

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

---

Институт ИНЭО  
Направление подготовки Электроэнергетика и электротехника  
Кафедра ЭПЭО

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Выбор электрооборудования фрезерного станка

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
35Г13	Тубчинова Валентина Геннадьевна		

Руководитель

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

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

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

Институт ИНЭО  
 Направление подготовки Электроэнергетика и электротехника  
 Кафедра ЭПЭО

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы <small>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</small>
--

Студенту:

Группа	ФИО
35ГЗ	Тубчиновой Валентине Геннадьевне

**Тема работы: Выбор электрооборудования фрезерного станка**

Утверждена приказом директора (дата, номер)	
---	--

Срок сдачи студентом выполненной работы:	17.06.2016
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

Исходные данные к работе <small>(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.).</small>	
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <small>(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).</small>	
Перечень графического материала <small>(с точным указанием обязательных чертежей)</small>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <small>(с указанием разделов)</small>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и	М.В Мелик – Гайказян

ресурсосбережение	
Социальная ответственность	И.И Романцов

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	И.А Чернышев	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
35Г13	Тубчинова В.Г		

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

Студенту:

<b>Группа</b> 3-5Г13	<b>ФИО</b> Тубчиновой Валентине Геннадьевне
-------------------------	--

<b>Институт</b>	<b>ИНЭО</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭПЭО</b>
<b>Уровень образования</b>	бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	Электроэнергетика и электротехника/ Электрооборудование и электрохозяйство промышленных предприятий, организаций и учреждений

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

<i>1. Стоимость затрат технического проекта (ТП): материально-технических, финансовых и трудовых ресурсов.</i>	<i>Материальные затраты, Зарботная плата определяется исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ</i>
--	--

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<i>1. Оценка потенциала и перспективности реализации ТП с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Производится оценка потенциала и перспективности реализации ТП с помощью SWOT-анализа и интегральной оценки ресурсоэффективности.</i>
<i>2. Формирование графика работ по реализации ТП</i>	<i>Для составления графика технико-конструкторских работ используется оценка трудоемкости работ для каждого исполнителя. По полученным данным строится график инженерных работ, позволяющий лучше спланировать процесс реализации ТП</i>
<i>3. Формирование сметы</i>	<i>В процессе формирования сметы ТП используется следующая группировка затрат по статьям:</i> – <i>материальные затраты ТП;</i> – <i>затраты на специальное оборудование;</i> – <i>полная заработная плата исполнителей;</i> – <i>отчисления во внебюджетные фонды;</i> – <i>накладные расходы.</i>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Диаграмма Ганта

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Мелик – Гайказян М.В.	К. Э. Н.,		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
3-5Г13	Тубчинова В.Г		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
35Г13	Тубчинова Валентина Геннадьевна

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

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</li> <li>– негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</li> <li>– чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</li> </ul>	<p>Территория инструментального цеха с главным объектом рассмотрения и исследования горизонтально-фрезерного станка. Необходимо поддержание:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Нормативных метеоусловий, уровней вибрации и шума;</li> <li>– Нормативных мер обеспечения электро- и пожаробезопасности.</li> <li>– Использование электрооборудования, отопление требуют воды, дающего выбросы 3В в атмосферу.</li> <li>– Наиболее вероятные ЧС: загорания (пожары), электрический удар, например, при замыкании фазы питания на корпус электрооборудования при нарушенном его заземлении.</li> </ul>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>ГОСТ 12.0.003-74 «ОиВПФ»; ГОСТ12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности»; ГОСТ 12.1.01290«Вибрационнаябезопасность»; ГОСТ 12.1.005-88«Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»; ПУЭ, утвержденный министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава1.7.; №123-ФЗ» Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»; Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681; Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12. 2014).</p>

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> </ul>	<p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Шум;</li> <li>2. Вибрации;</li> <li>3. Возможные ненормативные метеоусловия;</li> </ol>
--	---

<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты  (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul>	
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производённой среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> </ul>
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>Люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.</p> <p>оценить масштабы</p> <p>уменьшения выбросов ЗВ от возможной экономии электроэнергии на рабочем месте. По п.3.3.: дать схему обращения твердых отходов от рабочего места согласно Постановлению</p> <p>Администрации г. Томска от 11.11.2010.</p>
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС на объекте;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</li> </ul>	<p>Разработать мероприятия по предупреждению загораний и электропоражений и мер по ликвидации их последствий.</p>

<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</li> </ul>	
<p><b>Перечень графического материала:</b></p>	
<p>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</p>	

<p><b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Старший преподаватель</p>	<p>Романцов И.И</p>	<p>Кандидат технических наук</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>35Г13</p>	<p>Тубчинова Валентина Геннадьевна</p>		

## **РЕФЕРАТ**

Выпускная квалификационная работа содержит 122 страниц, 47 рисунков, 12 таблиц, 25 источников.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОПРИВОД, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЙ СТАНОК, СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК, ОБРАБАТЫВАЮЩИЙ ЦЕНТР, ЕСТЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ.

Объектом исследования является регулируемый электропривод главного движения металлообрабатывающего по системе преобразователь частоты - асинхронный двигатель.

Целью данной диссертации является исследование электропривода переменного тока главного движения обрабатывающего центра, который выполнен по схеме преобразователь частоты - асинхронной двигатель, обеспечивающий заданное положение инструмента в рабочем пространстве.

В процессе работы использовалось как специальное обеспечение (MATLAB R2010b), так и стандартные программы (Microsoft Word, Microsoft Excel, Microsoft Visio).

В результате выполнения курсового проекта была осуществлена разработка электропривода переменного тока с автоматическим управлением.

Курсовой проект выполнен в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2007.



## Содержание

Введение.....	11
1 Технический процесс металлообработки.....	13
1.1 Общие основы фрезерных станков.....	16
1.2 Устройство фрез и их назначение.....	19
1.3 Виды фрезерных станков.....	23
2. Энергосбережение.....	29
3. Выбор электрооборудования.....	37
3.1 Выбор электродвигателя.....	37
3.2 Выбор преобразователя частоты.....	38
3.3 Подключение преобразователя частоты.....	43
3.4 Выбор входного фильтра.....	49
3.5 Выбор выходного фильтра.....	51
3.6 Выбор автоматического выключателя.....	52
3.7 Выбор магнитных пускателей.....	53
4. Расчет статических характеристик для разомкнутой системы регулируемого электропривода.....	55
4.1 Расчет естественных характеристик , регулируемого электропривода.....	55
4.2 Расчет искусственных (регулирующих ) характеристик, регулируемого электропривода для заданного диапазона регулирования скорости.....	60
5. Создание математической модели и проведение имитационного моделирования работы в MATLAB SIMULINK.....	67
5.1 Определение дополнительных параметров двигателя и параметров схемы замещения.....	67
5.2 Прямой пуск двигателя.....	70
5.3 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода.....	73

5.4 Структурная схема нелинейной САУ РЭП асинхронного электропривода с векторным управлением.....	83
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	92
6.1. SWOT-анализ проекта.....	92
6.2. Организация работ технического проекта .....	95
6.2.1. Структура работ в рамках технического проектирования.....	95
6.2.2. Определение трудоемкости выполнения технического проекта.....	97
6.3. Составление сметы затрат на разработку технического проекта.....	99
6.3.1. Расчет материальных затрат.....	101
6.3.2. Основная заработная плата исполнителей темы.....	101
6.3.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)....	103
6.3.4. Накладные расходы.....	104
6.3.5. Формирование сметы технического проекта.....	104
6.4. Определение ресурсоэффективности проекта.....	105
7 Социальная ответственность .....	108
7.1 Характеристика помещения.....	108
7.2 Анализ опасных и вредных факторов.....	108
7.3 Техника безопасности .....	110
7.4 Производственная санитария .....	110
7.5 Расчет искусственного освещения .....	113
7.6 Пожарная безопасность.....	115
7.7 Охрана окружающей среды.....	120
Заключение.....	121
Список литературы.....	122

## **Введение:**

В настоящее время наблюдается тенденция на повышение уровня автоматизации производственных процессов. В производство все более внедряется автоматизированное оборудование, работающее без непосредственного участия человека или значительно облегчающее труд рабочего. Это позволяет значительно сократить трудоемкость производственного процесса, снизить себестоимость выпускаемой продукции, увеличить производительность труда. Поэтому главная задача инженеров - разработка автоматизированного оборудования, расчет его основных узлов и агрегатов, выявление наиболее оптимальных технических решений и внедрение их в производство.

Области применения автоматических устройств весьма обширны, благодаря чему существует большое разнообразие систем, выполняющих те или иные задачи. Наиболее распространенными являются системы слежения и стабилизации.

Широкое распространение получили цифровые следящие системы, применяемые в различных областях техники. Разрабатываются системы программного управления станками и манипуляторами. Внедрение цифровой техники происходит также и в системах стабилизации, и в промышленных регуляторах. Это приводит, как правило, к появлению новых структурных решений и их усложнению. Одновременно растут требования к надежности и увеличению срока службы разрабатываемых систем. При этом возникает задача автоматического контроля функционирования системы и сигнализации о неисправностях отдельных элементов и устройств подобно сложным автоматическим комплексам.

Эти системы должны удовлетворять определенным требованиям и обеспечивать выполнение их в конкретных условиях эксплуатации. Чаще всего основным требованием является точность работы в широком диапазоне изменения входной величины. Как известно, точность работы таких систем зависит от статических и эксплуатационных источников погрешностей.

Наибольшую погрешность вносят, как правило, измерительные элементы, повышение точности которых в ряде случаев является сложной задачей. В соответствии с этим должны быть рассмотрен выбор элементов, определение их параметров, т. е. проведен статический расчет системы для последующего анализа устойчивости и синтеза корректирующих устройств.

В настоящее время уделяется внимание вопросам проектирования высокоточных систем управления с измерительными элементами с электрической редукцией. Последние применяются как в аналоговых, так и в цифровых системах управления с целью обеспечения точности, исчисляемых угловыми минутами, а в ряде случаев и угловыми секундами.

Целью данной работы стоит разработать электропривод главного движения металлообрабатывающего центра, удовлетворяющего техническим условиям и требованиям.

# 1 Технический процесс металлообработки

## 1.1 Общие основы фрезерных станков

Фрезерование — процесс резания металла, осуществляемый вращающимся режущим инструментом при одновременной линейной подаче заготовки. Материал с заготовки снимают на определенную глубину фрезой, работающей либо торцовой стороной, либо периферией. Главным движением при фрезеровании является вращение фрезы  $v$  (рисунок 1). Скорость главного движения определяет скорость вращения фрезы. Движением подачи  $s$  при фрезеровании является поступательное перемещение обрабатываемой заготовки в продольном,

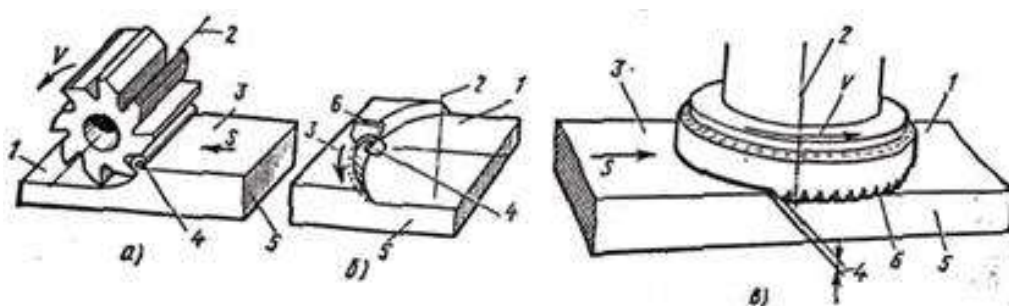


Рисунок 1 – Схемы фрезерования: а — цилиндрическое, б и в — торцовое фрезерование; 1—обработанная поверхность, 2-ось вращения фрезы, 3 — обрабатываемая поверхность, 4— стружка, 5 — заготовка, 6 — нож фрезы.

Поперечном или вертикальном направлениях. Процесс фрезерования является прерывистым процессом. Каждый зуб фрезы снимает дружку переменной толщины. Операции фрезерования могут быть подразделены на два типа: а) цилиндрическое фрезерование (рисунок 1, а); б) торцовое фрезерование (рисунок 1, б и в).

При цилиндрическом фрезеровании резание осуществляется зубьями, расположенными на периферии фрезы, и обработанная поверхность 1 является плоскостью, параллельной оси вращения фрезы 2.

На рисунке 1, а показана фреза с прямым зубом. Наряду с прямозубыми применяются фрезы с винтовыми зубьями (рисунок 2).

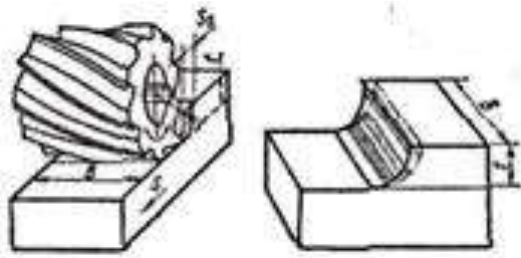


Рисунок 2 – Фрезерование цилиндрической винтовой фрезой:  $B$  — ширина фрезерования,  $t$  — глубина фрезерования,  $s$  — наибольшая толщина среза.

При торцовом фрезеровании (см. рисунок 1) резание осуществляется периферийными и торцовыми режущими кромками зубьев. Толщина среза увеличивается к центру среза и уменьшается в месте выхода фрезы из контакта с заготовкой. Начальная и конечная толщина среза зависит от отношения ширины заготовки к диаметру фрезы. Изменение толщины среза зависит также от симметричности расположения фрезы относительно заготовки. Большинство других процессов фрезерования являются комбинацией цилиндрического и торцового методов фрезерования.

Особенности стружкообразования при фрезеровании:

Процесс образования стружки при фрезеровании сопровождается теми же явлениями, что и при точении. Это деформации, теплообразование, образование нароста, вибрации, износ инструмента и др. Но при фрезеровании имеются свои особенности. Резец при точении находится под постоянным действием стружки вдоль всей длины обработки. При фрезеровании зуб за один оборот фрезы находится под действием стружки незначительное время. Большую часть оборота зуб не участвует в резании, за некоторое время он охлаждается, что положительно отражается на его стойкости. Вход зуба в контакт с обрабатываемой заготовкой сопровождается ударом о его режущую кромку; ударная нагрузка снижает стойкость зуб; фрезы.

Фрезерование против подачи и по подаче:

При фрезеровании цилиндрическими и дисковыми фрезами различают встречное фрезерование — против подачи и попутное— фрезерование по подаче. Когда окружная скорость фрезы противоположна направлению подачи (рисунок 3,а), процесс

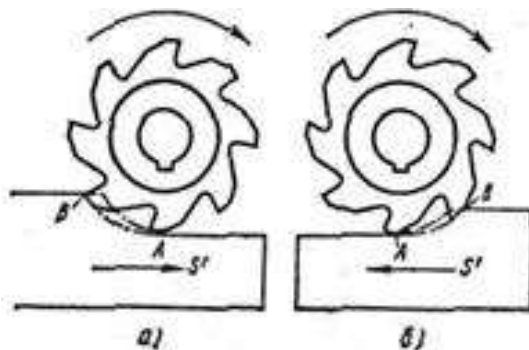


Рисунок 3 – Фрезерование против подачи (а) и по подаче (б) фрезерования называется встречным.

Толщина среза изменяется от нуля (в точке *A*) до максимальной величины при выходе зуба из контакта с заготовкой (в точке *B*). Когда направление окружной скорости фрезы и скорости подачи совпадают (рисунок 3, б), процесс фрезерования называется «попутным» фрезерованием. При этом способе фрезерования толщина среза изменяется от максимального значения в точке *B* в начале входа зуба в контакт с заготовкой до нуля в точке *A* (при выходе зуба из контакта с заготовкой).

Встречное фрезерование характеризуется тем, что нагрузка на зуб увеличивается постепенно, так как толщина среза изменяется от нуля при входе до максимума при выходе зуба из заготовки. Зуб фрезы работает из-под корки, выламывая корку снизу, фреза «отрывает» заготовку от стола, приподнимая вместе с ней и стол станка, увеличивая зазоры между направляющими стола и станины, что при значительных нагрузках приводит к дрожанию и увеличению шероховатости обработанной поверхности.

При попутном фрезеровании заготовка прижимается к столу, выбирая имеющиеся зазоры в направляющих стола и станины. Зуб фрезы начинает работать с наибольшей толщиной и сразу подвергается максимальной нагрузке.

### Равномерность фрезерования:

В процессе фрезерования прямозубой фрезой зуб фрезы входит в контакт с обрабатываемой заготовкой и выходит из него сразу по всей ширине фрезерования. Может оказаться, что в работе будет находиться только один зуб прямозубой фрезы, т. е. когда впереди идущий зуб уже вышел из контакта с обрабатываемой заготовкой, а следующий за ним зуб не вышел в контакт. В этом случае площадь поперечного сечения среза будет изменяться от нулевого значения до максимального с последующим падением до нуля или от максимального значения до нуля. Также неравномерно будет изменяться сила резания, а следовательно, будет неравномерная периодическая нагрузка на станок, инструмент и обрабатываемую заготовку. Это явление носит название неравномерности фрезерования.

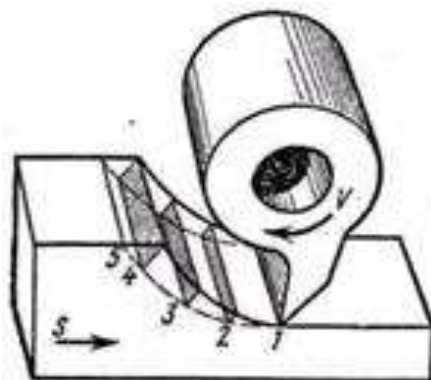


Рисунок 4 – Схема работы однозубой (условной) фрезой

На рисунке 4 показана упрощенная схема работы прямозубой фрезы. На фрезе условно показан один зуб. Зуб врезается в заготовку сразу по всей ширине фрезерования. Фреза испытывает толчок. При дальнейшем повороте фрезы толщина стружки будет постепенно увеличиваться (положения 2, 3, 4), будет увеличиваться и сила резания. На участке 4—5 зуб фрезы одновременно выходит из обрабатываемого металла, и сила резания быстро уменьшается до нуля.

Как видно, нагрузка на зуб фрезы в процессе резания резко изменяется. Чем большее число зубьев будет участвовать в работе



одновременно, тем более равномерным будет фрезерование. На рисунке 5 показана схема работы цилиндрической фрезы с винтовыми зубьями. Зуб такой фрезы врезается в

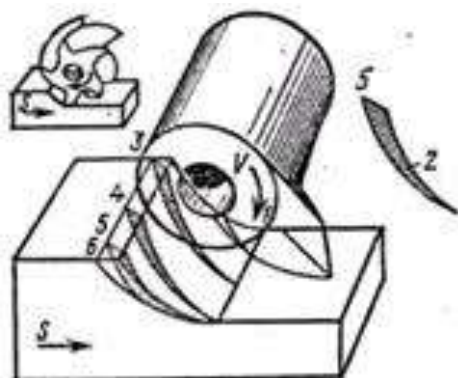


Рисунок 5 – Схема работы фрезы с винтовым зубом.

Схема работы фрезы с винтовым зубом обрабатываемую деталь не сразу по всей длине, а постепенно. На участке 1—3 площадь сечения срезаемого слоя (заштрихована) увеличивается, а значит, увеличивается и сила резания. На участке 3—4 площадь сечения срезаемого слоя и силы резания оказываются постоянными. При дальнейшем движении зуба (участок 4—6) площадь сечения срезаемого слоя и сила резания постепенно уменьшаются. Таким образом, изменение силы резания при работе винтового зуба происходит более плавно, а на некоторых участках сила резания постоянна.

