

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

Институт ЭНИН
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра Электропривода и электрооборудования

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Частотно – регулируемый электропривод вентиляторной установки

УДК 621.63:62-83-523

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГЗБ	Брюханов Анатолий Олегович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин А.А.	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Потехина Н.В.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Панин В.Ф.	д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2017 г.

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

Институт ЭНИН _____
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника _____
Кафедра Электропривода и электрооборудования _____

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

Дементьев Ю.Н

(Подпись)

(Дата)

(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ГЗБ	Брюханову Анатолию Олеговичу

Тема работы:

Частотно-регулируемый электропривод вентиляторной установки

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(Наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Асинхронный электропривод центробежного вентилятора типа В-Ц14-46-2,5 с системой регулирования преобразователь частоты, режим работы непрерывный.</p> <p>$Q=1500 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H=450 \text{ Па}$, $n=1500 \text{ об/мин}$</p>
--	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Введение; Изучение типов вентиляторов; Выбор оборудования; Создание имитационной модели электропривода вентиляторной установки; Разработка учебного стенда; Расчет параметров и характеристик асинхронного двигателя; Выводы и рекомендации; Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; Социальная ответственность.</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Потехина Н.В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Панин В.Ф.</p>

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Профессор</p>	<p>Шилин А.А.</p>	<p>Д.Т.Н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5ГЗБ</p>	<p>Брюханов Анатолий Олегович</p>		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ГЗБ	Брюханову Анатолию Олеговичу

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

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>Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>30 % премии 20 % надбавки 16 % накладные расходы 30 % районный коэффициент</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>30 % отчисления на социальные нужды</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>Оценки перспективности проекта по технологии QuaD.</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>	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Диаграмма Ганта 2. Оценочная карта QuaD 3. Бюджет затрат НИ 	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Потехина Н.В.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГЗБ	Брюханов Анатолий Олегович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГЗБ	Брюханову Анатолию Олеговичу

Институт	Энергетический (ЭНИН)	Кафедра	Электропривода и электрооборудования (ЭПЭО)
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p><i>1. Описание рабочего места (территория ремонтно-механического цеха и понижающей подстанции) на предмет возникновения:</i></p> <p><i>1.1. вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</i></p> <p><i>1.2. опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</i></p> <p><i>1.3. негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</i></p> <p><i>1.4. чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</i></p>	<p>Территория лаборатории электроники и микропроцессорной техники. Необходимо поддержание:</p> <p>1.1. Нормативных метеоусловий, уровней освещенности, вибрации и шума, электромагнитных полей;</p> <p>1.2. Нормативных мер обеспечения электро- и пожаробезопасности;</p> <p>1.3. Нормативных мер при обращении с выбросами, сбросами и твердыми отходами из-за ремонта оборудования.</p> <p>1.4. Наиболее вероятные ЧС: загорания (пожары), поражение персонала электрическим током.</p>
<p><i>2. Ознакомление и отбор законодательных и нормативных документов по теме и отбор их.</i></p>	<p>ГОСТ 12.0.003-74 «ОиВПФ»; ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности»; ГОСТ 12.1.01290 «Вибрационная безопасность»; ГОСТ 12.1.005-88» Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»;</p> <p>ПУЭ, утвержденный министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.;</p> <p>№123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»;</p> <p>Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681;</p> <p>Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12.2014).</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <p><i>1.1. физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</i></p> <p><i>1.2. действие фактора на организм человека;</i></p> <p><i>1.3. приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</i></p> <p><i>1.4. предлагаемые средства защиты</i></p>	<p>Вредные факторы:</p> <p>1. Шум;</p> <p>2. Вибрации;</p> <p>3. Возможные ненормативные метеоусловия и освещенность рабочих мест;</p> <p>4. Электромагнитные поля</p>

<i>(сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</i>	
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <p>2.1.механические опасности (источники, средства защиты);</p> <p>2.2.термические опасности (источники, средства защиты);</p> <p>2.3.электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</p> <p>2.4.пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</p>	<p>Опасные факторы:</p> <p>2.1.Опасность электропоражения;</p> <p>2.2.Опасность загораний (пожаров).</p>
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <p>3.1.анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</p> <p>3.2.анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</p> <p>3.3.анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</p>	<p>Описание проектируемой системы обращения с выбросами, сбросами, твердыми отходами ремонтно-механического цеха.</p>
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <p>4.1.перечень возможных ЧС на объекте;</p> <p>4.2.выбор наиболее типичных ЧС;</p> <p>4.3.разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</p>	<p>Возможные ЧС: загорание (пожар), электропоражения.</p> <p>Соблюдения техники безопасности</p> <p>Следовать плану эвакуации, вызвать пожарных.</p> <p>Разработать мероприятия по предупреждению загораний, электропоражений и ликвидации их последствий</p>
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <p>5.1.специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</p> <p>5.2.организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</p>	<p>Право на условие труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены.</p> <p>Использовать оборудования и мебель согласно антропометрическим данным.</p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор кафедры ЭБЖ	Панин В.Ф.	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГЗБ	Брюханов Анатолий Олегович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит страниц 95, рисунков 61, таблицы 23, источника 30.

Ключевые слова: Асинхронный двигатель, центробежный вентилятор, преобразователь частоты.

Цель работы – произвести расчет и исследование электропривода центробежного вентилятора по системе ПЧ-АД, выполнить экспериментальные исследования на стенде вентиляторной установки и провести исследования статических и динамических характеристик на имитационной модели.

В работе выполнен выбор преобразователя частоты, асинхронного двигателя и способа управления скоростью асинхронного двигателя.

Произведен расчет параметров двигателя, преобразователя, механической системы электропривода машины, предельных характеристик.

Произведено имитационное моделирование в программе MATLAB 7.7.0(R2008b). С помощью имитационной модели выполнено исследование асинхронного двигателя, получены переходные характеристики.

Степень внедрения: рекомендации по дальнейшей разработке учебного стенда.

Область применения: проведение лабораторных работ со студентами очной и заочной формы обучения.

В будущем планируется продолжить работу по автоматизации комплекса регулирования газообразных сред.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	18
1.1. Составление схемы управления регулируемого электропривода.....	19
2. РАСЧЕТ И ВЫБОР СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	21
2.1. Расчет мощности двигателя и предварительный его выбор	21
2.2. Выбор преобразовательного устройства для регулирования электропривода	23
2.3 Расчет и выбор основных силовых элементов системы регулируемого электропривода.....	26
2.3.1. Расчет АИН.....	26
2.3.2. Расчет выпрямителя (трехфазная мостовая схема)	27
2.3.3. Расчет фильтра	28
2.3.4. Расчет охладителя	29
2.4. Выбор аппаратуры управления и защиты	30
2.5. Расчет и выбор типа и сечения кабеля сети высокого напряжения и вспомогательного оборудования	32
2.6. Определение расхода электроэнергии за цикл работы, среднецикловых значений КПД и коэффициента мощности.	32
3. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	35
3.1. Расчет параметров схемы замещения	35
3.2 Построение естественных электромеханических и механических характеристик	40

3.3 Расчёт и построение механических и электромеханических характеристик АД для закона регулирования.....	42
4. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА.....	46
4.1. Библиотечная модель с характеристиками.....	46
4.2 Имитационная модель асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора α, β	50
4.3 Динамические характеристики.....	53
5. РАЗРОБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА	56
5.1 Описание оборудования	56
5.2 Экспериментальные характеристики	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
Список используемой литературы:	73

ВВЕДЕНИЕ

Вентилятор – один из наиболее часто используемых приборов в современной жизни. Данный термин происходит от латинского “ventilo”, что переводится как вею, махаю. Из этого названия и следует и смысл данного прибора и его принцип работы. Данное устройство, предназначено для формирования потока воздуха или другого газа различной степени мощности[1]. Вентилятор – это лопаточная машина, которая создает давление, максимальное значение которого составляет 15 кПа (по рекомендациям СЭВ — 30 кПа).

Виды вентиляторов

Вентиляторы в зависимости от направления потока газа в колесе разделяются на следующие виды:

- а) радиальные вентиляторы (рисунок 1);
- б) осевые вентиляторы (рисунок 2);
- в) диаметральные вентиляторы (рисунок 3);
- г) диагональные — радиально-осевые вентиляторы (рисунок 4).

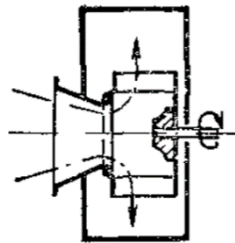


Рисунок 1 – Радиальный вентилятор

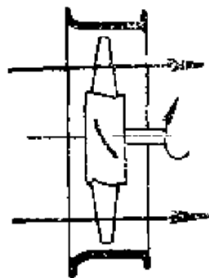


Рисунок 2 – Осевой вентилятор

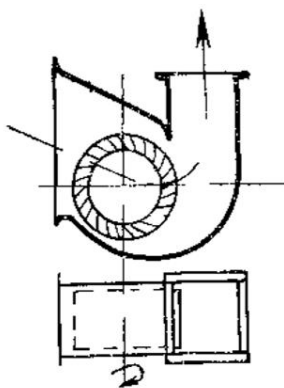


Рисунок 3 – Диаметальный вентилятор

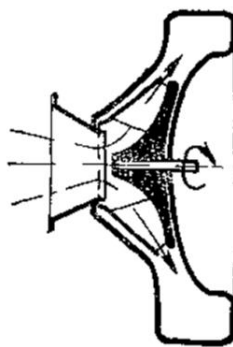


Рисунок 4 – Радиально - осевой вентилятор

Осевой вентилятор отличается тем, что воздух проходя корпус и колесо вдоль оси вала вентилятора двигается в одном направлении.

В диагональном вентиляторе перемещение воздуха в колесе происходит по диагонали между радиальным и осевым направлениями.

Наиболее обширно в вентиляционных системах используются осевые и радиальные виды вентиляторов.

Осевые вентиляторы выпускаются в различных модификациях. В вентиляционных установках чаще всего используются осевые вентиляторы с листовыми лопатками, которые вырезаны из листа металла и имеют одинаковую толщину.

Наименьшее распространение имеют осевые вентиляторы с профильными лопатками, имеющими форму крыла самолета, либо чечевицеобразными. Такие вентиляторы способны развивать большие

давления, чем вентиляторы с листовыми лопатками, благодаря значительной прочности лопаток.

Существуют осевые вентиляторы, у которых устанавливают неподвижные лопатки за колесом либо перед ним. Эти лопатки называются направляющим аппаратом вентилятора (если они расположены перед колесом) или спрямляющим аппаратом вентилятора, когда они расположены за колесом. Несмотря на то, что установка спрямляющих и направляющих аппаратов усложняет конструкцию, она улучшает аэродинамические качества осевых вентиляторов.

Осевые вентиляторы могут выполняться двух- или многоступенчатыми для увеличения давления.

Центробежные вентиляторы. Основные понятия. Применение.

Центробежными (радиальными) вентиляторами именуют машины для движения смесей газов с небольшими твердыми материалами и чистых газов, при степени увеличения давления до 1,15 при плотности потока $1,2 \text{ кг/м}^3$. В радиальном вентиляторе воздух, после вхождения в осевом направлении во входной патрубок корпуса, изменяет свое направление в колесе почти на 90° в радиальном направлении и движется в улитку корпуса.

Центробежные вентиляторы обширно распространены в промышленности и коммунальном хозяйстве для отсасывания вредоносных веществ в технологических процессах и вентиляции зданий.

Конструкция центробежного вентилятора простейшего типа изображена на рисунке 5. Литая ступица 1 жестко связана с основным диском 2. Рабочие лопатки 3 устанавливаются к основному диску 2 и переднему диску 4; 6 — шкив привода вентилятора, 7 — корпус, 8 — станина, на которой размещаются подшипники 9; 10 и 11 — фланцы крепления всасывающей и напорной труб.

Буквенное обозначение центробежных вентиляторов содержит букву Ц. Обозначение вентилятора содержит и его номер, который представляет

собой значение диаметра D_2 , выраженное в дециметрах. Например, центробежный вентилятор с диаметром рабочего колеса 400 мм, который имеет при максимальном КПД быстроходность 70 и коэффициент полного давления 0,86 обозначается Ц4-70-4.

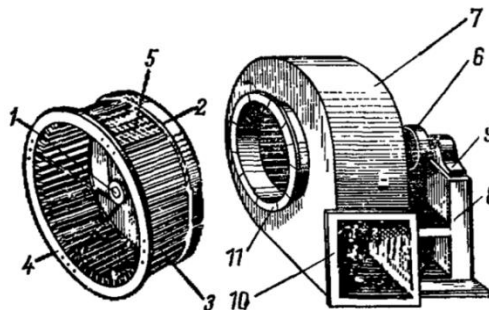


Рисунок 5 – Центробежный вентилятор

В обычных конструкциях отношение выходного и входного диаметров межлопастных каналов рабочего колеса центробежного вентилятора D_2/D_1 выбирается небольшим (1,2—1,45), радиальная длина лопасти составляет $(0,084 \div 0,16) D_2$.

Исходя из давления, создаваемого вентиляторами, их принято разделять на три группы: вентиляторы низкого давления – не более 0,98 кПа, среднего — свыше 0,98 до 2,94 кПа, высокого — более 2,94 до 11, 772 кПа.

Конструктивное выполнение центробежных вентиляторов общего назначения.

Конструктивная форма и габариты вентилятора определяются в зависимости от его подачи, давления и частотой вращения. Различные формы конструктивного исполнения рабочих колес вентиляторов изображены на рисунке 6.

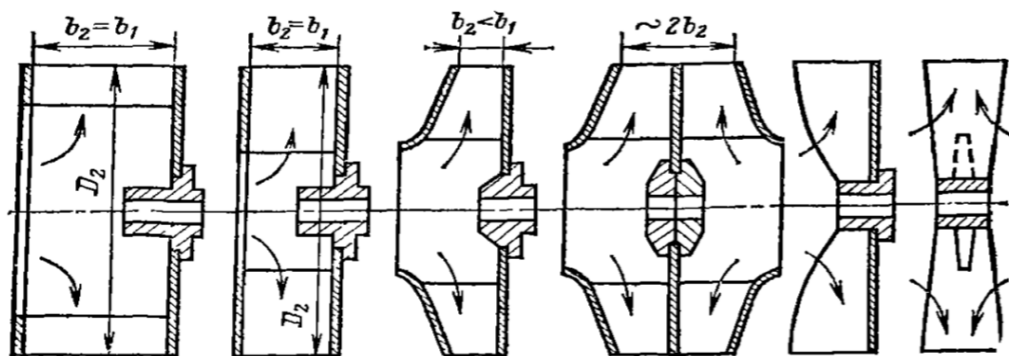


Рисунок 6 – Конструкция рабочих колес

Барабанная (а) и кольцевая (б) формы конструкций характерны для вентиляторов низкого давления с лопатками, которые загнуты вперед; формы (б), (в) и (г) отличительны для вентиляторов низкого, среднего и высокого давлений с лопатками, загнутыми назад.

Колеса формы (а) имеют меньшую жесткость и прочность, и допускают окружную скорость на диаметре D_2 не более 40 м/с. Ширина колес такого типа постоянна и составляет примерно $0.5D_2$.

Колеса, имеющие кольцевую форму с шириной $b_1=b_2=0,21 \div 0,35$ мм обладают большей прочностью и жесткостью и допускают скорость v_2 не превышающую 60 м/с.

Форма конического покрывающего диска (в и г) обеспечивает высокую жесткость колеса и допускает увеличение окружных скоростей до 80 м/с.

Форма колеса (г) используется для колес высокой подачи и находит, в частности, использование для дымососов и дутьевых вентиляторов ТЭС.

Также на ТЭС широко используются открытые однодисковые и бездисковые колеса (д и е), которые используются в пылевых вентиляторах, предназначенных для подачи смесей газов с твердыми частицами, к примеру в системах пылеприготовления.

В настоящее время есть тенденция внедрения лопаток, загнутых назад. Такая форма лопаток гарантирует по сравнению с лопатками,

загнутыми вперед, стабильную работу вентилятора в широком диапазоне расходов, более высокое значение его КПД и уменьшение шума[3].

Осевые вентиляторы

В осевой машине передача энергии с вала потоку происходит при поддержке рабочего колеса, которое состоит из консольных лопастей, прикрепленных на втулке.

Схема конструкции одноступенчатого осевого вентилятора была приведена на рисунке 7.

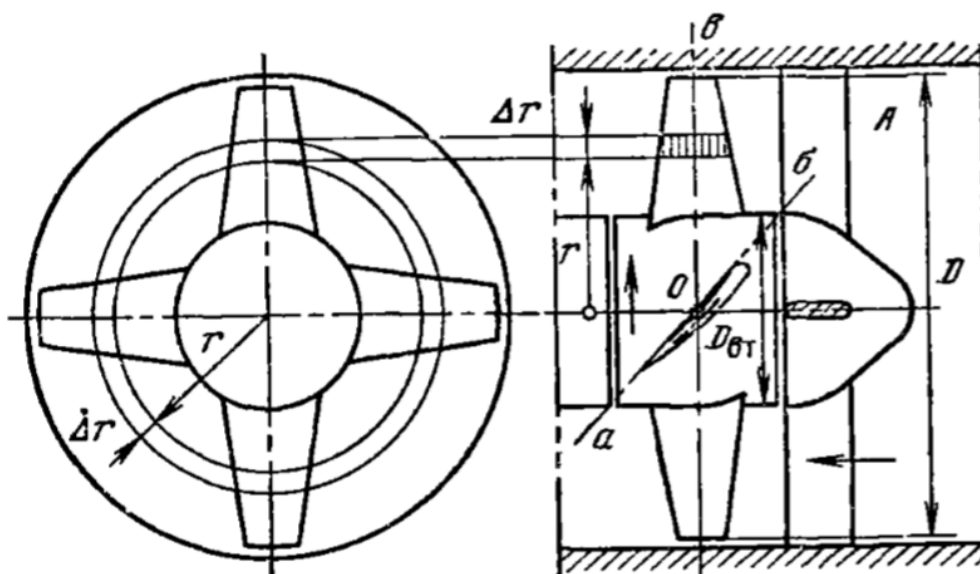


Рисунок 7 – Схема четырехлопастной осевой машины

Осевые вентиляторы общего назначения применяются для санитарно-технических и производственных целей.

