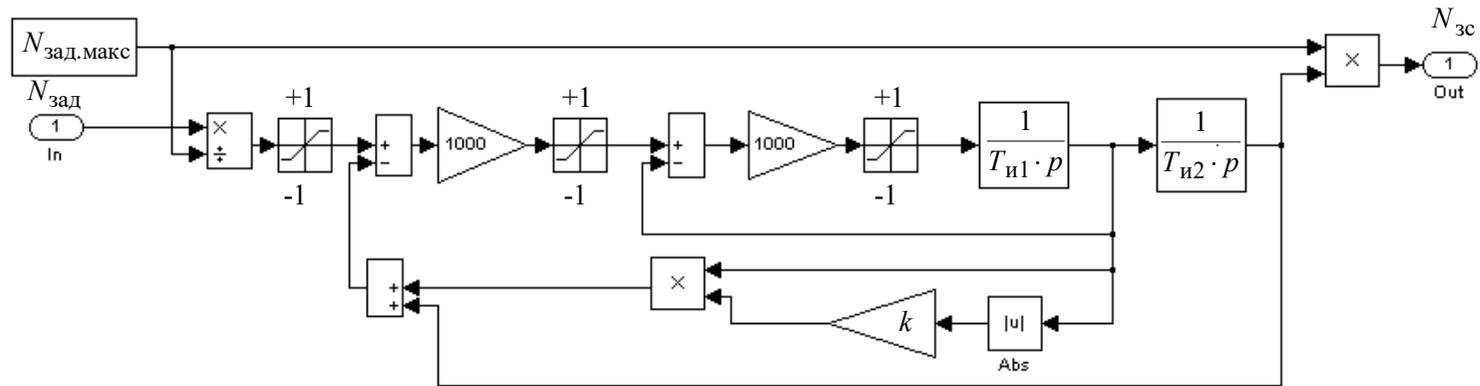


Рисунок 5.6.2 Схема набора имитационной модели асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением



a



б

Рисунок 5.6.3 Задатчик скорости с S – образной характеристикой: а – временная характеристика; б – имитационная модель

Имитационная модель задатчика интенсивности с S-образной характеристикой

Изображенный рисунок, 5.13b, дает представление о конфигурации имитационной модели, используемой для установки интенсивности. Этот установщик, известный своей S-образной характеристикой, основан на ссылке [6]. Примечательно, что для анализа были приняты параметры, соответствующие S-образному установщику, как показано на рис. 5.13. В частности, эти параметры включают в себя t_1 со значением 0,5 с, t_2 со значением 1 с и T_{zi} , которые могут быть определены как сумма удвоенных t_1 и t_2 , что дает в общей сложности 2 секунды. Параметры настройки имитационной модели задатчика интенсивности с S-образной характеристикой:

$$T_{и1} = t_1 = 0.5 \text{ с};$$

$$T_{и2} = t_1 + t_2 = 0.5 + 1 = 1.5 \text{ с};$$

$$k = 0.5 \cdot \frac{t_1}{t_1+t_2} = 0.5 \cdot \frac{0.5}{0.5+1.5} = 0.16667.$$

Имитационная модель преобразователя токов статора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя

Преобразование токов статора $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ двухфазного двигателя в неподвижной системе координат в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя i_{1a}, i_{1b}, i_{1c} реализуется в соответствии с формулами преобразования (1.3)

$$i_{1a} = i_{1\alpha}; \quad i_{1b} = -\frac{1}{2} \cdot i_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{1\beta}; \quad i_{1c} = -\frac{1}{2} \cdot i_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{1\beta}$$

по схеме, представленной на рисунке 5.6.4.

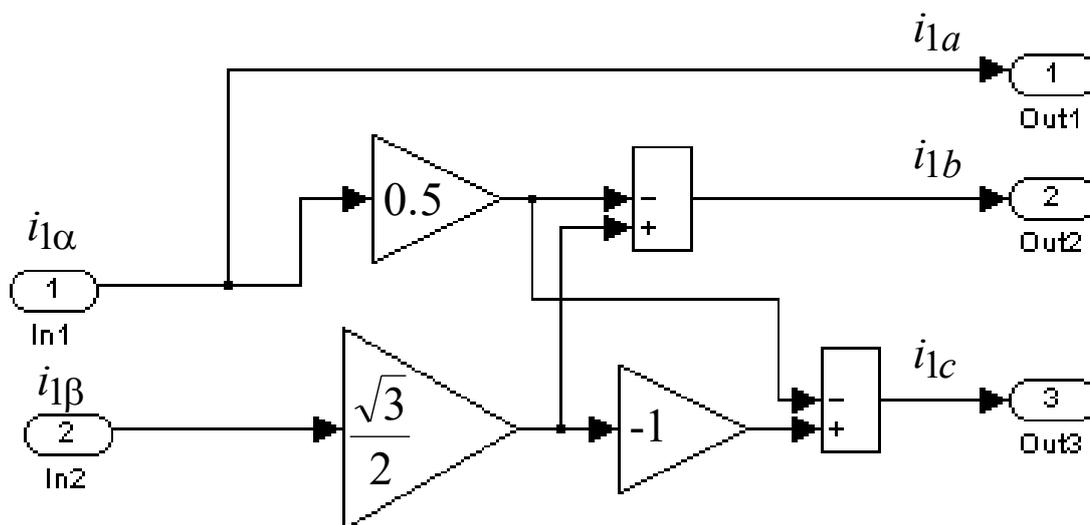


Рисунок 5.6.4 Имитационная модель преобразователя токов статора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат α, β в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}

Имитационная модель вычислителя действующего значения тока статора трехфазного двигателя

Действующие значения фазных токов трехфазного и двухфазного двигателя равны и определяются по выражению

$$I_{1\phi} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2}, \text{ A.}$$

В установившихся режимах работы действующие значения токов обмоток статора двухфазного и трехфазного двигателей равны:

$$i_{1\alpha} = i_{1\beta} = i_{1a} = i_{1b} = i_{1c} = I_{1\phi}.$$

Схема набора имитационной модели для вычисления действующего значения тока статора трехфазного двигателя приведена на рисунке 5.6.5.

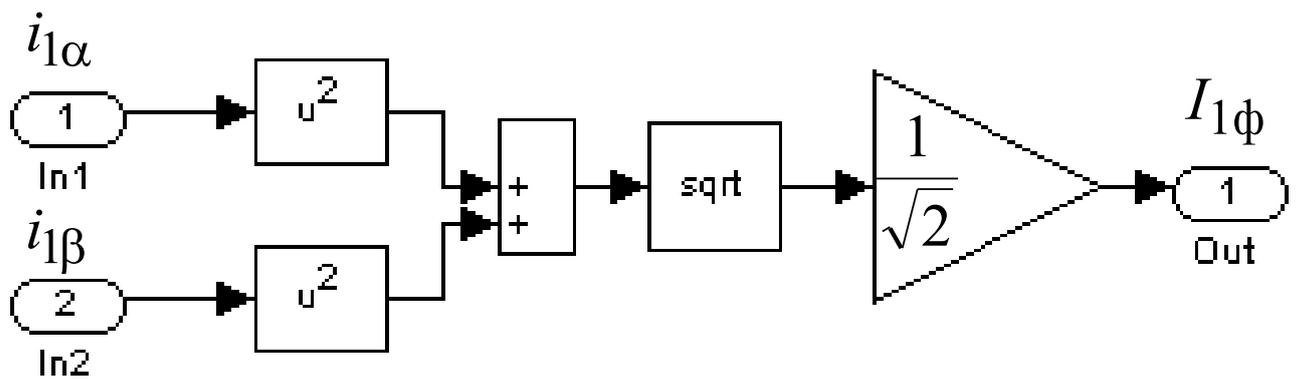


Рисунок 5.6.5 Имитационная модель вычислителя действующего значения тока статора трехфазного двигателя

Параметры блоков формирования задания:

$$f_{\text{инач}} = 3 \text{ Гц, } \textit{step time}=0;$$

$$N_{\text{зс1}} = \frac{f_{\text{р.мин}} - f_{\text{и.нач}}}{k_{Nf}} = \frac{33-3}{50} = 0.6, \textit{step time}=1 \text{ с};$$

$$N_{\text{зс2}} = \frac{f_{\text{р.макс}} - f_{\text{р.мин}}}{k_{Nf}} = \frac{50-33}{50} = 0.34, \textit{step time}=3 \text{ с};$$

$$N_{\text{зс3}} = \frac{-f_{\text{р.макс}} - f_{\text{и.нач}}}{k_{Nf}} = \frac{-50+3}{50} = -0.94, \textit{step time}=5 \text{ с}.$$

5.7 Имитационные исследования частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением

Для всесторонней оценки эксплуатационных возможностей электропривода вентилятора в различных технологических условиях, охватывающих диапазон скоростей запуска, переключения скоростей и электрического торможения во время простоя, проводится серия модельных исследований. Эти тщательно разработанные исследования охватывают множество сценариев, направленных на то, чтобы пролить свет на сложную динамику системы электропривод-вентилятор. Эти сценарии охватывают такие важные аспекты, как начальный запуск при минимальной рабочей скорости, начальный запуск до максимальной рабочей скорости, плавный переход от минимальной рабочей скорости к возвышенным областям максимальной скорости, тщательное замедление от зенита максимальной

скорости к низу минимальной скоростью и, в конечном счете, плавное отключение электропривода. Благодаря этим тщательным исследованиям моделей появляется всестороннее представление о диапазоне рабочих характеристик и адаптивности электропривода вентилятора, что позволяет изучить присущие ему возможности и ограничения в самых разных условиях эксплуатации.