Для обеспечения равномерности фрезерования в работе одновременно должно участвовать не меньше двух зубьев фрезы. Каждый следующий зуб должен вступать в работу в тот момент, когда предыдущий начинает выходить из металла. Для выполнения этого условия нужно, чтобы в тот момент, когда один из двух зубьев попал в положение 6, второй зуб был в положении 1. Это возможно, если расстояние между двумя соседними зубьями фрезы, измеренное вдоль её оси (осевой шаг), должно быть равной ширине фрезерования  $B$  (см. рисунок 2). Если в работе одновременно участвует более двух зубьев, то осевой шаг должен укладываться по ширине фрезерования целое число раз. Необходимым условием равномерного фрезерования

является равенство или кратность (в целых числах) ширины фрезерования  $B$  осевому шагу фрезы.

При торцовом фрезеровании всегда имеет место неравномерность фрезерования. Чем больше число одновременно работающих зубьев торцовой фрезы и чем больше отношение ширины фрезерования к диаметру фрезы, тем больше будет равномерность фрезерования.

### **1.2 Устройство фрез и их назначение**

Фрезы относятся к режущему инструменту. Основной функцией фрезы является проведение таких работ как обработка плоскостей, фасонных поверхностей, уступов, пазов, отрезки, прорезки, нарезания зубьев и резьбы.

Процесс резания происходит за счет вращения многолезвийного тела фрезы с зубьями, предназначенными для проведения фрезерования. В процессе фрезерования в контакте с обрабатываемой поверхностью находится, как правило, несколько зубьев, которые снимают стружку переменной толщины.

Материалом, из которого изготавливается режущая часть фрезы, служат твёрдые сплавы, быстрорежущая сталь, минералокерамика, массив кардной проволоки либо алмаз.

Зависимо от типа зубьев и конструкции фрезы бывают цельные, сварные и сборные. Цельные фрезы изготовлены полностью из одного материала. Основными элементами цельных фрез являются рабочая часть и корпус в виде хвостовика (характерно для концевых фрез) или в виде дискового или втулочного тела (характерно для насадных фрез). Хвостовик и режущая часть сварной фрезы изготовлены из различных материалов, но сваренные вместе. Сборные фрезы так же изготавливают из различных материалов, но соединяют их не свариванием, а обычными крепёжными элементами, такими как винты, болты, гайки или клинья. Основными составляющими элементами сборных фрез выступают корпус, режущие и указанные выше крепёжные элементы. Режущие элементы представлены

перетачиваемыми ножами и СМП. Как правило, ножи бывают напаянными с твердым сплавом или цельными из быстрорежущей стали.

Выделяют несколько основных видов фрез, а именно: концевые, червячные, дисковые, торцевые, цилиндрические, твердосплавные, отрезные, шпоночные. Фрезы способны выполнять большой объем разнообразных работ. Поэтому для эффективного выполнения обработки каждому отдельному этапу работ соответствует определенный вид фрез.

**Концевые фрезы** выполняют обработку уступов, плоскостей и пазов. По типу крепления фрезы в шпинделе станка концевые фрезы бывают как с цилиндрическим, так и с коническим хвостовиком. Концевые фрезы изготавливаются с крупными и нормальными зубьями. Фреза с нормальными зубьями используется для чистовой или получистовой обработки пазов, плоскостей или уступов, а с крупными зубьями - при проведении черновой обработки. Для проведения черновой обработки заготовок, которые получены свободной ковкой, литьем и т. д. предназначены обдирочные концевые фрезы с затылованными зубьями. Твердосплавные концевые фрезы бывают монолитными (целиком изготовленная из твердого сплава фреза), оснащенными коронками твердых сплавов и винтовыми пластинками.

**Фрезы червячные** это многолезвийный инструмент реечного типа, который работает по методу обката. Они представляют собой инструмент, изготовленный на базе стандартного червяка с прорезанными стружечными канавками. Червячные фрезы работают за счет точечного быстрого касания фрезы с обрабатываемой поверхностью детали. Профиль зубчатого колеса червячной фрезы имеет вид множества эвольвент, которые равномерно распределены по окружности. По направлению витков их разделяют на правые и левые. Правые используют для нарезания правозаходных и прямозубых колес, левые – для нарезания левозаходных косозубых колес. Кроме того, червячные фрезы по числу заходов червяка бывают однозаходные и многозаходные. По конструкции червячная фреза может

быть цельной или сборной. Существует так же разделение по технологии изготовления на фрезы с нешлифованными поверхностями зубьев и сошлифованными поверхностями зубьев.

**Дисковые фрезы** используют при обработке узких поверхностей, для подрезки уступов отрезки заготовок, для прорезки пазов и прочее. Зубья дисковых фрез снабжены на одном или обоих торцах вспомогательными режущими кромками, диаметр которых значительно больше длины самой фрезы. Этот вид фрез предназначен для работы в тяжелых условиях несвободного резания, которое зачастую сопровождается вибрацией. Такая вибрация происходит из-за низкой жесткости корпуса фрезы и сложных условий вывода стружки из области резания. Основные виды дисковых фрез: фрезы двухстороннего и трехстороннего резания, пазовые, отрезные (пилы) и прорезные. У двухсторонних режущие кромки зубьев расположены на одной торцовой и цилиндрической поверхностях. В отличие от них, трехсторонние имеют кромки зубьев на обоих торцах. Эти фрезы имеют возможность обработки двух или трех взаимно перпендикулярных поверхностей в уступах или пазах. Для чистовой обработки дисковые фрезы изготавливаются с мелкими зубьями, а для черновой обработки с крупными зубьями. Дисковые фрезы для черновой обработки характеризуются удалением большого объема обрабатываемого металла из выемок и глубоких пазов. Для хорошего выполнения этой работы они снабжены большим объемом стружечных канавок.

**Торцовая фреза** изготавливается, как правило, насадной, а когда её диаметр становится меньше длины, то она переходит к группе концевых фрез. Торцовые фрезы активно используют в ходе обработки плоских и ступенчатых поверхностей. Её конструкция способна поместить большое число зубьев на участке контакта фрезы с заготовкой, что обеспечивает отличную производительность и равномерное фрезерование. Как правило, торцовые фрезы изготавливают с массивным, жестким корпусом и с надежным механическим креплением режущего элемента. В процессе

фрезерования плоскостей есть возможность получения более низкой шероховатости. Это происходит за счет работы большого числа вспомогательных режущих кромок, расположенных на торце фрезы, а так же при наявности зачистных зубьев с  $\phi_1=0$ . Благодаря перечисленным достоинствам торцовые фрезы нашли широкое применение в металлообрабатывающей промышленности.

**Фрезы шпоночные** являются разновидностью концевых фрез. Эти фрезы предназначены для обрабатывания Т-образных пазов. Они оснащены двумя зубьями с глубокими наклонными или прямыми стружечными канавками. Высокая жесткость, которой обладают шпоночные фрезы, обеспечивается большим (до  $0,35d$ ) диаметром сердцевины. Шпоночные фрезы с напайными твердосплавными пластинами работают таким образом, что одна из таких пластин доходит до центра, в то время как другая делается короче и на некотором расстоянии отстоит от центра. Именно благодаря этому существенно улучшается процесс резания и упрощается технология изготовления фрезы.

**Цилиндрическая фреза** отличается расположением главных режущих кромок непосредственно на цилиндре. Ось данного цилиндра совпадает с осью, по которой происходит вращение инструмента. Цилиндрическая фреза не имеет режущих вспомогательных кромок, она работает в условиях свободного резания. Этот тип относится к насадным фрезам, поэтому он оснащен отверстием и шпоночными пазами, которыми он крепится на оправках. Что бы понизить колебания сил резания и вибрации зубьев, цилиндрические фрезы зачастую изготавливаются винтовыми. Это улучшает условия вывода стружки из зоны резания.

**Отрезные фрезы** предназначены для отрезки заготовок на фрезерных станках, для разрезания целого на части и отрезания от целого какой-либо части. Отрезные фрезы оснащены режущими кромками, которые расположены по периферии, но на торцах режущие кромки отсутствуют. Отрезные фрезы бывают трех типов: с мелким зубом, со средним

(нормальным) зубом, с крупным зубом. Практически все отрезные фрезы шириной от 1 мм и больше изготавливаются по классу точности «В». Отрезные фрезы со средним и мелким зубом предназначены для обработки чугуна и стали, фрезы с крупным зубом обрабатывают алюминиевые, магниевые и прочие легкие сплавы.

Твердосплавные фрезы (концевые твердосплавные) в отличие от обычных концевых предназначены для обработки плоскостей и пазов на изделиях из труднообрабатываемых материалов. Существует два типа таких фрез: со стальным цилиндрическим хвостовиком и цельные. Так же концевые твердосплавные фрезы делятся на фрезы повышенной точности и нормальной, все зависит от того, в каких условиях они применяются. Биение, торцевое и радиальное для твердосплавных фрез составляет 0,02 мм.

### **1.3 Виды фрезерных станков**

Фрезерные станки — группа металлорежущих станков классифицирующихся по виду обработки. Фрезерные станки предназначены для обработки с помощью фрезы плоских и фасонных поверхностей, тел вращения, зубчатых колёс и т. п. металлических и других заготовок. При этом фреза, закрепленная в шпинделе фрезерного станка, совершает вращательное (главное) движение, а заготовка, закреплённая на столе, совершает движение подачи прямолинейное или криволинейное (иногда осуществляется одновременно вращающимся инструментом). Управление может быть ручным, автоматизированным или осуществляться с помощью системы ЧПУ.

Во фрезерных станках главным движением является вращение фрезы, а движение подачи — относительное перемещение заготовки и фрезы.

Вспомогательные движения необходимы в станке для подготовки процесса резания. К вспомогательным движениям относятся движения, связанные с настройкой и наладкой станка, его управлением, закреплением и освобождением детали и инструмента, подводом инструмента к обрабатываемым поверхностям и его отводом; движения приборов для

автоматического контроля размеров и т. д. Вспомогательные движения можно выполнять на станках как автоматически, так и вручную. На станках-автоматах все вспомогательные движения в определенной последовательности выполняются автоматически.

**Фрезерные станки бывают различных типов:**

- Универсальные — с поворотным столом,
- горизонтально-фрезерные консольные станки (с горизонтальным шпинделем и консолью),
- широкоуниверсальные — с дополнительными фрезерными головками,
- широкоуниверсальные инструментальные станки — с вертикальной рабочей плоскостью основного стола и поперечным движением шпиндельных узлов,
- вертикально-фрезерные станки (с вертикальным шпинделем); в том числе консольные,
- бесконсольные (называемые также с крестовым столом),
- с передвижным порталом,
- копировально-фрезерные станки,
- фрезерные станки непрерывного действия, в том числе карусельно-фрезерные,
- барабанно-фрезерные.

**Универсально-фрезерный станок:**

Имеет горизонтально расположенный шпиндель и предназначен для обработки фрезерованием разнообразных поверхностей на небольших и не тяжелых деталях в условиях единичного и серийного производства. Обработку ведут цилиндрическими, дисковыми, угловыми, концевыми, фасонными, торцовыми фрезами. На этом станке можно обрабатывать вертикальные и горизонтальные фасонные и винтовые поверхности, пазы и углы. Фрезерование деталей, требующих периодического деления или

винтового движения, выполняют с использованием специальных делительных приспособлений.

На станине смонтированы все основные узлы станка. Внутри станины размещены шпиндельный узел и коробка скоростей. Для поддержания оправки с фрезой служит хобот с серьгами (подвесками). По вертикальным направляющим станины перемещается консоль, несущая коробку подач. По направляющим консоли в поперечном направлении движутся салазки с поворотным устройством, которое несет продольный стол и позволяет поворачивать стол вокруг вертикальной оси на  $45^\circ$  в обе стороны, благодаря чему стол может перемещаться в горизонтальной плоскости под разными углами к оси шпинделя. Крутящий момент от двигателя посредством коробки передач передаётся на шпиндель - полый вал в верхней части станины. В передний торец шпинделя вставляется оправка и закрепляется штревелем - стержнем, закреплённым в шпинделе. Оправка обычно стержень имеющий коническое посадочное место-конус Морзе, воспринимающий вращение от шпинделя; на оправку одеваются фреза и фиксирующие её кольца, зажимаются гайкой. Жёсткость оправки поддерживается подвеской.

### **Горизонтально-фрезерный станок:**

Отличается от универсально-фрезерного станка отсутствием поворотного устройства, то есть стол станка может перемещаться только перпендикулярно или вместе с салазками параллельно оси шпинделя.

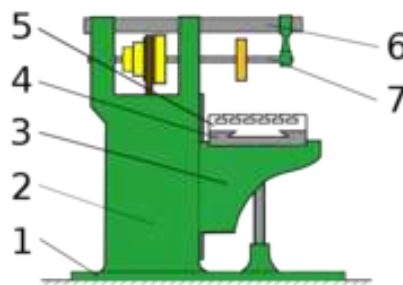


Рисунок 6 – Горизонтально-фрезерный станок (1 — фундаментная плита, 2 — станина, 3 — консоль, 4 — салазки, 5 — стол, 6 — хобот, 7 — оправка со фрезой)



### **Широкоуниверсальный фрезерный станок:**

В отличие от горизонтально-фрезерного станка имеет ещё одну шпиндельную головку, смонтированную на выдвижном хоботе, которую можно поворачивать под любым углом в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Возможна отдельная и одновременная работа обоими шпинделями. Для большей универсальности станка на поворотной головке монтируют накладную фрезерную головку, которая позволяет обработать на станке детали сложной формы не только фрезерованием, но и сверлением, зенкерованием, растачиванием и т. д.

В некоторых станках этого типа отсутствует консоль, а вместо неё по вертикальным направляющим станины, перемещается каретка. Каретка имеет горизонтальные направляющие для салазок с вертикальной рабочей поверхностью и Т-образными пазами, на которых крепят стол, делительные и другие приспособления. Широкая универсальность станка позволяет использовать его в экспериментальных и инструментальных цехах для производства кондукторов, зажимных приспособлений всех типов, инструментов, штампов, пресс-форм и других деталей.

### **Вертикальный консольно-фрезерный станок:**

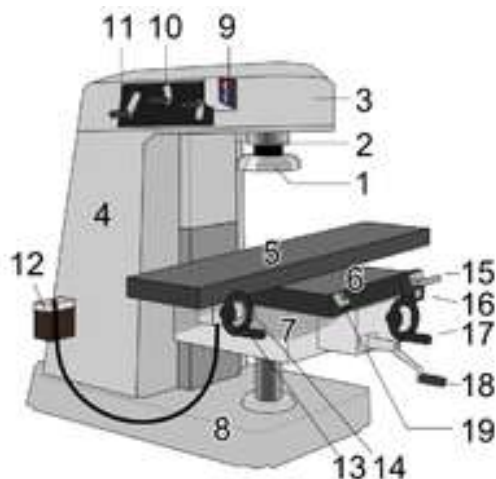


Рисунок 7 – Вертикально-фрезерный станок (1 — фреза, 2 — шпиндель, 3 — хобот, 4 — станина, 5 — стол, 6 — салазки, 7 — консоль, 8 — фундаментная плита)

В отличие от горизонтально-фрезерного имеет вертикально расположенный шпиндель, который в некоторых моделях станков допускает смещение вдоль своей оси и поворот вокруг горизонтальной оси, расширяя тем самым технологические возможности станка. В отличие от горизонтально-фрезерных станков оправка для вертикальных станков представляет собой фланец с конус инструментальный конусом Морзе с одной стороны и коническим отверстием с другой (тоже конус Морзе), куда и вставляется концевая фреза. Если требуется установить дисковую фрезу применяется оправка как на горизонтально-фрезерном станке, но много короче; так же и на горизонтальных станках возможно применяются оправки вертикальных станков для крепления концевых фрез. Вертикальное движение подачи, как правило, возможно осуществлять и инструментом.

#### **Вертикально- и горизонтально-фрезерные бесконсольные станки:**

Предназначены для обработки вертикальных, горизонтальных, наклонных поверхностей, пазов в крупногабаритных деталях. В отличие от консольно-фрезерных станков, в этих станках отсутствует консоль, а салазки и стол перемещаются по направляющим станины, установленной на фундамент. Такая конструкция станка обеспечивает более высокую его жесткость и точность обработки по сравнению со станками консольного типа, позволяет обрабатывать детали большой массы и размеров. Шпиндельная головка, являющаяся и коробкой скоростей, имеет установочное перемещение по вертикальным направляющим стойки. Кроме того, шпиндель вместе с гильзой можно сдвигать в осевом направлении при точной установке фрезы на требуемый размер.

#### **Продольно-фрезерные станки:**

Используют для обработки крупногабаритных деталей, главным образом, торцовым; а также цилиндрическими, концевыми, дисковыми и фасонными фрезами. Станки делятся на одностоечные и двухстоечные. В четырёхшпиндельном двухстоечном продольно-фрезерном станке станина имеет стол и портал, состоящий из двух стоек и балки. По направляющим

стоек перемещается траверса и две горизонтальные поворотные фрезерные головки. Две другие фрезерные головки перемещаются по направляющим траверсы. Обработку деталей можно производить при движущемся столе и неподвижных фрезерных головках, при неподвижном столе и подаче головок или при одновременно движущихся столе и фрезерных головках.

## 2. Энергосбережение

Энергосбережение в настоящее время актуально в связи с истощением природных энергетических ресурсов и с проблемами экологии. В электроприводе энергосбережение возможно путем оптимизации параметров исполнительных двигателей, улучшения режимов работы усилительно-преобразовательных устройств и оптимизации законов управления, применением оптимального управления движением электропривода.

Реализация энергосберегающих мероприятий в электроприводе дает максимальный экономический эффект. Так как в системах электроснабжения основным потребителем электрической энергии является двигательный электропривод, который потребляет порядка 80 % от всей отпускаемой электроэнергии.

В большинстве технологических систем энергетики, промышленности, сферы коммунального хозяйства и других отраслях установлены электродвигатели в расчёте на максимальную производительность оборудования. В результате электродвигатели, работающие с постоянной скоростью вращения, потребляют значительно больше электроэнергии (до 50 %), чем это требуется для обеспечения оптимального технологического процесса.

В себестоимости конечной продукции промышленных предприятий высока доля затрат на тепловую и электрическую энергию (в полтора – два раза выше, чем в промышленно развитых странах), что негативно сказывается на конкурентоспособности товаров и оборудования, выпущенного отечественными производителями. Эффективные системы энергосбережения позволяют значительно снизить себестоимость продукции и, как следствие, повысить ее конкурентоспособность на рынках. Энергосбережение является одним из факторов роста экономической эффективности работы предприятия. Тем сбережения электроэнергии наиболее актуальна, когда речь идет о предприятиях с технологическими

установками большой мощности, в частности, такой установкой может являться металлообрабатывающий станок, потребление энергии которого может составлять десятки МВт. В настоящее время благодаря современным тенденциям развития электроприводов разрабатывается и внедряется в промышленность различное оборудование, которое способствует сбережению электроэнергии. Одной из наиболее эффективных мер энергосбережения в таких случаях для управления электроприводами переменного тока является применение частотных преобразователей.

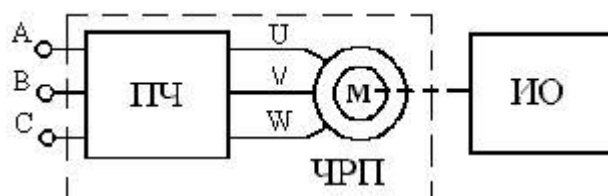
Возможность управления частотой вращения короткозамкнутых асинхронных электродвигателей была доказана сразу после их изобретения. Реализовать эту возможность удалось лишь с появлением силовых полупроводниковых приборов — сначала тиристоров, а позднее транзисторов IGBT. В настоящее время во всем мире широко реализуется частотный способ управления асинхронной машиной, который сегодня рассматривается не только с точки зрения экономии потребляемой энергии, но и с точки зрения совершенствования управления технологическим процессом.