Лопasti рабочих колес могут выполняться поворотными и неповоротными (жестко закрепленными на втулке). Основные размеры осевых вентиляторов общего назначения по ГОСТ: $D_{\text{вт}} = (0,3-7-0,55)$; диаметр входного конуса $D_{\text{к}} = 1,2D$; длина входного конуса $L_{\text{к}} = 0,2 D$. Углы установки лопастей $15-32^\circ$.

В конструкциях осевых вентиляторов с одним и несколькими рабочими колесами используются устройства, улучшающие

аэродинамические качества потока и увеличивающие КПД вентиляторов: обтекатели, коки, спрямляющие и направляющие аппараты.

На рисунке 8 показаны лопасти осевого вентилятора.

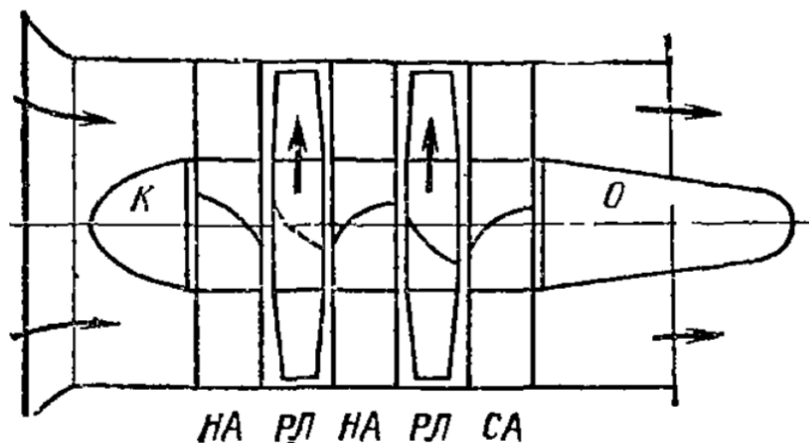


Рисунок 8 –Лопасти двухступенчатого осевого вентилятора

Рассмотрим предназначение отдельных частей конструкций осевого вентилятора.

Предназначение кока К – обеспечить постепенное увеличение скорости потока до величины c_0 на входе в направляющий аппарат первой ступени при малых затратах энергии. Направляющий аппарат НА состоит из венца неподвижных лопаток, расположенных перед входом в рабочее колесо.

Предназначение спрямляющего аппарата СА заключается в безударном принятии потока, сходящего с лопастей рабочего колеса, и придания ему осевого направления.

Регулировка подачи осевых вентиляторов может выполняться несколькими способами: направляющим аппаратом НА на входе, поворотом рабочих лопастей РЛ, изменением частоты вращения и одновременно двумя первыми способами.

Иногда, в случае привода от электродвигателя с неизменной частотой вращения, используется регулировка НА на входе.

Вентиляторы соединяются с электродвигателями следующими способами:

- рабочее колесо вентилятора зафиксировано на валу электродвигателя;
- регулируемой бесступенчатой передачей через гидравлические либо индукторные (электрические) муфты скольжения.

Согласно ГОСТ 5976 - 73 предусматриваются семь конструктивных схем соединения вентилятора с приводом, которые представлены на рисунке 9. Для вентиляторов небольших размеров применяется исполнение 1 (электровентилятор). Такое исполнение обеспечивает относительную бесшумность, компактность установки, ее надежность и экономичность из-за отсутствию потерь в передаче. Исполнения 2 и 4 широко не применяются, потому что подшипник и передняя опора, установленные во входном отверстии, затрудняют вход воздуха в вентилятор.

При одинаковых частотах вращения электродвигателя и вентилятора, имеющего рабочее колесо большого диаметра либо большой массы, применяется исполнение 3. Для вентиляторов двустороннего всасывания применяются исполнения 5 и 7. Исполнение 6 широко применяется, так как обеспечивается простота подключения вентилятора к сети и при необходимости можно легко и быстро выполнить замену приводных ремней.

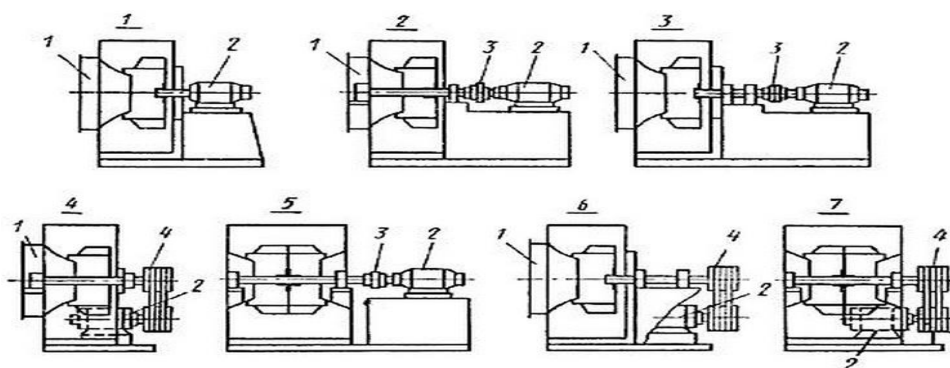


Рисунок 9 – Конструктивные схемы соединения вентиляторов с электродвигателями: 1 - всасывающий коллектор; 2 - электродвигатель; 3 - эластичная муфта; 4 - клиноременная передача.

1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Основные элементы, входящие в схему:

UZ – неуправляемый выпрямитель;

L_0, C_0 – фильтр;

RT – термистор, ограничивает ток конденсатора C_0 ;

R_0 – разрядное сопротивление для конденсатора C_0 ;

R, C – цепь защиты от перенапряжения на транзисторах IGBT (снаббер);

RS – датчик тока для организации защиты (FA) от сквозных и недопустимых токов перегрузки через IGBT;

VT – VD – трехфазный инвертор на IGBT с обратным диодным мостом.

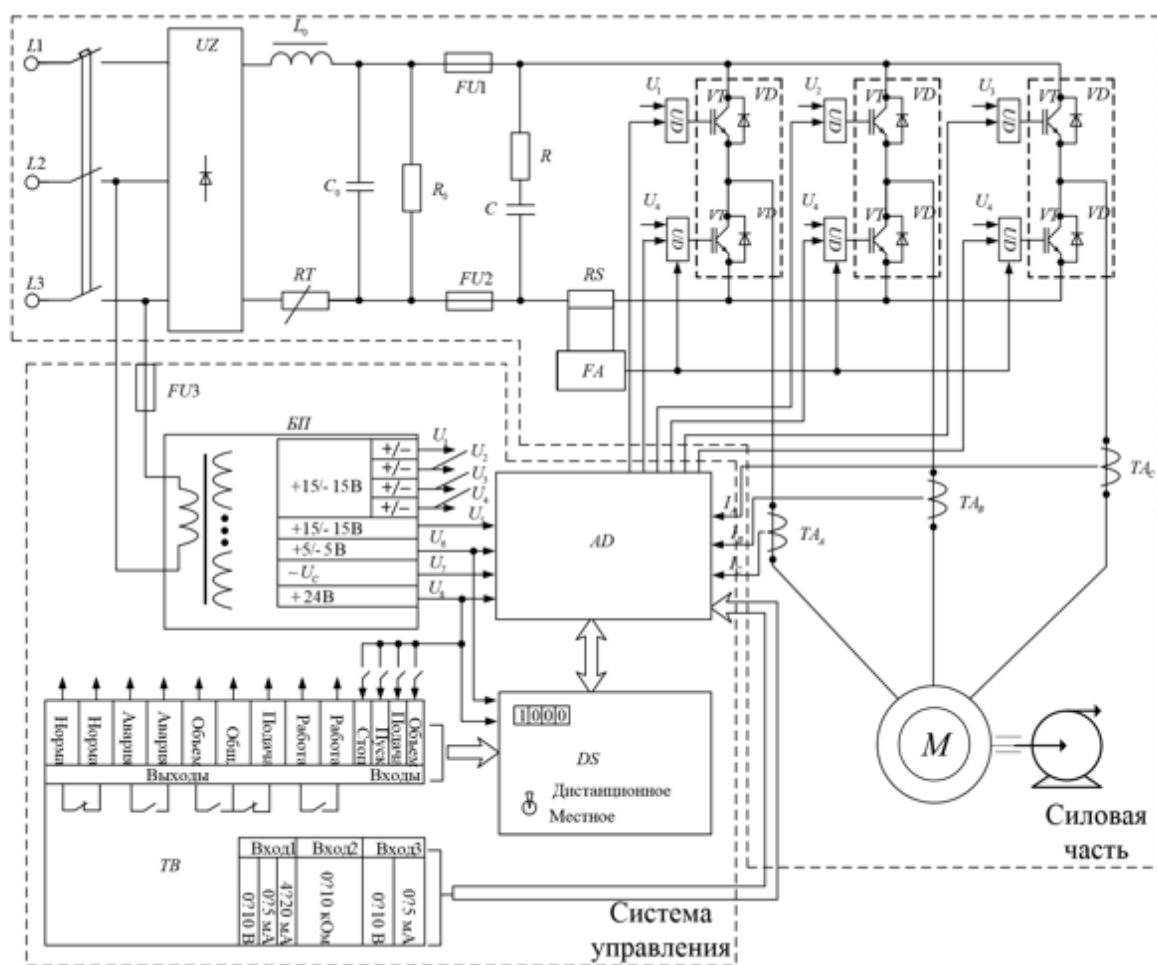


Рисунок 10 – Функциональная электрическая схема асинхронного электропривода с ПЧ

1.1. Составление схемы управления регулируемого электропривода

Определение структуры электропривода зависит от стоимости эксплуатации, технических требований к регулированию момента и скорости, экономических и массогабаритных показателей, условий эксплуатации, вариантов конструктивного исполнения.

Важным требованием к вентиляции является надежность. Практика показывает, что основной причиной выхода из строя ЭП являются неисправности в ПЧ или в системе управления. Из-за этого в схеме предусмотрено подключение двигателя на прямую к сети.

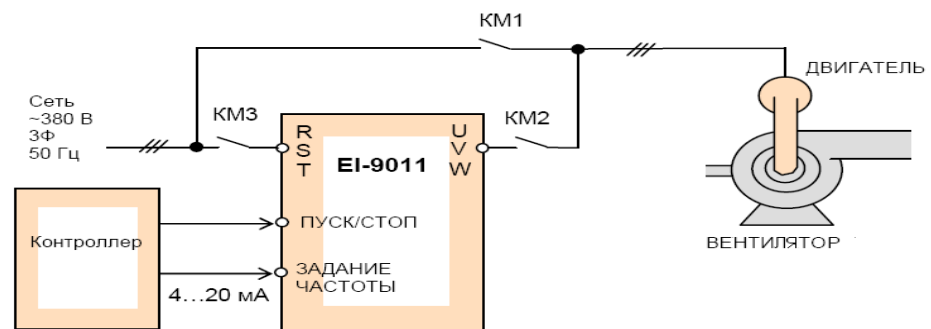


Рисунок 11 - Функциональная схема системы ПЧ-АД

ЭП имеет релейно-контакторную схему управления, благодаря которой есть возможность управлять им в ручном управлении, и обеспечена защита от параллельного включение ПЧ и аварийной сети питания ЭП.

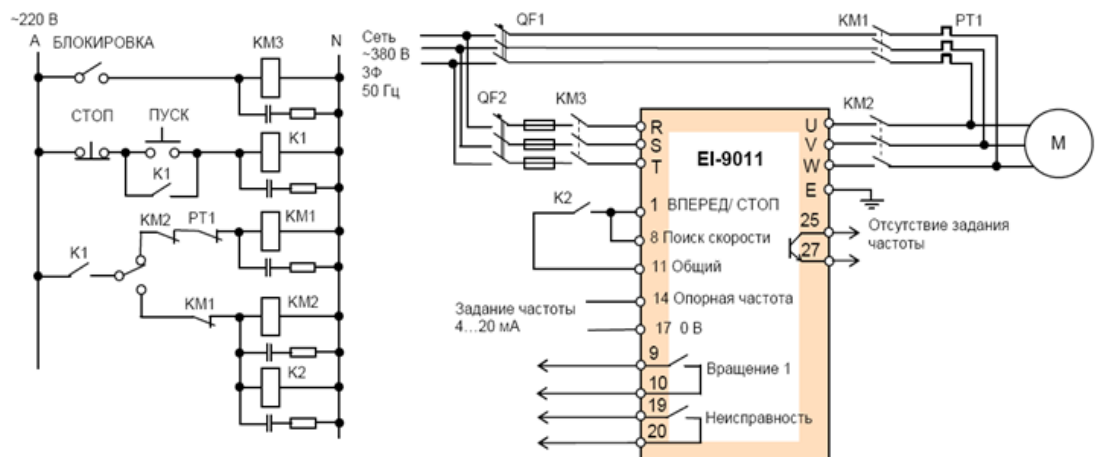


Рисунок 12 –Релейно-контакторная система управления

Нажатие кнопки блокировка приведет к подключению ПЧ к питающей сети с помощью контактора КМ3. Нажатие кнопки Пуск вызовет срабатывание катушки К1 и замыкание контакта К1. Что приведет к включению контактора КМ1 или КМ2. Которые подключат двигатель к питанию. Для того чтобы не произошло одновременного включения КМ1 и КМ2 предусмотрен переключатель. Также при прямом пуске двигателя существует защита от перегрузок двигателя выполнена с помощью реле тока РТ1, которое при своем срабатывании отключит контактор КМ1.

2. РАСЧЕТ И ВЫБОР СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В промышленности есть очень много различных двигателей, вентиляторов, преобразователей частоты, аппаратов защиты и т.д. Из всего этого разнообразия необходимо выбрать оборудование удовлетворяющее заданным техническим условиям для вентилятора. В этом разделе произведен расчет мощности электродвигателя вентилятора, произведен выбор двигателя и вентилятора по каталогам, выбор подходящего преобразователя частоты, определение типа управления вентилятором, выбран кабель сети высокого напряжения, выполнен расчет и выбор аппаратуры управления и защиты, определены энергетические показатели электропривода.

2.1. Расчет мощности двигателя и предварительный его выбор

Мощность является главным аспектом выбора двигателя. Номинальная мощность выбранного двигателя должна быть больше мощности, рассчитанной с помощью исходных данных. Исходные данные предоставлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные к работе

Производительность	$Q = 1500 \text{ м}^3 / \text{ч} = 0,417 \text{ м}^3 / \text{с},$
Напор	$H = 450 \text{ Па},$
КПД вентилятора	$\eta = 0,65$
КПД передачи	$\eta_n = 1$
Диапазон регулирования	1:10

Для вентиляторов необходимая мощность определяется по формуле [3]:

$$P = K_3 \cdot \frac{Q \cdot H}{1000 \cdot \eta \cdot \eta_n} = 1,2 \cdot \frac{0,417 \cdot 450}{1000 \cdot 1 \cdot 0,65} = 0,346 \text{ кВт}$$

где, K_3 - коэффициент запаса равный $1,1 \div 1,3$. Принимаем $K_3 = 1,2$.

По паспортным данным вентилятора В-Ц14-46-2,5 выбран двигатель АИМ71А4 с номинальной мощностью 550 Вт, изображенный на рисунке 13.

Из расчета видно, что данный двигатель подходит для привода вентилятора

$$0,55 \text{ кВт} \geq 0,346 \text{ кВт}$$

Условие выполняется.

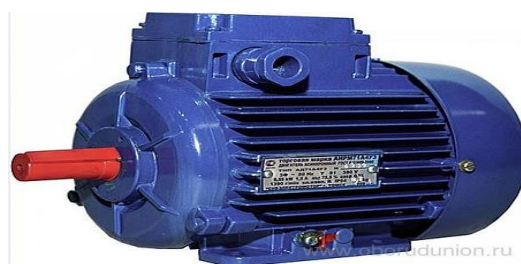


Рисунок 13 – Внешний вид асинхронного двигателя АИМ71А4

Таблица 2 – Техническая характеристика двигателя[5]

$P_{ном},$ кВт	$n_{ном},$ об/мин	$I_{пуск}/$ $I_{ном}$	$\cos\varphi$	$M_{пуск}/$ $M_{ном}$	КПД, %	$M_{макс}/$ $M_{ном}$	$M_{мин}/$ $M_{ном}$	$J, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
0,55	1450	5	0,73	2,3	1	2,4	1,8	0,013

Таблица 3 – Габаритные размеры, мм

h31	L33	L30	d24
229	-	305	200

Таблица 4-Установочные и присоединительные размеры, мм

b1	b2	b10	d1	d2	d10	d20
5	-	113	19	-	7	165
d22	h	h1	h2	h5	h6	h10
12	72	6	-	21,6	-	9
L1	L2	L10	L21	L31		
40	-	90	12	45		

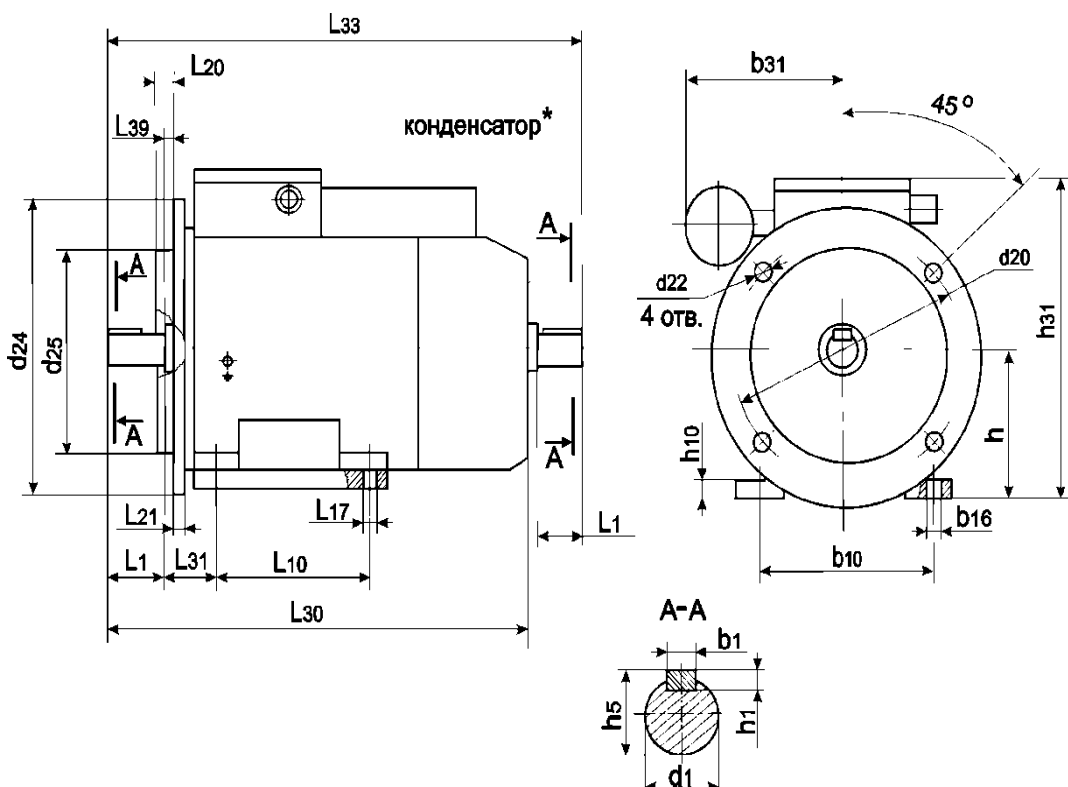


Рисунок 14 – Габаритные и присоединительные размеры двигателя

2.2. Выбор преобразовательного устройства для регулирования электропривода

До недавнего времени главными недочётами асинхронных электродвигателей были сложность и неэкономичность регулирования их частоты вращения, а плавная регулировка двигателей с короткозамкнутым ротором была практически невозможна. Однако, регулировка частоты вращения была необходима для привода механизмов, работающих с переменной нагрузкой и используемых для изменения расходов.