Хотя динамические характеристики не имеют решающего значения для электропривода вентилятора, при настройке параметров устройства регулирования скорости важно уделять приоритетное внимание обеспечению плавного пуска. Результаты, полученные в результате модельных экспериментов, показывают, что использование устройства с постоянной времени $T_{zi} = 2$ с является достаточным для достижения желаемой плавности во время запуска вентилятора.

Чтобы обеспечить более четкое понимание, давайте рассмотрим наглядный пример работы электропривода вентилятора в течение определенного цикла. Этот цикл начинается с минимальной частоты $f_{и. мин} = 3$ Гц, за которой следует переход к минимальной рабочей частоте вращения вентилятора при $f_{р. мин} = 33$ Гц. Впоследствии цикл включает переход к максимальной рабочей частоте вращения вентилятора при $f_{р. макс} = 50$ Гц, прежде чем вернуться к минимальной частоте $f_{и. мин} = 3$ Гц.

Для всестороннего описания временных и динамических механических характеристик электропривода вентилятора на рисунке 5.7.1 представлена информативная визуализация. Анализ включает в себя устройство регулирования напряжения, управляемое законом $U_1/f_1^2 = \text{const}$, и включает вольт-частотную характеристику, как указано в уравнении (4.3.4), обеспечивая согласованность на протяжении всего заданного рабочего цикла.

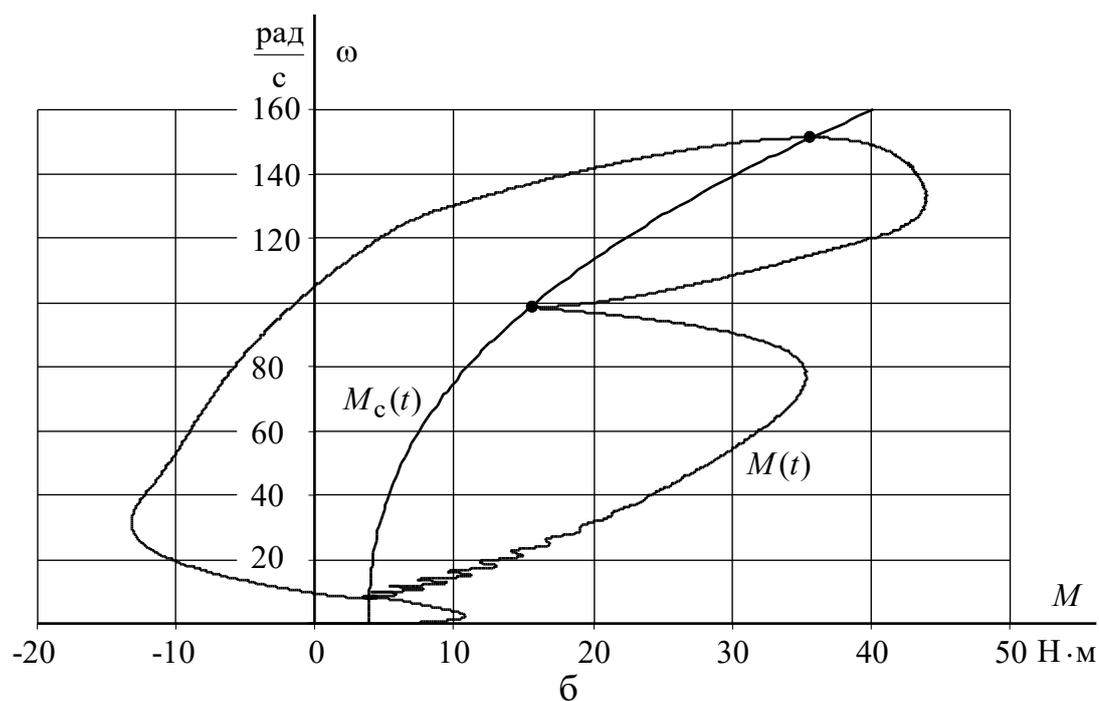
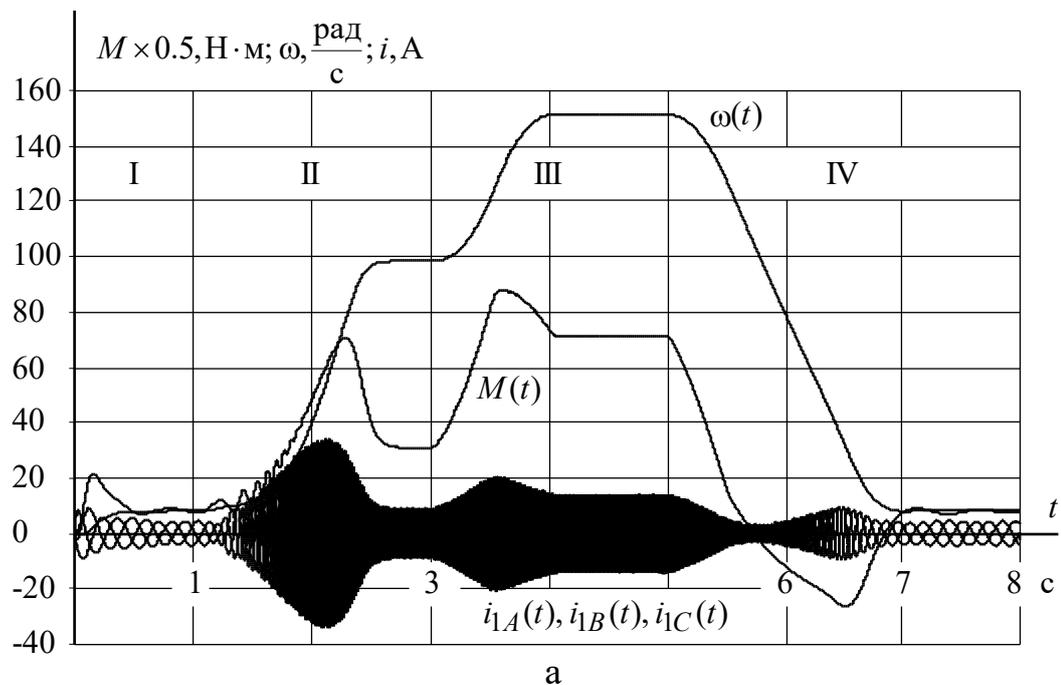


Рисунок 5.7.1 Результаты имитационных исследований отработки электроприводом вентилятора заданного цикла при настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с (4.3.4): а – графики переходных процессов; б – статическая и динамическая механические характеристики электропривода и нагрузки

Выводы. Имитационные исследования дают убедительные результаты, наглядно иллюстрирующие эффективность асинхронного электропривода вентилятора с частотной модуляцией, работающего на основе принципов скалярного управления. Придерживаясь закона управления $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и тщательно регулируя вольт-частотную характеристику в соответствии с (4.3.4), эта сложная система демонстрирует похвальное мастерство в обеспечении плавного запуска электропривода с начальной частоты $f_{и. \text{мин}} = 3$ Гц при плавном регулировании желаемого диапазона скорости вращения вентилятора. На протяжении всех переходных фаз, присущих электроприводу, преобладает замечательный уровень плавности, эффективно ограничивающий динамический момент, а также токи двигателя и преобразователя. Кроме того, система позволяет пользователям определять продолжительность как фазы запуска электропривода, так и фазы электрического торможения за счет разумного выбора оптимальной постоянной времени для регулятора скорости.

6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Тема выпускной магистерской диссертации «Асинхронный скалярный электропривод дутьевого вентилятора котла». Проведен сравнительный анализ энергетических, массогабаритных и экономических характеристик преобразователя частоты.

Результатом исследования является разработка регулируемого электропривода дутьевого вентилятора, которая может применяться при проведении широкого спектра работ в различных областях народного хозяйства (в помещениях цехов, в полевых условиях и т.д.). Данная установка интересна тем, что применение регулируемого электропривода способствует уменьшению энерго затрат и более точной работе оборудованию.

Целью раздела является подтверждение целесообразности и конкурентно способности разрабатываемой установки, оценка эффективности ее экономических показателей, отвечающих современным требованиям.

6.1 Портрет потенциальных потребителей

Потребителями являются крупные промышленные производства, связанные с металлообработкой, строительные организации, авторемонтные мастерские и многие другие предприятия и многие др. предприятия по монтажу, обслуживанию и ремонту.

Сегментировать рынок по спектру услуг, связанных с изготовлением и обслуживанием ЭП в зависимости от длительности эксплуатации, можно по следующим пунктам: выпуск и реализация устройства; установка нового оборудования; техническое обслуживание, ремонт и замена комплектующих (табл. 6.1).

Таблица 6.1. – Сегментирование услуг, связанных с эксплуатацией УИН

Наименование услуги	Срок эксплуатации, лет			
	1	1-10		более 10
Фирмы производители				
Фирмы по установке и монтажу				
Фирмы по техническому обслуживанию и ремонту				



– фирма изготовитель.



– сервисная компания по установке данных устройств.



– ремонтная служба.

Учитывая данные таблицы 6.1, можно сделать вывод, что при продаже установок потребителям, в период эксплуатации от 1 до 10 лет, изготовитель может иметь дополнительный доход на реализации запасных частей и комплектующих фирмам, сервисным компаниям, которые занимаются установкой, обслуживанием и ремонтом устройств нагрева.

6.2 Анализ конкурентных технических решений

Для сравнения разрабатываемого регулируемого электропривода с аналогичными аппаратами других производителей, рекомендуется провести

оценочный анализ, который поможет выявить сильные и слабые стороны проектов конкурентов. Его удобно осуществлять с помощью оценочной карты, в которую вносят не менее двух конкурентных разработок.

Для этого были выбраны электропривода:

- напряжения с последовательным колебательным контуром, производства фирмы «Пром-Индуктор» ($K_{к1}$);
- прямого пуска по току, производства фирмы «Индукция» ($K_{к2}$);
- на базе частотного преобразователя проектируемой модели ($K_{ф}$).