В промышленно развитых странах техника применения частотно-регулируемых приводов используется более 30 лет. В течение этого времени закладывались научные и методические основы, разрабатывались и совершенствовались технические средства управления электроприводом, совершенствовались технологические процессы и оборудование, корректировались учебные курсы для подготовки специалистов. Накоплен достаточно большой опыт в принятии технических решений при создании систем, использующих этот тип приводов, ряд решений стандартизирован. Однако, к сожалению, это относится к положению дел за рубежом. В нашей стране сложилась несколько иная ситуация. Частотно-регулируемые приводы, отвечающие требованиям надежности и электромагнитной совместимости с электрическими сетями, появились на российском рынке сравнительно поздно, да и цена их в условиях рыночной экономики

достаточно высока. Имеющийся не всегда положительный опыт применения тиристорных приводов predetermined осторожное отношение к использованию современных преобразователей частоты, а относительно ожидаемого экономического эффекта от их внедрения многие эксплуатационники выражают недоверие. Действительно, учитывая сравнительно высокую стоимость полупроводниковых преобразователей, применяемых для регулирования частоты вращения асинхронных приводов, на сегодняшний день наиболее важным является вопрос возврата средств, вложенных в их внедрение.

Существует несколько направлений снижения потребления электроэнергии регулируемыми асинхронными электродвигателями. Первое направление связано со снижением потерь в электроприводе при выполнении им заданных технологических операций по заданным тахограммам и с определенным режимом нагружения. Второе направление связано с изменением технологического процесса на основе перехода к более совершенным способам регулирования электропривода и параметров этого технологического процесса. Третье направление обеспечивает реализацию энергосберегающих технологий, в рамках которого предусмотрено совершенствование системы электропривода в сочетании с автоматизацией технологического процесса.

Современный частотно регулируемый электропривод состоит из асинхронного или синхронного электрического двигателя и преобразователя частоты. Схематически, электропривод изображен на рисунке 8:



ПЧ - преобразователь частоты

ИО - исполнительный орган

ЧРП - частотно-регулирующий электропривод

Рисунок 8 – Регулируемый электропривод

В настоящее время, подавляющее большинство управляемых электроприводов строятся на базе асинхронных электродвигателей и преобразователей частоты, где преобразователь частоты выполнен по схеме: неуправляемый выпрямитель — автономный управляемый инвертор напряжения; то есть, сначала электрическая энергия сети преобразуется в постоянный ток, а потом инвертор создает трехфазный электрический ток переменной частоты. Различают два основных принципа управления преобразователями частоты.

Преобразователь частоты управляет электрическим двигателем и представляет собой электронное статическое устройство. На выходе преобразователя формируется электрическое напряжение с переменными амплитудой и частотой. Название «частотно регулируемый электропривод» обусловлено тем, что регулирование скорости вращения двигателя осуществляется изменением частоты напряжения питания, подаваемого на двигатель от преобразователя частоты.

Для решения задач регулирования скорости и момента в современном электроприводе применяют два основных метода частотного управления:

- скалярное управление;
- векторное управление.

Асинхронный электропривод со скалярным управлением является на сегодняшний день наиболее распространенным. Он применяется в составе приводов насосов, вентиляторов, компрессоров и других механизмов, для которых важно поддерживать либо скорость вращения вала двигателя (при этом используется датчик скорости), либо технологический параметр (например, давление в трубопроводе, при этом используется соответствующий датчик).

Основной принцип скалярного управления - изменение частоты и амплитуды питающего напряжения по закону  $U/f^n = \text{const}$ , где  $n \geq 1$ . Конкретный вид зависимости определяется требованиями, предъявляемыми к приводу нагрузкой. Обычно за независимое воздействие принимается

частота, а значение напряжения при данной частоте определяет вид механической характеристики, значения пускового и критического моментов. Скалярное управление обеспечивает постоянство перегрузочной способности привода независимо от частоты напряжения, однако имеет место снижение развиваемого двигателем момента при низких частотах (при  $f < 0,1 f_{ном}$ ). Максимальный диапазон регулирования скорости вращения ротора при неизменном моменте сопротивления для приводов со скалярным управлением достигает 1:10.

Метод скалярного управления относительно прост в реализации, но обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, при отсутствии датчика скорости на валу двигателя невозможно регулировать скорость вращения вала, так как она зависит от нагрузки. Наличие датчика скорости решает эту проблему, однако остается второй существенный недостаток — нельзя регулировать момент на валу двигателя. С одной стороны, и эту проблему можно решить установкой датчика момента, однако такие датчики имеют очень высокую стоимость, зачастую превышающую стоимость всего привода. Но даже при наличии датчика управление моментом получается очень инерционным. Более того, при скалярном управлении нельзя регулировать одновременно и момент и скорость, поэтому приходится выбирать ту величину, которая является наиболее важной для данного технологического процесса.

Для устранения недостатков, присущих скалярному управлению, фирмой SIEMENS еще в 1971 году был предложен метод векторного управления. Первые варианты приводов с векторным управлением требовали использования двигателей со встроенными датчиками потока. Это существенно ограничивало применение таких приводов. В современных электроприводах в систему управления закладывается математическая модель двигателя, которая позволяет рассчитывать момент на валу и скорость вращения вала. При этом необходимыми являются только датчики тока фаз статора двигателя. Благодаря специальной структуре системы



управления обеспечивается независимое и практически безынерционное регулирование двух основных параметров — момента на валу и скорости вращения.

На сегодняшний день сформировалось два основных класса систем векторного управления — бездатчиковые системы (без датчика скорости на валу двигателя) и системы с обратной связью по скорости. Применение того или иного метода векторного управления определяется областью применения электропривода. При небольших диапазонах изменения скорости (не более 1:100) и требованиях к точности ее поддержания не более  $\pm 0,5\%$  применяют бездатчиковое векторное управление. Если же скорость вращения вала изменяется в широких пределах (до 1:10000 и более), имеются требования к высокой точности поддержания скорости вращения (до  $\pm 0,02\%$  при частотах вращения менее 1 Гц) или есть необходимость позиционирования вала, а также при необходимости регулирования момента на валу двигателя на очень низких частотах вращения, применяют методы векторного управления с обратной связью по скорости.

При использовании векторного управления достигаются следующие преимущества:

- высокая точность регулирования скорости даже при отсутствии датчика скорости;
- плавное, без рывков, вращение двигателя в области малых частот;
- возможность обеспечения номинального момента на валу при нулевой скорости (при наличии датчика скорости);
- быстрая реакция на изменение нагрузки: при резких скачках нагрузки практически не происходит скачков скорости;
- обеспечение такого режима работы двигателя, при котором снижаются потери на нагрев и намагничивание, а следовательно, повышается КПД двигателя.

Наряду с очевидными преимуществами, методу векторного управления присущи и некоторые недостатки, такие, как большая

вычислительная сложность и необходимость знания параметров двигателя. Кроме того, при векторном управлении колебания скорости на постоянной нагрузке больше, чем при скалярном управлении. Следует отметить, что существуют области, в которых возможно использование только скалярного управления, например в групповом приводе, где от одного преобразователя питаются несколько двигателей.

Возможности, открывающиеся при использовании преобразователя частоты в качестве регулирующего устройства для электропривода, выполненного на асинхронном электродвигателе, безграничны. Следует отметить, что использование преобразователей частоты в качестве регулируемого электропривода, создает свои преимущества за счет автоматического изменения параметров системы, в зависимости от условия работы часто меняются и пределы изменений достаточно широки. Система регулируемого электропривода управляется микроконтроллером с достаточно солидным программным обеспечением, позволяющего задавать параметры регулирования в зависимости от необходимых условий работы механизма. В этой связи расширяется область применения регулируемого электропривода не только в сферах высоких технологий, но и там, где до настоящего времени традиционно использовался простой нерегулируемый электропривод с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. При этом важным становится повышение энергетической эффективности существующих электроприводов, позволяющих решать технологические задачи при минимальных затратах.

Наиболее простой вариант использования ПЧ, когда одним преобразователем управляется один электродвигатель, например электродвигатель лифта, вентилятора, станка, дымососа котла и т.д.

В данном случае преобразователь подключается непосредственно к одному электродвигателю и руководит его работой в зависимости от заданных параметров и получаемой от датчиков информации. При этом эффект от работы электропривода определяется снижением расхода

электроэнергии и повышением качества регулируемого технологического параметра, который чаще всего и определяет качество продукции. При таком варианте использования ПЧ удельная стоимость преобразователя на 1 кВт мощности максимальна и решение об установке ПЧ, как правило, принимается по необходимости регулирования технологических параметров, хотя расчеты показывают, что составляющая экономии электроэнергии часто позволяет окупить затраты на установку ПЧ менее чем за один год и далее приносить чистую экономию.

Если на объекте расположено несколько электроприводов, работающих во взаимосвязанном режиме, то целесообразно рассмотреть установку преобразователя в комплексе с системой управления электроприводов – так называемую станцию управления электроприводами.

Под энергосбережением, помимо сбережения количества электроэнергии, также подразумевается сбережение качества электроэнергии. Применение преобразователей частоты влечет за собой создание различных помех, которые неблагоприятно влияют на работу электроприводов, а также создают искажения в питающей сети. В таких случаях предполагается применение различных фильтров. В электроприводах с преобразователями частоты используется два фильтра.

### 3. Выбор электрооборудования

#### 3.1 Выбор электродвигателя

Определение мощности электродвигателя главного движения определяется по формуле :

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{эф}}}{\eta}$$

где  $P_{\text{эф}}$  - полезная мощность резания [12, 52 с.]

$$P_{\text{эф}} = \frac{P_z}{1,25 \cdot \eta_{\text{пр}}}$$

где  $\eta$  - КПД главного движения (для станков с вращательным главным движением  $\eta = 0,7 - 0,85$ )

$P_z$  - сила резания ( 13000 Н )

$$P_{\text{эф}} = \frac{13000}{1,25 \cdot 0,85} = 12240, \text{ Вт}$$

$$P_{\text{дв}} = \frac{12240}{0,85} = 14400, \text{ Вт}$$

Для привода главного движения обрабатывающего центра выбираем электродвигатель АИР160S2, паспортные данные которого приведены в таблице 1.



Рисунок 9 – Электродвигатель АИР160S2

Технические данные выбранного электродвигателя сведены в таблице 1, параметры схемы замещения – в таблице 2.

Таблица 1 – Технические данные электродвигателя

Марк а	$n_0, \left[ \frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$	$I, \text{ А}$	$U_{\text{ИН}}, \text{ В}$	$P_{\text{дв.н.}}, \text{ кВт}$	При номинальной нагрузки			$J_{\text{дв.}}, \left[ \text{кг} \cdot \text{м}^2 \right]$
					$s_{\text{н}}, \%$	$\cos\varphi_{\text{н}}$	$\eta_{\text{н}}, \%$	
АИР 160 S2	3000	30	380	15	5	0,86	88	0,05

Продолжение таблицы 1

$m_{\text{П}} = \frac{M_{\text{ПУСК}}}{M_{\text{Н}}}$	$m_{\text{К}} = \frac{M_{\text{МАКС}}}{M_{\text{Н}}}$	$m_{\text{М}} = \frac{M_{\text{МИН}}}{M_{\text{Н}}}$	$k_{\text{ИДВ}} = \frac{I_{\text{ПУСК}}}{I_{\text{Н}}}$	Степень защиты
2.2	2.3	1.3	7.5	IP55

Таблица 2 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1', \text{ о.е.}$	$X_1', \text{ о.е.}$	$X_{\mu}', \text{ о.е.}$	$R_2'', \text{ о.е.}$	$X_2'', \text{ о.е.}$
0,052	0,092	4,0	0,022	0,12

### 3.2 Выбор преобразователя частоты

К числу более популярных и универсальных преобразователей частоты можно отнести Micromaster фирмы Siemens, серия которых уже не первый год находится на рынке и остается наиболее запрашиваемым выбором на рынке.

Преобразователь частоты, удовлетворяющий требованиям проекта, является преобразователь фирмы Siemens Micromaster 440.

Данные продукты идеально подходят для автоматизации процесса производства каких-либо изделий в различных отраслях промышленности. При этом осуществляется компьютерное управление согласно современным тенденциям и технологиям. Качественные преобразователи частоты Micromaster, применяются к различным типам оборудования.

Micromaster 440 - Преобразователь частоты с режимом векторного управления с обратной связью. Используется в приводах, где есть необходимость использовать большой диапазон регулирования.

Критерии для выбора ПЧ следующие:

- ПЧ должен быть рассчитан на мощность электродвигателя;
- Ток должен быть не меньше допустимого

На основании приведенных выше требований, выбираем преобразователи частоты Siemens серии Micromaster 440 6SE6440-2UE31-5DA1. Характеристики ПЧ приведены в таблице 3



Рисунок 10 – Внешний вид преобразователя частоты Siemens Micromaster 440

Особенности Siemens Micromaster 440:

- Простой ввод в эксплуатацию
- Особо гибкая конфигурация благодаря модульной конструкции
- Шесть встроенных, свободно параметрируемых цифровых входа
- Два аналоговых входа (0...10 В, 0...20 мА), может по выбору быть использован в качестве 7 и 8-го цифрового входа
- Два аналоговых выхода (0... 20 мА)
- Три параметрируемых релейных выхода (30 В DC/5 А, активная

нагрузка, 250 В АС/2 А, индуктивная нагрузка)

- Бесшумная работа двигателя благодаря высокой частоте ШИМ
- Полная защита двигателя и преобразователя

Защита:

- Защита от перенапряжения и пониженного напряжения
- Защита от перегрева преобразователя
- Защита двигателя с помощью подключения РТС терморезистора

или КТУ датчика

- Защитное заземление
- Защита от короткого замыкания
- Тепловая защита по  $I^2t$
- Защита от блокировки двигателя
- Защита от опрокидывания
- Защита от изменения параметров

Достоинства:

- Новейшая технология IGBT
- Цифровое микропроцессорное управление
- Высококачественное векторное управление
- Прямое управление потоком двигателя (FCC) для улучшения

динамических характеристик и оптимального управления двигателем

- V/f управление, с параметрируем начальным напряжением
- Управление моментом «подхват на ходу»
- Компенсация скольжения
- Автоматический повторный запуск при пропадании питания или

нарушениях режима

- Свободные функциональные блоки логических и арифметических операций

- Встроенный PID регулятор ( с автоподстройкой)

- Параметрируемое время разгона и торможения в пределах от 0 до 650 с
- Сглаживание кривой пуска
- Быстродействующее токоограничение (FCL) для безаварийной работы
  - Быстродействующие цифровые входы
  - Точный ввод заданного значения благодаря 10-битному аналоговому входу
- Комбинированное торможение для контролируемого останова
- Встроенный тормозной блок (только для преобразователей от 0.12 кВт ... 75 кВт)
  - 4 частоты пропускания против резонанса
  - Демонтируемый Y – конденсатор для использования в сети IT (с изолированной нейтралью) (при работе в сетях с изолированной нейтралью “Y” конденсатор удаляется, и устанавливается выходная дроссель).

Таблица 3 - Технические данные преобразователя частоты

Частота сети	47 Гц ... 63 Гц
Рабочая мощность	15 кВт
Номинальный выходной ток, А	35
Выходная частота	650 Гц (в режиме U/f); 0 Гц ... 200 Гц (в векторном режиме)
Коэффициент мощности	>0,95
КПД преобразователя	96 % ... 97 %
Перегрузочная способность	
- СТ (пост. момент)	1,5 x расчетный вых. ток в теч. 60 сек (каждые 300 сек.)
-VT-(перем. момент)	1,4 x расчетный вых. ток в теч. 3 сек (каждые 300 сек.)
Пусковой ток	Не выше расчетного входного тока



Закон управления	Векторное управление с/без датчика скорости; управление моментом; линейная зависимость U/f; квадратичная U/f зависимость; программируемая зависимость U/f; прямое управление потоком (FCC)
Частота импульсов	8 кГц (Заводская установка); 2 кГц ... 16 кГц (ступенями по 2 кГц)
Число фиксированных частот	15, параметрируемые
Частоты диафрагмирования	4, параметрируемые
Дискретность задания	0,01 Гц цифровое с панели; 0,01 Гц с компьютера; 10 бит аналоговое представление
Цифровые входы	6 параметрируемые, потенциально развязанные; переключаемые PNP/NPN
Аналоговый вход	2 параметрируемых; Вход 1 (AIN1): 0 В ... 10 В, 0 мА ... 20 мА и -10 В ... +10 В Вход 2 (AIN2): 0 В ... 10 В и 0 мА ... 20 мА • могут использоваться как 7 и 8 цифровые входы
Релейный выход	3, параметрируемые, DC 30 В/5 А (омическая нагрузка), AC 250 В/2 А (индуктивная нагрузка)
Аналоговый выход	2, параметрируемые (0/4 мА ... 20 мА)
Последовательный интерфейс	Встроенный RS-485, опционально RS-232
Допустимая длина кабеля до двигателя без выходного дросселя	50 м (экран. кабель); макс. 100 м (неэкран. кабель)
Электромагнитная	ЭМС-фильтр по EN 55 011, в качестве

совместимость	опции класса А или В. Преобразователь с встроенным фильтром кл. А (типоразмеры А,В,С,Д,Е,Ф)
Торможение	Торможение постоянным током, комбинированное торможение, встроенный тормозной блок
Степень защиты	IP20
Рабочая температура	СТ: -10 °С ... +50 °С (+14 °F ... +122 °F) VT: -10 °С ... +40 °С (+14 °F ... +104 °F)
Температура хранения	-40 °С ... +70 °С (-40 °F ... +158 °F)
Относительная влажность	95 % (Без образования конденсата)
Функции защиты по:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Пониженному напряжению;</li> <li>• Перенапряжению;</li> <li>• Перегрузке;</li> <li>• Включению на землю;</li> <li>• Короткому замыканию;</li> <li>• Блокировке двигателя;</li> <li>• Перегреву двигателя;</li> <li>• Перегреву преобразователя;</li> <li>• Защита от изменения параметров</li> </ul>

### 3.3 Подключение преобразователя частоты.

Преобразователи частоты Siemens серии Micromaster 440 относятся к классу высокотехнологичных устройств, которые кроме повышенной точности, характеризуются широким диапазоном регулирования и предусматривают возможность развивать высокий момент на валу электродвигателя [21, 55 с.].

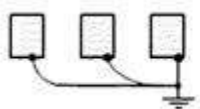
Длительная и надёжная работа частотного преобразователя зависит, в основном, именно от правильного монтажа.

Подключение оборудования к частотным преобразователям серии Micromaster 440 мощностью 15 / 18.5 кВт и ниже (соответственно) необходимо выполнять в соответствии с схемой подключения рис.12

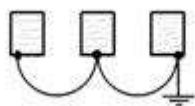
Заземление:

При выполнении «заземления» одного или нескольких частотных преобразователей, настоятельно рекомендуется следовать нижеприведенным указаниям:

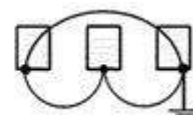
- Сопротивление "Земли" должно быть 10 Ом или менее.
- Запрещается заземлять частотный преобразователь с использованием общей заземляющей шины со сварочным оборудованием, электродвигателями или другим мощным электрооборудованием.
- При использовании нескольких частотных преобразователей нужно заземлять их, согласно нижеприведенному рисунку:



а) допустимо



б) недопустимо



в) недопустимо

Рисунок 11 – Заземление преобразователя частоты.

Использование автомата силовой защиты:

Подключение источника силового питания к клеммам питания преобразователя всегда осуществляется через автомат силовой защиты (рекомендуется с электромагнитным расцепителем) [21, 12 с.]:

- Ток срабатывания автомата силовой защиты выбирается в полтора-два раза больше потребляемого частотным преобразователем тока.
- Быстродействие автомата силовой защиты должно выбираться исходя из перегрузочной способности частотного преобразователя.