Частотно-регулируемый привод содержит асинхронный двигатель М и преобразователь частоты ПЧ (рисунок 15):

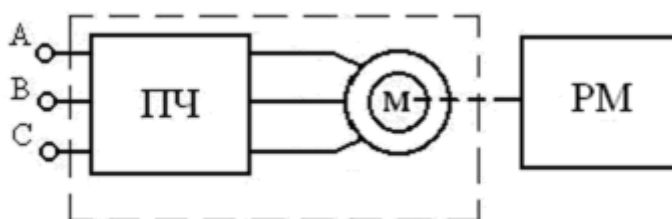


Рисунок 15 –Общая структура ЧРП

Рабочий механизм приводится в движение электрическим двигателем. Принцип регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя основан на изменении частоты вращающегося магнитного поля, создаваемого статором двигателя.

В более широко используемом частотно-регулируемом приводе на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором используются скалярный и векторный вид управления.

При скалярном управлении одновременно изменяют амплитуду и частоту подаваемого на двигатель напряжения.

ПЧ включает в себя систему управления, шины постоянного тока и выпрямитель. Синусоидальное напряжение на входе с неизменной амплитудой и частотой выпрямляется в звене постоянного тока В, далее сглаживается фильтром, который состоит из дросселя L_B и конденсатора фильтра C_B , а затем снова преобразуется в переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды инвертором АИН. Регулирование выходной частоты $f_{\text{вых}}$ и напряжения $U_{\text{вых}}$ осуществляется в инверторе с помощью высокочастотного широтно-импульсного управления. Широтно-импульсное управление определяется периодом модуляции, внутри которого обмотка статора электродвигателя подключается поочередно к отрицательному и положительному полюсам выпрямителя.

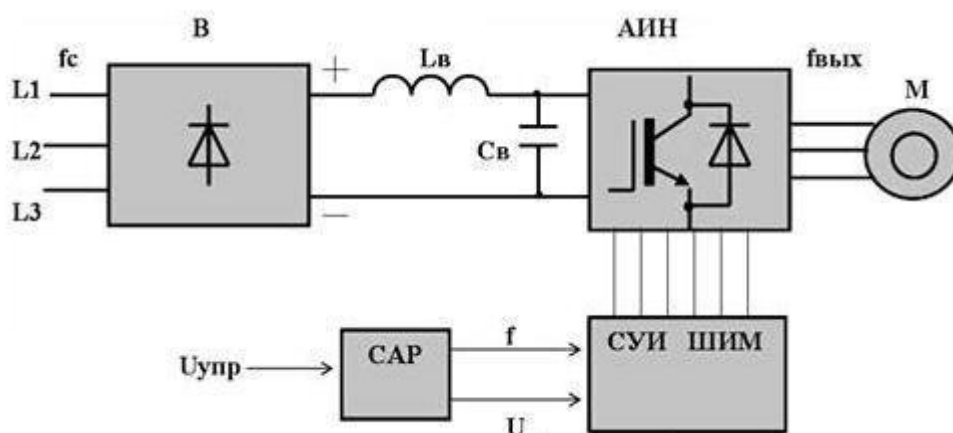


Рисунок 16 – Структурная схема частотного преобразователя

Система управления СУИ производит широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) напряжения, прикладываемого к обмоткам двигателя. Частота и амплитуда напряжения характеризуются параметрами модулирующей синусоидальной функции. На выходе ПЧ образуется трехфазное переменное напряжение регулируемой частоты и амплитуды.

ПЧ выбирается при условии: $I_{н ПЧ} \geq 1,25 I_{н ДВ}$ $\beta \geq 2,01$

Преобразователь частоты micromaster 440 [4].



Рисунок 17 – Преобразователь частоты micromaster 440

Модель нового поколения преобразователей частоты. Используется для управления приводами с переменной нагрузкой. Новую модель выгодно отличают меньшие массогабаритные характеристики, расширенные функциональные возможности, увеличенный диапазон мощностей.

- Диапазон мощностей 0,12-250 кВт.
- Возможность управления группой электродвигателей от одного преобразователя.
- программируемая зависимость U/f;
- прямое управление потоком (FCC);
- Векторное управление;
- Питание 380 В, 50 Гц;
- Встроенный ПИД-регулятор (С функцией автоподстройки);
- 6 цифровых, 2 аналоговых, РТС/КТУ, 3 релейных;

- Лучше всего подходит для решения задач автоматизации с контроллерами с контроллерами SIMATIC S7-200, SIMATIC S7-300/400 (TIA) или SIMOTION.
- 3 набора параметров
- встроенный тормозной блок (до 75 кВт)

2.3 Расчет и выбор основных силовых элементов системы регулируемого электропривода

2.3.1. Расчет АИН

Максимальный ток через ключи инвертора[7]:

$$I_{c\max} = \frac{P_H \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta_{дв} \cos \phi \sqrt{3} U_{л}} = \frac{0,55 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,1}{0,71 \cdot 0,73 \cdot \sqrt{3} \cdot 380} = 3,01 \text{ А},$$

Где $k_1 = 1,2 - 1,5$ коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току, необходимый для обеспечения динамики ЭП,

$U_{л} = 380\text{В}$ - линейное напряжение двигателя, В,

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

Выбираем IGBT транзистор IRG4IBC20UD с параметрами: $I_{ном} = 2 \text{ А}$,
 $U_{max} = 600, \text{ В}$ $I_{max} = 6 \text{ А}$.

Определение потерь в IGBT в проводящем состоянии:

$$P_{SS} = \frac{I_{c\max}}{k_1} \cdot U_{ce(sat)} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \phi \right) = \frac{3,01}{1,2} \cdot 1,85 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{3 \cdot \pi} \cdot 0,73 \right) = 0,922 \text{ Вт}$$

$U_{ce(sat)} = 2,1 - 2,2\text{В}$ - прямое падение напряжения на IGBT в насыщенном состоянии при I_{cp} и $T_j = 125^\circ\text{C}$,

Где $D = \frac{t_p}{T} \approx 0,95$ – максимальная скважность.

Определение потерь в IGBT при коммутации:

$$P_{sw} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cp} \cdot U_{cc} \cdot f_{sw} (t_{c(on)} + t_{c(off)}) \cdot f_{sw}}{2} = \frac{1}{3,14 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{2,508 \cdot 513 \cdot (0,3 \cdot 10^{-6} + 0,8 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^4}{2} = 1,304 \text{ Вт},$$

$$I_{cp} = I_{cmax} / k_1 = 3,01 / 1,2 = 2,508 \text{ А},$$

где $U_{cc} = U_d = 513 \text{ В}$ – напряжение на коллекторе IGBT, $U_d = 1,35 \cdot U_{л}$, т.к. схема выпрямителя мостовая, $f_{sw} = 10 \text{ кГц}$ – частота коммутаций ключей, время включения и выключения транзистора: $t_{c(on)} = 0,3 \cdot 10^{-6}$, $t_{c(off)} = 0,8 \cdot 10^{-6}$ – продолжительность переходных процессов по цепи коллектора IGBT на открытие и закрытии транзистора соответственно,.

Определение суммарных потерь в IGBT: $P_Q = P_{SS} + P_{sw} = 0,922 + 1,304 = 2,225 \text{ Вт}$.

Определение потерь диода в проводящем состоянии:

$$P_{DS} = I_{cp} \cdot U_{ec} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \phi \right) = 2,508 \cdot 1,4 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{3 \cdot \pi} \cdot 0,73 \right) = 0,697 \text{ Вт},$$

Где, $I_{cp} = I_{cp} = 2,508 \text{ А}$, $U_{ec} = 1,4 \text{ В}$ – прямое падение напряжения на диоде в проводящем состоянии.

Потери диода при восстановлении запирающих свойств:

$$P_{DR} = \frac{1}{8} \cdot (U_{cc} \cdot I_{rr} \cdot t_{rr} \cdot f_{sw}) = \frac{1}{8} \cdot (513 \cdot 2,508 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4) = 0,322 \text{ Вт}$$

Где, $t_{rr} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ – продолжительность импульса обратного тока.

Суммарные потери диода:

$$P_D = P_{DR} + P_{DS} = 0,322 + 0,697 = 1,019 \text{ Вт}.$$

Результирующие потери в IGBT с обратным диодом:

$$P_T = P_D + P_Q = 1,019 + 2,225 = 3,245 \text{ Вт}.$$

2.3.2. Расчет выпрямителя (трехфазная мостовая схема)

$U_d = 1,35 \cdot U_{л}$ – среднее выпрямленное напряжение; $n=6$ – количество пар IGBT/FWD в инверторе[7].

Максимальное значение среднего выпрямленного тока:

$$I_{dm} = \frac{\cos \phi \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \frac{I_{cmax}}{\sqrt{2}} + n \cdot P_T}{U_d} = \frac{0,73 \cdot \sqrt{3} \cdot 380 \cdot \frac{3,01}{\sqrt{2}} + 6 \cdot 3,245}{513} = 2,031 \text{ A}$$

Максимальный рабочий ток диода:

$$I_{vm} = k_{cc} \cdot I_{dm} = 1,045 \cdot 2,031 = 2,123 \text{ A},$$

Где, $k_{cc} = 1,045$ для мостовой трехфазной схемы.

Максимальное обратное напряжение диода:

$$U_{vm} = k_{3н} \cdot \sqrt{2} \cdot U_n \cdot k_c \cdot k_{cн} + \Delta U_{\Pi} = 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,1 \cdot 1,35 + 120 = 1078 \text{ В}$$

Где $k_{cн} = 1,35$ – коэффициент схемы для номинальной нагрузки, $k_c = 1,1$ – коэффициент допустимого повышения напряжения сети, $k_{3н} = 1,2$ – коэффициент запаса по напряжению, $\Delta U_{\Pi} = 100 - 150 \text{ В}$ – запас на коммутационные выбросы напряжения в звене постоянного тока.

Выбор диодов проводится исходя из величины постоянного рабочего тока (не менее I_{vm}) и класса напряжения (не менее $U_{vm} / 100$).

Выбираем диод КД239А с параметрами $U_{обрmax} = 100 \text{ В}$, $I_{пр} = 15 \text{ А}$.

Потери в выпрямителе для установившегося режима работы ЭП:

$$P_{DV} = m_v \cdot k_{cs} \cdot (U_j + R_{on} \cdot \frac{I_{dm}}{k_1}) \cdot \frac{I_{dm}}{k_1} = 6 \cdot 0,577 \cdot 1 \cdot \frac{2,031}{1,2} = 5,86 \text{ Вт}$$

$$k_{cs} = 0,577, m_v = 6, U_j + R_{on} \cdot \frac{I_{dm}}{k_1} \leq 1.$$

2.3.3. Расчет фильтра

Коэффициент пульсаций на входе фильтра[7]:

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

Амплитуда тока в фазе двигателя: $I_{sm1} = 1,41 \cdot I_{двн} = 2,267 \text{ А}$.

Емкость конденсатора, необходимая для протекания реактивного тока нагрузки инвертора:

$$C_{03} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{sm1} \cdot \sin^2(\frac{\phi_1}{2} - \frac{\pi}{12})}{2U_d \cdot f_{sw} \cdot q_{1вх}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 2,267 \cdot \sin^2(\frac{0,752}{2} - \frac{\pi}{12})}{2 \cdot 513 \cdot 10000 \cdot 0,057} = 8,753 \cdot 10^{-8} \text{ Ф},$$

где φ_1 – угол сдвига между первой гармоникой фазного напряжения и фазного тока, $\varphi_1 = a \cos(\cos(\phi)) = a \cos(\cos(0,73)) = 0,752$.

Амплитуда тока, протекающего через конденсаторы фильтра на частоте пульсаций выпрямленного тока (по первой гармонике):

$$I_{c0m} = q_{1вх} \cdot U_d \cdot 2\pi \cdot m \cdot f_{sw} \cdot C_{03} = 0,057 \cdot 513 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 10000 \cdot 8,753 \cdot 10^{-8} = 0,002 \text{ А.}$$

2.3.4. Расчет охладителя

При установке модулей (выпрямитель, инвертор) на общий охладитель требуемое сопротивление определяется как [7]:

$$R_{th(f-a)} = \frac{R_{th(f-a)1} \cdot R_{th(f-a)2}}{R_{th(f-a)1} + R_{th(f-a)2}}$$

При мощности инвертора до 55 кВт все приборы можно установить на один охладитель. Площадь охладителя, наиболее широко применяемая в данном типе ПЧ находится следующим образом: $A_{rad} = 2d(b + h)$, где d , b , h – габаритные размеры профиля. На рисунке 18 изображен чертеж охладителя.

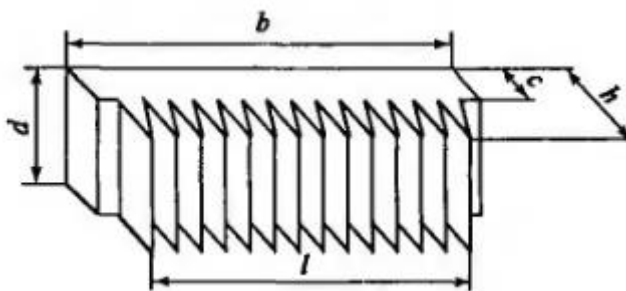


Рисунок 18 – Охладитель

Предварительно выбираем охладитель ОХЛ 1.1 без принудительного обдува и $R_{th(c-h)} = 0,54 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт}$.

Тепловое сопротивление переход-корпус $R_{th(j-c)}$ является паспортным параметром.

Тепловое сопротивление корпус-охладитель приводится в справочных материалах, а также может являться паспортным данным.

Максимально допустимое переходное сопротивление охладитель – окружающая среда:

$$R_{th(h-a)} \leq \frac{T_c - T_a}{P_T} - R_{th(c-h)},$$

где T_c – температура теплопроводящей пластины, принимаем $T_c = 110^{\circ}C$

;

$R_{th(c-h)}$ – тепловое сопротивление корпус – охладитель $R_{th(c-h)} = 0,54$
 $^{\circ}C / Вт$

T_a – температура охлаждающего воздуха, принимаем $T_a = 45^{\circ}C$;

Максимально допустимое переходное сопротивление в расчета на пару IGBT/FWD: $R_{th(h-a)1} \leq \frac{110-45}{113} - 0,54$; $R_{th(h-a)} \leq 0,06$.

Температура кристалла IGBT и обратного диода:

$T_{ja} = T_c + P_q R_{th(j-c)q} = 110 + 0,03 \cdot 94 = 112$; Условие $T_{ja} \leq 125^{\circ}C$ выполняется

$T_{jd} = T_c + P_d R_{th(j-c)d} = 110 + 0,03 \cdot 19 = 110,6$; Условие $T_{jd} \leq 125^{\circ}C$ выполняется

Аналогично для выпрямителя:

$T_{jDV} = T_c + \frac{P_{DV}}{n_D} R_{th(j-c)DV} = 110 + 0,03 \cdot 42 = 111,3$; Условие $T_{jDV} \leq 140^{\circ}C$ выполняется

Принимаем окончательно охладитель ОХЛ 1.1 без принудительного обдува

2.4. Выбор аппаратуры управления и защиты

По номинальному току и напряжению было выбрано реле Finder

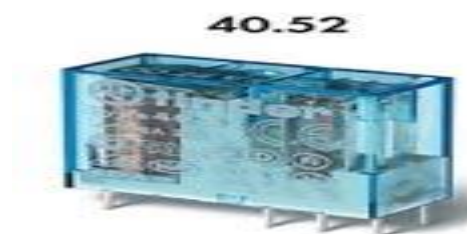


Рисунок 19 – Реле Finder

Таблица 5 - Технические характеристики Реле Finder

Характеристики	Величина
Тип	40.52
Номинальное напряжение	230V
Номинальный ток	8 А
2 перекидных контакта	-
Минимальная нагрузка на переключение	300 мВт

Также был выбран автоматический выключатель трехполюсной серии АП-50Б 3МТ. Выключатели серии АП50Б предназначены для проведения тока в нормальном режиме и отключения тока при перегрузках и коротких замыканиях, а также для оперативных включений и отключений электрических цепей. Соответствуют требованиям ГОСТ Р 50030.2 [8].



Рисунок 20 – АП-50Б 3МТ

Данный выключатель имеет следующие параметры:

- Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В – 230/400
- Номинальный ток I_n , А – 1,6; Номинальный ток расцепителя $I_n=2,5$, А;
- Номинальная отключающая способность, кА – 0,3
- Характеристики срабатывания электромагнитного расцепителя –С
- Число полюсов – 3
- Степень защиты выключателя – IP 20
- Механическая износостойкость, циклов В-О, не менее – 20000

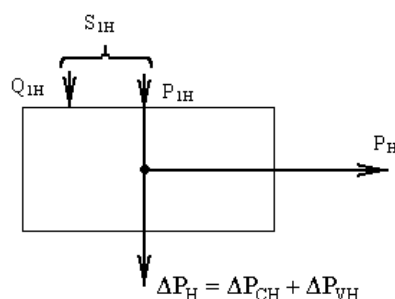
2.5. Расчет и выбор типа и сечения кабеля сети высокого напряжения и вспомогательного оборудования

Выбор типа проводников и конструкции сети проводится с учетом окружающей среды помещений цехов. В цеховых сетях до 1000 В используются электропроводки, комплектные шинопроводы, кабельные линии. Способ прокладки питающей сети определяется в зависимости от характера окружающей среды.