Анализ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения приведен в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{ф}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$K_{ф}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Повышение производительности труда пользователя	0.05	1	1	1	0.05	0.05	0.05
Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0.1	4	4	4	0.4	0.4	0.4
Уровень шума	0.07	3	3	3	0.225	0.225	0.225
Надежность	0.07	4	3	3	0.2	0.15	0.15
Безопасность	0.07	3	3	3	0.3	0.3	0.3
Энергоэкономичность	0.13	4	1	1	0.5	0.125	0.125

Продолжение таблицы 6.2

Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0.1	5	2	3	0.5	0.2	0.3
Уровень проникновения на рынок	0.05	5	2	2	0.25	0.1	0.1
Цена	0.075	3	3	3	0.225	0.225	0.225
Предполагаемый срок эксплуатации	0.1	4	3	3	0.4	0.3	0.3
Послепродажное обслуживание	0.075	4	3	4	0.3	0.225	0.3
Финансирование научной разработки	0.05	4	1	1	0.2	0.05	0.05
Наличие сертификации разработки	0.05	2	1	1	0.25	0.05	0.05
Итого	1	49	30	32	3.8	2.4	2.575

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 6.2, подобраны, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i ,$$

где: К – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

Б_i – балл i -го показателя.

Итог анализа:

Данный регулируемый привод является энергоэффективной, а также, в системе используется частотно регулируемая система, что гарантирует надежную работу и простоту в управлении, а также возможность легкой настройки для автоматических режимов работы.

Данный анализ показывает, что продукт конкурентоспособен, и он может заинтересовать инвесторов, т.к. экономия энергии и ресурсов является одной из главных задач современности

6.2 SWOT-анализ проекта

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

Применительно к проектируемому приводу, SWOT-анализ позволит оценить сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы.

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, в которую записываются слабые и сильные стороны проекта, а также возможности и угрозы.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

Матрица SWOT приведена в таблице 6.3.

Таблица 6.3- Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Простота подключения к энергосистеме</p> <p>С2. Надежность системы при аварийных ситуациях</p> <p>С3. Хорошие энергетические показатели</p> <p>С4. Квалифицированный персонал</p> <p>С5. Повышенная безопасность при эксплуатации</p> <p>С6. Экономия электроэнергии за счет использования частотного преобразователя</p> <p>С.7 Повышение химической стойкости элементов деталей электропривода</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>СЛ1. Высокий уровень вибрации при работе</p> <p>СЛ2. Большая стоимость оборудования</p> <p>СЛ3. Большой уровень шума при работе</p> <p>СЛ4. Большие начальные затраты</p>
<p>В1. Дополнительное резервное питание электропривода ВСМА</p> <p>В2. Повышение стоимости конкурентных систем электропривода ВСМА</p>	<p>Так как при необходимости резервного питания его легко обеспечить, потому что данное устройство легко подключается к энергосистеме.</p> <p>При условии что конкурентные системы будут повышать стоимость своего оборудования для обеспечения надёжности, данное устройство обеспечивает надёжность</p>	<p>При работе устройства наблюдается повышенная вибрация, которой может быть у конкурентных устройств но с более высокой ценой.</p>

	системы при аварийных ситуациях при такой же стоимости.	
--	---	--

Продолжение таблицы 6.3

<p>Угрозы:</p> <p>У1. Исчезновение питания электропривода ВСМА</p> <p>У2. Некачественные элементы конструкции</p> <p>У3. Введение дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции</p> <p>У4. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства</p>	<p>При некачественных материалах и комплектующих для устройства, последнее может быть негерметично, и соответственно внутрь может попасть частицы мусора. Для предотвращения этого необходимо тщательно подбирать материалы и поставщиков.</p>	<p>При работе устройства создаются большие вибрации, при введении новых стандартов на вибрации необходимо реконструировать устройство для устранения вибрации, или найти необходимые средства защиты от вибрации.</p>
--	--	---

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

Анализ интерактивных матриц, приведенных в таблицах 6.2.3 и 6.2.4, показывает, что сильных сторон у проекта значительно больше, чем слабых.

Кроме того, угрозы имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

«+» – сильное соответствие;

«-» – слабое соответствие.

Анализ интерактивных матриц, приведен в таблицах 6.4 и 6.5.

Таблица 6.4 - Интерактивные матрицы возможностей

Возможности	Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	-	-	+
	B2	+	-	-	+	-
	B3	-	+	-	-	+
	B4	+	+	-	+	+
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2	Сл3		
	B1	-	-	-		
	B2	+	+	0		
	B3	-	+	-		
	B4	-	-	-		

Таблица 6.5 - Интерактивные матрицы угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	-	-	+	+	-
	У2	-	-	+	0	-
	У3	-	-	+	+	+
	У4	-	-	-	-	-
Слабые стороны проекта						

		Сл1	Сл2	Сл3	
	У1	-	+	-	
	У2	+	-	-	
	У3	+	-	+	
	У4	-	-	-	

В результате анализа было установлено, что разрабатываемая установка имеет следующие минусы и угрозы: некачественная разработка конструкции и финансовое обеспечение и поддержка со стороны государства. Данные проблемы решаются путем подбора квалифицированного персонала, который сможет обучить пользователей установки правильно пользоваться ей, и также представить данное изобретение государству как экономически и энерго-эффективным, полезным и инновационным.

6.3. Инициация проекта

Под ней понимают процессы для определения ее целей и задач, заинтересованные стороны, финансовые ресурсы, запланированное время и др., которые могут повлиять на общий результат, Вся информация прописывается в уставе проекта.

В инициации заинтересованными сторонами являются организаторы проекта (руководитель, инженер) и заказчик (предприятие оборудованные отопительными котлами) (табл. 6.6).

Таблица 6.6 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Руководитель проекта	Получение гранта на дальнейшие разработки
Инженер	Повышение по должности, участие в других исследованиях

Заказчик	Уменьшение финансовых и энергетических затрат при производстве
----------	--

Основной целью проекта является создание регулируемого электропривода с соответствующими повышенными показателями, при меньших энергозатратах (табл. 6.7)

Таблица 6.7– Цели проекта и критерии их достижения

Цель проекта	повышение ресурсы и энергоэффективности установки
Ожидаемые итоги	увеличение мощности установки; энергосбережение; уменьшение массогабаритных размеров; мобильность; снижение финансовых затрат.
Критерии приемки	испытание устройства; расчет материальных затрат; сравнительный анализ с подобными проектами.
Требования по выполнению	соблюдение сроков; выполнение поставленных целей и задач; ограничение по бюджету – предельно допустимые расходы средств на весь перечень затрат по проекту.

После утверждения этих этапов, создается рабочая группа исполнителей, которые участвуют в проекте и выполняют определенные функции (табл.6.8).

Таблица 6.8 – Роли и функции рабочей группы проекта

№	ФИО	Роль в проекте	Функции
1	Чернышев И.А.	руководитель	Координация работы всех участников.
2	Шевченко А.С.	инженер	Проведение расчетов и моделирования, создание технической документации, внесение изменений по ходу работы.

При планировании исследования, могут возникнуть факторы ограничения и допущения, влияющие на реализацию проекта и сроки его выполнения (табл.6.9).

Таблица 6.9 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения
Бюджет	290 000 руб.
Источник финансирования	ТПУ; Предприятие Заказчика
Сроки проекта	4 мес.
Дата утверждения	2 марта 2023 г.
Дата завершения	30 июля 2023 г.
Прочие ограничения	значение интегрального показателя не менее 4,7

При создании устава разрабатываемой установки, документируют все текущие и возможные потребности для разработки, учитывают круг заинтересованных лиц и желаемый результат.

6.4 Планирование научно-исследовательских работ

6.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения проектных и пуско-наладочных работ формируется рабочая группа, в состав которой входят:

Руководитель;

Инженер;

Необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения технического проекта и ПНР, провести распределение исполнителей по видам работ.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и произведено распределение

исполнителей по видам работ. Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 6.10.

Таблица 6.10 - Распределение исполнителей по данным видам работ

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Изучение первичной информации об объекте, требования к техническому проекту, составление задания и плана на работу	Руководитель
Выбор направления технического проектирования установки	2	Подбор и изучение материалов по теме, изучение различных источников, касающихся различных сторон технического проекта	инженер
Расчеты и проектирование вибрационной установки	3	Подготовка данных для расчетов. Отладка данных и проведение расчетов	инженер, руководитель
	4	Выбор оборудования по результатам расчетов	инженер, руководитель
	5	Расчет и проверка модели установки	инженер, руководитель

Продолжение таблицы 6.10

	6	Пуско- наладочные работы, настройка совместной работы оборудования	инженер, руководитель
		программного обеспечения, снятие и настройка необходимых характеристик и сопоставление их с расчетными данными проекта	
Оформление отчета по техническому проектированию	8	Оформление пояснительной записки	инженер
	9	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем и последующая сдача проекта	руководитель

6.4.2 Определение трудоемкости выполнения технического проекта

Трудовые затраты во многих случаях образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным пунктом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}$$

Где: t_o - ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы человек-дней;

$t_{\min i}$ - минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), человек-дней;

$t_{\max i}$ - максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), человек-дней.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 70 %.

$$T_{Pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}$$

Где T_{Pi} - продолжительность одной работы, раб. дн.;

$T_{ожі}$ - ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ - численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

6.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – тип столбчатых диаграмм, используемый для иллюстрации трудового плана, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} ,$$

где: T_{ki} - продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} - продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ - коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$K_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = \frac{365}{299} = 1,22 ,$$

Где $T_{кал}$ - количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа. Все рассчитанные значения сведены в таблицу 6.11.