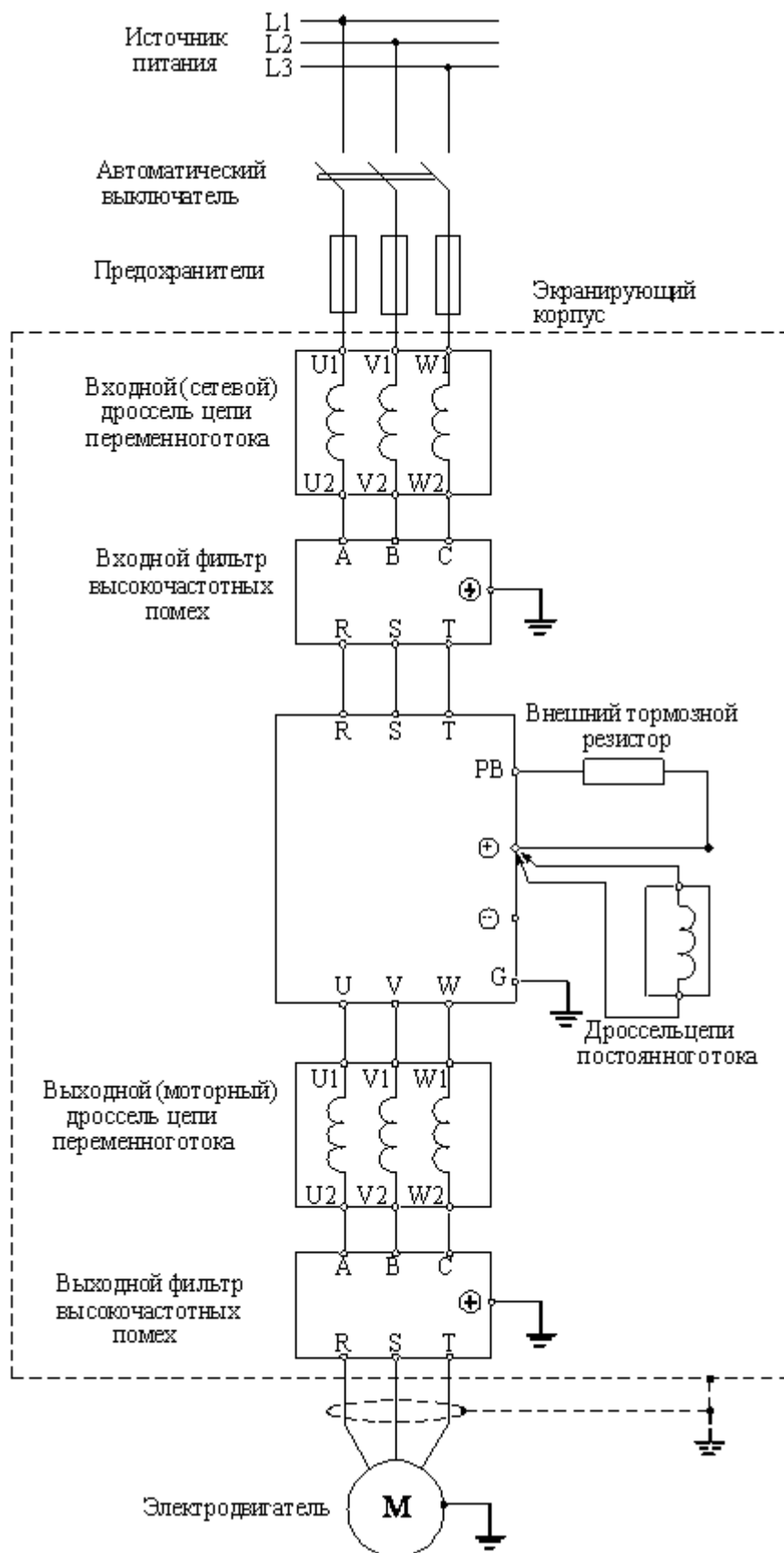


Рисунок 12 – Схема подключения преобразователя частоты.

- Если автомат силовой защиты предназначен для использования с несколькими частотными преобразователями или совместно с другим оборудованием, последовательность подключения должна быть такой, чтобы при появлении сигнала ошибки на выходе частотного преобразователя, напряжение питания отключалось

Установка защиты по шине заземления:

Вследствие присутствия на выходе частотного преобразователя высокочастотных коммутаций (выходная ШИМ), преобразователь генерирует высокочастотные токи утечки. В общем случае, каждый частотный преобразователь генерирует ток утечки величиной примерно 100 мА (при силовом кабеле длиной 1 м) и еще примерно 5 мА, на каждый дополнительный метр длины кабеля. Поэтому, в районе подключения силовых цепей к преобразователю, устанавливайте специальный защитный прерыватель, определяющий ток утечки на частотах, являющихся опасными для персонала, и не реагирующий на высокочастотные токи утечки.

В качестве специального защитного прерывателя используется прерыватель с чувствительностью, по меньшей мере, 10 мА на каждый частотный преобразователь.

При использовании защитных прерывателей общего назначения, используется для каждого частотного преобразователя защитные прерыватели чувствительностью 200 мА или более, с быстродействием не менее 0.1 сек.

Использование магнитного контактора:

В случае, когда питание силовой цепи должно отключаться согласно заданной последовательности работы, вместо автомата силовой защиты можно использовать магнитный контактор.

Механизм может быть запущен и остановлен посредством включения и выключения контактора на стороне питания, однако частые переключения магнитного контактора могут привести к отказу частотного преобразователя.

В случае использования тормозного прерывателя и резистора, устанавливается последовательность работы таким образом, чтобы отключение магнитного контактора осуществлялось контактами термореле блока.

Использование сетевого дросселя цепи переменного тока:

Сетевой дроссель цепи переменного тока применяется для подавления гармоник (гармонических составляющих токов и напряжений) со стороны питающей сети, сводит к минимуму дополнительные тепловыделения, возникающие при работе преобразователя, и вероятность возникновения всевозможных сбоев в работе оборудования, вызываемых нестабильностью питающей сети. Рекомендуется устанавливать, если мощность питающей сети в десятки раз превышает мощность частотного преобразователя или при наличии в питающей сети помех от более мощных устройств. Использование сетевого дросселя цепи переменного тока существенно влияет на форму потребляемого преобразователем тока и значительно приближает его к синусоидальной, существенно ослабляет броски напряжения в сети при включении или выключении крупных потребителей, продлевается срок службы конденсаторов промежуточного контура, надежность преобразователя увеличивается в 5 - 7 раз.

При использовании сетевого дросселя цепи переменного тока ограничивается скорость нарастания тока, если преобразователь по каким либо причинам вышел из строя, при этом успевает сработать входной автомат отключения питания, и повреждения оказываются минимальными, и, как следствие, более дешевый ремонт.

Использование входного фильтра высокочастотных помех:

Входной фильтр высокочастотных помех применяется для снижения уровня высокочастотных электромагнитных помех, излучаемых в сеть при работе частотного преобразователя. Рекомендуется использовать, если электропитание преобразователя частоты осуществляется от одного ввода

совместно с другими устройствами, чувствительными к электромагнитным помехам (контроллеры, радиооборудование, компьютеры и т.п.).

Длина кабеля между частотным преобразователем и двигателем:

Длина кабеля между преобразователем и двигателем должна быть минимальной.

При значительной длине кабеля между частотным преобразователем и двигателем увеличение высокочастотных токов утечки вызовет соответствующее увеличение выходного тока, что может повлиять на периферийное оборудование.

Использование моторного дросселя цепи переменного тока:

Моторный дроссель цепи переменного тока применяется для частичного подавления гармоник (гармонических составляющих токов) высших порядков со стороны двигателя (на выходе частотного преобразователя). Рекомендуется использовать для повышения коэффициента эффективности потребления мощности преобразователем на стороне питающей сети, снижения скорости нарастания аварийных токов, компенсации емкостных токов длинных моторных кабелей, снижения выбросов напряжения на обмотках двигателя.

Использование выходного фильтра высокочастотных помех:

Выходной фильтр высокочастотных помех применяется для ослабления уровня ВЧ-электромагнитных помех, генерируемых в выходной цепи работающего преобразователя частоты. Рекомендуется использовать, если в непосредственной близости с преобразователем частоты находятся другие устройства, чувствительные к электромагнитным помехам (контроллеры, радиооборудование, компьютеры и т.п.), а также если длина кабеля, соединяющего выход частотного преобразователя и двигатель, превышает 20 м.

Меры по защите от генерирования гармоник:

Применение дросселей, включаемых в цепи постоянного и переменного тока, позволяет подавить гармоники, что снижает резкие

изменения (скачки) токов. Дроссели цепи постоянного тока подавляют гармоники высшего порядка эффективнее, чем дроссели цепей переменного тока. Совместное применение дросселей цепей и постоянного, и переменного тока является наиболее эффективным с точки зрения подавления гармоник.

Использование тормозного прерывателя и тормозного резистора:

При торможении двигатель отдает энергию назад – в частотный преобразователь (работает в генераторном режиме) вследствие чего напряжение на шине постоянного тока повышается. Частотный преобразователь пытается уменьшить напряжение, увеличивая выходную частоту, тем самым уменьшая скольжение двигателя. Интенсивность торможения в этом случае зависит от потерь мощности в преобразователе и двигателе. Частотный преобразователь можно тормозить с мощностью около 20% от номинальной за счет собственных потерь двигателя и преобразователя. Этого обычно достаточно для небольших неинерционных нагрузок, т.е. там, где кинетическая энергия невелика или время торможения не критично. Если требуется произвести быстрое торможение, необходимо использовать тормозной прерыватель и тормозной резистор.

### **3.4 Выбор входного фильтра**

Входные выпрямители трехфазных преобразователей частоты, применяемые в электроприводах, считаются нелинейными, т.к. ток на выходе является несинусоидальным. Они генерируют преимущественно 5 и 7, 11 и 13 гармоники тока. Гармоники тока обуславливают ряд проблем в питающих сетях, таких как:

- перегрев кабелей, трансформаторов и другого оборудования
- искажение кривой напряжения
- ложное срабатывание входных автоматов
- преждевременный выход из строя двигателей, генераторов, ложные срабатывания и отказы компонентов слаботоочного оборудования. В таком случае возникает потребность использования фильтров. Существующие



методы подавления гармоник (линейные реакторы, многопульсные схемы, резонансные или широкополосные пассивные и активные фильтры) зачастую недостаточно надежны, неэффективны и дорогостоящи. Для нашей системы выберем фильтр фирмы «Веспер».



Рисунок 13 – Внешний вид входного фильтра Веспер 15кВт

Таблица 4 – Технические данные входного фильтра

Мощность ПЧ [кВт]	Ток [А]	Индуктивность [мГн]	Габаритные размеры [мм]						Исп.	Масса [кг]
			L	B	H	d	e	f		
15	30	0,98	145	104	191	120	82	Ø6,5	А	6

Входные фильтры применяются для сглаживания фронта и уменьшения амплитуды выброса всплесков силового переменного питающего напряжения.

Дополнительно они уменьшают амплитуду пульсаций тока, потребляемого частотным преобразователем от сети. При отсутствии всплесков напряжения в питающей сети установка фильтров не требуется.

Входные фильтры устанавливаются при подключении преобразователя малой мощности (менее 15 кВт) в сеть с большой мощностью (более 600 кВА), или при наличии мощных потребителей в этой сети.

Выбор входного фильтра определяется мощностью преобразователя частоты.

### 3.5 Выбор выходного фильтра

Выходные фильтры предназначены для сглаживания фронтов и уменьшения выбросов напряжения на зажимах электродвигателя при работе от частотного преобразователя. Дополнительно они защищают силовые выходные цепи преобразователя от перегрузки в случае возникновения токов короткого замыкания в электродвигателе или кабеле.

Фильтры устанавливаются между частотным преобразователем и электродвигателем. Установка рекомендуется при больших расстояниях между частотным преобразователем и электродвигателем (порядка сотен метров).

Выбор выходного фильтра определяется мощностью преобразователя частоты.



Рисунок 14 – Внешний вид выходного фильтра серии OCL 15кВт

Таблица 5 – Технические данные выходного фильтра

Мощность (кВт)	15
Модель	OCL0007EISCE1M9
Номинальное напряжение:	380 В/50 Гц или 660 В/50 Гц
Номинальный рабочий ток:	от 5 А до 1600 А при 40 °С
Индуктивность (мГн)	0.35
Падение напряжения	2%

Ном. ток (А)	40
Вес (кг)	11.5
Класс изоляции:	F
Обмотка сердечника:	~ 3000 В/50 Гц/5 мА/10 с

### 3.6 Выбор автоматического выключателя

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

Выбор автоматического выключателя для двигателя (АИР 160 S2,  $I_H = 30$  А)

1. Определяем пусковой ток

$$I_{ПВСК} = 5 \cdot I_H = 5 \cdot 30 = 150 \text{ А}$$

2. Определяем кратковременный ток:

$$I_{КР} = 1,25 \cdot I_{ПВСК} = 1,25 \cdot 150 = 187,5 \text{ А}$$

3. Ток электромагнитного расцепителя должен быть больше кратковременного тока:

$$I_{ЭМ} \geq I_{КР}.$$

По время-токовой характеристике отключения выбираем уставку электромагнитного расцепителя равную 3 т.е.

$$I_{ЭМ} = 3 \cdot I_{НАВ} = 3 \cdot 200 = 600 \text{ А},$$

где  $I_{НАВ} = 200 \text{ А}$  - номинальный ток автоматического выключателя.

$$600 \text{ А} \geq 187,5 \text{ А}.$$

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

$$I_{Т.Р.} \geq I_H,$$

Для защиты двигателя АИР160S2 выбираем автоматический выключатель IEK ВА88-35 ЗР 200А на номинальный ток 200А



Рисунок 15 – Автоматический выключатель IEK на номинальный ток 200А

### 3.7 Выбор магнитных пускателей

Магнитный пускатель – это коммутационный аппарат, предназначенный для автоматического включения и отключения потребителей электроэнергии таких, как электродвигатель.

Магнитный пускатель позволяет осуществить дистанционное управление, включать и отключать потребителя на расстоянии с пульта управления. Самое распространенное применение магнитного пускателя получили асинхронные двигателя, при помощи его осуществляется пуск, стоп и реверс двигателя.

Как к элементу систем автоматического управления к пускателям предъявляются высокие требования по износостойкости. Пускатели выпускаются в трех классах коммутационной износостойкости (А, Б и В).

Для пуска двигателя главного движения обрабатывающего центра используем пускатель ПМ12. Данные пускатели ПМ12 снабжены более мощной контактной системой с эффективным дугогашением, имеют существенно меньшие тепловые потери на контактных переходах, высокое

быстродействие при отключении, имеется большее количество дополнительных контактов, не требуется заземление основания корпуса.



Рисунок 16 – Магнитный пускатель серии ПМ12

Пускатель серии ПМ12 применяется в схемах управления электроприводами на напряжение до 660 В переменного тока с частотой 50 Гц.

Защита управляемых электродвигателей от перегрузок недопустимой продолжительности и от токов, возникающих при обрыве одной из фаз.

Пускатели этой серии используются в различных системах автоматизации.

Основные технические характеристики магнитного пускателя представлены в таблице 8:

Таблица 6 – Параметры магнитного пускателя

Тип магнитного Пускателя	Ном. ток	Ном. напряжение	Напряжение по изоляции	Мощность управляемого электродвигателя
ПМ12-200100	200 А	380 В	690 В	15-20 кВт

#### 4. Расчет статических характеристик для разомкнутой системы регулируемого электропривода

##### 4.1 Расчет естественных характеристик $\omega = f(I)$ , $\omega = f(M)$ регулируемого электропривода

Ток холостого хода асинхронного двигателя можно найти по следующему выражению:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_* (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}} \sqrt{\frac{22.947^2 - 0.75 \cdot 30.031 (1 - 0.05) / (1 - 0.75 \cdot 0.05)^2}{1 - 0.75 (1 - 0.05) / (1 - 0.75 \cdot 0.05)^2}} = 8.461 \text{ A}$$

где  $I_{1H} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot \cos \phi_H \cdot z_H} = \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0.86 \cdot 0.88} = 30.031 \text{ A}$  - номинальный ток статора

двигателя;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot \cos \phi_{p_*} \cdot z_{p_*}} = \frac{0.75 \cdot 15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0.86 \cdot 0.88} = 22.947 \text{ A}$$
 - ток статора двигателя при

частичной нагрузке;

Коэффициент мощности при частичной нагрузке

$$\cos \phi_{p_*} = 0.99 \cdot \cos \phi_H = 0.99 \cdot 0.86 = 0.85;$$

Коэффициент загрузки двигателя

$$p_* = \frac{P}{P_H} = 0.75.$$

Коэффициент мощности и КПД при частичной нагрузке в технической литературе приводятся редко, а для целого ряда серий электрических машин такие данные в справочной литературе отсутствуют. Эти параметры можно определить, руководствуясь следующими соображениями:

– современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10-15% меньше номинальной. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них в силу стандартной дискретной шкалы мощностей работают с некоторой недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и нагрузке  $p_* = 0,75$  практически равны между собой, т.е.  $\eta_H \approx \eta_{0,75}$

– коэффициент мощности при той же нагрузке  $p_* = 0,75$  значительно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя.

$$\eta_{p_*} = \eta_H = 0.89 \text{ - КПД при частичной загрузке;}$$

Из формулы Клосса определяем соотношение, которое необходимо для расчета критического скольжения:

$$s_k = s_H \frac{k_{\text{MAX}} + \sqrt{(k_{\text{MAX}})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{\text{MAX}} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{\text{MAX}} - 1)},$$

$$s_k = 0.05 \frac{2.3 + \sqrt{(2.3)^2 - [1 - 2 \cdot 0.05 \cdot 1 (2.3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.05 \cdot 1 (2.3 - 1)} = 0.253$$

где  $\beta = \frac{R_1}{C_1 \cdot R_2'}$  - значение коэффициента  $\beta$  находится в диапазоне 0,6 – 2,5,

поэтому в первом приближении принимаем  $\beta = 1$ .

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{8.461}{2 \cdot 7,5 \cdot 30.031} = 1.019$$

Электромеханическая характеристика при частотном управлении АД, определяется зависимостью приведенного тока ротора от скольжения

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{KH}}^2 f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 R_2'}{s X_{\mu\text{H}} f_{1*}}\right)^2}},$$

где  $U_{1j}$  - фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;

$f_{1*} = \frac{f_{1j}}{f_{1H}}$  - относительное значение частоты питающего напряжения.

Задаваясь значениями скольжения можно рассчитать соответствующее значение тока и воспользовавшись формулой  $\omega = \omega_0(1 - s)$  получить соответствующее значение угловой скорости.