Исходя из номинального тока двигателя выбирается медный трехжильный кабель сечением 1,5 мм² марки КуВВ, у которого допустимый ток равен 23 А. Кабель такой же марки выбирается для сети высокого напряжения, сечением 2,5 мм². Допустимый ток этого кабеля равен 30 А.

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

Номинальный режим



Производим расчет полной мощности:

$$\Delta P_H = P_H \left(\frac{1}{\eta_H} - 1 \right) = 550 \cdot \left(\frac{1}{0,71} - 1 \right) = 224,648 \text{ Вт}$$

Определение переменная составляющей потери мощности:

$$\Delta P_{V.H} = M_H (\omega_0 - \omega_H) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = 3,892 \cdot (157 - 141,3) \cdot \left(1 + \frac{20,257}{19,482} \right) = 124,654 \text{ Вт}$$

Определение постоянной составляющей потери мощности:

$$\Delta P_{С.H} = \Delta P_H - \Delta P_{V.H} = 224,648 - 124,654 = 99,994 \text{ Вт}$$

Расчет коэффициента потерь мощности:

$$a = \frac{\Delta P_{C.H}}{\Delta P_{V.H}} = \frac{97,662}{126,985} = 0,769$$

Определение полезного расхода энергии:

$$A_2 = M_c \cdot \omega_c \cdot t_c = 3,892 \cdot 141,3 \cdot 0,4 = 219,976 \text{ [Вт с]}$$

где ω_c , t_c – угловая скорость и время установившегося режима.

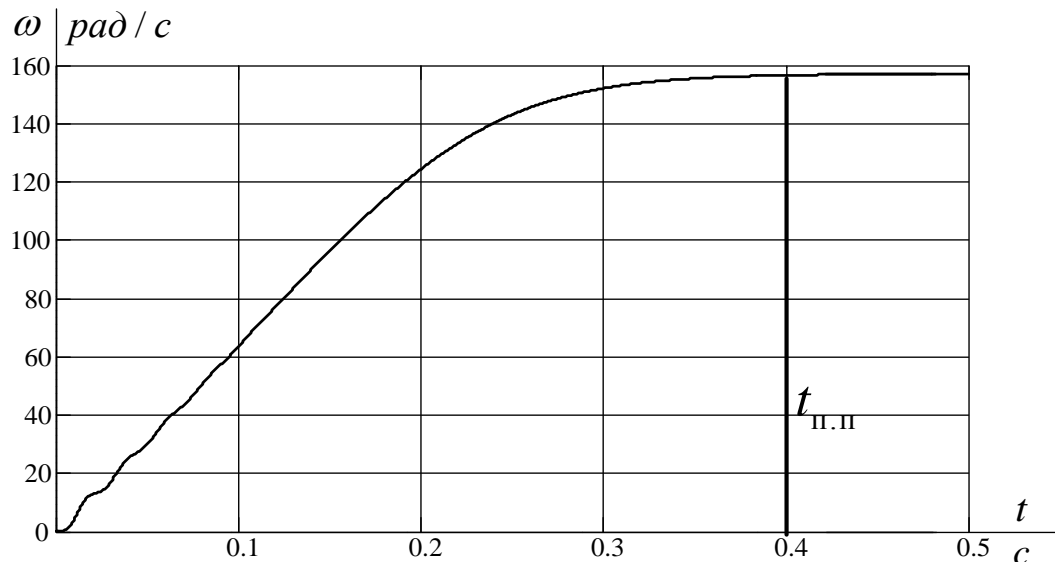


Рисунок 21 – Зависимость скорости двигателя от времени

Постоянная составляющая потери энергии:

$$\Delta A_C \approx \Delta P_{CH} \cdot \left(\frac{\omega_c}{\omega_H}\right)^2 \cdot t_c = 97,662 \cdot \left(\frac{141,3}{157}\right)^2 \cdot 0,4 = 31,643 \text{ [Вт с]}.$$

Определение величины приведенного фазного тока ротора в установившемся режиме:

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S_c}\right)^2 + (X_K)^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(19,54 + \frac{18,127}{0,1}\right)^2 + (23,142)^2}} = 1,088 \text{ [А]},$$

Переменная составляющая потери энергии:

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

где ϵ – поправочный коэффициент

$$\epsilon = 1 + \frac{2 \cdot I_0 \cdot X_K}{U_1} = 1 + \frac{2 \cdot 1,253 \cdot 23,142}{220} = 1,264$$

$$\Delta A_V = 3 \cdot [1,253^2 \cdot 19,54 + 1,088^2 \cdot (1,264 \cdot 19,54 + 18,127)] \cdot 0,4 = 97,688 \text{ [Вт · с]}.$$

Потребляемая из сети энергия:

$$A_1 = A_2 + \Delta A_c + \Delta A_v = 219,976 + 31,643 + 97,688 = 349,307 \text{ [Вт с]}.$$

Потребление реактивной энергии за цикл:

$$\sum A_p = \sum_{i=1}^n 3[I_0^2 \cdot (X_1 + X_\mu) + (I_{2i}')^2 \cdot (X_1 + X_2')] \cdot t_{c,i}$$

$$\sum A_p = 366,137 B \cdot A.$$

где X_μ – индуктивное сопротивление намагничивающего контура двигателя,

n – число установившихся режимов.

Энергетический (среднецикловой) коэффициент полезного действия ЭП:

$$\eta_3 = \frac{\sum A_2}{\sum A_1} \cdot 100\% = \frac{219,976}{349,307} \cdot 100\% = 63\%.$$

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

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

Энергетический (среднецикловой) коэффициент мощности ЭП:

$$\cos \varphi_3 = \frac{\sum A_1}{\sqrt{(\sum A_1)^2 + (\sum A_p)^2}} = \frac{349,307}{\sqrt{349,307^2 + 366,137^2}} = 0,69$$

3. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. Расчет параметров схемы замещения

Для проведения расчета механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя нужно использовать его математическую модель. Т-образная схема замещения, изображенная на рисунке 22, является наиболее простой и удобной для расчетов асинхронного двигателя. Расчет параметров схемы замещения производится по [9].

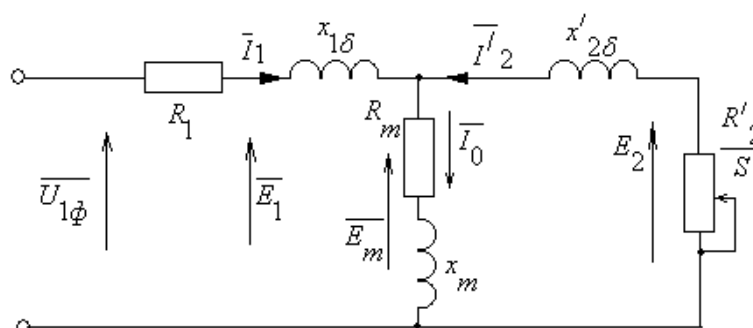


Рисунок 22 –Схема замещения асинхронного двигателя

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

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

I_1 – ток обмотки статора;

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

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

I'_2 – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора;

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

X_m - индуктивное сопротивление контура намагничивания

I_0 – ток холостого хода (намагничивания);

Параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя АИМ 71А4 определяются по следующим каталожным данным:

Номинальное фазное напряжение: $U_{H1} = 220 \text{ В}$.

Номинальное напряжение сети: $U_{\text{фн}} = 380 \text{ В}$.

Номинальная мощность двигателя: $P_H = 0,55 \text{ кВт}$.

Номинальная частота вращения: $n_H = 1450 \text{ об/мин}$.

Кратность пускового тока: $k_i = 5 \text{ о. е.}$

Коэффициент мощности в режиме номинальной мощности: $\cos \varphi = 0,73 \text{ о. е.}$

КПД в режиме номинальной мощности: $\eta_H = 0,71 \text{ о. е.}$

Кратность пускового момента: $k_{\Pi} = 2,3 \text{ о. е.}$

Кратность максимального момента: $k_{max} = 2,4 \text{ о. е.}$

Число пар полюсов: $p = 2$.

Коэффициент загрузки двигателя: $p_{ж} = 0,75 \text{ о. е.}$

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие Т-образной схеме:

$$\begin{cases} \bar{U}_{1\Phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0 \\ \bar{E}_m + j \cdot X_2' \cdot \bar{I}_2' + R_2' \cdot \bar{I}_2' / s = 0 \\ \bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_0 = 0 \end{cases}$$

Синхронную частоту вращения и номинальное скольжение определяют по следующим формулам:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0,033 \text{ о. е.}$$

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_{жс} \cdot I_{1н} \cdot \frac{1-S_H}{1-p_{жс} \cdot S_H})^2}{1 - (p_{жс} \cdot \frac{1-S_H}{1-p_{жс} \cdot S_H})^2}}, \text{ где}$$

$$I_{11} = \frac{p_{жс} \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \phi_{р*} \cdot \eta_H} = \frac{0,75 \cdot 0,55 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,606 \cdot 0,71} = 1,453 \text{ А -}$$

ток статора двигателя при частичной нагрузке, где

$$\cos \phi_{ржс} = \cos \phi \cdot \left(\frac{\cos \phi_{0,75}}{\cos \phi} \right) = 0,73 \cdot 0,83 = 0,606 \text{ о.е. - коэффициент мощности}$$

при частичной нагрузке.

$$\eta_{ржс} = \eta_H = 0,71 \text{ - КПД при частичной нагрузке,}$$

$\cos \phi_{0,75} / \cos \phi_H = 0,83$ – относительный коэффициент мощности при частичной нагрузке (определяется из графика на рисунке 23).

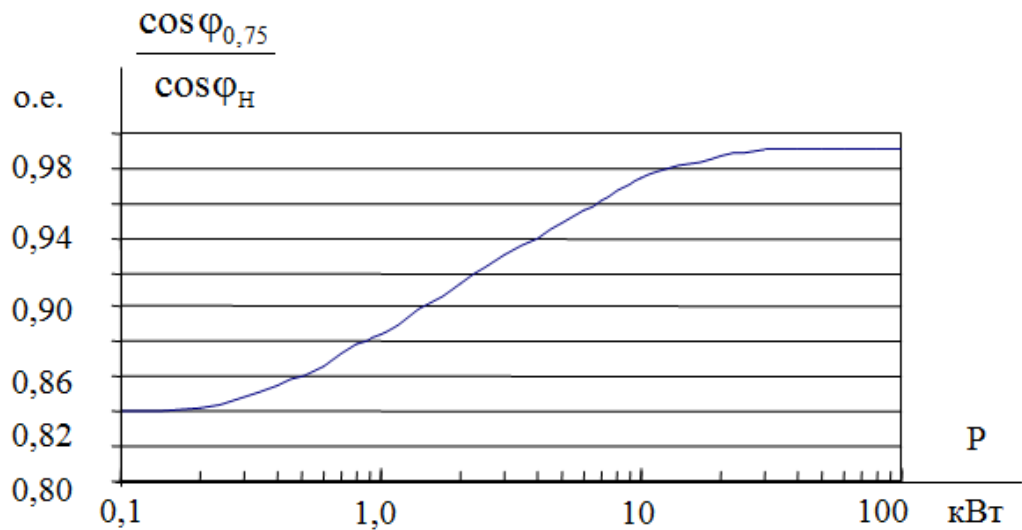


Рисунок 23 – Зависимость $\cos \phi_{0,75} / \cos \phi_H$ от мощности асинхронного двигателя

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_{1н} = \frac{P_H}{3 U_{1н} \cdot \cos \phi \cdot \eta_H} = \frac{550}{3 \cdot 220 \cdot 0,71 \cdot 0,73} = 1,608 \text{ А}$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* \cdot I_{1H} (1 - S_H) / (1 - p_* \cdot S_H)]^2}{1 - p_* \cdot (1 - S_H) / (1 - p_* \cdot S_H)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1,453^2 - [0,75 \cdot 1,608 \cdot (1 - 0,033) / (1 - 0,75 \cdot 0,033)]^2}{1 - [0,75 \cdot (1 - 0,033) / (1 - 0,75 \cdot 0,033)]^2}} = 1,253 \text{ A};$$

С помощью формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. В первом приближении принимаем $\beta = 1$:

$$S_{KP} = S_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - [1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0,10 \cdot \frac{2,4 + \sqrt{2,4^2 - [1 - 2 \cdot 0,10 \cdot 1 \cdot (2,4 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,10 \cdot 1 \cdot (2,4 - 1)} = 0,6451 \text{ о.е.}$$

Определение значений коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{1,253}{2 \cdot 5 \cdot 1,608} = 1,08;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,1)}{2 \cdot 1,08 \cdot 2,4 \cdot 0,55 \cdot 10^3} = 45,825$$

Производим определение активного сопротивления ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/S_{KP}) \cdot C_1} = \frac{45,825}{\left(1 + \frac{1}{0,6451}\right) \cdot 1,08} = 18,127 \text{ Ом};$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,08 \cdot 18,127 \cdot 1 = 19,54 \text{ Ом};$$

Определим параметр γ , который позволяет рассчитать индуктивное сопротивление короткого замыкания x_{KH} :

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_{KP}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,645} - 1^2} = 1,184;$$

Значение индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$X_k = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 1,184 \cdot 1,08 \cdot 18,127 = 23,142 \text{ Ом};$$

Найдем индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$X_2' = 0,58 \cdot \frac{X_k}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{23,142}{1,08} = 12,452 \text{ Ом};$$

Найдем индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$X_1 = 0,42 \cdot X_k = 0,42 \cdot 23,142 = 9,72 \text{ Ом};$$

По найденным значениям C_1, R_2' и $x_{кн}$ найдем критическое скольжение:

$$S_{к1} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_{кн}^2}} = \frac{1,08 \cdot 18,127}{\sqrt{19,54^2 + 23,142^2}} = 0,6451 \text{ о.е.}$$

Рассчитанные значения $S_{к1}$ и S_k равны.

Для того чтобы найти ЭДС ветви намагничивания E_1 определим $\sin \varphi$:

$$\sin \varphi = \sin(\arccos(\cos \varphi)) = \sin \arccos(0,73) = 0,683$$

Найдем ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведенную потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1н} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1н})^2 + (U_{1н} \cdot \sin \varphi - x_{1н} \cdot I_{1н})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,73 - 19,54 \cdot 1,608)^2 + (220 \cdot 0,683 - 9,72 \cdot 1,608)^2} = 201,332 \text{ В} \end{aligned}$$

Синхронная угловая скорость:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_{\muн} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{201,332}{1,253} = 43,372 \text{ Ом}$$

3.2 Построение естественных электромеханических и механических характеристик

Произведем расчет и построение естественной электромеханической характеристики:

$$\sin \phi_2 = \frac{x_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\omega - \omega_0}\right)^2 + x_{KH}^2}} \cdot \omega_0$$

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \phi_2},$$

где $I_2'(\omega)$ – приведенный ток ротора от скольжения;

$$I_2' = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\omega - \omega_0}\right)^2 + (x_{1H} + x'_{2H})^2}}$$

С помощью формул, приведенных выше, рассчитывается естественная электромеханическая характеристика, изображенная на рисунке 24.

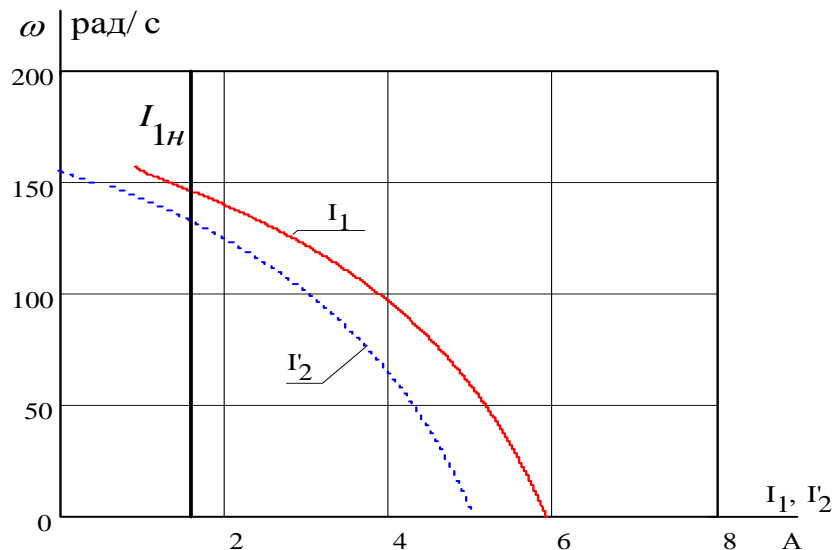


Рисунок 24 – Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя

Формула для расчета и построения естественной механической характеристики:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}} \right)^2 + x_{кн}^2 \right]}$$

Произведем расчет контрольных точек механической характеристики по паспортным данным:

Номинальная скорость:

$$\omega_n = \omega_0 \cdot (1 - S_n) = 517 \cdot (1 - 0,1) = 141,3 \text{ рад/с};$$

$$\text{Момент номинальный: } M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{550}{141,3} = 3,892 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\text{Момент критический: } M_{кр} = M_{ном} \cdot k_{макс} = 3,892 \cdot 2,4 = 9,342 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\text{Момент пусковой: } M_{п} = M_{ном} \cdot k_{п} = 3,892 \cdot 2,3 = 8,953 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