Таблица 6.11 – Рассчитанные сведения

Название Работы	Трудоёмкость работ						Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}			
	Минимально возможная трудоёмкость выполнения заданной i-ой работы, t_{min} , чел-дн.		Максимально возможная трудоёмкость выполнения заданной i-ой работы, t_{max} , чел-дни		Ожидаемая трудоёмкость выполнения одной работы, $t_{ож}$, чел-дни							
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер						
Составление и утверждение технического задания	1	-	1	-	1	-	1	-	1,4	-	1,7	-
Выбор направления технического проектирования установки	-	4	-	5	-	4,4	1	1	-	4,4	-	5,368
Подбор и изучение материалов по теме	2	14	4	21	2,8	16,8	1	1	2,8	16,8	3,4 16	20,5
Расчет и проверка модели виброустановки	2	21	4	25	2,8	23,8	1	1	2,8	23,8	3,4 1	29

Продолжение таблицы 6.11

Проведение пусконаладочных работ	1	18	2	20	1,4	18,8	1	1	1,4	26,8	1,7	22,936
ценка эффективности полученных результатов	2	5	4	7	2,8	5,8	1	1	2,8	5,8	3,4 16	7,076
Оформление пояснительной записки	-	5	-	9	-	6,6	-	1	-	6,6	-	8,05
Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	2	-	5	-	3,2	-	1	-	3,2		3,9 04	
Итого											110,5	

Итого длительность работ – 110 календарных дней

На основе таблицы 6.11 строится календарный план – график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Календарный план-график проведения НИОКР приведен в таблице 6.12

Таблица 6.12 - Календарный план-график

№ работ	Вид работ	Исполнители	ТКj, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Фев.		Март			Апр.			Май			Июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление технического задания	Руководитель	2	■													
2	Выбор направления проектирования	Инженер	5,4	■													
3	Изучение материалов по теме	Инженер, Руководитель	20,5		■	■	■										
4	Расчет и проверка модели установки	Инженер, Руководитель	29				■	■	■	■							
5	Пуско-наладочные работы	Инженер, Руководитель	22,9							■	■	■					
6	Оценка эффективности	Инженер, Руководитель	7									■	■				
7	Оформление пояснительной записки	Инженер	8										■	■			

8	Проверка ВКР	Руководит ель	3															
				Руководитель														
				Инженер														

По результатам составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная со второй декады февраля, заканчивая первой декадой июня. Учитывая вероятностный характер оценки трудоемкости, реальная продолжительность работ может быть, как меньше (при благоприятном стечении обстоятельств), так и несколько превысить указанную продолжительность (при неблагоприятном стечении обстоятельств).

Календарная продолжительность выполнения технического проекта составит 110 дней. Из них:

93 день – рабочая занятость инженера;

18 дней – рабочая занятость руководителя;

Продолжительность выполнения проекта в рабочих днях составит 80 дней. Из них:

77 дней – продолжительность выполнения работ инженером;

13 дней – продолжительность выполнения работ руководителем;

6.5 Бюджет затрат технического проекта

При планировании бюджета технического проекта (ТП) должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением [15]. В процессе формирования сметы ТП используется группировка затрат по следующим статьям:

- материальные затраты ТП;
- затраты на специальное оборудование;
- полная заработная плата исполнителей разработки ТП;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы.

Материальные затраты в данном техническом проекте не рассчитываются, так как соединительные провода, шлейфы и т.д. укомплектованы вместе с оборудованием.

6.5.1 Расчет материальных затрат проекта

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль, содержание, ремонт и эксплуатация оборудования, зданий, сооружений, других основных средств и прочее), а также запасные части для ремонта оборудования, износа инструментов, приспособлений, инвентаря, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам, износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов; -покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований

(испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований);

В материальные затраты, помимо вышеуказанных, включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Однако их учет ведется в данной статье только в том случае, если в научной организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi},$$

где: m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Величина коэффициента (k_T), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в

пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, приведены в таблице 6.13.

Таблица 6.13 - материальные затраты

Наименование	Ед. измерения	Количество	Цена за ед., руб	Затраты на материалы, (Зм), руб.
Краска для принтера	Шт	3	80	624
Итого, руб				624

6.5.2 Основная заработная плата исполнителей проекта

В данную статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Статья включает в себя основную заработную плату и дополнительную заработную плату

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} ,$$

где: $Z_{осн}$ - основная заработная плата;

$Z_{доп}$ - дополнительная заработная плата (12-15 % от $Z_{осн}$).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} ,$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Среднедневная заработная плата для сотрудника ТПУ рассчитывается

$$Z_{дн} = \frac{Z_{осн} + Z_{допл} + Z_{р.к.}}{F_{д}}$$

по формуле:

где: $F_{д}$ – количество рабочих дней в месяце (для 6-дневной рабочей неделе), раб. дн.

$F_{д}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Показатели рабочего времени представлены в таблице 6.13

Таблица 6.13 – Показатели рабочего времени

Показатели рабочего времени	Дни
Календарные дни	365
Нерабочие дни (выходные/праздничные дни)	66
Потери рабочего времени (отпуск/невыходы по болезни)	56
Действительный годовой фонд рабочего времени ($F_{д}$)	243

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{м} = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_{д}) \cdot k_{р} ,$$

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

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$) [16, с. 27];

$k_{д}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство) [15, с. 27];

$k_{р}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска, как для северного района РФ) [16, с. 27].

Размер заработной платы по тарифной ставке определяется по формуле:

$$Z_{тс} = T_{ci} \cdot k_T$$

где T_{ci} –тарифная ставка работника (принимается равной тарифной ставке работника первого разряда т.е. $T_{ci}=9300$ руб.);

k_T – тарифный коэффициент в зависимости от разряда, $k_T= 1,407$.

Дополнительная заработная плата есть вознаграждение за труд сверх установленной нормы, за трудовые успехи и за особые условия труда:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} ,$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, принимаемый 0,15 [16, с. 28].

Расчет заработной платы инженера:

1. Заработная плата по тарифной ставке:

$$Z_{тс} = 9300 \cdot 1,407 = 13085,1 \text{ руб./месяц};$$

1. Месячный оклад инженера:

$$Z_{м} = 13085,1 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 25515,945 \text{ руб./месяц};$$

2. Среднедневная заработная плата инженера:

$$Z_{дн} = \frac{(25515,945 \cdot 10,5)}{243} = 1102,54 \text{ руб};$$

3. Основная заработная плата инженера:

$$Z_{осн} = 1102,54 \cdot 93 = 102539,22 \text{ руб};$$

4. Дополнительная заработная плата инженера:

$$Z_{\text{доп}} = 0,15 * 102539,22 = 15380,43 \text{ руб};$$

5. Итоговая заработная плата инженера:

$$Z_{\text{п}} = 102536,22 + 15380,43 = 117916,653 \text{ руб};$$

Расчёт основной заработной платы руководителя происходит на основании отраслевой системы оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1. оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

2. стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3. иные выплаты; районный коэффициент.

Так как стимулирующие надбавки, иные выплаты и поощрения зависят от деятельности руководителя в частности, то примем коэффициент стимулирующих надбавок равным 30%, а коэффициент поощрения руководителя за добросовестную трудовую деятельность 40%. С учётом документа «Положение об оплате труда», доцент, к. т. н., работающий в ТПУ, имеет оклад равный 32000 рубля. С учётом этого, рассчитаем размер основной заработной платы руководителя НТИ.

Расчет заработной платы руководителя:

1. Месячный оклад руководителя:

$$Z_{\text{м}} = 32000 \text{руб};$$

2. Среднедневная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{32000 \cdot 10,5}{243} = 1382,71 \frac{\text{руб}}{\text{день}};$$

3. Основная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = 1382,71 \cdot 18 = 24888,78 \text{руб};$$

4. Дополнительная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 24888,78 = 3733,317 \text{руб};$$

5. Итоговая заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{п}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 24888,78 + 3733,317 = 28622,097 \text{руб};$$

Данные расчетов представлены в таблице 6.14

Таблица 6.14 - Расчет основной заработной платы

№ п/п	Исполнители по категориям	$Z_{\text{осн}}, \text{руб.}$	$K_{\text{пр}}$	$K_{\text{д}}$	$K_{\text{р}}$	$T_{\text{р}}$	$Z_{\text{осн}}, \text{руб.}$
1	Руководитель	1382,71	0,3	0,4	1,3	23	24888,78
2	Инженер	1102,54	0,3	0,4	1,3	59	102539,22
Итого							127505,22

Таблица 6.15 - расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	$k_{\text{доп}}$	$Z_{\text{осн}}, \text{руб.}$	$Z_{\text{доп}}, \text{руб.}$	$Z_{\text{полн}}, \text{руб.}$
Руководитель	0,4	24888,78	3733,31	28622,097
Инженер	0,4	102539,22	15380,43	117919,653
7 Итого $Z_{\text{осн}}, \text{руб.}$		127505,22	19113,74	146618,96

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

6.5.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников. Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) ,$$

где: $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2023 г. размер страховых взносов – 30,2%.

Отчисления во внебюджетные фонды инженера:

$$З_{внеб} = 117916,653 \cdot 0,302 = 35610,829 \text{руб};$$

Отчисления во внебюджетные фонды руководителя:

$$З_{внеб} = 28622,097 \cdot 0,302 = 8643,87 \text{руб};$$

6.5.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = (\text{сумма статей}) k_{нр} ,$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

6.5.6 Формирование бюджета НИИ

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно технический проект приведен в таблице 6.16

Таблица 6.16 – Затраты на научно технический проект

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты	624
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	127505,22
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	19113,74
4. Отчисления во внебюджетные фонды	44254,699
5. Прочие прямые	18000
6. Накладные расходы	25455,3
7. Бюджет затрат НИИ	234952,959

Исходя из представленной выше таблицы, можно сделать вывод, что общие затраты на реализацию технического проекта составят примерно 235 тысячи рублей, из которых большую часть составят затраты по основной з/п. При необходимости снизить общие затраты на реализацию проекта, рекомендуется использовать в качестве выборки оборудования какое-либо другое исполнение.