Полагая, что ток намагничивания двигателя имеет полностью реактивный характер, выражение для электромеханической характеристики,

описывающей зависимость тока статора от скольжения, запишется следующим образом

$$I_{1j} s = \sqrt{I_0^2 + I_{2j}^2 s + 2 \cdot I_0 \cdot I_{2j} s \cdot \sin \varphi_{2s}},$$

где  $I_0$  будет меняться в зависимости от величины питающего напряжения, согласно выражению

$$I_{0j} = \frac{U_{1j}}{\sqrt{R_1^2 + X_{1H} + X_{\mu H}^2}},$$

$$\sin \varphi_{2s} = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2}}.$$

Задаваясь скольжением  $S = 2 \div 2$  и принимая во внимание, что для естественной характеристики  $f_{1*} = 1$  по формуле рассчитываем естественные электромеханические характеристики АД в двигательном и генераторном режимах, приведенные на рисунке 17. Сплошной линией представлена зависимость  $\omega = f(I_2')$ , а пунктирной линией зависимость  $\omega = f(I_1)$ ,  $I_0 = 8,461 \text{ A}$ . Значения электромеханической характеристики приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Значения электромеханической характеристики

$\omega$ , рад/с	0	120,1	201,4	220,1	301,4	320	350,2	375,49	398,3
$\Gamma_2$ , А	154,6	83,65	119,4	78,65	20,29	50,1	75,05	98,6	144,3
I, А	159,8	148,43	128,3	79,43	20,97	52,6	77,8	101,1	147,46



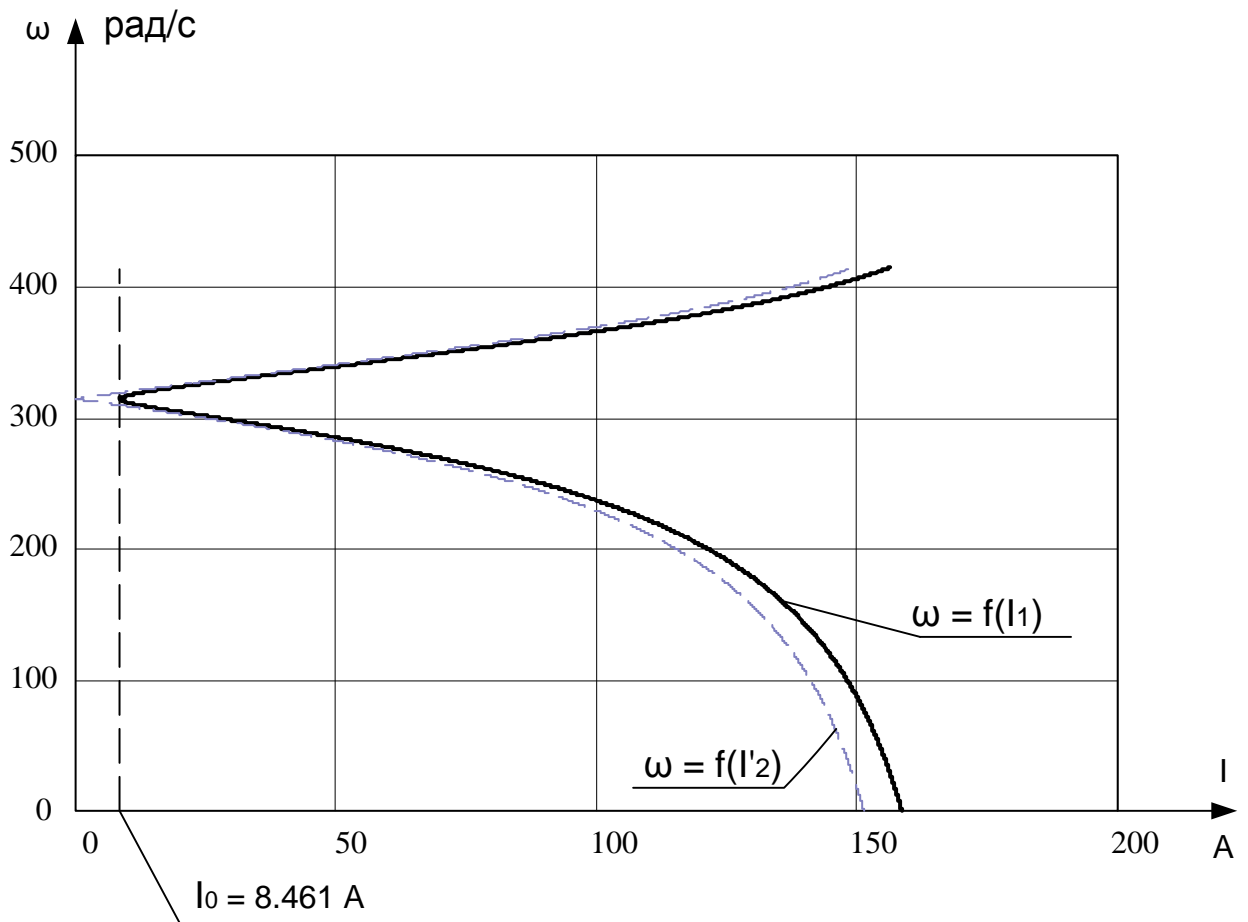


Рисунок 17 - Естественные электромеханические характеристики АД

Механическую характеристику асинхронного двигателя при переменных значениях величины и частоты напряжения питания можно рассчитать по следующему выражению

$$M = \frac{3U_{1j}^2 R_2'}{\omega_{0j} s_j \left[ X_{KH}^2 f_{1*}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_j} \right)^2 + \left( \frac{R_1 R_2'}{s_j X_{\mu H} f_{1*}} \right)^2 \right]}$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя имеет критический момент и критическое скольжение, которые определяются по следующим формулам:

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2} \right]} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314,159 \cdot 1,019 \cdot \left[ 0,396 + \sqrt{0,396^2 + 1,553^2} \right]} = 115,594 \text{ Нм,}$$

$U_{1j}$  - фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя.

$X_K = X_{1н} + X_{2н}' = 0,674 + 0,879 = 1,553 \text{ Ом}$  Ом - индуктивное сопротивление

короткого замыкания.

$$s_{Kj} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = \frac{1,019 \cdot 0,389}{\sqrt{0,396^2 + 1,553^2}} = 0,253$$

Знак (+) означает, что критический момент и скольжение относятся к двигательному режиму, знак (-) – к генераторному режиму.

Расчет механической характеристики проводим по формуле Клосса:

$$M(s) = \frac{2M_K \left( 1 + a \cdot \frac{s}{s_K} \right)}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K} + 2 \cdot a \cdot \frac{s}{s_K}}$$

где  $a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{0,396}{0,389} = 1,018$  - коэффициент, равный отношению активного сопротивления статора к активному приведенному сопротивлению ротора;  $\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 314,159 \cdot (1 - 0,05) = 298,45 \text{ об/мин}$  - номинальная скорость;  $M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{15 \cdot 10^3}{298,45} = 50,26 \text{ Нм}$  - номинальный момент;

На рисунке 18 представлена естественная механическая характеристика  $\omega = f(M)$  для асинхронного двигателя. Её значения приведены в таблице 8.

Таблица 8 – значения естественной механической характеристики

$\omega$ , рад/с	314	300	291,3	258,1	246,6	242,1	200,3	98,6	10,1
M, Нм	0	47,2	76,3	110,2	112,5	115,4	110,9	75,3	69,3

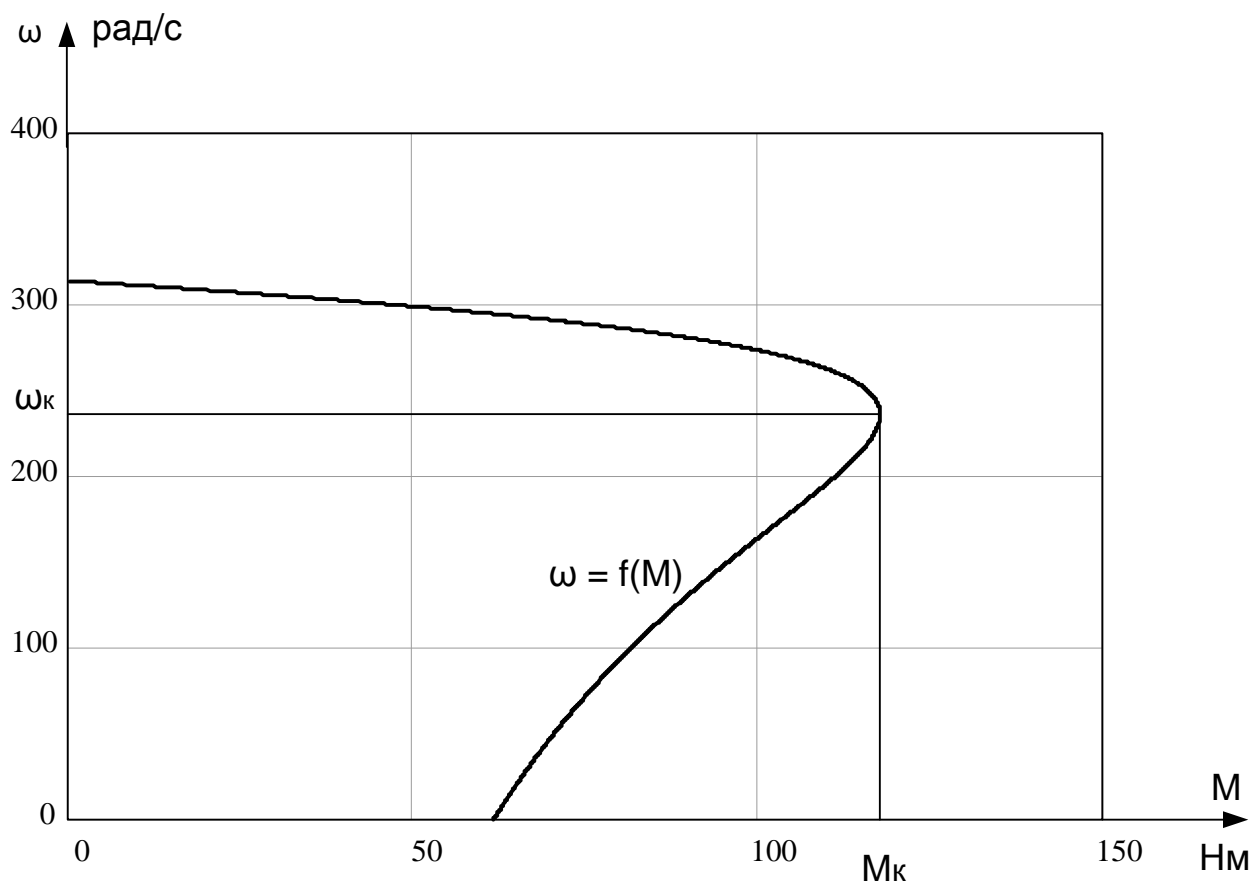


Рисунок 18 - Естественная механическая характеристика АД

**4.2 Расчет искусственных ( регулировочных ) характеристик  $\omega = f(I)$ ,  $\omega = f(M)$  регулируемого электропривода для заданного диапазона регулирования скорости**

Частоты напряжения преобразователя,  $f_{11} = 50$  Гц,  $f_{12} = 25$  Гц,  $f_{13} = 10$  Гц,  $f_{14} = 5$  Гц.

Возможность частотного регулирования скорости асинхронного двигателя — регулирование путем изменения частоты питающего напряжения — вытекает из того обстоятельства, что скорость вращения электромагнитного поля статора пропорционально частоте питающего напряжения

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{P_n}$$

Следует также учесть, что поскольку с изменением частоты питающего напряжения изменяется и величина потока двигателя  $\Phi_1$ ,

$$\Phi_1 = \frac{E_1}{kf_1} \approx \frac{U_1}{kf_1}$$

то в большинстве случаев одновременно с изменением частоты питающего напряжения необходимо регулировать и его амплитуду.

Необходимость регулирования напряжения при уменьшении частоты вниз от номинальной связана с тем, что из-за уменьшения индуктивного сопротивления обмоток АД ток намагничивания будет возрастать, что приведет к насыщению магнитопровода двигателя и его перегреву. Регулирование напряжения следует производить таким образом, чтобы скольжение двигателя было минимальным.

При частотном регулировании величина относительного скольжения  $S_j$  зависит как от разности скоростей вращающегося электромагнитного поля и ротора – абсолютного скольжения  $S_a = \omega_0 - \omega$ , так и от относительного значения  $f_{1*}$  частоты питающего напряжения

$$\frac{f_{1j}}{f_{1H}} = f_{1*},$$

$$S_j = \frac{\omega_{0j} - \omega}{\omega_{0j}}$$

Здесь  $f_{1j}$ ,  $\omega_{0j}$ ,  $S_j$  — регулируемые значения частоты напряжения статора и соответствующие значения скорости вращения и скольжения;  $f_{1H}$  и  $\omega_{0H}$  — номинальные значения частоты статора и скорость поля, соответствующие паспортным данным двигателя.

$$S_j = 1 - \frac{\omega}{\omega_{0H}}$$

Для анализа электромеханических характеристик двигателя при частотном регулировании. Приходится учитывать, что реактивные

сопротивления двигателя зависят от частоты питающего напряжения и изменяются с изменением частоты.

$$X_{1j} = X_{1H} \cdot f_{1*} ; X_{\mu j} = X_{\mu H} \cdot f_{1*} ;$$

$$X'_2 = X'_{2H} \cdot f_{1*} ; X_k = X_{kH} \cdot f_{1*} .$$

В связи с ним нужно заметить, что при номинальной частоте 50Гц индуктивное сопротивление контура намагничивания  $X_{\mu H}$  на порядок (для машин малой мощности) или на два порядка (для машин большой мощности) больше, чем активное сопротивление обмотки статора  $r_1$ . Поэтому при анализе и расчете электромеханических характеристик асинхронных двигателей, работающих при постоянной номинальной частоте питающего напряжения, сопротивлением  $r_1$  обычно пренебрегают. Если же двигатель работает с переменной частотой напряжения, то при снижении частоты сопротивление  $r_1$ , становится соизмеримым с реактивными сопротивлениями машины и учет сопротивления  $r_1$ , является необходимым.

Мощность скольжения, выделяемая в цепи ротора, расходуется на нагрев обмоток ротора как следует из

$$P_s = M \omega_{0j} S_j = 3 I_2'^2 r_2' , \text{ откуда}$$

$$M = \frac{3 I_2'^2 r_2'}{\omega_{0j} S_j} .$$

Из схемы замещения, учитывая, что отношения  $\frac{x_{1H}}{x_{\mu H}}$  и  $\frac{x'_{2H}}{x_{\mu H}}$  гораздо меньше единицы и ими можно пренебречь, определим значение  $I_2'$

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{кН}^2 f_{1*}^2 + \left( \frac{R_1 R_2'}{s X_{\mu H} f_{1*}} \right)^2}}$$

Подставляя выражение получим формулу для механических характеристик при переменных значениях величины и частоты напряжения питания

$$M = \frac{3U_{1j}^2 R_2'}{\omega_{0j} s_j \left[ X_{KH}^2 f_{1*}^2 + \left( R_{1экв} + \frac{R_2'}{s_j} \right)^2 + \left( \frac{R_{1экв} R_2'}{s_j X_{\mu H} f_{1*}} \right)^2 \right]}$$

где  $R_{1экв} = R_1 - k_m R_1$ ,

$k_m$  – коэффициент, характеризующий степень компенсации.

Для случаев, когда  $k_m = 0,25; 0,5; 0,75; 1$  найдем  $R_{1экв1}; R_{1экв2}; R_{1экв3}; R_{1экв4}$ ;

$$R_{1экв1} = 0,396 - 0,75 \cdot 0,396 = 0,297 \text{ Ом};$$

$$R_{1экв2} = 0,396 - 0,5 \cdot 0,396 = 0,198 \text{ Ом};$$

$$R_{1экв3} = 0,396 - 0,25 \cdot 0,396 = 0,099 \text{ Ом};$$

$$R_{1экв4} = 0,396 - 1 \cdot 0,396 = 0 \text{ Ом}.$$

Положив  $dM/ds_j = 0$ , найдем значения максимального момента и

критического скольжения

$$M_k = \frac{3U_{1j}^2}{2\omega_{0j} \left[ r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + x_{KH}^2 f_{1*}^2 \left( 1 + \frac{r_1^2}{x_{\mu H}^2 f_{1*}^2} \right)} \right]}$$

$$s_{kj} = \pm r_2' \sqrt{\frac{1 + r_1^2 / X_{\mu H} f_{1*}^2}{r_1^2 + X_{KH}^2 f_{1*}^2}}$$

Знак (+) соответствует двигательному режиму, знак (-) – режиму рекуперативного торможения.

Если пренебрегать величиной активного сопротивления статора ( $r_{1=0}$ ), то, для того чтобы при частотном регулировании (уменьшении частоты вниз от номинальной) сохранять критический момент постоянным, нужно величину напряжения изменять пропорционально изменению частоты.

Для обрабатывающего центра характеристика нагрузки имеет вид:

$$\frac{U_{1*}}{f_{1*}} = const$$

Построим естественную и искусственные механические характеристики соответствующие рассчитанным параметрам, данные для построения естественной характеристики сведены в таблицу 9

Таблица 9 - Естественная механическая характеристика

$M_{ст1}$ , Нм	75.9	82.7	99,5	122,6	134,9	143,8	78,7	0
$\omega$ , рад/с	0	50,1	102,13	150,6	201,9	225,5	280,7	314.06
$M_{ст2}$ , Нм	110.2	126,3	133,68	124,97	89,27	50,47	25,1	0
$\omega$ , рад/с	0	59,9	66,56	100,2	115,7	148,85	159,7	161,65
$M_{ст3}$ , Нм	109.8	98,3	90.2	93.4	66.7	25.7	12.6	0
$\omega$ , рад/с	0	33.2	35.7	38.1	44.8	62.9	64.8	65.3
$M_{ст4}$ , Нм	68.2	60.4	50.9	45.4	33.4	25.9	13.9	0
$\omega$ , рад/с	0	8	14.8	15.1	16.5	17.97	22.8	28.1

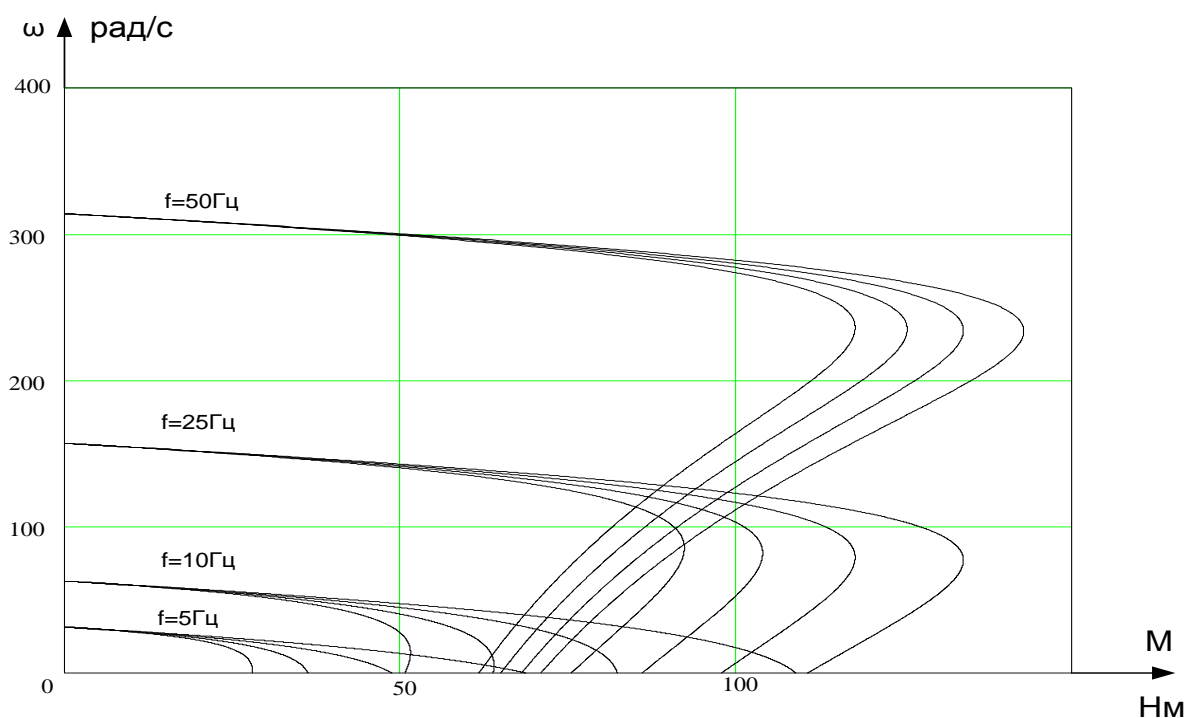


Рисунок 19 - Механические характеристики при  $\frac{U_{1*}}{f_{1*}} = const$

Электропривод механизма тормозится в режиме выбега.

Далее рассчитываем соответственно зависимости  $I_2' = f(\omega)$  и  $I_1 = f(\omega)$ , которые представлены на рисунках 20, 21; расчетные данные приведены в таблицах 10,11.