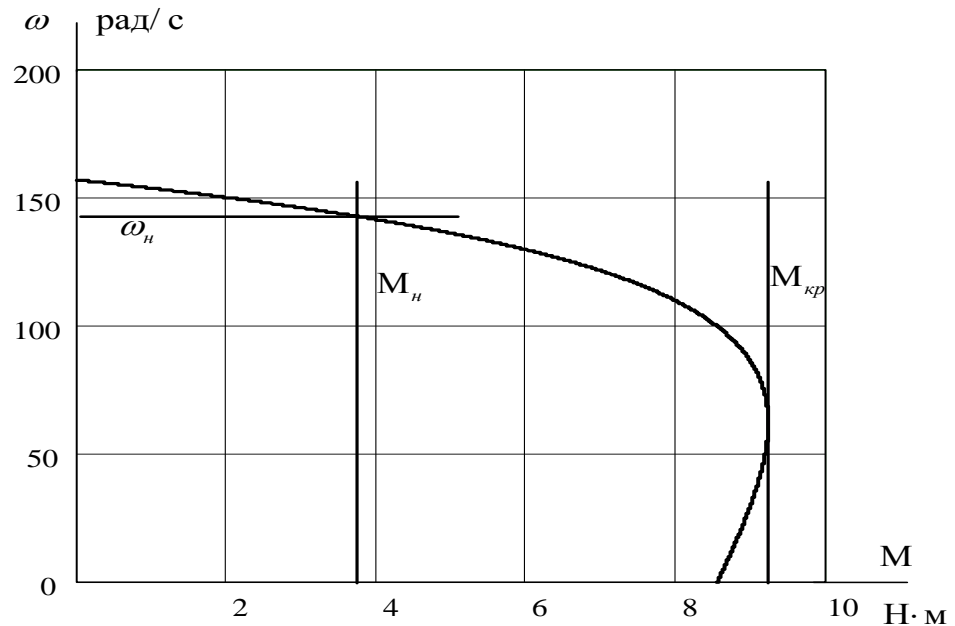


Рисунок 25 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

3.3 Расчёт и построение механических и электромеханических характеристик АД для закона регулирования

Расчет характеристик производим для частот $f_1=50; 30; 20; 15$ Гц при

$$\text{законе регулирования: } Z_p = \frac{U_{1H}}{f^2} = \frac{220}{50^2} = 0,088.$$

Найдем относительные значения частот питающего напряжения:

$$\text{при } f_{1H1}=50 \text{ Гц} \quad f_{1*1} = \frac{f_{1H}}{f_{1H}} = \frac{50}{50} = 1$$

$$\text{при } f_{1H2}=25 \text{ Гц} \quad f_{1*2} = \frac{f_{2H}}{f_{1H}} = \frac{25}{50} = 0,5$$

$$\text{при } f_{1H3}=10 \text{ Гц} \quad f_{1*3} = \frac{f_{3H}}{f_{1H}} = \frac{10}{50} = 0,2$$

$$\text{при } f_{1H4}=5 \text{ Гц} \quad f_{1*4} = \frac{f_{4H}}{f_{1H}} = \frac{5}{50} = 0,1$$

Найдем фазное напряжение обмотки статора асинхронного двигателя:

$$U_{1H1} = Z_p \cdot f_{1H1}^2 = 0,088 \cdot 50^2 = 220 \text{ В};$$

$$U_{1H2} = Z_p \cdot f_{1H2}^2 = 0,088 \cdot 25^2 = 55 \text{ В};$$

$$U_{1H3} = Z_p \cdot f_{1H3}^2 = 0,088 \cdot 10^2 = 8,8 \text{ В};$$

$$U_{1H4} = Z_p \cdot f_{1H4}^2 = 0,088 \cdot 5^2 = 2,2 \text{ В}.$$

Токи холостого хода при данных частотах регулирования:

$$I_{01} = \frac{U_{1H1}}{X_{\mu H}} = \frac{220}{167,837} = 1,31 \text{ А};$$

$$I_{02} = \frac{U_{1H2}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*2}} = \frac{55}{167,837 \cdot 0,5} = 0,65 \text{ А};$$

$$I_{03} = \frac{U_{1H3}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*3}} = \frac{8,8}{167,837 \cdot 0,2} = 0,26 \text{ А};$$

$$I_{04} = \frac{U_{1H4}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*4}} = \frac{2,2}{167,837 \cdot 0,1} = 0,13 \text{ А}.$$

В зависимости от частот питающего напряжения рассчитаем значений скорости идеального холостого хода:

$$\omega_{01} = \frac{2\pi \cdot f_{1H1}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157,1 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{02} = \frac{2\pi \cdot f_{1H2}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 25}{2} = 78,5 \text{ рад/с;}$$

$$\omega_{03} = \frac{2\pi \cdot f_{1H3}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10}{2} = 31,4 \text{ рад/с;}$$

$$\omega_{04} = \frac{2\pi \cdot f_{1H4}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5}{2} = 15,7 \text{ рад/с.}$$

Построение электромеханических характеристик $\Gamma_2(\omega)$ для выбранных частот производится по равенствам:

$$I_2'(s, f) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_*^2(f) + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{MH} \cdot f_*(f)}\right)^2}},$$

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

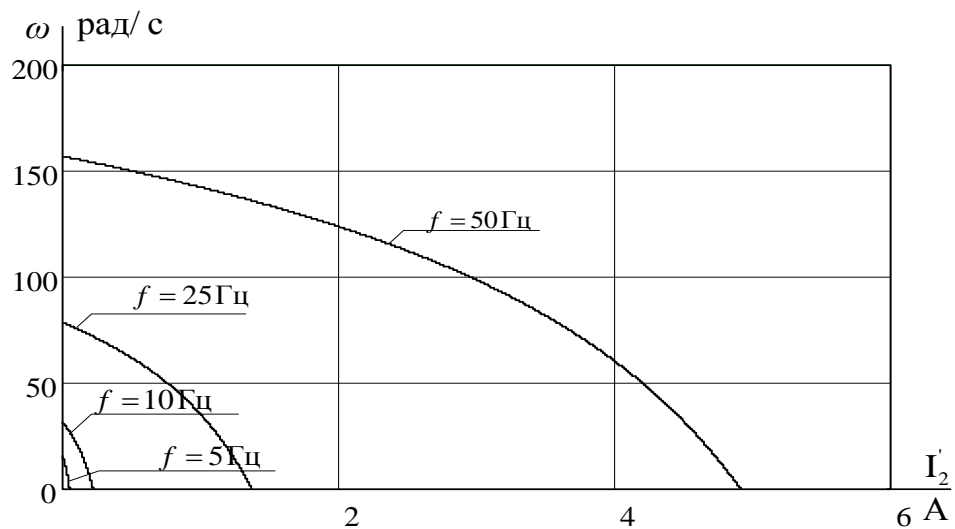


Рисунок 26 – Искусственные электромеханические характеристики $\Gamma_2(\omega)$ для

закона регулирования $\frac{U_1}{f_1^2} = const$

Построение электромеханических характеристик $\Pi(\omega)$ для выбранных частот производится по равенствам:

$$I_1(s, f) = \sqrt{\left(I_0(f)\right)^2 + \left(I_2'(s, f)\right)^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I_2'(s, f) \cdot \sin \varphi_2(s, f)},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s),$$

$$\sin \varphi_2(s, f) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f)}}$$

где $I_0(f) = \frac{U_1(f)}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}$ – ток холостого хода асинхронного двигателя

В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ.

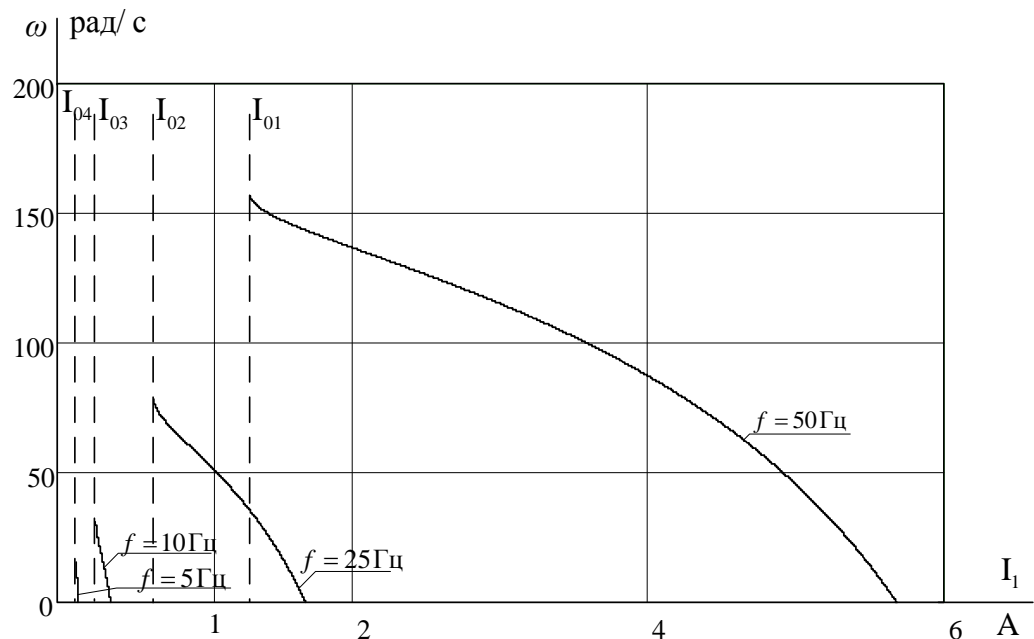


Рисунок 27 – Искусственные электромеханические характеристики $\Pi(\omega)$ для

$$\text{закона управления } \frac{U_1}{f_1^2} = const$$

Механические характеристики асинхронного двигателя $M(\omega)$ рассчитываем для выбранных значений по выражениям

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R_2'}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[X_{\text{сг}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu \text{г}} \cdot f_{1*}(f)}\right)^2 \right]}$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s)$$

Критические момент и скольжение можно определить по выражениям

$$M_k(f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2}{2 \cdot \omega_0(f) \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{кн}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2)} \cdot \left(1 + \frac{R_1^2}{X_{\muн}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2} \right) \right]}$$

$$s_k(f) = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{R_1^2}{X_{\muн}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2}}{R_1^2 + X_{\muн}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2}}$$

$$\omega_k(f) = \omega(s_k(f), f)$$

$$M_c(f) = M_0 + 0,75 \cdot M_n \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)$$

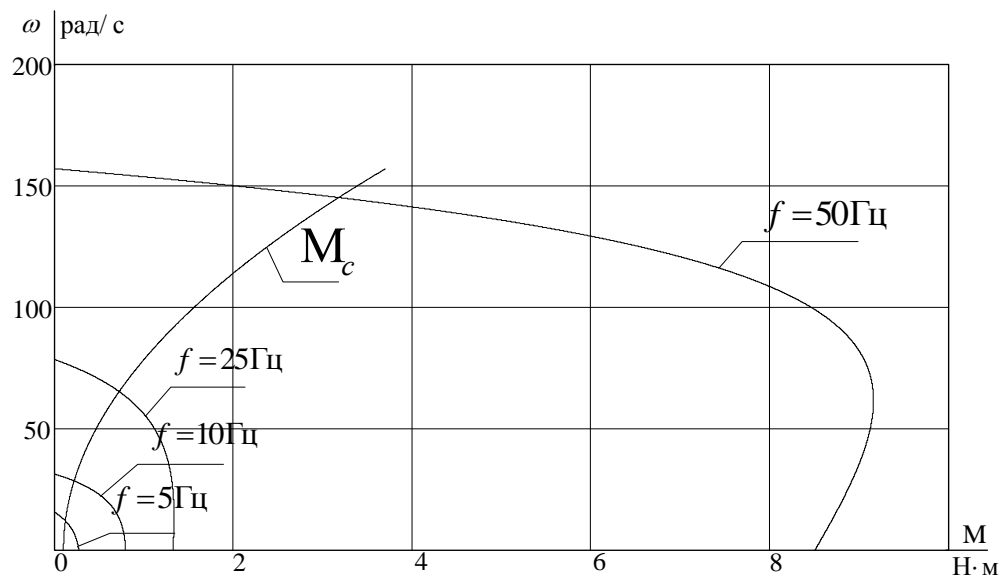


Рисунок 28 – Искусственные механические характеристики $M(\omega)$

для закона управления $\frac{U_1}{f_1^2} = const$

4. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА

Данный метод исследования асинхронного двигателя был проверен на имитационной модели в среде *Matlab/Simulink*. Схема прямого пуска двигателя собрана из стандартных компонентов среды *Simulink*, и состоит из двигателя, источника трехфазного напряжения, двух осциллографов».

4.1. Библиотечная модель с характеристиками

Для того, чтобы создать имитационную модель прямого пуска асинхронного электродвигателя определим следующие параметры [10].

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{167,83}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,535 \text{ Гн.}$$

Индуктивность фазы обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{9,72}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,031 \text{ Гн.}$$

Индуктивность фазы обмотки ротора:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{12,45}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,04 \text{ Гн.}$$

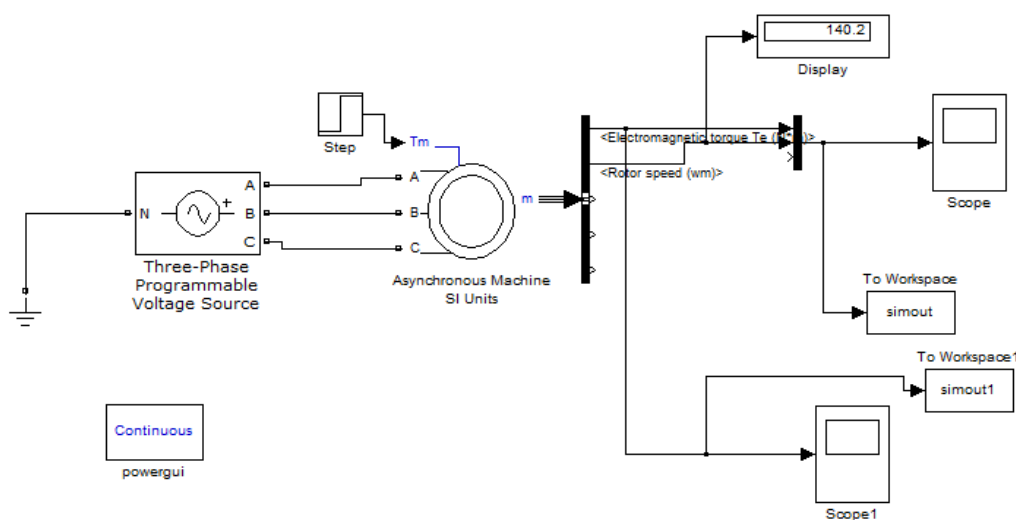


Рисунок 29 – Библиотечная модель пуска асинхронного двигателя

Задаем параметры асинхронного двигателя, рисунок 30.

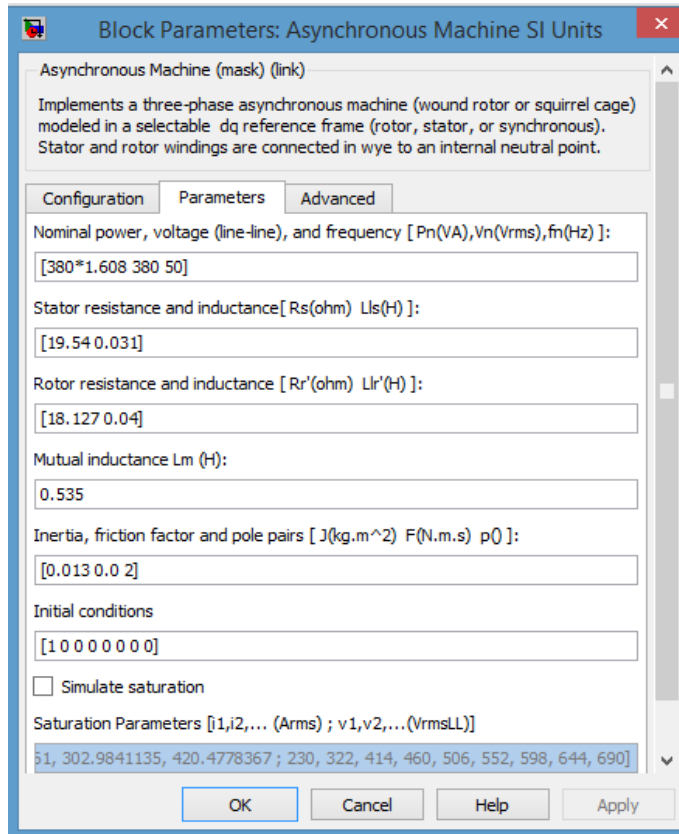


Рисунок 30 – Параметры асинхронного двигателя

Время наброса нагрузки принимаем равным $t=2$ с.