6.5.7 Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности произведем на основе интегрального показателя ресурсоэффективности:

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

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -ого варианта исполнения разработки.

Результаты расчета интегрального показателя ресурсоэффективности сведем в общую таблицу 6.17

Сравнивается два варианта исполнения проекта, с преобразователями (ПЧ) и без преобразователей (Пр).

Таблица 6.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии оценки	Весовой коэффициент, a_i	Балльная оценка, b_i	
		ПЧ	Пр
1. Цена	0,2	2	5
2. Диапазон работ	0,1	5	1
3. Удобство в эксплуатации	0,2	3	5
4. Надёжность	0,3	3	5
5. Энергоэффективность	0,2	4	5
Итого	1,0	3,2	4,6

Таким образом ресурсоэффективность в исполнении без преобразователей была подтверждена ($I_{рПр} = 4,6$) с помощью расчета интегрального показателя.

6.6 Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

- Анализ конкурентных решений с учетом различных требований показал наибольшую конкурентоспособность среди альтернативных методов управления электродвигателем.
- С помощью SWOT-анализа был проанализирован выбранный метод с точки зрения конкурентоспособности. Итого проект имеет значительно большее число сильных сторон, по сравнению с числом слабых, положительные стороны которых в значительной мере перекрывают минусы.
- Также было произведено календарное планирование работ, суммарное значение календарных дней руководителя и исполнителя составило 110 календарных дня, длительность самого же проекта, по приблизительной оценке, составит 80 календарных дня. Результаты данного этапа были графически отображены на диаграмме Ганта.
- Итоговые затраты на научно-исследовательский проект составили 234952 рублей 95 копеек. Из которых 51,9 % составляет фонд основной заработной платы.

Итого, разрабатываемый регулируемый электропривод обладает высокой конкурентоспособностью по сравнению с другими методами.

7. Социальная ответственность

Данный раздел посвящен анализу опасных и вредных производственных факторов при выполнении пуско-наладочных работ и эксплуатации электропривода, а так же ставятся задачи определения необходимых мер защиты от этих факторов, оценки условий труда, микроклимата рабочей среды и представления рекомендаций по созданию оптимальных условий труда. Объектом исследования является рабочее место обслуживающего персонала.

Объектом исследования является регулируемый ЭП. При подаче напряжения на обмотки которого создается переменное магнитное поле которое заставляет вращаться ротор с определенной частотой.

Актуальность данной темы обусловлена требованиями, предъявляемыми к технологическим процессам. Таким образом, ЭП должен способствовать эффективному ресурсоиспользованию и значительно сокращать время работы одного цикла производственного процесса.

Разрабатываемый в данной работе регулируемый электрический привод (ЭП) будет применяться во взрывозащищенном помещении, размеры которого не регламентированы. Для работы ЭП требуются: источник питания (1 шт), система преобразователь-двигатель (1 шт), преобразователь частоты (1 шт), ПК (1 шт).

7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

7.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.

-За вредные условия труда в размере 8 %. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. N 197-ФЗ. Часть третья. Раздел VI. Оплата и нормирование труда. Глава 21. Заработная плата. Статья 147;

-Ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск 4 календ. дней. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 г. № 197-ФЗ. Часть третья. раздел V. Время отдыха. Глава 19. Отпуска. Статья 117;

-Право на досрочное назначение трудовой пенсии. Федеральный закон от 28.12.2013 N 400-ФЗ. "О страховых пенсиях". Статья 30. Сохранение права на досрочное назначение страховой пенсии. (ред. от 01.10.2019). [21]

Право на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний, которое осуществляется в Российской Федерации с января 2000 года в соответствии с Федеральным законом от 24.07.1998 г. № 125-ФЗ. [29];

Также предоставляются права на проведение в установленном порядке за счет средств организации обязательных предварительных и периодических в данной организации медицинских осмотров (обследований), обязательных психиатрических освидетельствований в случаях, предусмотренных трудовым законодательством и иными нормативными правовыми актами, содержащими нормы трудового права (в ред. Федеральных законов от 30.06.2006 N 90-ФЗ, от 30.11.2011 N 353-ФЗ, от 25.11.2013 N 317-ФЗ). [25]

7.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Обстановка на установке, а также расположение всех элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы. В частности, при организации рабочего места должны быть соблюдены следующие основные условия: оптимальное размещение оборудования, входящего в состав рабочего места и достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения, сюда относятся: спускоподъемные операции (СПО), перемещение активаторов, переводников, установка блоков манифольдов, монтаж нагнетательных линий и т.д.

7.2 Производственная безопасность

Для безопасного и эффективного труда необходимо проанализировать и по возможности устранить или минимизировать опасные и вредные факторы, охарактеризованные в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

В табл. 7.1 представлен анализ вредные и опасные факторы, которые могут возникать при использовании синхронного двигателя с постоянными магнитами на разных этапах работы.

Табл. 7.1. Возможные опасные и вредные производственные факторы при выполнении работ с исследуемым электроприводом

Факторы	Нормативные документы
Повышенный уровень шума	Требования к параметрам шума устанавливает СП 51.13330.2011 [7]
Повышенный уровень общей и локальной вибрации	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [9]
Отклонение параметров микроклимата	ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды [8]

	ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [6]
Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий, включая действие молнии и высоковольтного разряда в виде дуги	ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [5]

Работа двигателя и его системы управления сопровождается шумом и вибрацией. Данные факторы могут оказывать влияние на физическое здоровье человека при превышении допустимых значений.

По характеру спектра в помещении присутствуют широкополосные шумы и общая и локальная вибрации. Их источник – электродвигатели в системе охлаждения и вентиляции машин.

Шумы оказывают негативное влияние на организм человека. Со временем, работник может иметь проблемы со снижением остроты слуха, повышением кровяного давления, нарушением ритма сердечной деятельности, ухудшение памяти, что скажется на снижении общей производительности труда. Шумы на рабочих местах нормируются по СП 51.13330.2011.

Звуковые колебания уровнем 70-90 дБ создают значительную нагрузку на нервную систему. Длительный шум уровнем выше 100 дБ может привести к тугоухости.

Рабочая зона оператора относится к кабинам наблюдения и дистанционного управления без речевой связи по телефону. Предельным уровнем звука при этом является 75 дБА.

Для уменьшения уровня шума предпринимают следующие меры: устанавливают звукоизоляционные ограждения, для агрегатов применяют звукоизолирующие кожухи и акустические экраны, применяют дистанционное управление [10]. При необходимости используются средства индивидуальной защиты.

Негативное воздействие вибрации, проявляющееся в виде развития различных патологий, стоит на втором месте (после пылевых) среди профессиональных заболеваний. При действии на организм общей вибрации страдает в первую очередь нервная система и анализаторы: вестибулярный, зрительный, тактильный. Эти нарушения вызывают головные боли, головокружения, нарушения сна, снижение работоспособности, ухудшение самочувствия, нарушения сердечной деятельности, расстройство зрения, онемение и отечность пальцев рук, заболевание суставов, снижение чувствительности. Локальной вибрации подвергаются главным образом люди, работающие с ручным механизированным инструментом. Локальная вибрация вызывает спазмы сосудов кисти, предплечий, нарушая снабжение конечностей кровью.

Нормы показателей по вибрации представлены в СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [8]. Предельно допустимыми показателями технологическими вибрациями на стационарных рабочих местах являются: эквивалентный скорректированный уровень общей вибрации по оси Z – 100 дБ; по осям X, Y – 97 дБ. Эквивалентный уровень виброускорений по оси Z – 0,1 м/с²; по осям X, Y – 0,071 м/с² [8, табл. 5.4].

Для уменьшения степени воздействия вибрации на организм человека применяют средства индивидуальной и коллективной защиты.

Коллективные средства защиты: ограждающие устройства, виброизолирующие, виброгасящие и вибропоглощающие устройства, устройства дистанционного управления.

При длительном нахождении людей в непроветриваемом помещении, при эксплуатации привода двигателя, при его длительной работе наблюдаются изменения параметров микроклимата. Основными параметрами, изменяющимися в процессе работы на всех этапах, являются температура воздуха и влажность.

При различных работах происходит уменьшение концентрации кислорода в воздухе, нагрев его. При превышении допустимых значений этих показателей ухудшается общее физическое состояние человека, возникают головные боли, снижается иммунитет и возникает кашель. Нормы для показателей микроклимата регламентируются ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Так при выполнении работ операторского типа нормы показателей составляют 22-24 °С при относительной влажности воздуха не более 60-40 % и не более 0,1 м/с скорости движения.

Для сохранения допустимых показателей необходимо регулярно проветривать помещения, по возможности применять вытяжки и кондиционеры.

Так же при изготовлении и эксплуатации объекта исследования возможны прикосновения к токоведущим частям, соприкосновение с полом, стенами и конструктивными деталями помещений, оказавшихся под напряжением и др, что может привести к поражению электрическим током. Действие электрического тока на человека приводит к травмам или гибели людей.

Для переменного тока частотой 50 Гц допустимое значение напряжения прикосновения составляет 2 В, а силы тока – 0,3 мА, для тока частотой 400 Гц, соответственно – 2 В и 0,4 мА, для постоянного тока – 8 В и 1 мА.

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ, являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. 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.