Таблица 10 - Зависимости  $I_2' = f(\omega)$  и  $I_1 = f(\omega)$

$\omega_{СТ1}, A$	130,4	128,6	126,5	115,1	100,2	75,8	45,8	0
$f_1 = 50Гц$ $\omega, рад/с$	0	57,1	100,3	200,3	229,5	250,9	301,1	308,06
$\omega_{СТ2}, A$	123,4	102,1	82,4	65,7	50,7	44,3	20,8	0
$f_1 = 25Гц$ $\omega, рад/с$	0	78,5	98,9	115,2	126,8	130,6	138,7	150,6
$\omega_{СТ3}, A$	75,6	65,8	50,9	45,8	35,1	25,6	10,2	0
$f_1 = 10Гц$ $\omega, рад/с$	0	24,5	28,2	28,9	38,6	49,8	56,9	58,2
$\omega_{СТ4}, A$	42,9	40,7	37,9	32,3	26,5	18,9	12,9	0
$f_1 = 5Гц$ $\omega, рад/с$	0	10,8	19,8	21,8	27,5	30,3	32,9	37,01

Таблица 11 - Зависимости  $I_2' = f(\omega)$  и  $I_1 = f(\omega)$

$I_{1СТ1}, A$	147,9	142,7	139,4	128,2	119,3	84,5	45,2	10,6
$f_1 = 50Гц$ $\omega, рад/с$	0	55,5	100,8	150,4	200,5	254,3	289,5	310,9
$I_{1СТ2}, A$	127,1	122,1	100,3	73,6	61,4	48,6	21,4	11,1
$f_1 = 25Гц$ $\omega, рад/с$	0	54,3	81,3	98,6	112,3	117,6	142,3	156,3
$I_{1СТ3}, A$	77,3	68,7	50,1	45,6	40,2	32,2	20,4	10,4
$f_1 = 10Гц$ $\omega, рад/с$	0	10,3	18,5	39,5	42,6	48,3	55,8	66,2
$I_{1СТ4}, A$	48,3	46,2	42,5	38,2	28,6	25,7	20,3	11,2
$f_1 = 5Гц$ $\omega, рад/с$	0	8,3	11,2	15,3	17,6	18,3	19,6	21,3



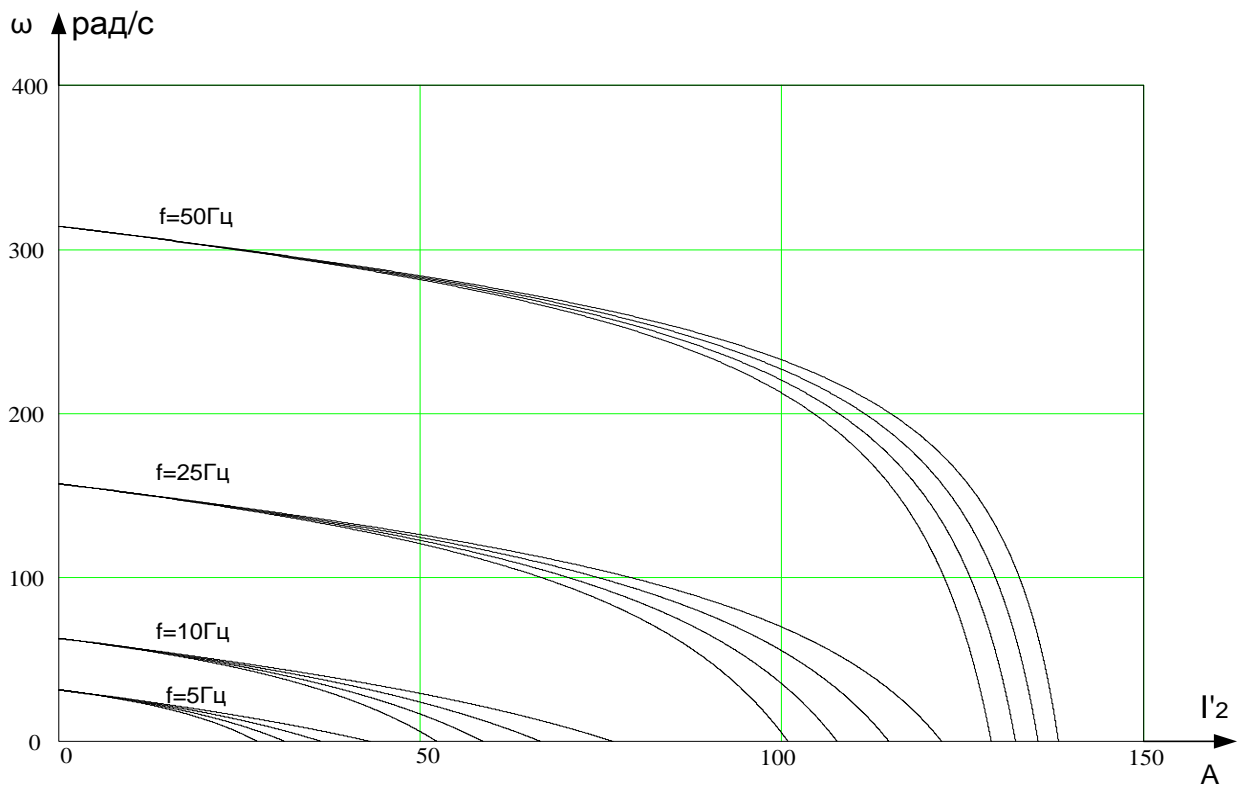


Рисунок 20 - Электромеханические характеристики  $I'_2 = f(\omega)$  при  $\frac{U_{1*}}{f_{1*}} = const$

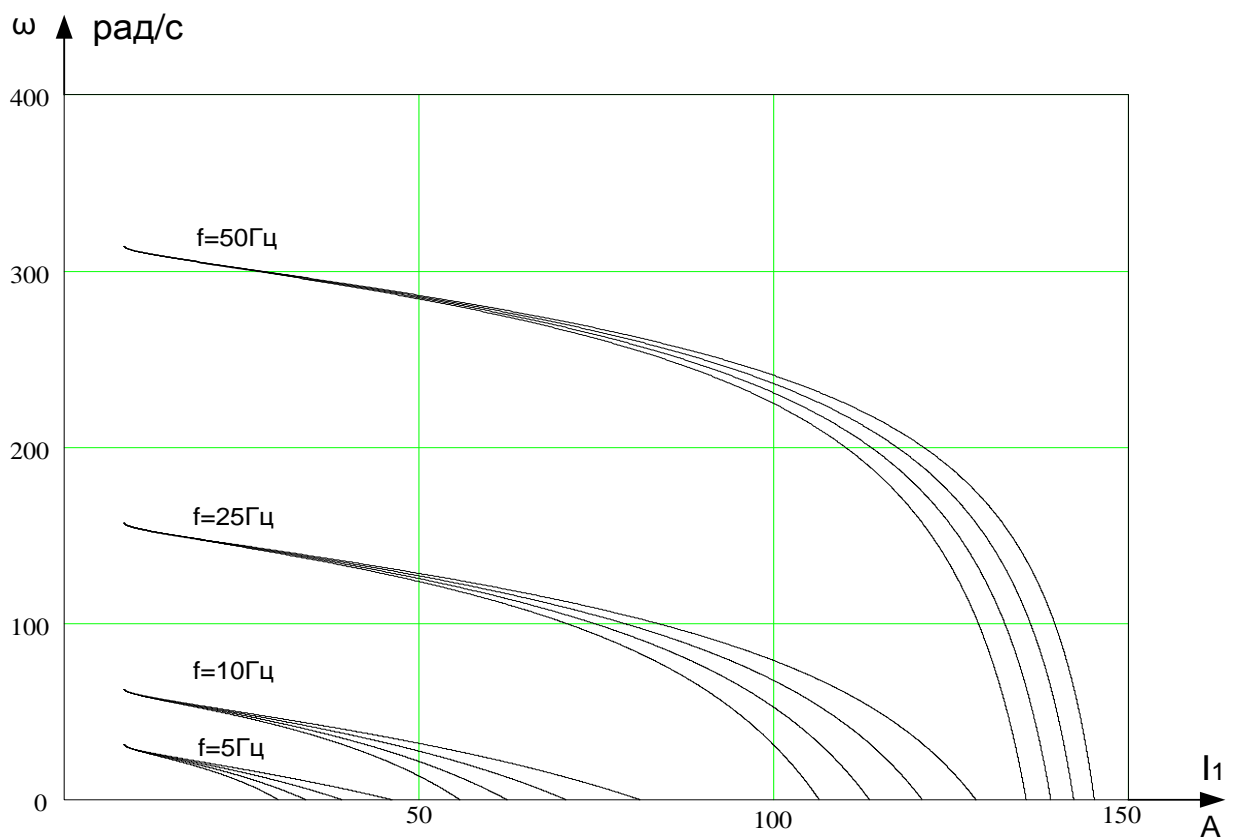


Рисунок 21 - Электромеханические характеристики  $I_1 = f(\omega)$  при  $\frac{U_{1*}}{f_{1*}} = const$

## 5. Создание математической модели и проведение имитационного моделирования работы в MATLAB SIMULINK

### 5.1 Определение дополнительных параметров двигателя и параметров схемы замещения

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314,159 \text{ рад/с} .$$

Номинальная частота вращения двигателя

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot n_0 = (1 - 0,05) \cdot 3000 = 2850 \text{ об/мин} .$$

или

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot \omega_0 = (1 - 0,05) \cdot 314,159 = 298,451 \text{ рад/с} .$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{15 \cdot 10^3}{298,451} = 50,259 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора. Для определения номинального фазного тока необходимо знать схему соединения обмоток статора. Если соединение обмоток неизвестно, то при расчете следует принять соединение Y.

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

Принимаем  $U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В}$ .

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,86 \cdot 0,88} = 30,03 \text{ А} .$$

Примечания:

$I_{1\text{лн}}$  – ток, потребляемый двигателем из сети в номинальном режиме работы.

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске

$$I_{1\text{макс}} = k_{\text{идв}} \cdot I_{1\text{лн}} = 7,5 \cdot 30,03 = 225,231 \text{ А} .$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике

$$M_k = m_k \cdot M_{двн} = 2,3 \cdot 50,259 = 115,597 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске

$$M_{двпуск} = m_{п} \cdot M_{двн} = 2,2 \cdot 50,259 = 110,571 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

T – образная схема замещения асинхронного двигателя для одной фазы приведена на рисунке 22.

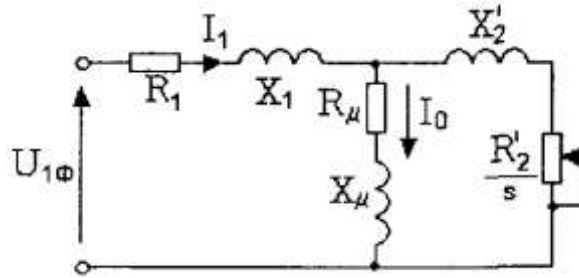


Рисунок 22 – Схема замещения асинхронного двигателя

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = R_1' \cdot \frac{U_{1\phiн}}{I_{1\phiн}} = 0,052 \cdot \frac{220}{30,03} = 0,381 \text{ Ом} .$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_{1\delta} = X_1' \cdot \frac{U_{1\phiн}}{I_{1\phiн}} = 0,092 \cdot \frac{220}{30,03} = 0,674 \text{ Ом} .$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{1\delta} = \frac{X_{1\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{0,674}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,145 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} .$$

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора

$$R_2' = R_2'' \cdot \frac{U_{1\phiн}}{I_{1\phiн}} = 0,022 \cdot \frac{220}{30,03} = 0,161 \text{ Ом} .$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$X_{2\delta}' = X_2'' \cdot \frac{U_{1\phiн}}{I_{1\phiн}} = 0,12 \cdot \frac{220}{30,03} = 0,879 \text{ Ом} .$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния

$$L'_{2\delta} = \frac{X'_{2\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,879}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,798 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} .$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания при номинальном режиме

$$X_{KH} = X_{1\delta} + X'_{2\delta} = 0,674 + 0,879 = 1,553 \text{ Ом} .$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление)

$$X_{\mu} = X'_{\mu} \cdot \frac{U_{1ФН}}{I_{1ФН}} = 4 \cdot \frac{220}{30,03} = 29,303 \text{ Ом} .$$

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

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{29,303}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,093 \text{ Гн} .$$

Параметры схемы замещения электродвигателя сведены в таблице 12.

Таблица 12 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1$ , Ом	$X_{1\delta}$ , Ом	$L_{1\delta}$ , Гн	$X_{\mu}$ , Ом	$L_{\mu}$ , Гн	$R'_2$ , Ом	$X'_{2\delta}$ , Ом	$L'_{2\delta}$ , Гн	$X_{KH}$ , Ом
0,381	0,674	$2,145 \cdot 10^{-3}$	29,303	0,093	0,161	0,879	$2,798 \cdot 10^{-3}$	1,553

## 5.2 Прямой пуск двигателя

Полученные значения подставляем в имитационную модель (рисунок 23) и, исследуя ее в программе Matlab, получаем графики переходных процессов момента и скорости электродвигателя при прямом пуске без нагрузки и при пуске двигателя с нагрузкой.

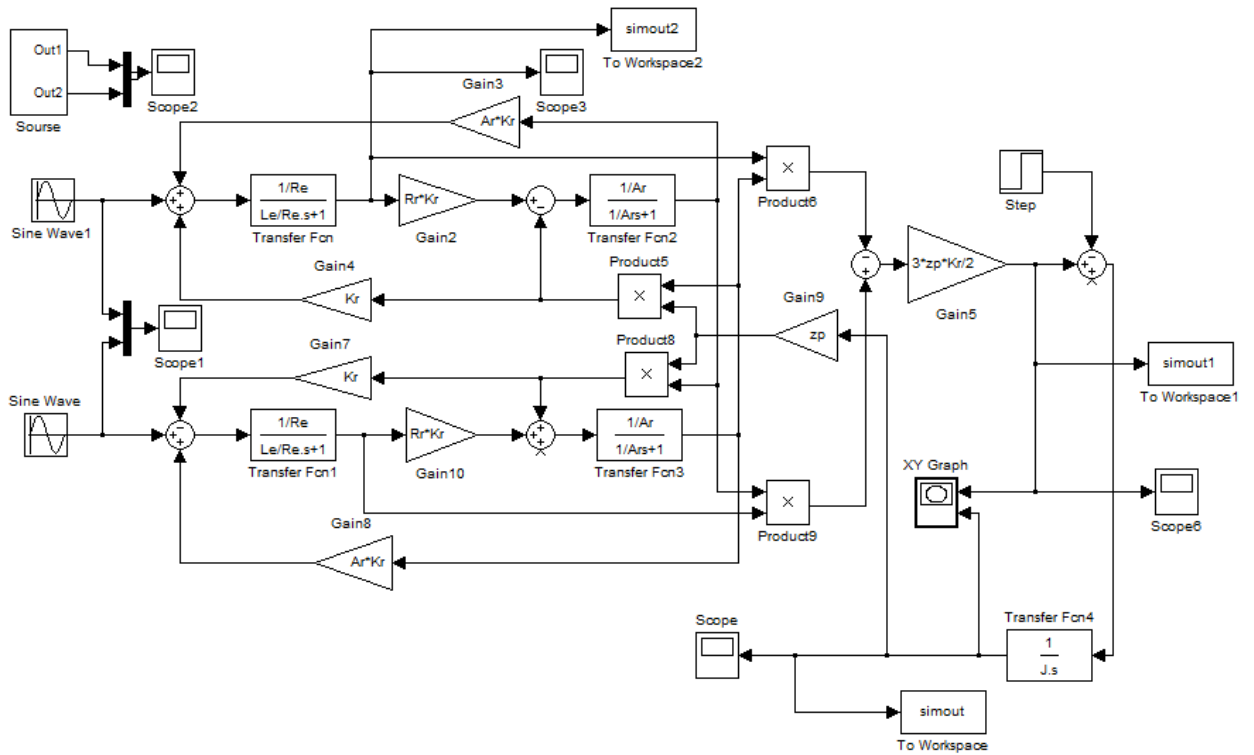


Рисунок 23 – имитационная модель прямого пуска двигателя

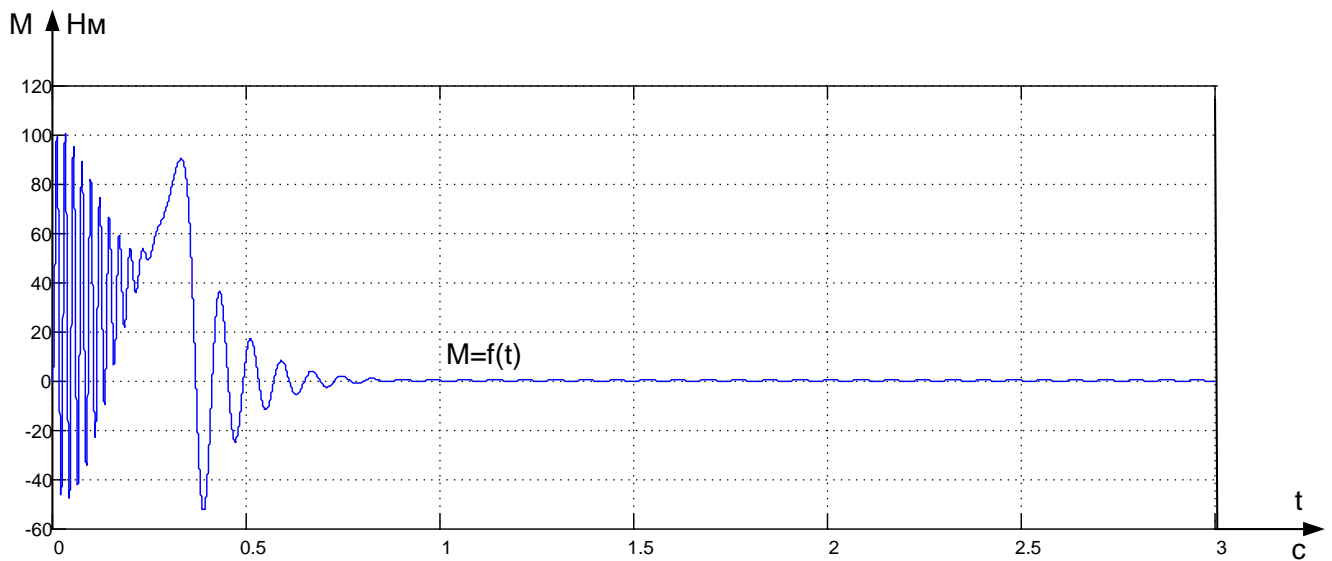


Рисунок 24 – График переходного процесса момента АД при прямом пуске без нагрузки

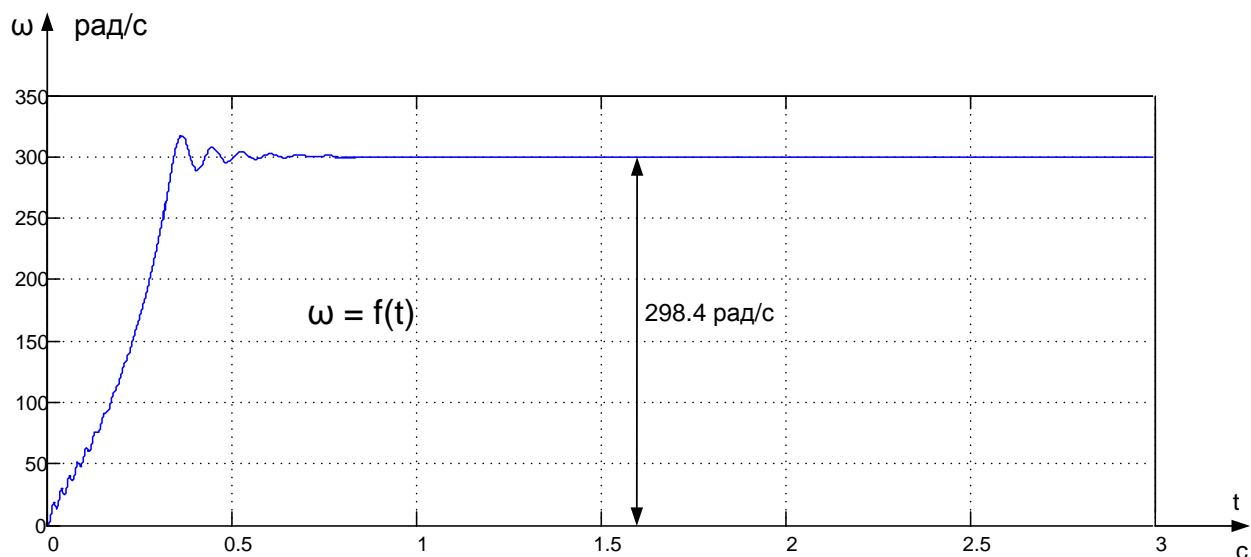


Рисунок 25 – График переходного процесса скорости АД при прямом пуске без нагрузки