На рисунках 31, 32 изображены переходные характеристики момента и скорости, при прямом пуске АД при набросе нагрузки и при сбросе нагрузки на рисунках 33, 34

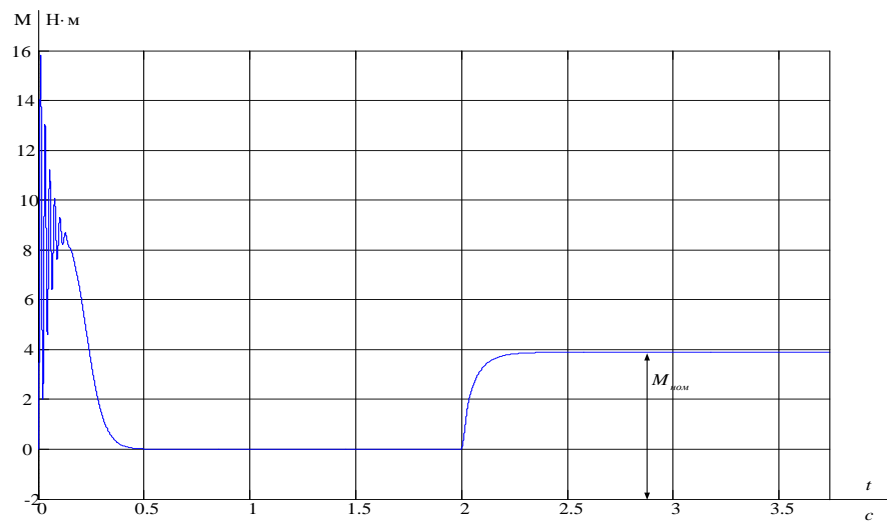


Рисунок 31 – Переходная характеристика момента двигателя при прямом пуске и набросе нагрузки

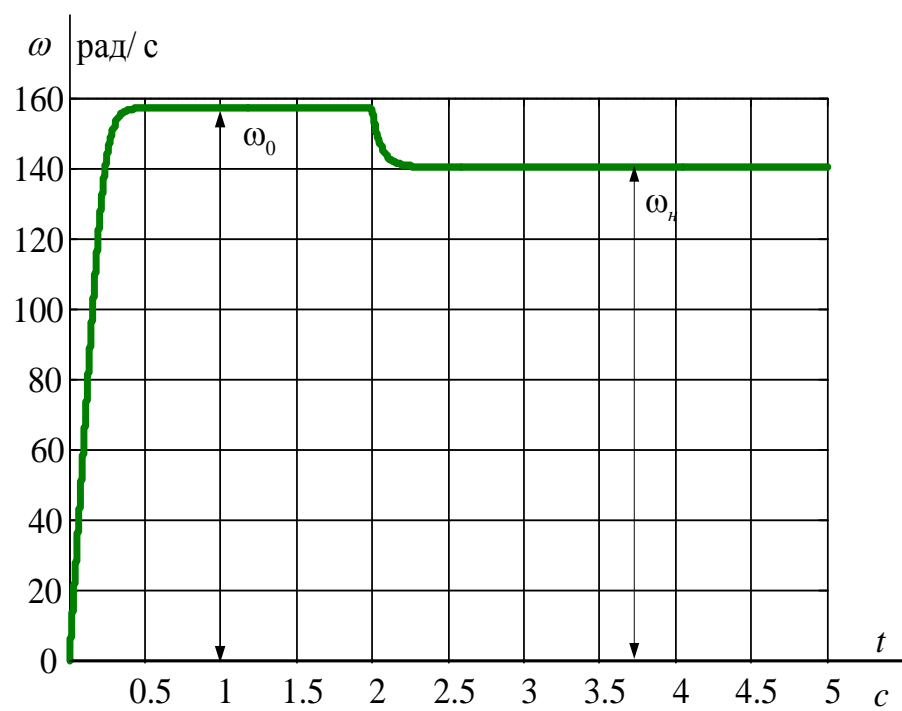


Рисунок 32 - Переходная характеристика скорости двигателя при прямом пуске и набросе нагрузки

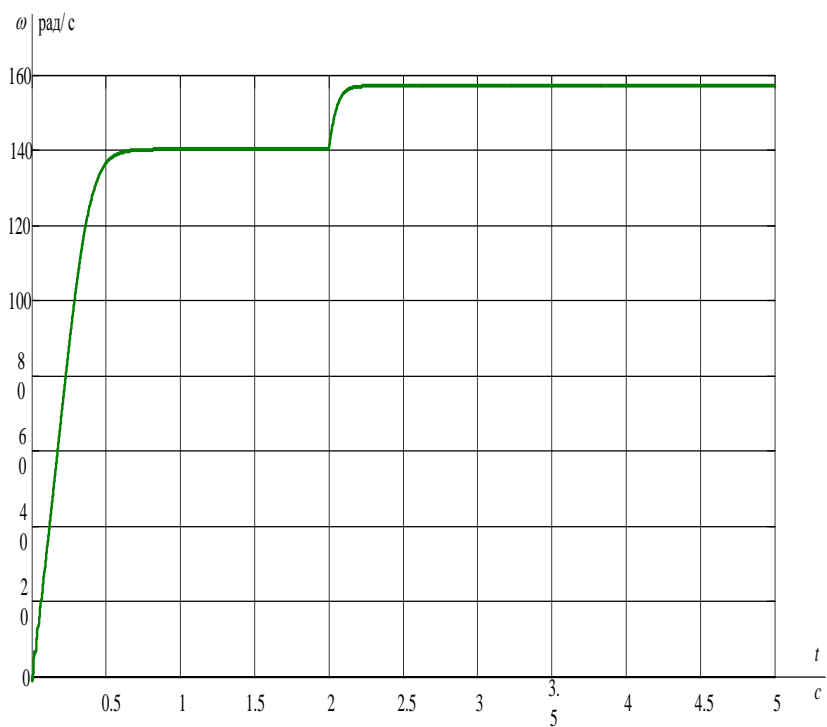


Рисунок 33 –Переходная характеристика скорости двигателя при прямом пуске и сбросе нагрузки

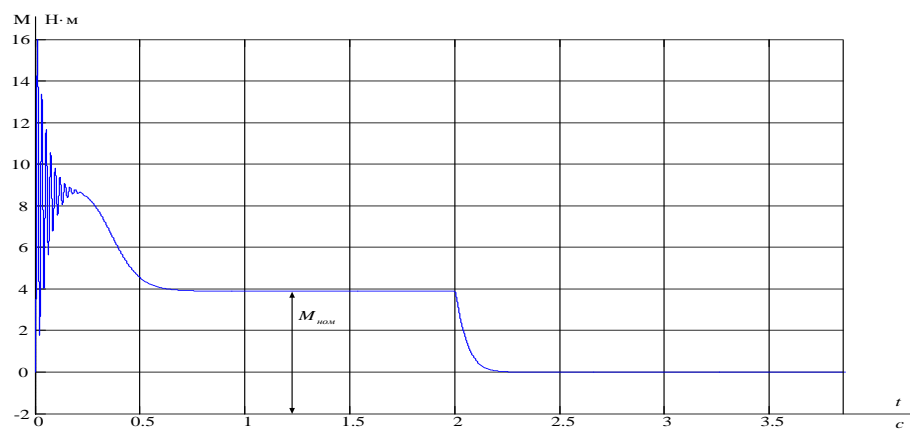


Рисунок 34 – Переходная характеристика момента двигателя при прямом пуске и сбросе нагрузки

Исходя из полученных переходных характеристик, можно сделать вывод, что при пропорциональном снижении напряжения и частоты снижается значение номинальной скорости и время достижения этой скорости, электромагнитный момент.

4.2 Имитационная модель асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора α, β

Сравним полученные характеристики с характеристиками полученными в структурной схеме асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора α, β . Для этого соберём данную схему в программе MATLAB Simulink. Данная схема представлена на рисунке 35. Для создания имитационной модели пуска асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора α, β найдем следующие параметры двигателя[10].

$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0.031 + 0.535 = 0.565$ Гн, эквивалентная индуктивность обмотки статора;

$L_2 = L_{2\sigma} + L_m = 0.04 + 0.535 = 0.574$ Гн, эквивалентная индуктивность обмотки ротора;

$$R_{\text{эк}} = R_1 + R' \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2} = 19.54 + 18.127 \cdot \frac{0.535^2}{0.574^2} = 36.416 \text{ -эквивалентное}$$

сопротивление двигателя;

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0.535^2}{0.565 \cdot 0.574} = 0.12 \text{ -коэффициент рассеяния;}$$

$$T_1 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_1} = \frac{0.12 \cdot 0.565}{36.416} = 1.864 \cdot 10^{-3}, T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0.574}{18.127} = 0.032 \text{ -}$$

электромагнитные постоянные времени.

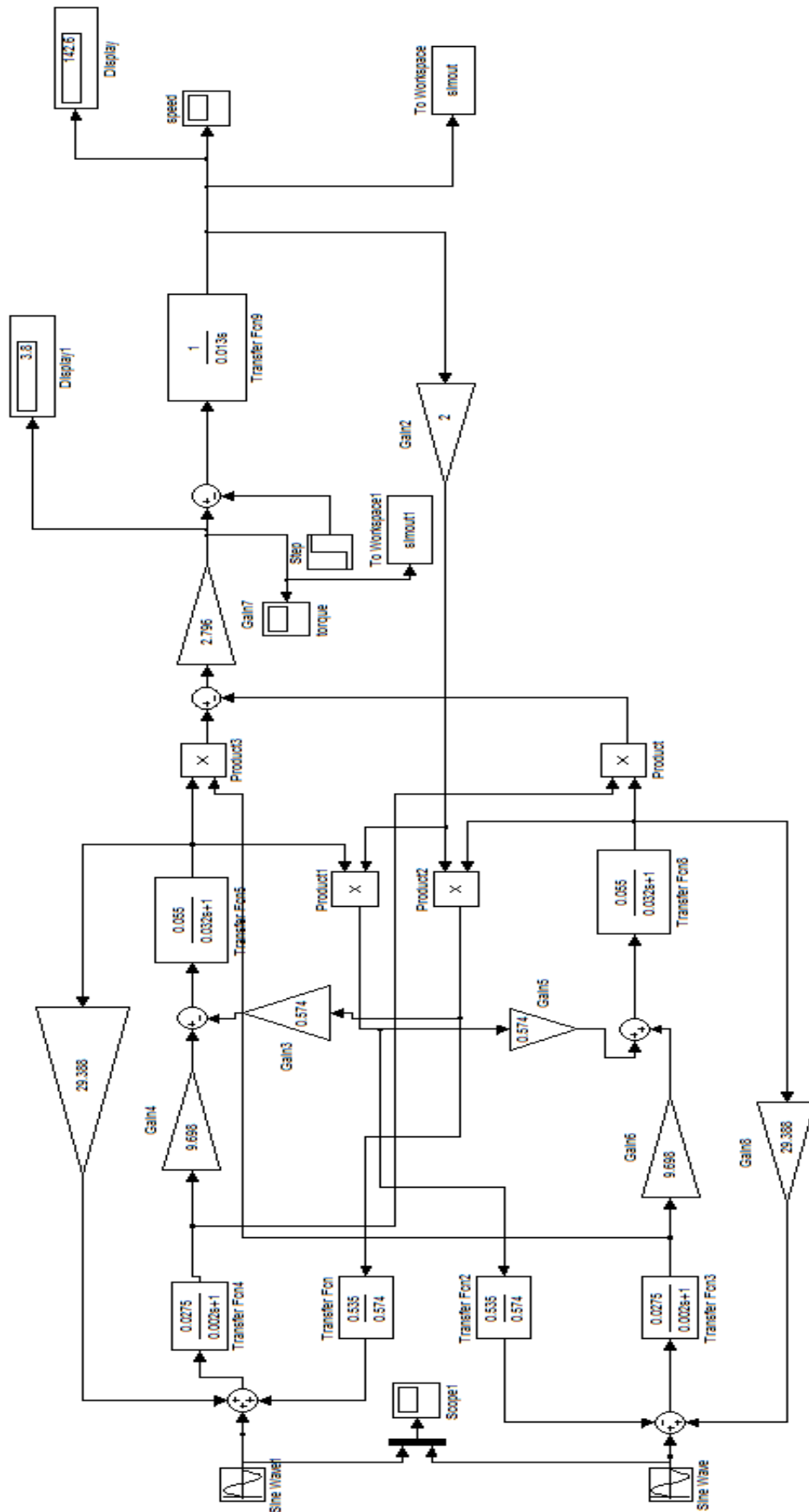


Рисунок 35 – Имитационная модель пуска асинхронного двигателя в α и β координатах.

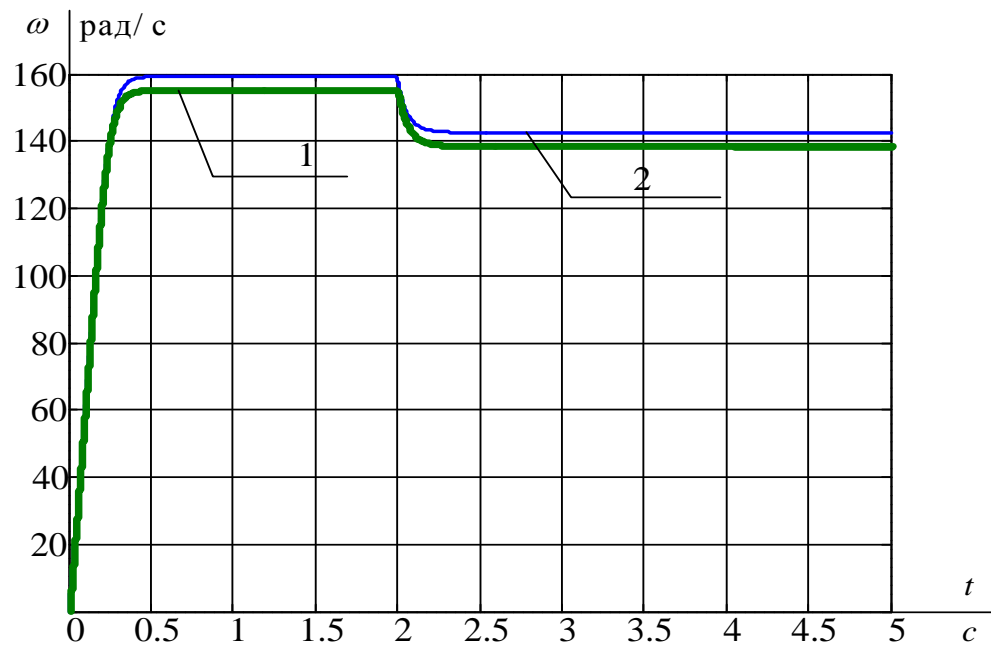


Рисунок 36 – Сравнение переходных характеристик скорости двигателя

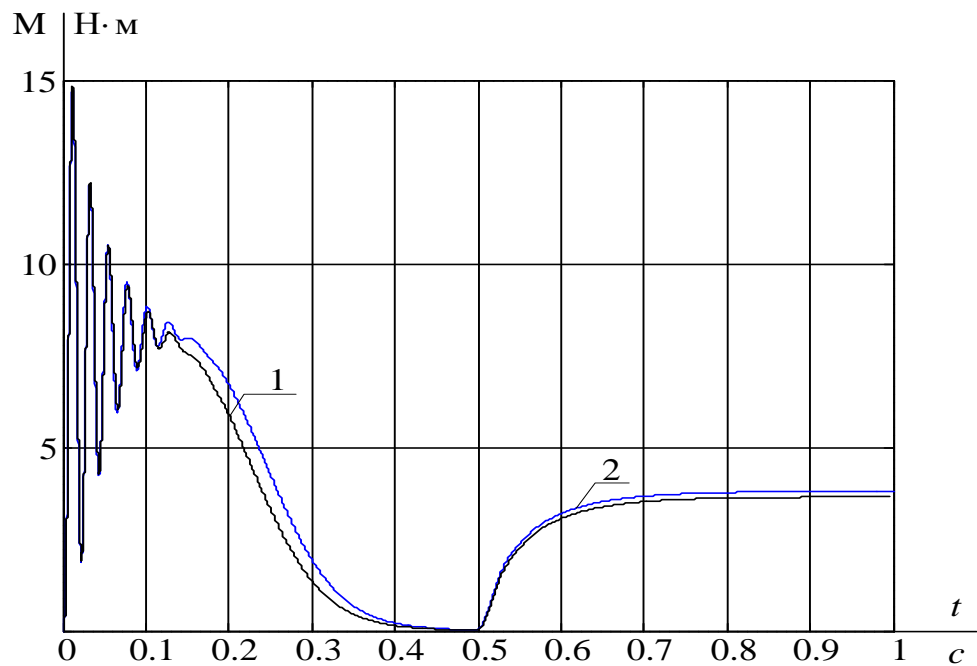


Рисунок 37 - Сравнение переходных характеристик момента двигателя

1- Пуск АД в библиотечной модели;

2- Пуск АД в неподвижной системе координат статора α, β .

Характеристики представленных на рисунках 36, 37 ведут себя практически идентично. Следовательно, схема асинхронного

электродвигателя в неподвижной системе координат статора α, β собрана правильно и пригодна для дальнейших исследований.

4.3 Динамические характеристики

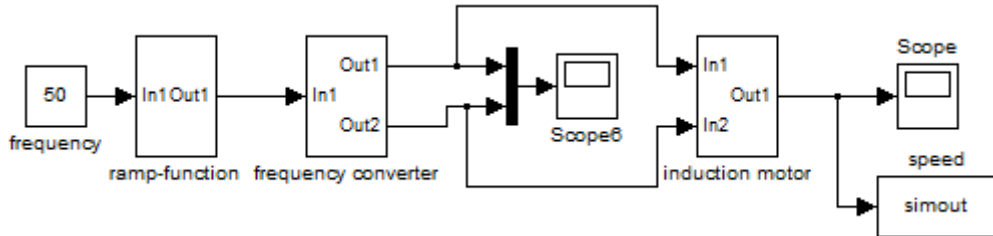


Рисунок 38 – Схема частотно - регулируемого асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора α, β по закону управления U/f^2

Данная сема состоит из следующих блоков.

frequency converter – преобразователь частоты. Его схема изображена на рисунке 39;

induction motor - асинхронного двигателя в α и β координатах. Он изображен на рисунке 35.

ramp-function – задатчик интенсивности. Он изображен на рисунке 40.

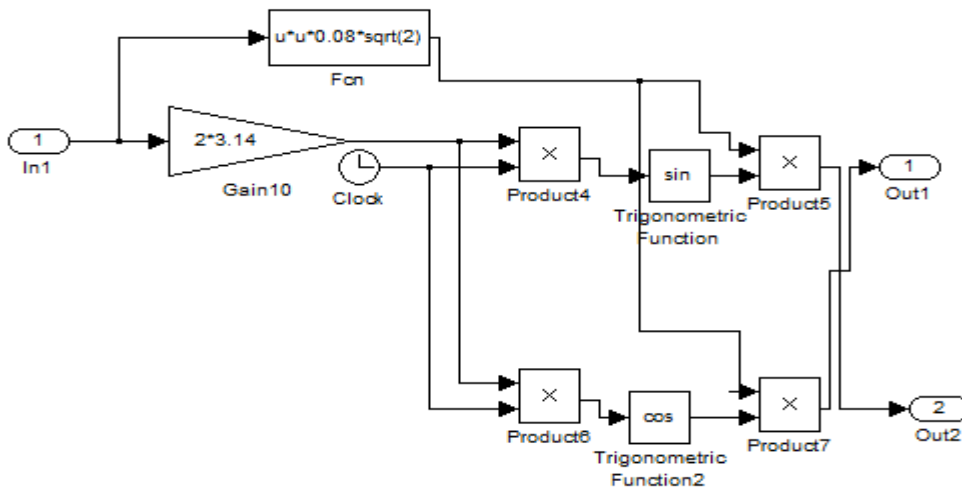


Рисунок 39 – Схема преобразователя частоты

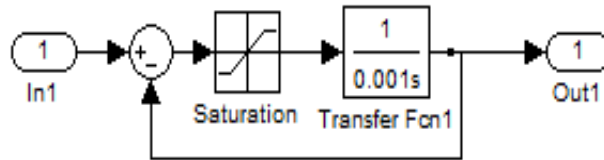


Рисунок 40 – Задатчик интенсивности

Ниже, на рисунке 41, 42 и 43 представлены переходные характеристики момента и скорости при пуске АД с задатчиком интенсивности и без него.