Расчет устройства защитного заземления

Искусственное групповое защитное заземляющее устройство (УЗЗ) может состоять из вертикальных электродов и горизонтально расположенной соединительной полосы, соединенных между собой сваркой или болтовым соединением. Для обеспечения надежной защиты от электропоражения устройство заглубляется в земле на 0,7 - 0,8 м. Это необходимо, так как верхний слой земли промерзает и высыхает при снижении и повышении сезонных колебаний температуры, что может приводить к возрастанию удельного сопротивления растеканию тока в земле.

Для уменьшения размеров и экономических затрат на сооружение УЗЗ рекомендуется использовать сопротивление естественных заземлителей. В качестве которых можно использовать: свинцовые оболочки кабелей; инженерные сооружения, проложенные в земле, кроме трубопроводов для горючих жидкостей; грозозащита опор линий электропередачи.

В данной работе расчет УЗЗ выполнен, исходя из допустимого, согласно ПУЭ, сопротивления заземлителя растеканию тока методом коэффициентов использования.

Исходные данные:

Вентилятор мощностью 7,7 кВт с питающим напряжением 540 В (до 1000 В).

Для искусственных заземлителей используются трубы длиной $l = 2,5$ м, диаметром $d = 25$ мм и полосовая сталь шириной $n = 30$ мм и толщиной 4 мм.

Наряду с УЗЗ использовать естественный заземлитель - трубопровод длиной $L=25$ м, проложенный в земле на глубине 2,5 м, диаметром $D = 35$ мм.

Данные измерений удельного сопротивления грунта на участке, где

предполагается сооружение заземлителя, приведены в табл. 7.2.

Табл.7.2. Удельные сопротивления грунта растеканию тока КЗ

Грунт	Удельное сопротивление, (Ом·м)	Грунт	Удельное сопротивление, (Ом·м)
Песок сухой	2500	Глина	60
Песок влажный	600	Торф	20
Супесок	300	Каменный	4000
Чернозем	200	Вода речная	100
Суглинок	100	Вода озерная	50

Удельное сопротивление грунта на участке, где сооружается заземлитель, 60 Ом·м.

Сопротивление естественных заземлителей вычисляются по формулам, выведенным для искусственных заземлителей аналогичной формы, или специальным формулам, встречающимся в технической литературе.

Определяем сопротивление трубопровода:

$$R_{\Pi} = \frac{0,366\rho K_{\Gamma}}{l_{\Pi}} \lg \frac{2l_{\Pi}^2}{h_{\Pi}D} = \frac{0,366 \cdot 60 \cdot 2,25}{25} \lg \frac{2 \cdot 25^2}{2,5 \cdot 0,035} = 8,21 \text{ Ом,}$$

где: $\rho = 60 \text{ Ом·м}$ – удельное сопротивление грунта;

K_{Γ} – повышающий коэффициент для горизонтальной полосы. Для 3 трубопровода;

$D = 35$ мм – диаметр трубы.

Требуемая величина устройства защитного заземления

Для установок с напряжением до 1000 В при мощности менее 100 кВА сопротивление заземляющего устройства должно быть не более 10 Ом, а в противном случае – не более 4 Ом.

Так как мощность нашего устройства составляет 7,7 кВт, сопротивление заземляющего устройства должно быть не более $R = 4$ Ом.

Требуемая величина искусственного заземляющего устройства может быть определена как:

$$R_3 = \frac{R \cdot R_{\Pi}}{R_{\Pi} - R} = \frac{8,21 \cdot 4}{8,21 - 4} = 7,8 \text{ Ом.}$$

Расчет сопротивления одного заземляющего электрода

Сопротивление одного электрода:

$$r_3 = \frac{3,366\rho \cdot K_B}{l_3} \left(\lg \frac{2l_3}{d_3} + 0,5 \lg \frac{4h_3 + l_3}{4h_3 - l_3} \right), \text{ Ом,}$$

где ρ – удельное сопротивление грунта;

K_B – коэффициент, учитывающий сезонные изменения ρ для вертикально помещенных в грунт проводников;

l_3 – длина заземлителя;

d_3 – диаметр заземлителя;

h_3 – глубина заложения заземлителя.

В установках размещение электродов должно обеспечить возможно полное выравнивание потенциала на площадке, занятой электрооборудованием. С этой целью заземлитель должен быть выполнен в виде горизонтальной сетки из проводников, уложенных в земле на глубине 0,5-0,8 м, и вертикальных электродов.

Из расчета из вышеприведенной формулы $r_3 = 32,1$ Ом.

Предварительно требуемое количество электродов определяется:

$$n^* = \frac{r_3}{R_3} = \frac{32,1}{7,8} = 4,$$

где R_3 – требуемая величина заземляющего устройства.

Сопротивление полосы, соединяющей электроды, определяется как:

$$r_{\Pi} = \frac{0,366\rho \cdot K_{\Gamma}}{l_{\Pi}} \lg \frac{2l_{\Pi}^2}{h_{\Pi} \cdot b} = \frac{0,366 \cdot 60 \cdot 2,25}{15} \lg \frac{2 \cdot 15^2}{0,8 \cdot 0,03} = 14,06 \text{ Ом},$$

где K_{Γ} – повышающий коэффициент для горизонтальной полосы.

$l_{\Pi} = \alpha \cdot (n^* - 1) = 5(4 - 1) = 15$ м - длина полосы l_{Π} для соединения по контуру;

$h_{\Pi} = 0,8$ м – глубина залегания полосы;

$b = 0,03$ м – ширина соединяющей электроды полосы.

Общее сопротивление контура защитного заземления определяется как:

$$R_{\Sigma} = \frac{r_{\text{э}} \cdot r_{\Pi}}{r_{\text{э}} \cdot \eta_{\Pi} + r_{\Pi} \cdot \eta_{\text{э}} \cdot n} = \frac{32,1 \cdot 14,06}{32,1 \cdot 0,5 + 14,06 \cdot 4 \cdot 0,8} = 7,3 \text{ Ом}$$

где $\eta_{\Pi} = 0,5$ – коэффициент использования полосы при отношении $\alpha : l = 2$;

$\eta_{\text{э}} = 0,8$ – коэффициент использования электродов при отношении $\alpha : l = 2$.

Так как условие $R_{\Sigma} \leq R_3$ выполняется, устройство заземления рассчитано верно.

7.2.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия

Поражение электрическим током

Поражение электрическим током возможно из-за доступности прикосновения к токоведущим частям, отсутствия защитного заземления, не применения защитных средств, при обслуживании электроустановок.

С целью снижения вероятности поражения рабочих электрическим током необходимо проводить следующие мероприятия:

- проектирование, монтаж, наладка, испытание и эксплуатация электрооборудования буровых установок должны проводиться в соответствии с требованиями «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ), «Межотраслевые правила по ОТ при эксплуатации электроустановок» [13].

- применения защитного заземления буровой установки;

- применение блокировочных устройств;

- применение СИЗ при обслуживании электроустановок; -применение средств коллективной защиты: оградительные, автоматического контроля и сигнализации, изолирующие устройства и покрытия, устройства защитного заземления и зануления, устройства автоматического отключения, плакаты по охране труда.

Пожароопасность и взрывоопасность

Электрооборудование, которое работник обязан обслуживать, работает с легковоспламеняющейся жидкостью (нефтепродукты). В связи с этим для предотвращения утечки сырья работник обязан следить за состоянием корпуса электрооборудования и его исправностью. На рабочем месте предусмотрены средства пожаротушения.

7.3 Экологическая безопасность

Объект исследования в процессе своей работы не оказывает существенного влияния на гидросферу и атмосферу, однако в процессе изготовления применяются такие виды деятельности как сварка и пайка, благодаря которым в атмосферу выбрасываются газообразные и токсичные отходы (например, пары металлов). Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны не должно превышать ПДК описанных в ГОСТ 12.1.005-88. Таких сероводород (ПДК = 10 мг/м³), бутан (300 мг/м³), окись азота (5 мг/м³) и т.д. [6, табл. 1]. Для снижения загрязнения атмосферы необходимы регулярные проверки и техническое обслуживание оборудования. – в задании указано другое

При сборке деталей во избежание их быстрого износа необходимо использовать смазочные и охлаждающие жидкости, для устранения неполадок, связанных с пылью, оставшейся на соединяемых деталях, перед непосредственной сборкой осуществляется промывание деталей. Данные жидкости вместе с промышленными и бытовыми водами, электролитами оказывают негативное влияние на гидросферу.

Для минимизации негативного влияния, оказываемого на атмосферу и литосферу, требуется утилизация отходов, полученных в результате изготовления, в соответствии с предусмотренным порядком. Влияние на литосферу объекта управления невозможно исключить.

Для уменьшения влияния шума на селитебную зону применяется физический эффект затухания звука с расстоянием [15, пункт 7.1,7.2,7.3]. То есть шумные станки располагают в местах, удаленных от селитебных зон.

7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

К возможным чрезвычайным ситуациям (ЧС) при эксплуатации относятся:

- пожар классов В, С, Е;
- нарушения внутри питающей сети.

Наиболее частая ЧС – пожар. Горючими материалами выступают: строительные материалы, изоляция электрооборудования, электроника, электрооборудование. Источниками возгорания могут стать горючие газы, электрооборудование, проводка.

Все работы по монтажу, демонтажу и эксплуатации электропривода необходимо выполнять в строгом соответствии с ПБ 08-624-03.

Возможный пожар по видам горючим материалам [11, ст. 8] следует идентифицировать как классы В (горючие жидкости или плавящиеся твердые веществ и материалы), С (газы) и Е (горючие вещества и материалы электроустановок, находящихся под напряжением). Рабочая зона имеет класс А по взрывопожарной и пожарной опасности [11, ст. 27].