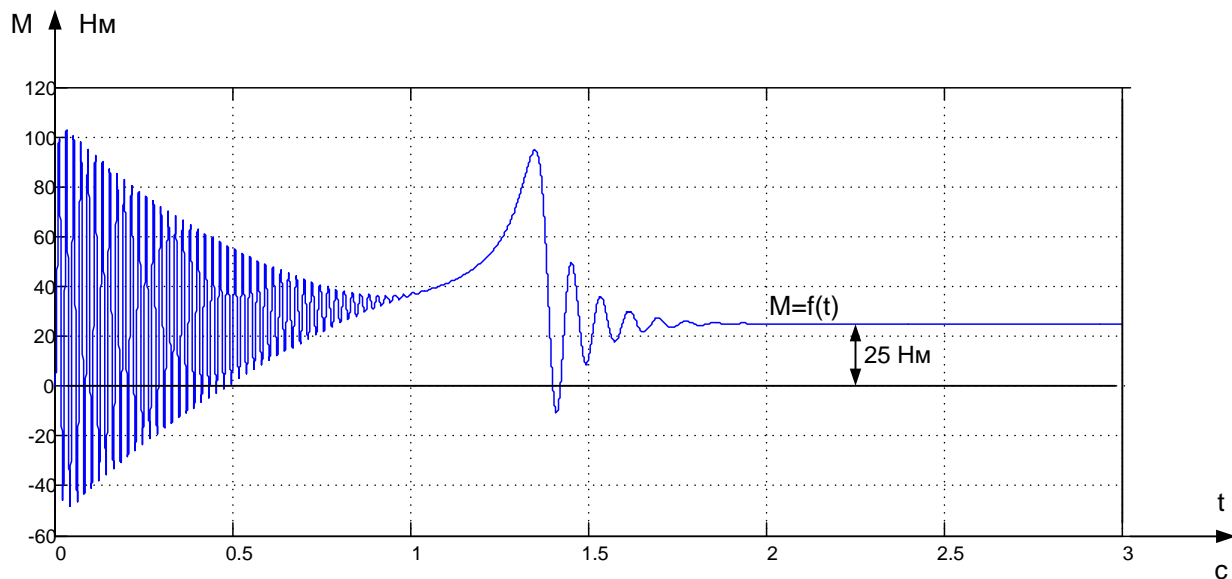


Рисунок 26 – График переходного процесса момента АД при прямом пуске с нагрузкой 25Нм

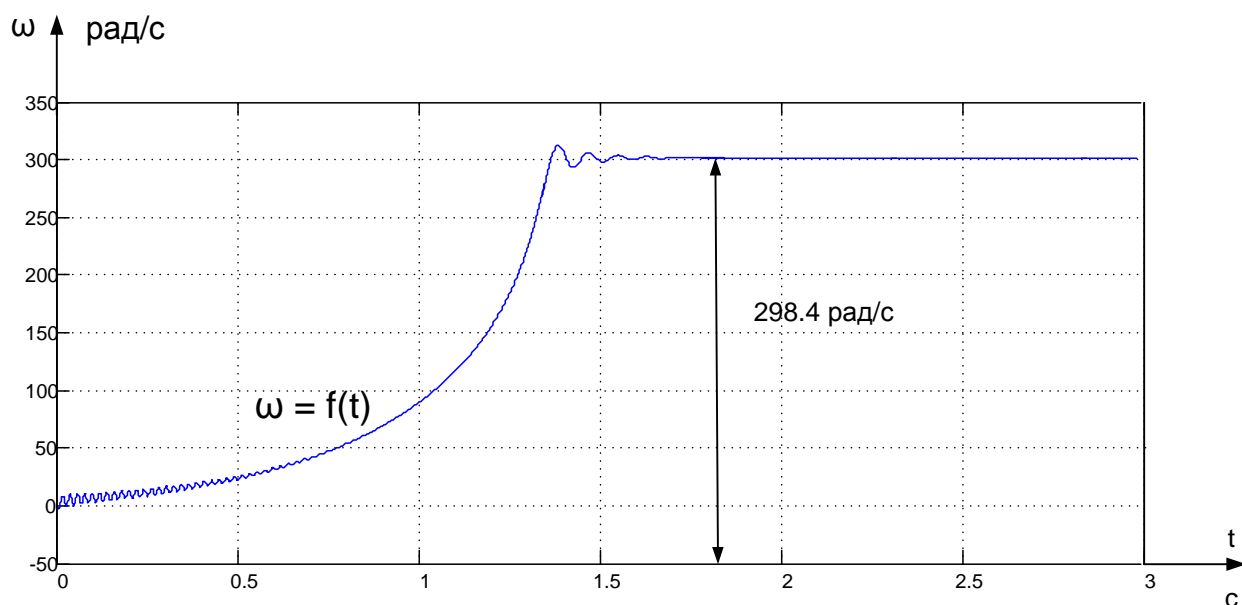


Рисунок 27 – График переходного процесса скорости АД при прямом пуске с нагрузкой 25Нм

Анализ переходных процессов при прямом пуске показывает наличие значительной колебательной составляющей в кривых момента, и затухающих по мере разгона двигателя. Пуск с нагрузкой сопровождается более меньшим перерегулированием, чем пуск без нагрузки и меньшими мгновенными значениями момента, но чуть большим временем переходного процесса.

В итоге прямой пуск не позволяет получить удовлетворительного качества переходных процессов.

### 5.3 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода

Расчет параметров преобразователя:

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя

$$k_{и} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\Phi}}{U_{уп\max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,113 ,$$

где  $U_{уп\max} = 10$  В, – максимальное значение напряжения управления.

Эквивалентная постоянная времени преобразователя

$$T_{и} = \frac{0,5}{f_{и}} = \frac{0,5}{8 \cdot 10^3} = 6,25 \cdot 10^{-5} \text{ с} ,$$

где  $f_{и}$  – несущая частота инвертора, Гц.

Расчет параметров двигателя:

Эквивалентная индуктивность обмоток:

- статора

$$L_1 = L_{1\delta} + L_{\mu} = 0,002145 + 0,09328 \cong 0,0954 \text{ Гн} ;$$

- ротора

$$L_2' = L_{2\delta}' + L_{\mu} = 0,002798 + 0,09328 \cong 0,09607 \text{ Гн} .$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,09328^2}{0,0954 \cdot 0,09607} = 0,051 .$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_{\mathcal{E}} = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_{\mu}^2}{L_2^2} = 0,381 + 0,16 \cdot \frac{0,093^2}{0,096^2} = 0,53 \text{ Ом} .$$

Электромагнитные постоянные времени

$$T_{\mathcal{E}} = \frac{\delta \cdot L_1}{R_{\mathcal{E}}} = \frac{0,051 \cdot 0,095}{0,53} = 0,00912 \text{ с} ;$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0,096}{0,16} = 0,596 \text{ с} .$$

Расчет параметров механической системы:

Момент инерции механизма

$$J_M = 0,5 \cdot J_{дв} = 0,5 \cdot 0,05 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

Эквивалентный момент инерции привода

$$J_{\mathcal{E}} = J_{дв} + J_M = 0,05 + 0,025 = 0,075 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

### Структурная схема линеаризованной САУ РЭП

Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно - регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 28.



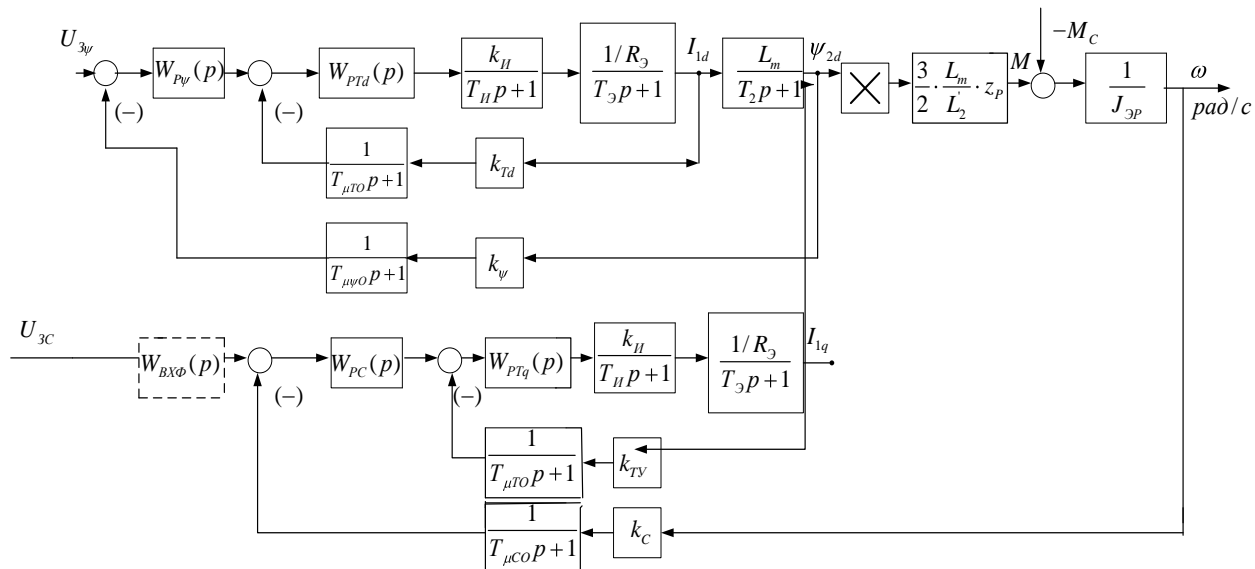


Рисунок 28 – Структурная схема линейризованной непрерывной САУ РЭП частотно–регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

На схеме приняты следующие обозначения:

$W(p)_{PT}, W(p)_{P\psi}, W(p)_{PC}$  - передаточные функции регуляторов тока, потокосцепления и скорости соответственно;

Имеем  $U_{3TMAX} = 10$  В .

Коэффициент обратной связи по току

$$k_T = \frac{U_{3TMAX}}{I_{1YMAX}} = \frac{10}{22.194} = 0,451 \text{ В/А} .$$

Максимально допустимое значение тока

$$I_{1YMAX} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{\Sigma PMAX}^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{17.324^2 + 7.338^2} = 22.194 \text{ А}$$

Период сглаживания результатов измерения тока

$$T_{CT} = \frac{1}{f_{ШИМ}} \cdot n_T = \frac{1}{8 \cdot 10^3} \cdot 8 = 0,001 \text{ с} ,$$

где  $n_T = 8$  количество измерений.

Малая постоянная времени цепи обратной связи по току

$$T_{\mu T0} = \frac{T_{CT}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с} .$$

Имеем  $U_{3\psi MAX} = 10$  В .

Номинальный электромагнитный момент двигателя

$$M_{\text{ЭМ Н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{ФН}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{Н}} \cdot \left[ (X_{\text{КН}})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{Н}}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{Н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,161}{314,159 \cdot 0,05 \cdot \left[ (1,553)^2 + \left( 0,381 + \frac{0,161}{0,05} \right)^2 + \left( \frac{0,381 \cdot 0,161}{0,05 \cdot 29,303} \right)^2 \right]} = 96,76 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент трения на валу двигателя

$$M_{\text{С ДВ}} = M_{\text{ЭМ Н}} - M_{\text{ДВ Н}} = 96,76 - 50,259 = 46,501 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{ЭИН}} = 1,088 \cdot M_{\text{ДВ.Н}} = 54,682$$

Значение номинального потокосцепления двигателя

$$\psi_{2\text{ХН}} = \psi_{\text{Н}} = \frac{M_{\text{ЭИН}}}{\frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\text{Н}}^2 - I_0^2}} = \frac{54,682}{\frac{3}{2} \cdot 1 \cdot \frac{0,093}{0,093 + 0,002798} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{30,03^2 - 6,831^2}} = 0,908 \text{ Вб.}$$

Коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора

$$k_{\psi} = \frac{U_{3\psi\text{МАКС}}}{\psi_{2\text{ХН}}} = \frac{10}{0,908} = 11,013 \text{ В/Вб} .$$

Период расчета потокосцепления:

имеем  $n_{\psi} \geq 3$ ;

$$T_{\text{С}\psi} = \left( 16 \cdot \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} \right) \cdot n_{\psi} = \left( 16 \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3} \right) \cdot 3 = 0,006 \text{ с};$$

Малая постоянная времени цепи обратной связи по потокосцеплению

$$T_{\mu\psi 0} = \frac{T_{\text{С}\psi}}{3} = \frac{0,006}{3} = 0,002 \text{ с} .$$

Имеем  $U_{3\text{СМАКС}} = 10 \text{ В}$ ;  $f_{\text{ШИМ}} = 8 \text{ кГц}$  .

Коэффициент обратной связи по скорости

$$k_c = \frac{U_{3\text{СМАКС}}}{\omega_{\text{ЭПМАКС}}} = \frac{10}{298,451} = 0,0335 \text{ В} \cdot \text{с/рад} .$$

Период расчета скорости:

$$\text{Имеем } n_c \geq 3; \quad T_{\text{Сс}} = \left( 16 \cdot \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} \right) \cdot n_c = \left( 16 \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3} \right) \cdot 3 = 0,006 \text{ с} .$$

Малая постоянная времени цепи обратной связи по скорости

$$T_{\mu C0} = \frac{T_{CC}}{3} = \frac{0,006}{3} = 0,002 \text{ с .}$$

### Оптимизация контура тока:

Контур регулирования тока имеет относительно большую инерционность в цепи обратной связи.

Структурная схема контура тока с инерционной обратной связью и полной компенсацией внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя приведена на рисунке 29. Контуров токов  $I_{1x}$  и  $I_{1y}$  идентичные.

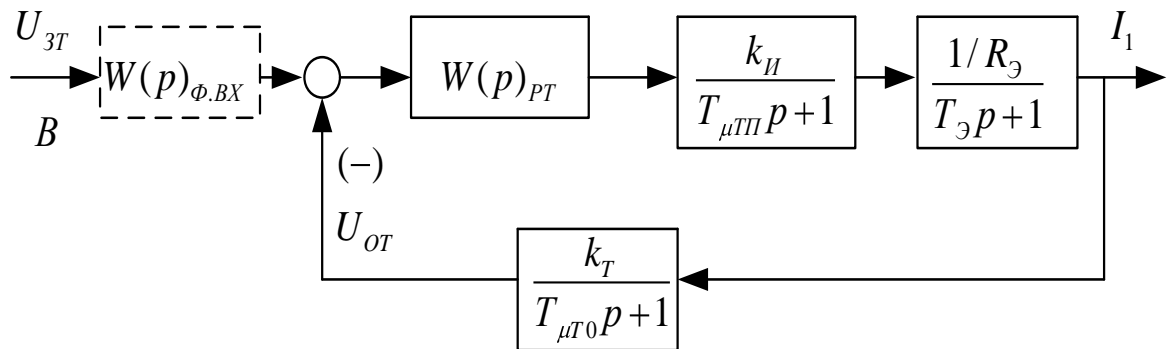


Рисунок 29 – Структурная схема контура тока

На схеме рисунке 29 приняты следующие обозначения:

$U_{ЗТ}$  – напряжение задания на ток, В;

$T_{\mu TP}$  – малая постоянная времени в прямом канале, с;

$$T_{\mu TP} = T_{II} = 6,25 \cdot 10^{-5} \text{ с .}$$

$T_{\mu T0}$  – малая постоянная времени в цепи обратной связи, с.

Передаточная функция ПИ-регулятора тока

$$W_{PT}(p) = k_{PT} \cdot \frac{T_{PT} \cdot p + 1}{T_{PT} \cdot p} = 0,438 \cdot \frac{0,01 \cdot p + 1}{0,01 \cdot p} .$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{PT} = \frac{T_{\Omega} \cdot R_{\Omega}}{k_{II} \cdot k_T \cdot a_T \cdot (T_{\mu TP} + T_{\mu T0})} = \frac{0,0091 \cdot 0,533}{31,113 \cdot 0,451 \cdot 2 \cdot 3,958 \cdot 10^{-4}} = 0,438 , \text{ где}$$

$$k_T = \frac{U_{ЗТМАКС}}{I_{1УМАКС}} = \frac{10}{22,194} = 0,451 \text{ В/А ;}$$

$$U_{ЗТМАКС} = 10 \text{ В ;}$$

$a_T = 2$  – коэффициент оптимизации.

### Постоянная времени регулятора тока

$$T_{pT} = T_{\Theta} = 0,00912 \text{ с ;}$$

Контур тока имеет следующие передаточные функции:

- разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{РАЗ.Т}} = \frac{1}{a_T \cdot T_{\mu\text{ПП}} \cdot T_{\mu\text{ГО}} \cdot T_{\mu\text{ГЭ}} \cdot p^3 + a_T \cdot T_{\mu\text{ГЭ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ГЭ}} \cdot p} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 0,0000625 \cdot 0,000333 \cdot 0,00912 \cdot p^3 + 2 \cdot 0,00912^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,00912 \cdot p};$$

- замкнутого контура

$$W(p)_{\text{ЗАМ.Т}} = \frac{\frac{1}{k_T} \cdot (T_{\mu\text{ГО}} \cdot p + 1)}{a_T \cdot T_{\mu\text{ПП}} \cdot T_{\mu\text{ГО}} \cdot T_{\mu\text{ГЭ}} \cdot p^3 + a_T \cdot T_{\mu\text{ГЭ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ГЭ}} \cdot p + 1} \approx$$

$$\approx \frac{\frac{1}{k_T} \cdot (T_{\mu\text{ГО}} \cdot p + 1)}{a_T \cdot T_{\mu\text{ГЭ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ГЭ}} \cdot p + 1} \approx \frac{\frac{1}{0,405} \cdot (0,000333 \cdot p + 1)}{2 \cdot 0,00912^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,00912 \cdot p + 1};$$

где  $T_{\mu\text{ГЭ}} = T_{\mu\text{ПП}} + T_{\mu\text{ГО}} = 0,0000625 + 0,000333 = 0,000396 \text{ с}$  - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Настройка контура близка к настройке на модульный оптимум (МО) системы 2-го порядка. Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению.

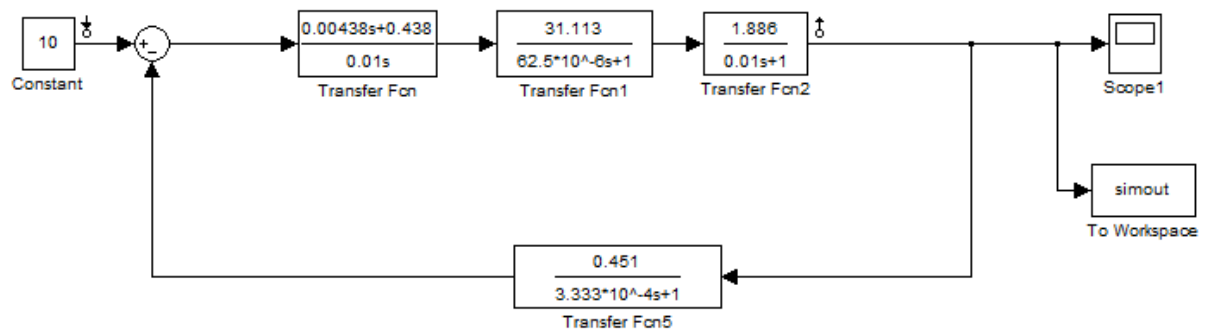


Рисунок 30 – Имитационная модель контура тока в среде Simulink

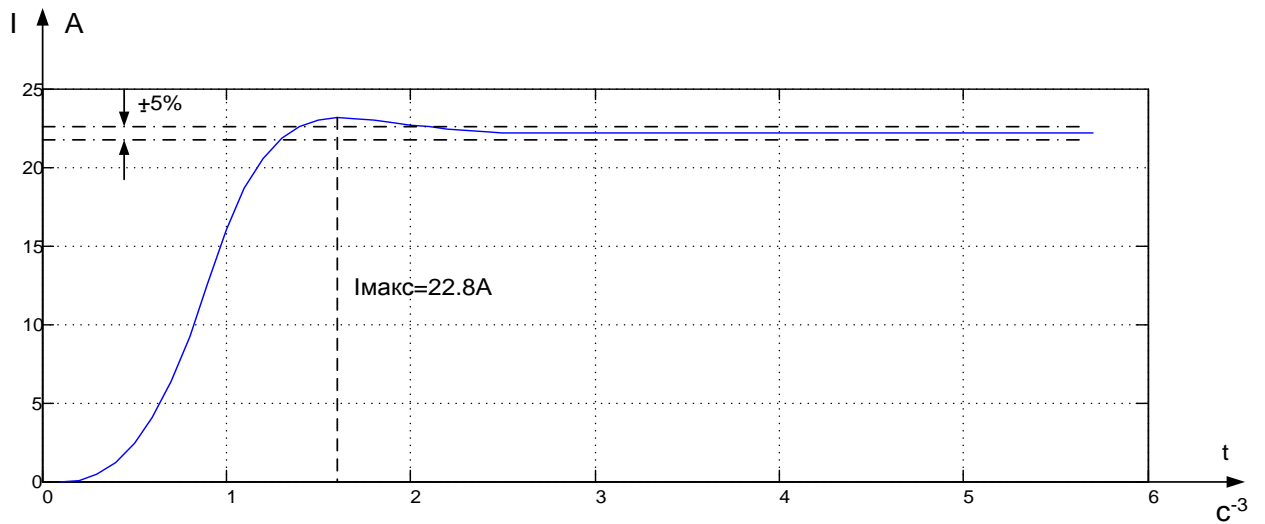


Рисунок 31 – Переходная характеристика  $i(t)$  контура тока по имитационной модели рисунка 30

### Оптимизация контура потокосцепления:

Контур регулирования потокосцепления имеет относительно большую инерционность в цепи обратной связи.