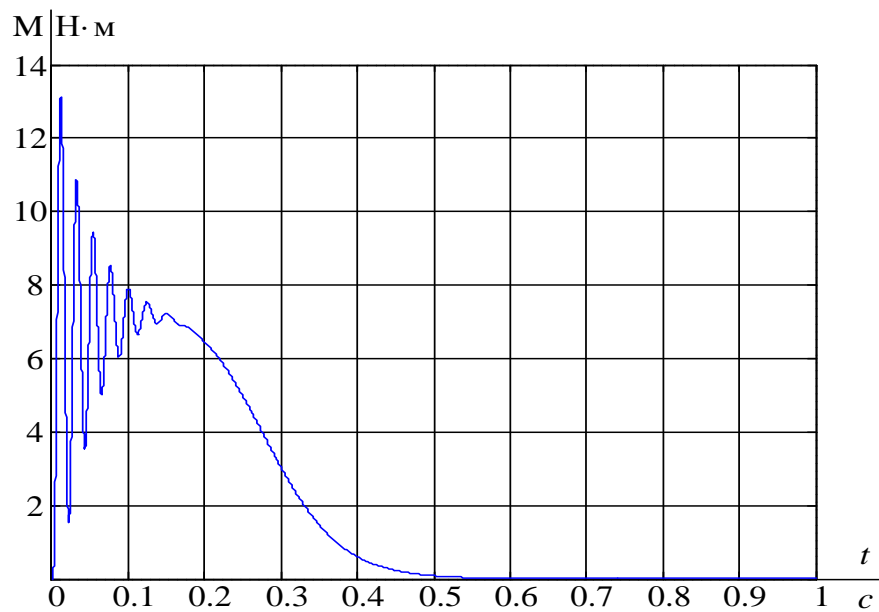


Рисунок 41 –Переходные характеристики момента двигателя при частотном регулировании АД неподвижной системе координат α, β без задатчика интенсивности

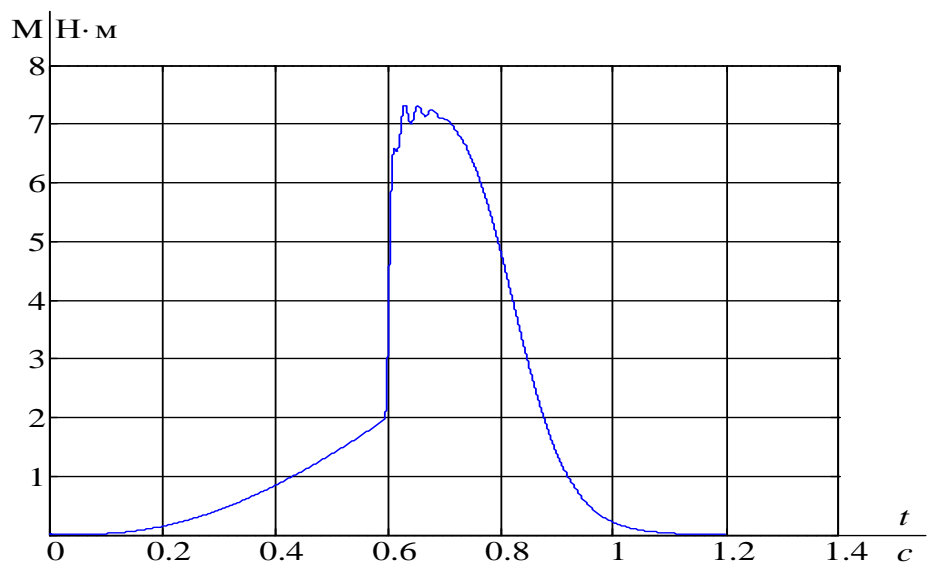


Рисунок 42– Переходные характеристики момента двигателя при частотном регулировании АД неподвижной системе координат α, β с задатчиком интенсивности

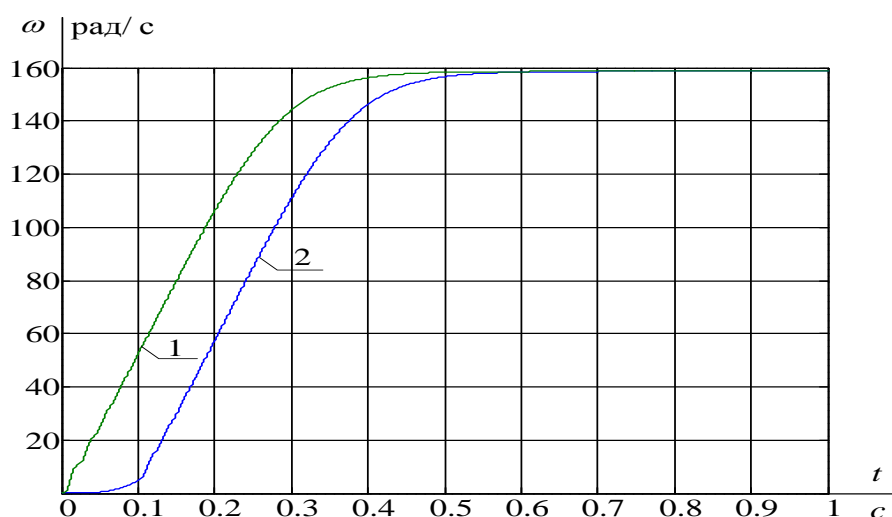


Рисунок 43 – Переходные характеристики скорости двигателя при частотном регулировании АД неподвижной системе координат α, β

Задатчик интенсивности обеспечивает функцию плавного пуска в работу электропривода.

При пуске двигателя без задатчика интенсивности скорости, мы наблюдаем в начальный момент времени колебания момента. При пуске двигателя в неподвижной системе координат α, β с помощью задатчика интенсивности мы практически избавляемся от этих колебаний, т.е. пуск двигателя будет проходить плавно.

5. РАЗРОБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

Были проведены исследования на экспериментальном стенде с датчиком расхода газа ДРГ.М, асинхронными двигателями типа АИМ6А4У2.5 и АИМ71А4, двумя центробежными вентиляторами В-Ц14-46-2,5. Блок контроля теплоты микропроцессорный БКТ.М служил для снятия показаний. Изображение экспериментального стенда изображено на рисунке 44. Осциллограммы выхода датчика расхода изображены на рисунках 53 и 54.



Рисунок 44 – Стенд экспериментальных исследований

5.1 Описание оборудования

Датчик расхода газа ДРГ.М

Назначение изделия:

Датчик расхода газа ДРГ.М (далее – датчик расхода) входит в состав счетчиков газа типа СВГ.М, СВГ.Т ТУ 39-0148346-001-92 и счетчиков пара СВП ТУ 4218-01212530677-98, и предназначен для преобразования объёмного расхода газа (при рабочем давлении) или пара в импульсный электрический сигнал с нормированной ценой импульса или нормированной частотой, и токовый сигнал 4 - 20 мА.

Описание датчика:

Датчик расхода может размещаться в помещениях или на открытом воздухе (под навесом).

Датчик расхода базового исполнения «ДРГ.М- ХХХ» соответствует требованиям ГОСТ 30852.0-2002, ГОСТ 30852.14-2002 к конструкции взрывозащищенного электрооборудования группы II с защитой вида "n", имеет маркировку взрывозащиты ExnAIIТ6 X и допускает эксплуатацию во взрывоопасных зонах помещений классов В-1а и В-1г.

Технические характеристики

Измеряемая среда для датчика расхода (базового исполнения) - природный газ, свободный нефтяной газ и другие, неагрессивные к стали марки 12Х18Н10Т, газы (сжатый воздух, водяной пар, азот, кислород и т.п.) с параметрами:

- избыточное давление, МПа – не более 2,5;
- содержание механических примесей, мг/м³, до 50;
- плотность при стандартных условиях, кг/м³, не менее – 0,6;
- температура от -40 до +200 °С.

Основные параметры датчиков расхода соответствуют значениям, указанным в таблице 6.

Таблица 6 - Основные параметры датчиков расхода

Типоразмер датчика расхода	Номинальный диаметр подсоединяемого трубопровода DN, мм	Избыточное давление измеряемой среды в диапазоне, Мпа	Диапазон эксплуатационных расходов Q (при рабочих условиях), м ³ /ч	
			наименьший, Q _{min}	наибольший, Q _{max}
ДРГ.М-60/80	50(80*)	от0,0 до 0,05	2	80
		от0,05 до 2,5	1	

Продолжение таблицы –6

ДРГ.М-160	50(80*)	от0,0 до 0,05	8	160
		от0,05 до 2,5	4	
ДРГ.М-400	80(50**)	от0,0 до 0,05	20	400
		от0,05 до 2,5	10	
ДРГ.М-800	80	от0,0 до 0,05	40	800
		от0,05 до 2,5	20	
ДРГ.М-1600	80	от0,0 до 0,05	80	1600
		от0,05 до 2,5	40	
ДРГ.М-2500	100	от0,0 до 0,05	125	2500
		от0,05 до 2,5	62,5	
ДРГ.М-5000	150	от0,0 до 0,05	250	5000
		от0,05 до 2,5	125	
ДРГ.М10000	200	от0,0 до 0,05	500	10000
		от0,05 до 2,5	250	

Примечание: *В комплекте с КМЧ (Комплект монтажных частей) на DN80

**В комплекте с КМЧ на DN50.

Степень защиты, обеспечиваемая оболочкой датчика расхода - IP57 по ГОСТ 14254-96.

Чувствительными элементами датчика расхода являются два пьезоэлектрических датчика пульсаций давления типа 014МТ (до 200 °С) или 018 (до 300 °С), или 020 (до 400 °С), встроенные в корпус преобразователя датчика расхода заподлицо* с внутренней поверхностью проточной части корпуса преобразователя.

*По специальному заказу может быть изготовлен «конденсатоустойчивый» вариант датчика расхода с выдвинутыми в проточную часть чувствительными элементами 014МТ (для повышения работоспособности на среде с содержанием жидкой фазы).

Устройство и работа:

Датчик расхода состоит из первичного преобразователя расхода ПР и смонтированного на нем электронного преобразователя ЭП. Электронный преобразователь ЭП состоит из корпуса, в котором расположены плата преобразования и плата коммутации.

Принцип работы датчика расхода заключается в следующем: набегающий поток газа образует за телом обтекания, находящимся в проточной части первичного преобразователя расхода, дорожку, характеризующуюся местными завихрениями в потоке. Частота срыва вихрей с тела обтекания пропорциональна скорости потока газа. У верхнего торца тела обтекания установлены два чувствительных элемента (пьезоэлектрические датчики давления), воспринимающие пульсации давления при срыве очередного вихря.



Рисунок 45 – Структурная схема датчика расхода

Плата преобразования датчика расхода осуществляет усиление, фильтрацию, масштабирование и обработку по заданному алгоритму сигналов с пьезоэлектрических датчиков давления и формирует импульсный и токовый выходные информационные сигналы.

Подключение датчика расхода осуществляется посредством клеммной колодки на плате коммутации. Внешний вид платы коммутации приведен на рисунке 46.

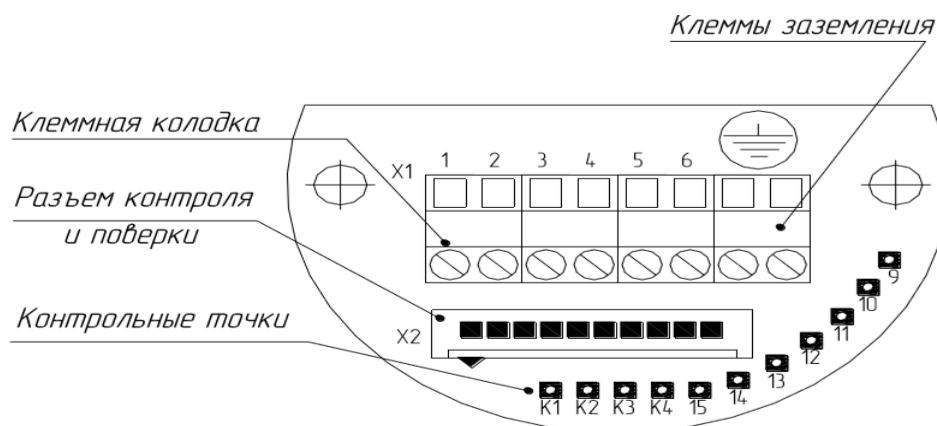


Рисунок 46 – Плата коммутации

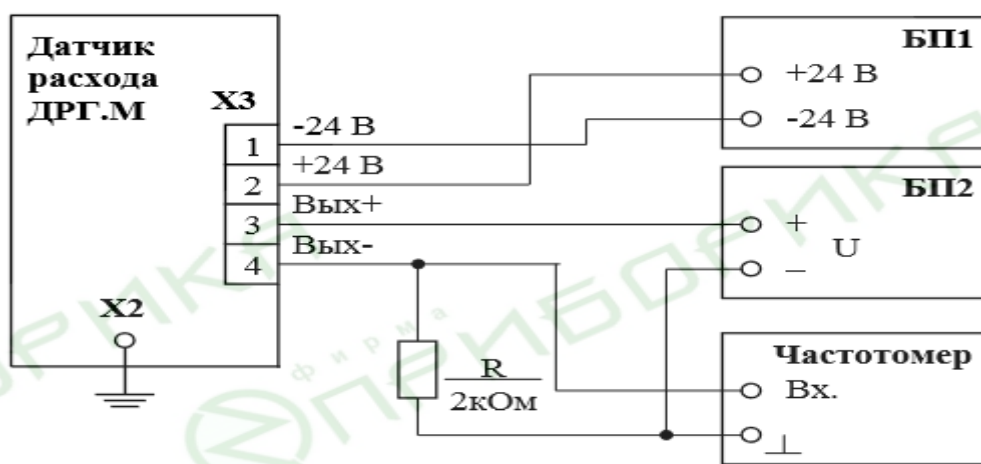


Рисунок 47 – Схема соединений и подключений

БП1 – стабилизированный источник питания (24±1) В;

БП2 – стабилизированный источник питания 5-30 В;

R - резистор типа МЛТ-0,25.

Частотомер должен обеспечивать время измерения не менее 10 с.

Маркировка и пломбирование:

Обозначение типоразмера датчика расхода, дата изготовления, номинальное давление, степень защиты от внешних воздействий, маркировка взрывозащиты, указание направления потока газа, обозначение технических условий указаны на табличке, прикрепленной к корпусу датчика расхода.

Места пломбирования датчика расхода указаны на монтажном чертеже 311.00.00.000 МЧ.

ДРГ-М Датчик расхода. Цена 68200р.

Датчик ТСПУ 9418

Назначение:

Термопреобразователи с унифицированным выходным сигналом взрывозащищенные ТСПУ 9418, ТСМУ 9418. Датчики температуры предназначены для измерения температуры газообразных, жидких, сыпучих веществ, не разрушающих материал защитной арматуры. Используются в системах автоматического контроля и регулирования температуры на объектах энергетики, нефтяной, газовой, горнодобывающей промышленности и других.

ТСПУ 9418, ТСМУ 9418 включают в себя первичный термопреобразователь, который соединен с расположенным в головке нормирующим преобразователем с выходным унифицированным сигналом (4-20) мА или (0-5) мА.

Основные технические характеристики

- Диапазоны измеряемых температур, -200...600 °С;

Термометры сопротивления ТСМ, ТСП выпускаются в защитной арматуре из стали 12Х18Н10Т диаметром 6; 8 или 10 мм.

Стоимость 8 165.60

Преобразователь давления измерительный МТМ701.6

Назначение:

Преобразователи предназначены для непрерывного преобразования давления газообразных и жидких некристаллизующихся сред в электрический унифицированный аналоговый выходной сигнал постоянного тока.

Преобразователи предназначены для эксплуатации в следующих условиях:

- синусоидальная вибрация с частотой от 10 Гц до 55 Гц и амплитудой смещения 0,15 мм;

- относительная влажность окружающего воздуха до 95 % при 35 °С и более низких значениях температуры без конденсации влаги;
- атмосферное давление от 84 кПа до 106,7 кПа;
- температура окружающего воздуха от минус 40 °С до плюс 60 °С;
- постоянные магнитные поля и (или) переменные поля сетевой частоты с напряженностью до 400 А/м.

Блок контроля теплоты микропроцессорный БКТ.М

Назначение:

Блок контроля теплоты микропроцессорный БКТ.М (далее - блок БКТ.М) предназначен для преобразования входной информации о параметрах газа и вычисления на их основе объемного расхода и объема газа, приведенного к стандартным условиям, в составе счетчика газа вихревого СВГ.М (далее – счетчик газа) на промышленных объектах и предприятиях коммунально-бытового назначения.

- подключение и электрическое питание с гальванической развязкой четырех датчиков расхода (электромагнитных, вихревых, турбинных) с частотным или числоимпульсным выходным сигналом с подавлением дребезга контактов электромеханических устройств формирования импульсов - герконов и т.д.;

- подключение и электрическое питание от одного источника датчиков температуры и давления (абсолютного либо избыточного) с токовым выходом 0-5 мА или 4-20 мА (общее количество датчиков не более шести);

- измерение времени наработки при включенном питании и индикацию даты и времени суток; - прием и обработку сигналов с датчиков расхода, температуры и давления по заданному алгоритму;

- вычисление расхода и объёма газа по трем “трубам” (одна “труба” объединяет три канала: “расход”, “температура” и “давление”), приведённого

в соответствии с ПР 50.2.019-2006 к стандартным условиям по ГОСТ 2939-63;

- регистрацию и хранение, за последние два месяца, информации о среднечасовых значениях температуры, давления, объёмного расхода газа и информации нарастающим итогом о значении объёма газа, приведённого к стандартным условиям (в м³) и времени наработки счётчика газа;

- передачу информации на верхний уровень с помощью стандартных интерфейсов RS232/RS485 по протоколу ModBus[RTU], MicontBus[ASCII], MicontBus[RTU];

- запись сохраняемой информации на магнитный 3,5" флоппи-диск, по запросу оператора, с помощью встроенного дисковод;

- отображение мгновенных параметров потока газа, текущей информации о среднечасовых и итоговых параметрах на экране индикатора-дисплея;

- сохранение информации о среднечасовых и итоговых параметрах при отключении питания;

- исключение несанкционированного доступа к программе; - автоматическую перезагрузку процессора при «зависании», остановке, вызванных электростатическими помехами.

Устройство и работа:

Общий вид и габаритные размеры блока БКТ.М приведены на рисунке 48. Блок БКТ.М выполнен в герметичном пылевлагозащищенном корпусе настенного исполнения и функционально состоит из блоков, в соответствии с рисунком 49.