Рабочая зона должна быть обеспечена химическими огнетушителями, ящиком с песком, противопожарными покрывалами, бочками с водой, комплектом инструментов и ведрами.

В соответствии с требованиями пожарной безопасности [12], ответственность за обеспечение пожарной безопасности, своевременное выполнение противопожарных мероприятий и правильное обслуживание средств пожаротушения возлагается на мастеров бригады и инженерно-технических работников подразделения. Лица, непосредственно отвечающие за пожарную безопасность, обязаны ознакомиться с соответствующими правилами и нормами, а также ежегодно проводить проверку знаний и проводить инструктажи в бригадах каждый квартал. Они также должны строго требовать от всех работников соблюдения этих инструкций и правил в целях обеспечения безопасности и предотвращения пожаров.

Порядок действий при пожаре:

1. Сообщить о пожаре в пожарную часть, затем оператору по телефону или рации.
2. Немедленно отключить станцию управления, при необходимости обесточить все объекты. Вывод всех людей, не участвующих в ликвидации пожара из опасной зоны.
3. Первая помощь пострадавшим до приезда скорой помощи.
4. Приступить к ликвидации пожара первичными средствами до приезда пожарной бригады.

После того, как пожар был ликвидирован необходимо оценить масштаб повреждений и обеспечить сохранность места его возникновения для расследования причин, при этом обеспечив безопасность персонала. После работы комиссии устраняются последствия пожара с последующей утилизацией сгоревших материалов и обломков. После этого необходимо приступить к восстановлению поврежденных объектов и оборудования. Это может включать ремонт или замену поврежденных частей, проведение испытаний и проверок, чтобы убедиться в безопасности и надежности систем.

Выводы по главе:

В ходе написания данного раздела выпускной квалификационной работы был рассмотрен объект управления (ЭП) и процесс его эксплуатации с точки зрения безопасности для человека и окружающей среды.

Сформулированы и проанализированы в целях минимизации основные опасные и вредные производственные факторы эксплуатации электропривода. Рассчитано устройство защитного заземления. Определены и предложены пути минимизации негативных факторов на окружающую среду, возникающих во время эксплуатации. По влиянию на окружающую среду, объект имеет I категорию [14, гл. 1]. Подобраны нормативные документы, регламентирующие допустимые параметры этих факторов для минимизации вреда для здоровья человека.

Разобраны некоторые чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть в процессе создания и эксплуатации привода. Так средствами защиты от вредных и опасных производственных факторов являются диэлектрические перчатки, коврики и боты, инструмент с изолированными рукоятками и прочие средства индивидуальной защиты.

Описаны мероприятия, направленные на предотвращение ЧС, среди которых выделен пожар, и их минимизацию. Класс пожароопасности блока автоматики – В4/П-Па. Категория возможного пожара по горючим материалам – В и Е [11, ст. 8]. Рабочая зона имеет класс А по взрывопожарной и пожарной опасности [11, ст. 27].

Определены проблемы, нарушающие экологическую безопасность и пути их решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе разработан частотно-регулируемый электропривод для вентиляционной установки. Предложено использовать вентилятор ООО «Вега», являющегося одним из крупнейших производителей вентиляционного оборудования в России. В соответствии с заданными параметрами выбран вентилятор типа ВР 80-75 $D_n = 630$ мм, обеспечивающий высокий КПД, низкий уровень шума и высокие аэродинамические показатели. Расчет мощности и выбор приводного двигателя выполнен с использованием специальных методик и компьютерных программ, позволяющих не только учесть все требования технического задания и условия эксплуатации, но и минимизировать массогабаритные показатели, снизить уровень шума и осуществить выбор двигателя практически без запаса по мощности. Выбран асинхронный электродвигатель 4А112М4 ($P_{дв.н} = 5.5$ кВт, $n_0 = 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$) и преобразователь частоты VLT2800 фирмы Danfoss. Управление электроприводом скалярное с законом регулирования $U_1/f_1^2 = const$.

Кульминацией заключительного квалификационного проекта является успешная разработка электрической силовой установки, которая полностью удовлетворяет указанным требованиям, изложенным в техническом задании. Даны подробные рекомендации по настройке частотно-напряженной характеристики преобразователя, а также по разумному выбору и точной настройке датчика интенсивности, что обеспечивает оптимальную плавность в переходные периоды и сводит к минимуму продолжительность операций управления.

Экономический сегмент заключительного квалификационного проекта посвящен многогранным аспектам, охватывающим этапы проектирования и внедрения в эксплуатацию разработанного электропривода. Была тщательно проведена всесторонняя оценка связанных с этим расходов, включающая расчет ожидаемой экономии затрат на потребление электроэнергии. В разделе

"Безопасность и экологичность проекта" произведен расчет воздухообмена, рассмотрены вопросы пожарной безопасности и производственной санитарии.

Список используемой литературы

1. Сахарнов Ю.В. Регулируемый электропривод - эффективное энергосберегающее оборудование. <http://www.mtu-net.ru>
2. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: "Академия", 2004.
3. Онищенко Г.В., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М.: 1972
4. Lucchesi L.J. Match the variable frequency drive to the industrial fan // Chem. Eng. (USA). – 2000. – 107, № 11.
5. Мальцева О.П., Удуг Л.С., Кояин Н.В. Системы управления электроприводов. Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 152 с.
6. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электропроводах. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. 172 с.
7. Кояин Н.В., Удуг Л.С., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 5. – Применение программы DORA-FUZZY в расчетах электроприводов постоянного тока: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2002. – 156 с.
8. Карвовский Г.А., Огороков С.П. Справочник по асинхронным двигателям и пускорегулирующей аппаратуре. – М.: «Энергия», 1969. – 256 с.: ил.
9. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 502 с., ил.
10. Баев И.А., Варламова З.Н., Васильева О.Е. Экономика предприятия: Учебник для вузов. 4-е изд. – СПб.: Питер, 2005. – 384 с.

11. Трудовой кодекс Российской Федерации: дата введения с изм. 2023-01-03. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.
12. ГОСТ 12.2.032-78. «Рабочее место при выполнении работ сидя».
13. ГОСТ 21752-76. «Система человек-машина. маховики управления и штурвалы».
14. ГОСТ 12.2.003-74. «Оборудование производственное».
15. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов: дата введения 1983-07-01 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200313> (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.
16. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны: дата введения 1989-01-01 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003608> (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.
17. СП 51.13330.2011. Защита от шума: дата введения 2011-05-20 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084097> (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.
18. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды: дата введения 1971-01-01 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003320> (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.
19. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: дата введения 2021-03-01 – URL:

<https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.

20. ГОСТ Р МЭК 60050-195-2005. Заземление и защита от поражения электрическим током. Термины и определения: дата введения 2007-01-01 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200045057> (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.

21. ФЗ N 123 Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: дата введения 2022-05-01 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.

22. ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования: дата введения 1992-07-01 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9051953> (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.

23. Правила устройства электроустановок. Издание седьмое. – URL: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html> (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.

24. Правительство Российской Федерации. Постановление от 31 декабря 2020 года N 2398. Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий: дата введения 2021-01-01 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573292854> (дата обращения 01.05.2023). – Текст: электронный.

Приложение А
(справочное)

Asynchronous scalar electric drive of the boiler blast fan

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM16	Шевченко Артур Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Игорь Александрович	Кандидат технических наук, доцент		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Егорова Юлия Ивановна	Кандидат технических наук		

Introduction

Russia is one of the leading economic powers in the world. However, compared to other countries, it still faces the problem of high energy consumption. Studies show that up to 30% of the energy consumed in the country is spent on production processes. In this article, we will look at the reasons for this situation and propose a solution that will help reduce energy costs - the introduction of an adjustable electric drive.

There are several reasons that explain the high level of energy consumption in Russia. Firstly, many enterprises still use outdated equipment that does not meet modern energy efficiency standards. This leads to excessive energy consumption when performing production operations.

Secondly, the lack of an effective energy management system and energy conservation measures contributes to suboptimal energy use in enterprises. Many companies do not have the means to monitor and control energy consumption, which leads to its excessive use.

Industrial and household electricity needs from the power grid continue to grow, which makes it increasingly difficult to ensure peak thermal and electrical loads in the autumn-winter period. The construction and commissioning of new facilities to meet the growing demand for power in kWh is not an easy task. However, the introduction of energy-saving equipment, in particular regulating electric drives, turns out to be a more economical solution to achieve the same amount of kWh and obtain savings. All over the world, including Russia, electric drives for mechanical work consume about 20 percent of all electricity. Asynchronous electric motors are mainly used in the industrial and utility sectors, accounting for 50-55 percent of total energy consumption.

The adjustable electric drive is an effective solution for reducing energy consumption in various industries. It allows you to control the speed and power of

the electric drive in accordance with the requirements of the process. Thus, the optimal use of energy is achieved and the load on the power grid is reduced.

The distribution of asynchronous electric motors by power and electricity consumption is presented in detail in Table A.1. Distribution of asynchronous motors by capacity and electricity consumption

Power, kW	Percentage of the total	Percentage of total electricity consumption
up to 1	10	5
from 1 to 5	60	40
from 5 to 20	20	30
from 20 to 100	9	20
Over 100	1	5

Induction motors, which are one of the most common types of motors, have a capacity of up to 30 kits. They consume approximately 80% of electrical energy and efficiently convert it into mechanical power. These motors are limited to a maximum capacity of 100 kits, making up 80% of all engines.

The majority of power consumption is attributed to various mechanisms, such as pumps and ventilators. These mechanisms account for more than half of the total number of mechanisms in operation.

Table A.2 – Distribution of asynchronous electric motors by mechanisms

Mechanisms	Percentage of the total	Mechanisms	Percentage of the total
Fans	37,7	Mixers	5,5
Transporters	19,9	Mechanisms of movement	4,0
Pumps	17,0	Closures, latches	3,7

Processing machines	7,0	Compressors	2,8
---------------------	-----	-------------	-----

The widespread use of electric motors with a large power reserve in various sectors of the economy often leads to unjustified energy consumption. Despite the fact that even during peak hours they work only 15-20 hours, these engines consume a significant amount of energy, sometimes exceeding the required amount up to 60 kW. In order to solve this problem and achieve significant energy savings, it is extremely important to widely introduce energy-efficient electric drives.

For pumping gas or oil, in various cargo and industrial equipment for quarries, fans are used in mines to supply air, electric elevators are also used in mines. Moreover, they are used in pumping and fan installations of thermal power plants, boiler houses, heating networks and other systems.

In industry and agriculture, electric drives with the possibility of regulation are also used. They play an important role in various mixing devices, pumps, pneumatic compressors. They are also used in electric drives of machining machines, electric conveyors, conveyors, furnaces, mills and other equipment.

Table A.3 provides information on the efficiency of using an adjustable electric drive in specific mechanisms.

Table A.3. Energy savings when using an adjustable electric drive in various mechanisms

Mechanisms	Energy saving
Pumps	by 25%-30%;
Compressors	by 40%;
Fans	by 30%;
Centrifuges	by 50%.
Smoke pumps	from 30% to 80%

The adjustable electric drive provides a wide range of advantages, including reduced operating costs and increased equipment life. This type of drive helps to

reduce starting currents, eliminates the need to use throttles and valves, and also reduces the dynamic loads on the equipment, which leads to a reduction in costs and the risk of accidents.

In developed industrial countries, up to 90% of manufactured electric drives are regulated, due to the high profitability of such a choice. The introduction of adjustable electric drives is considered as a promising solution from the point of view of energy saving. The Russian market of frequency converters has significant potential for development and expansion.

The use of an adjustable electric drive provides the following advantages:

Reduction of energy consumption (electricity, water, fuel) by 15-20%, 10-12% and 8-10%, respectively.

Reducing costs by reducing energy consumption.

Increasing the service life of the equipment.

Development of the domestic industry of regulated electric drives.

Support of qualified scientific and production personnel.

Additional revenues to the budget of enterprises from taxes.

The introduction of an adjustable electric drive pays off in less than 1.0 years. The economic benefits obtained from the initial energy saving measures can be used to finance subsequent projects. Given the growing tendency to increase the cost of energy, this effect becomes even more significant. The experience of implementing a regulated electric drive in Russia confirms its effectiveness in the field of energy saving and increasing the service life of equipment.

Fan designs



Figure A.1 – Low-pressure radial fan BP 80-75

Fan housings are created by manufacturing welded structures using carbon and oxidized steel. The enclosures for fans of small and medium size, with a working part size of up to 1000 mm, can be constructed using sealing seams or galvanized sheet metal, irrespective of the ventilation type. These enclosures are fabricated from high-quality material to ensure airtightness and prevent air leakage.

Equipped with connecting flanges, such as angles or bands, the fan enclosures facilitate air entry and exit. Moreover, the rear wall of the enclosure features circumferential bolts that are welded, allowing for flexible installation in various orientations relative to the support structure, while maintaining a specified inclination.

In terms of rotation, the fans offer two options: right or left direction. When a fan rotates in the right direction, it moves in a clockwise manner, while a fan rotating in the left direction moves counterclockwise when observed from the intake side.

The spiral housing is able to move and allows air to escape from the fan in different directions. The position of the spiral housing is determined by the angle of rotation relative to the initial position, creating a vertical rotation of the air flow in the direction of the wheel.

Axial fan housings are made of carbon steel in a cylindrical shape and have solid flanges. The fan wheels are made of welded carbon and stainless steel and can have rear, front and rear blades.

The rear disc is securely attached to the wheel hub. To ensure reduced vibration, all impellers undergo dynamic balancing, achieving an average square value of 6.3 mm.

Carbon steel is used to construct the wheels of axial fans. The wheels consist of three blades welded to the shield, forming leaf blades. Five different bearing designs are utilized to mount the fan wheels on the motor or intermediate shaft. The housing of the wheel or intermediate shaft is affixed to a profiled rack made of rolled steel. These racks can be firmly fixed on the foundation or installed on vibration isolation materials.

In the case of the fifth design scheme, racks with an intermediate shaft are mounted on a frame composed of profiled rolled products. The motor with a pulley is also positioned on this frame. A V-belt connects the intermediate shaft pulley to the motor pulley. The pulleys must be securely installed beneath the bearing support. Typically, pulleys consist of a frame and a detachable conical sleeve connected by screws fixed in the housing and insert. The tension device, which is also attached to the frame, is used to tighten the belts.

The axial fan wheel and the motor are both mounted on a rack that forms part of the circular housing. The shafts, made of 40x rotating alloy steel, have keyways at their ends for the attachment of the wheel and chassis.

Electric motors used

An asynchronous three-phase short-circuited single-speed motor is used to install the fans. It is designed to operate in alternating current networks with a frequency of 50 Hz and a voltage from 220 to 380 V. Fans that are used in industry and are resistant to corrosion are equipped with motors from the 4A, AIR, RA and other series [4]. For fans that are designed for explosive environments, ventilation motors of the V, 2V, AIM and other types are used. In addition, it is possible to use engines of other series and types that have similar technical characteristics, the same as the installation in terms of power, rotation speed and voltage.

Fans that are designed according to 5 different design schemes can be replaced by similar motors that have the same power and rotation speed. For fans that are designed to move explosive mixtures of category 2A, category 2B, groups T1, T2, TZ, T4, an engine that corresponds to a higher PV category and group T4 is used. The marking of such an engine should indicate HT1 and a higher class and group [5]. The engine design is determined by the climatic operating conditions specified in the order.

For more economical operation, each engine is equipped with several motors with different Nu power settings. It depends on the operating mode Q, PV and power H.

JUSTIFICATION OF THE USE OF A FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE FOR A FAN

Fans make up 37.7% of all mechanisms driven by asynchronous motors [2]. Most fans are designed for sanitary and technical use and carry out air conditioning in industrial and technical premises. As mentioned above, fans with relatively low power (up to 100 kW) consume a significant amount of energy in aggregate [3].

An increase in the diameter of the fan impeller requires a decrease in its nominal speed due to the limitation of the permissible speed of the blade ends. Fans have a large moment of inertia, sometimes significantly exceeding the moment of inertia of the drive motor. This makes it difficult to start the fan and, in some cases, requires the use of engine braking to stop it quickly.

Fans are regulated by changing the angle of rotation of the guide vanes. This aerodynamic control method is widely used for centrifugal fans. When the blades turn, the cross-section of the input channel decreases and the flow is pinched in front of the impeller. However, such regulation leads to a significant decrease in the efficiency of the fan.

Changing the angle of rotation of the guide vanes can be carried out either manually, as needed, or automatically with the help of an executive motor. However, in practice, automatic adjustment of the angle of installation of the guide device is rarely used due to the complexity of operation and low reliability.

Another way to regulate the performance of fans is to use an adjustable gate, which changes the cross-section of the output channel of the fan, similar to throttle regulation of pumps. However, such regulation does not change the characteristics of the fan, but affects the characteristics of the fan-trunk system.

Therefore, the use of an adjustable electric drive is of particular importance for fans. Studies show that the efficiency of fans with an adjustable electric drive is on average 12% higher compared to an unregulated electric drive [4].

In addition to increasing efficiency, the use of an adjustable fan drive makes it possible in some cases to simplify the design of turbomachines by removing the guide unit, and to ensure the simultaneous operation of two or more fans.

CONCLUSION

The share of power inputs in the cost price of production and sphere of services in Russia makes up to 20-30 % that is much higher, than in the countries with the advanced market economy.

Advantages of such decision are

Opportunity to solve questions of energy-saving effectively;

Exception of shutters from a design of ventilating installation, essentially lowering reliability and profitability of work;

Increase reliability of an electric equipment due to elimination of shock starting currents, decrease (reductions) of mechanical and electrodynamic loadings

Convenience and simplicity of introduction

The purpose of the given final qualification work was designing and development the electric drive of the ship ventilating fan.

By results of precomputations the ventilating fan and the electric motor, design variables are defined. In the capacity of the basic method of the analysis the simulation modeling is used.

One of problems was a justification and sampling of control action of a rotational speed of the ventilating fan. As the control range of speed, on a requirement specification, is small (1:2) such control action as $U = \text{var}$, $U/f = \text{const}$ and $U/f^2 = \text{const}$.

Graphs of transients of the moment and speed of the electric motor were analysed with different importance of a supply voltage. In the capacity of criterion have been for comparison purposes accepted: conformity of the moment of loading with direct current characteristic, average losses and quality of transients.

As a result of research it has been established, that the best control action is $U/f^2 = \text{const}$. At application of this control action quality of transients of the moment and speed of the propeller was much better, than at other laws, however the peak value of the moment exceeded the greatest possible importance.

For decrease of oscillations of the moment "soft" start-up of the electric drive is recommended, by feeding into of the set-point device of intensity that has allowed to lower considerably oscillations and a peak value of the moment.

By results of research the frequency converter picked, developed the control package providing protection of the induction motor with the cage rotor, the signalling system about normal and emergency operation of operation of the electroventilating fan and the feed source, and also realizes switching the electroventilating fan from the basic feed source on reserve in case of disappearance of a voltage in the basic web and retrace in basic in case of recovery in her voltage.

In an economic part of final qualification work account of the cost price of the electric drive of the ventilating fan of an alternating current is produced, the price and the profit of the factory is defined.

Industrial safety is covered in special part of final qualification work.