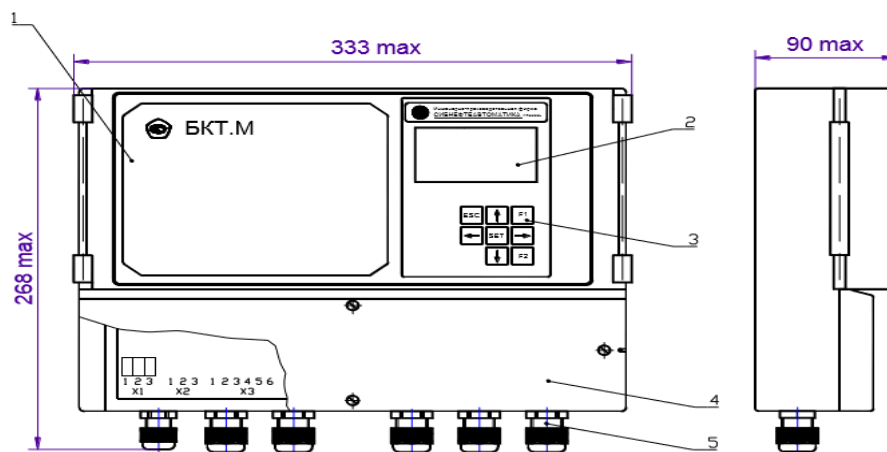


Рисунок 48 – Блок контроля теплоты микропроцессорный БКТ.М. Общий вид.

1 - дисковод; 2 - дисплей; 3 – клавиатура; 4 – отсек клеммных соединителей; 5 – гермовводы.



Рисунок 49 – Структурная схема блока БКТ.М

Подключение датчиков происходит по схеме, приведенной на рисунке 50, в соответствии с действующими инструкциями по монтажу и наладке электрооборудования.

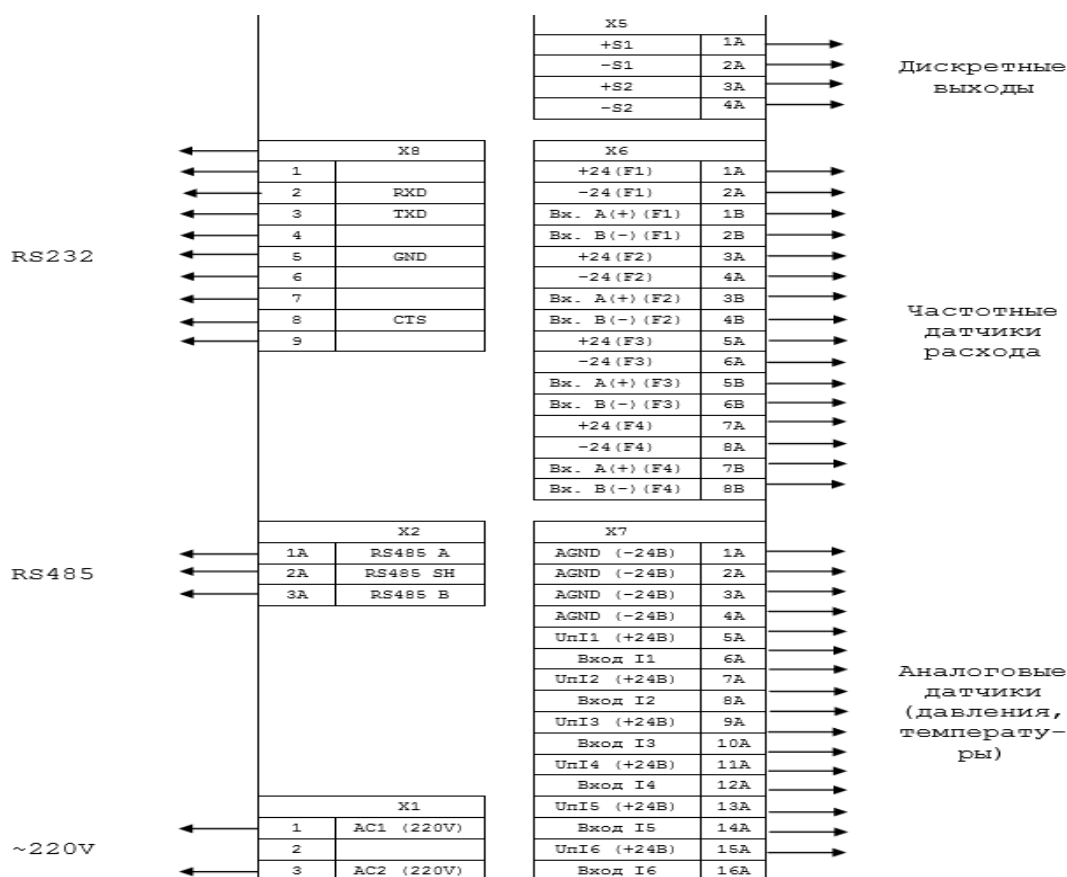


Рисунок 50 – Схема подключения

Производитель: завод Сибнефтеавтоматика г.Тюмень. В наличии 7 шт. Цена 15000руб/шт.

Преобразователь частоты micromaster 440

MICROMASTER 440 используется при решении многочисленных задач, при решении которых требуется применение приводов с большим диапазоном регулирования. Благодаря его гибкости обеспечен широкий спектр применений. Преобразователь MICROMASTER 440 имеет высокую производительность. Преобразователь производится для широкого диапазона сетевого напряжения, благодаря этому есть возможность использовать его в любой части света.

Радиальный вентилятор В-Ц14-46-2,5

В данной работе рассматривается радиальный вентилятор типа В-Ц14-46-2,5.

Общий вид вентилятора, габаритные, присоединительные и установочные размеры приведены на рисунке 51 и в таблицы 7.

Таблица 7 - габаритные, присоединительные и установочные размеры

Индекс вентилятора	А, мм	А1, мм	Н, мм		Н1, мм		L, мм	L _{max} , мм	D1, мм	D2, мм	n1, мм	d1, мм
			max	min	max	min						
В-Ц14-46-2,5	479	155	512	508	335	311	150	481	250	273	8	7

Продолжение таблицы 7

Индекс вентилятора	b, мм	c, мм	Б1, мм	Б2, мм	n2, мм	d2, мм
В-Ц14-46-2,5	2,5	10	220	190	8	7

Продолжение таблицы 7

Индекс вентилятора	E, мм	E1, мм	n3, мм	d3, мм	l3, мм	C, мм	C1, мм	C2, мм	C3, мм	F, мм
В-Ц14-46-2,5	467	245	6	7	30	12	70	50	12	255

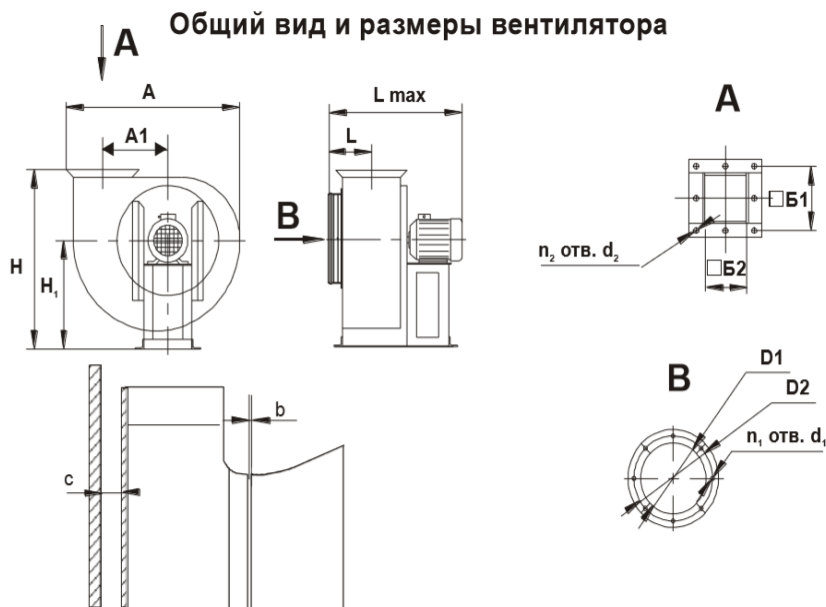


Рисунок 51 – Общий вид и размеры вентилятора

Корпус вентилятора может быть установлен в любом из положений показанных на рисунке 52.

Направление вращения рабочего колеса правое и левое.

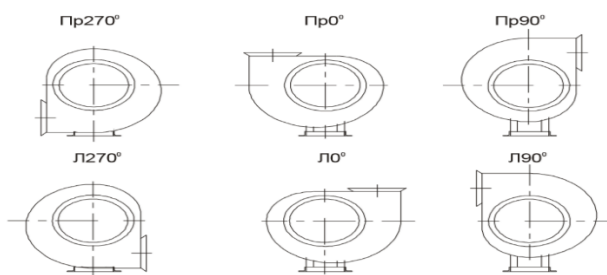


Рисунок 52 – Положения корпуса вентилятора

Вентиляторы общего назначения и коррозионностойкие комплектуются преимущественно электродвигателями типа АИР.

Устройство и принцип работы

Вентилятор состоит из спирального корпуса, рабочего колеса, профилированного коллектора, входного патрубка, станины, электродвигателя.

Детали и узлы вентиляторов общего назначения изготовлены из углеродистой стали обыкновенного качества ГОСТ380-88[34]; вентилятор К – корпус и рабочее колесо из стали 12Х18Н10Т, станина из углеродистой стали. Коллекторы изготовлены из стеклопластика.

Принцип работы вентилятора заключается в передаче механической энергии от вращаемого электродвигателем рабочего колеса потоку воздуха путем аэродинамического воздействия на него лопаток колеса. Выйдя из рабочего колеса и пройдя спиральный диффузор корпуса, поток воздуха с более высоким давлением поступает через нагнетательное отверстие в сеть.

5.2 Экспериментальные характеристики

Подключение осциллографа к датчику расхода



Рисунок 53 – Выходной сигнал датчика расхода при 25 Гц



Рисунок 54 – Выходной сигнал датчика расхода при 50 Гц

Снятие характеристики расхода вентилятора при изменения частоты. Зависимость расхода от частоты питающей сети приведены в таблицы 8 и 9.

Таблица 8 - Один двигатель

f, Гц	20	25	30	35	40	45	50
G1, м ³ /ч	125	170,5	205	245	281	320	354

Таблица 9 - Два двигателя

f, Гц	20	25	30	35	40	45	50
G1, м ³ /ч	195	254	302	350	407	449	513,15

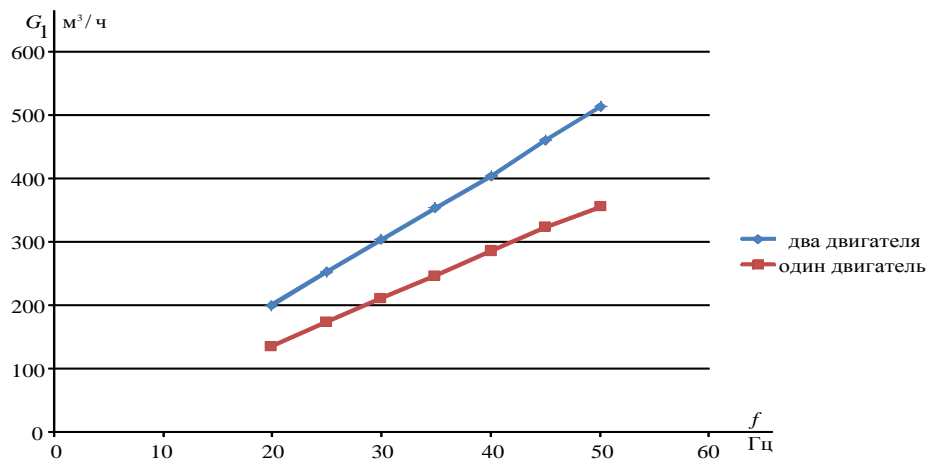


Рисунок 55 – Зависимость расхода вентилятора от частоты питающей сети.

Использование двух двигателей увеличивает расход вентилятора. Данный способ регулирования можно отнести качественному методу регулирования вентилятора. Производительность увеличивается пропорционально первой степени увеличения числа оборотов. Из графиков можно сделать вывод, что при возрастании числа оборотов нагнетателя (двигателя) расход увеличивается пропорционально. Расход увеличивается на 32 % при использовании двух двигателей.



Рисунок 56 – Показания расхода с датчика БКТ.М при частоте питания 50 Гц



Рисунок 57 – Показания расхода с датчика БКТ.М при частоте питания 25 Гц

Таблица 10 – Один двигатель

Число оборотов	0	2	4	6	8	10	11	12	13
$G_1, \text{м}^3/\text{ч}$	0	0	0	0	75,361	156,56	167	179,1	190
Число оборотов	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$G_1, \text{м}^3/\text{ч}$	204	218	225,47	236,8	242,15	254,81	261,1	269,4	270
Число оборотов	23	24	25	26	27	28	29	30	
$G_1, \text{м}^3/\text{ч}$	280	287	292,71	297	302,9	306,9	309	314	

Таблица 11 – Два двигателя

Число оборотов	0	2	4	6	8	10	11	12	13
$G_1, \text{м}^3/\text{ч}$	0	0	0	0	228,7	274	296,4	320	334,3
Число оборотов	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$G_1, \text{м}^3/\text{ч}$	356	367	388,7	390	405	417	426	434	444,8
Число оборотов	23	24	25	26	27	28	29	30	
$G_1, \text{м}^3/\text{ч}$	457	464	474,07	483,4	489	494	502	508,19	

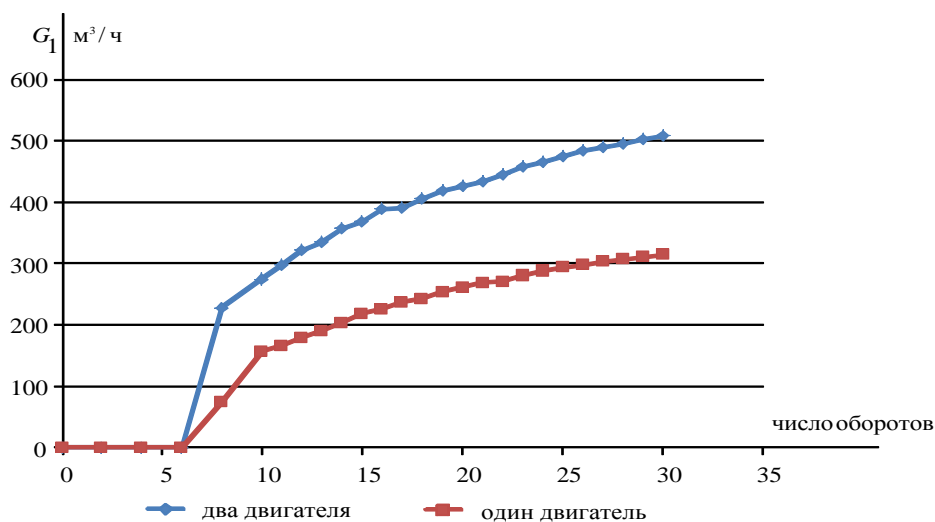


Рисунок 58 – Зависимость расхода вентилятора от затвора

При постепенном перекрытии вентиля сопротивление сети увеличивается, и характеристика сети становится более крутой.



Рисунок 59 – Показания расхода с датчика БКТ.М при частоте питания 50 Гц(30 оборотов)



Рисунок 60 – Показания расхода с датчика БКТ.М при частоте питания 50 Гц(11 оборотов)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной выпускной квалификационной работы является исследование электропривода вентиляторной установки.

В данной работе были рассчитаны параметры асинхронного двигателя, рассчитаны и построены естественные и искусственные характеристики для заданного закона регулирования. Система ПЧ-АД была смоделирована в среде MATLAB Simulink, там же были получены переходные процессы, удовлетворяющие технологическому процессу.

На стенде, который включает в себя два вентилятора и два двигателя, проведены эксперименты. В ходе экспериментов были сняты характеристики расхода от частоты питающей сети.

Проведены имитационное моделирование и аналитические расчеты, которые подтвердили правильность выбора преобразователя и электродвигателя.

Система преобразователь частоты – асинхронный двигатель обеспечивает требуемые статические и динамические нагрузки привода вентилятора.

В экономической части выпускной квалификационной работы исследованы вопросы планирования, определение ресурсной (ресурсосберегающей), бюджетной, финансовой, социальной и экономической эффективности исследования, расчет сметы затрат, расчет показателя конкурентоспособности, расчет бюджета для технического исследования. В разделе безопасности и экологичности проекта рассмотрены вопросы: промышленной безопасности; техники безопасности; анализ опасных и вредных производственных факторов; пожарная безопасность; рассмотрены мероприятия по охране окружающей среды.

Список используемой литературы:

1. Вахвахов Г. Г. Работа вентиляторов в сети. М., Строй издат, 1975. 101 с.
2. Название сайта "Полдник.Ру" История создания вентилятора. [электронный ресурс]. <http://poldnic.ru/interesnoe/2249-istoriya-sozdaniya-ventilyatora.html> (дата 08.03.17).
3. Черкасский В. М. 4-48 Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник для теплоэнергетических специальностей вузов. — 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоатом издат, 1984. — 416 с.
4. Компания "Регион-Новые технологии" АИМ71А4 Электродвигатель асинхронный взрывозащищенный. [электронный ресурс] <http://www.ufk-techno.ru/1305.htm> (дата 10.04.17).
5. Название сайта «Промышленные вентиляторы» Вентиляторы общепромышленного применения. [электронный ресурс]. http://ventilator.od.ua/promislenni_ukraina_zarubezh/vent_tory.html (дата 25.04.17).
6. Электротехнический справочник: Использование электрической энергии / Под общ.ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). — 8-е изд., — М.: Издательство МЭИ, 2002. — 696 с.
7. Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Расчёт характеристики электроприводов переменного тока. Часть 1. Асинхронный двигатель. Учебное пособие. /Томский политехнический университет. — Томск: Издательство ТПУ, 2005. — 136 с.
8. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.8. Асинхронный частотно – регулируемый электропривод: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. — 488 с.

9. Преобразователь давления измерительный МТМ701.6. Руководство по эксплуатации ААЛУ.421111.002 РЭ
10. Блок контроля теплоты микропроцессорный руководство по эксплуатации 324.02.00.000-02 РЭ
11. Каталог DA 51.2 • 2003/2004
12. Паспорт вентиляторы центробежные ВЦ 14-46
13. Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009, №1116 (с изменениями от 24.12.2014) “Об организации сбора, вывоза, утилизации и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования "Город Томск".”
14. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 “Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств.”
15. ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т “Пожарная безопасность. Общие требования.”
16. ГОСТ Р 50571.3-94 “Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защиты от поражения электрическим током.”
17. Майсак О. С. SWOT-анализ: объект, факторы, стратегии. Проблема поиска связей между факторами // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. — 2013. — № 1 (21). — С. 151—157