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{зам.т}} \approx \frac{1}{k_T} \approx \frac{1}{0,451} \approx \frac{2.217}{0,000792 \cdot p + 1},$$

где  $T_T = a_T \cdot T_{\mu T \Theta} = a_T \cdot (T_{\mu T \Pi} + T_{\mu T \Theta}) = 2 \cdot (0,0000625 + 0,000333) = 0,000792 \text{ с}$  –

эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Структурная схема контура потокосцепления с инерционной обратной связью и ПИ – регулятором приведена на рисунке 32.

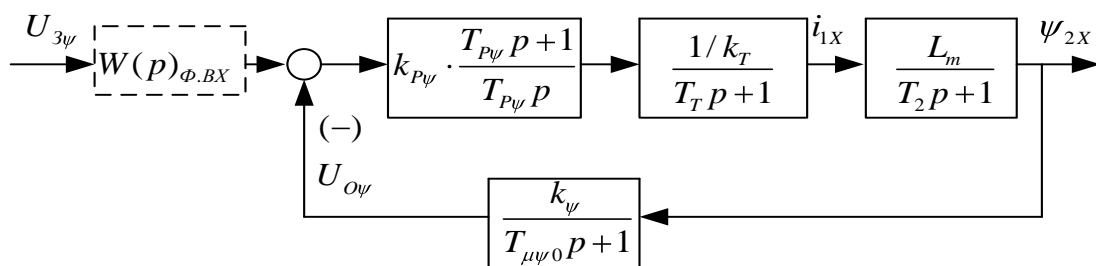


Рисунок 32 – Структурная схема контура потокосцепления с ПИ-регулятором

## Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W(p)_{P\Psi} = k_{P\Psi} \cdot \frac{T_{P\Psi} \cdot p + 1}{T_{P\Psi} \cdot p} = 46.999 \cdot \frac{0,596 \cdot p + 1}{0,596 \cdot p}$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора потокосцепления определяются по выражениям

$$k_{P\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_\Psi} \cdot \frac{1}{a_\Psi \cdot (T_T + T_{\mu\Psi 0})} = \frac{0,596 \cdot 0,451}{0,093 \cdot 11,013} \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,000792 + 0,002)} = 46.999 ,$$

где  $k_\Psi = \frac{U_{3\Psi \text{МАКС}}}{\Psi_{2\text{ХН}}} = \frac{10}{0,908} = 11,013 \text{ В/Вб}$  ;  $U_{3\Psi \text{МАКС}} = 10\text{В}$ ;

$a_\Psi = 2$  - коэффициент оптимизации.

Контур потокосцепления с ПИ – регулятором настроенный таким образом имеет следующие передаточные функции:

- разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{РАЗ.}\Psi} = \frac{1}{a_\Psi \cdot T_T \cdot T_{\mu\Psi 0} \cdot T_{\mu\Psi \Delta} \cdot p^3 + a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi \Delta}^2 \cdot p^2 + a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi \Delta} \cdot p} \approx \frac{1}{2 \cdot 0,000792 \cdot 0,002 \cdot 0,00279 \cdot p^3 + 2 \cdot 0,00279^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,00279 \cdot p} ;$$

- замкнутого контура

$$W(p)_{\text{ЗАМ.}\Psi} = \frac{\frac{1}{k_\Psi} \cdot (T_{\mu\Psi 0} \cdot p + 1)}{a_\Psi \cdot T_T \cdot T_{\mu\Psi 0} \cdot T_{\mu\Psi \Delta} \cdot p^3 + a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi \Delta}^2 \cdot p^2 + a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi \Delta} \cdot p + 1} \approx \frac{\frac{1}{k_\Psi} \cdot (T_{\mu\Psi 0} \cdot p + 1)}{a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi \Delta}^2 \cdot p^2 + a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi \Delta} \cdot p + 1} \approx \frac{\frac{1}{11,013} \cdot (0,002 \cdot p + 1)}{2 \cdot 0,00279^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,00279 \cdot p + 1} ;$$

где  $T_{\mu\Psi \Delta} = T_T + T_{\mu\Psi 0} = 0,000792 + 0,002 = 0,00279 \text{ с}$  – эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

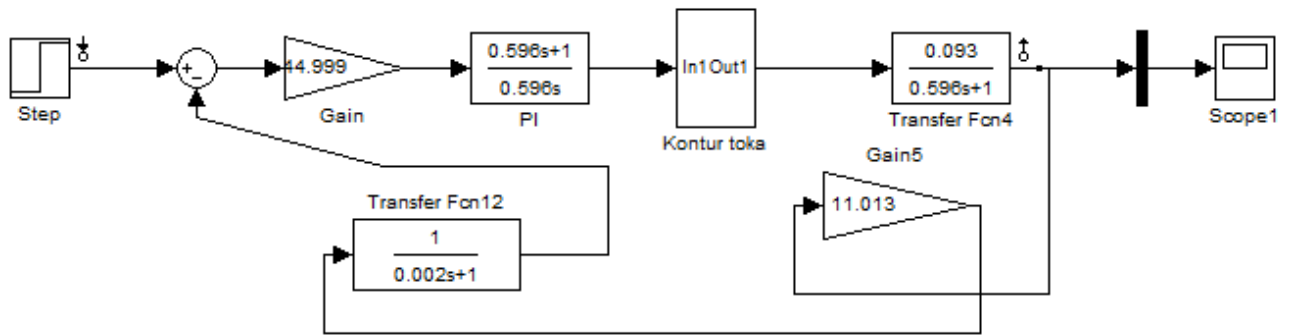


Рисунок 33 – Имитационная модель контура потокосцепления в среде Simulink

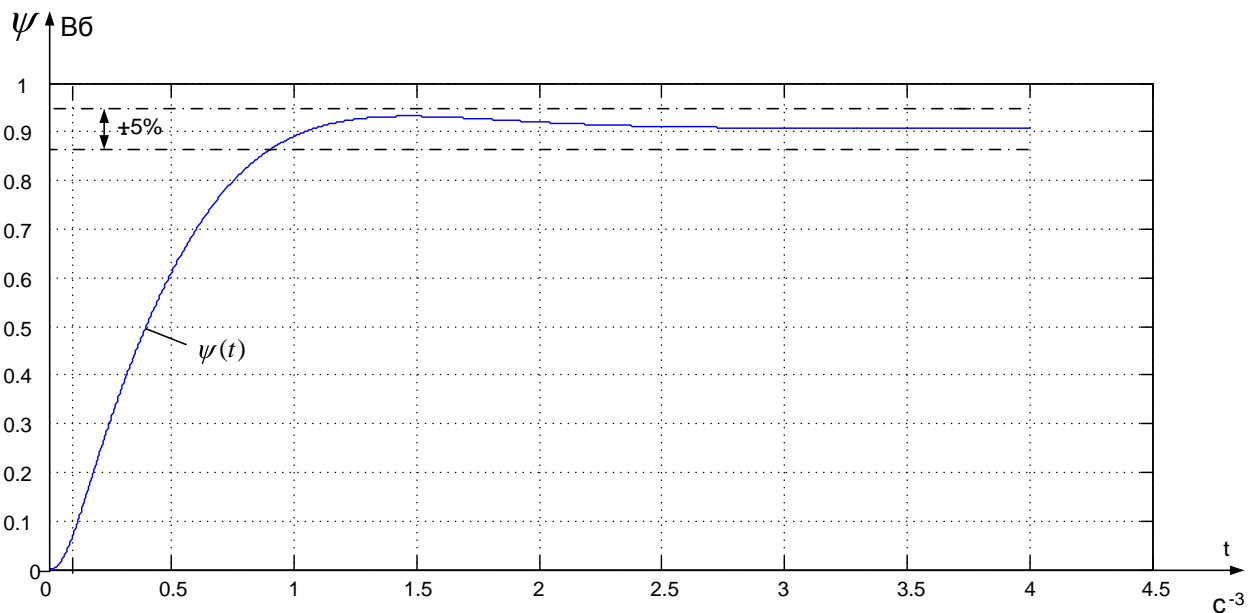


Рисунок 34 – Переходная характеристика  $\psi(t)$  контура потокосцепления по имитационной модели рисунка 33

### Оптимизация контура скорости:

Контур регулирования тока имеет относительно большую инерционность в цепи обратной связи.

При оптимизации контура скорости внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{зам.т}} \approx \frac{1}{k_T \cdot p + 1} \approx \frac{1}{0,000792 \cdot p + 1};$$

где  $T_T = a_T \cdot T_{\mu T \Theta} = a_T \cdot (T_{\mu T \Pi} + T_{\mu T \Theta}) = 2 \cdot (0,0000625 + 0,000333) = 0,000792 \text{ с}$  -

эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

### Оптимизация контура скорости с ПИ- регулятором:

Структурная схема контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ- регулятором приведена на рисунке 35.

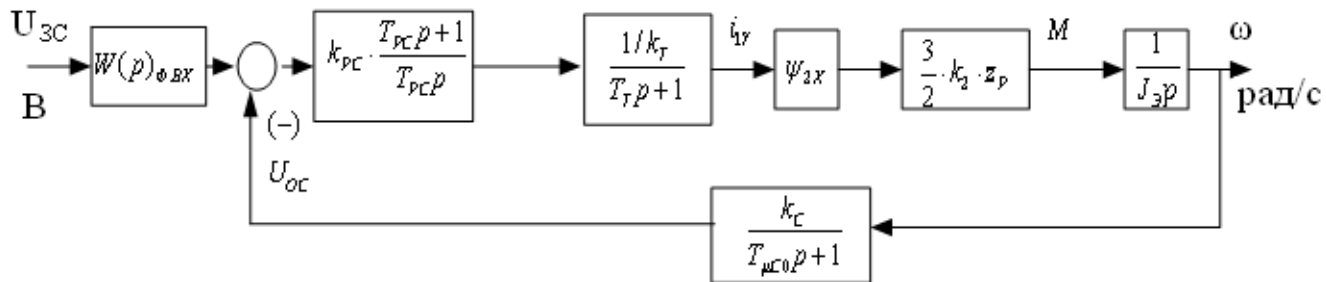


Рисунок 35 – Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором

#### Передаточная функция ПИ-регулятора

$$W(p)_{PC} = k_{PC} \cdot \frac{T_{PC} \cdot p + 1}{T_{PC} \cdot p} = 62,89 \cdot \frac{0,011 \cdot p + 1}{0,011 \cdot p}.$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора скорости определяются по выражениям

$$k_{PC} = \frac{J_{\Theta} \cdot k_T}{\psi_{2X} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot k_C} \cdot \frac{1}{a_C \cdot (T_T + T_{\mu CO})} = \frac{0,075 \cdot 0,451}{0,908 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,093}{0,096} \cdot 1 \cdot 0,073} \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,000792 + 0,002)} = 62,89$$

где  $T_{PC} = b_C \cdot a_C \cdot (T_T + T_{\mu CO}) = 2 \cdot 2 \cdot (0,000792 + 0,002) = 0,011 \text{ с}$  - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Оптимизированный контур скорости с ПИ-регулятором имеет следующие передаточные функции:

- разомкнутого контура

$$W(p)_{PA3C} = \frac{a_C \cdot b_C \cdot T_{\mu C \Theta} \cdot p + 1}{b_C \cdot a_C^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu CO} \cdot T_{\mu C \Theta}^2 \cdot p^4 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu C \Theta}^3 \cdot p^3 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu C \Theta}^2 \cdot p^2} =$$

$$= \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,00279 \cdot p + 1}{2 \cdot 2^2 \cdot 0,000792 \cdot 0,002 \cdot 0,00279^2 \cdot p^4 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,00279^3 \cdot p^3 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,00279^2 \cdot p^2};$$

- замкнутого контура по управлению



$$W(p)_{\text{ПАЗС}} = \frac{1}{k_C} \cdot \frac{(a_C \cdot b_C \cdot T_{\mu\text{СЭ}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\mu\text{С0}} \cdot p + 1)}{b_C \cdot a_C^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu\text{С0}} \cdot T_{\mu\text{СЭ}}^2 \cdot p^4 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu\text{СЭ}}^3 \cdot p^3 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu\text{СЭ}}^2 \cdot p^2 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu\text{СЭ}} \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{1}{0,451} \cdot \frac{(2 \cdot 2 \cdot 0,00279 \cdot p + 1) \cdot (0,002 \cdot p + 1)}{2 \cdot 2^2 \cdot 0,000792 \cdot 0,002 \cdot 0,002792^2 \cdot p^4 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,002792^3 \cdot p^3 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,002792^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 2 \cdot 0,002792 \cdot p + 1}$$

где  $T_{\mu\text{СЭ}} = T_T + T_{\mu\text{С0}} = 0,000792 + 0,002 = 0,002792$  с - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Оптимизированный контур при обработке ступенчатых управляющих воздействий обеспечивает высокое быстродействие при перерегулировании в общем случае более 43%. Настройка контура без фильтров на входе близка к настройке на СО.

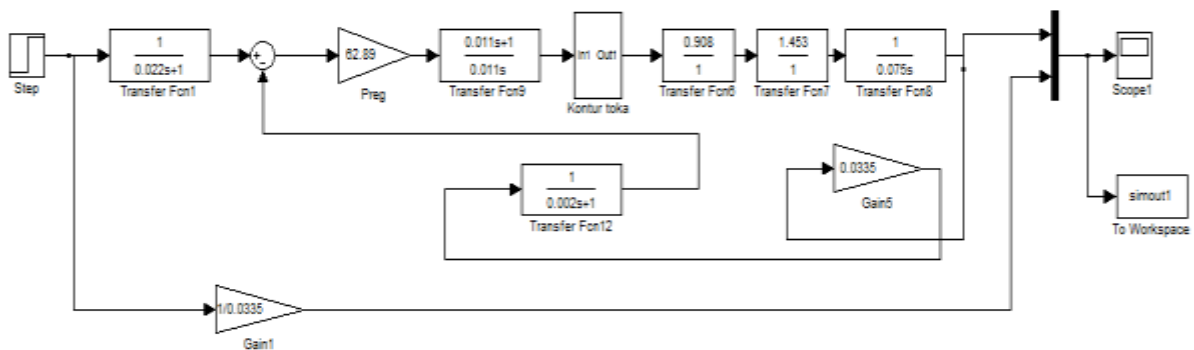


Рисунок 36 – Имитационная модель контура скорости с ПИ-регулятором (с фильтром на входе)

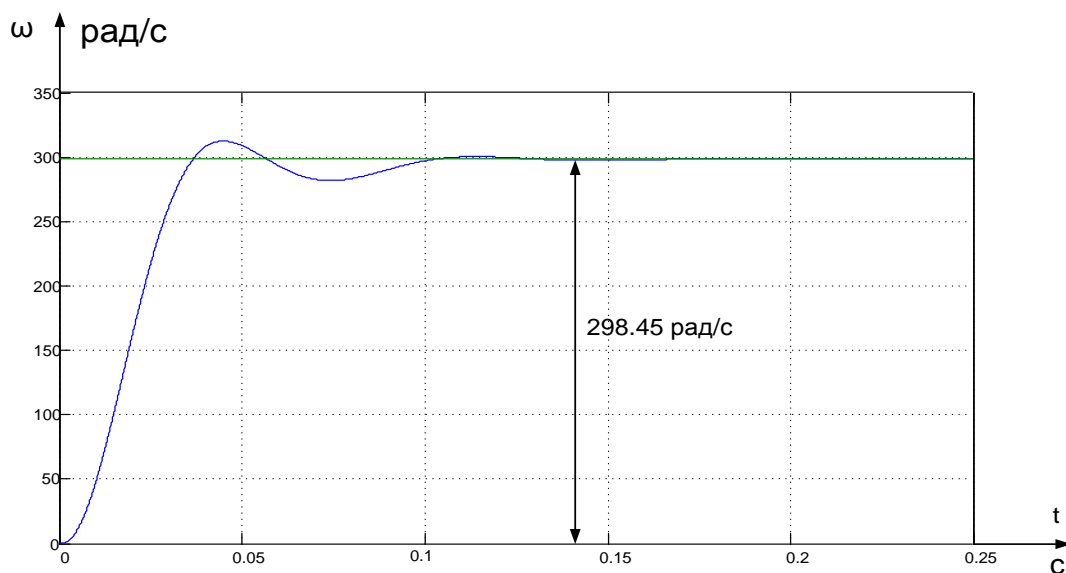


Рисунок 37 – Переходная характеристика контура скорости по имитационной модели рисунка 26.

## 5.4 Структурная схема нелинейной САУ РЭП асинхронного электропривода с векторным управлением

Структурная схема нелинейной САУ частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 38. Структурная схема ( рисунок 38 ) составлена на основании структурной схемы линеаризованной САУ электропривода и учитывая следующие основные нелинейности элементов системы управления электропривода:

- насыщение регулятора тока, потокосцепления и скорости

$$U_{PTMAXC} = \pm 10B,$$

$$U_{P\psi MAXC} = \pm 10B,$$

$$U_{PCMAXC} = \pm 10B;$$

- постоянное по величине ограничение максимального тока электропривода в переходных режимах и кратковременных нагрузках, которое достигается ограничением выходного напряжения регулятора скорости на уровне

$$U_{PCDOП}(\omega) = \pm k_T \cdot I_{ЭП MAXC}(\omega),$$

ограничение выходного напряжения инвертора  $E_{И} = \sqrt{2} \cdot U_{ИН}$  ;

реактивный характер нагрузки  $M_C(\omega) = M_C \cdot \text{sign } \omega$ ,

где величина момента изменяется от  $(M_{СХХ} + M_{СДВ})$  до  $(M_{С MAXC} + M_{СДВ})$  ;

нелинейная зависимость задания потокосцепления  $U_{C\psi}$  во второй зоне регулирования скорости от величины задания скорости  $U_{ЗС}$ .

Исследование на имитационной модели нелинейной САУ электропривода проводятся с целью оценки влияния величины задания скорости  $U_{ЗС}$  и момента  $M_C$  на характер переходных процессов и динамические показатели качества работы электропривода с учетом ограничения выходных напряжений регуляторов и преобразователя частоты.

По результатам имитационных исследований могут быть внесены изменения в настройку контуров регулирования САУ электропривода,

введены корректирующие цепи или выбраны компромиссные настройки с учетом изменяющихся параметров силовой части электропривода, например, момента инерции, потокосцепления и т.д.

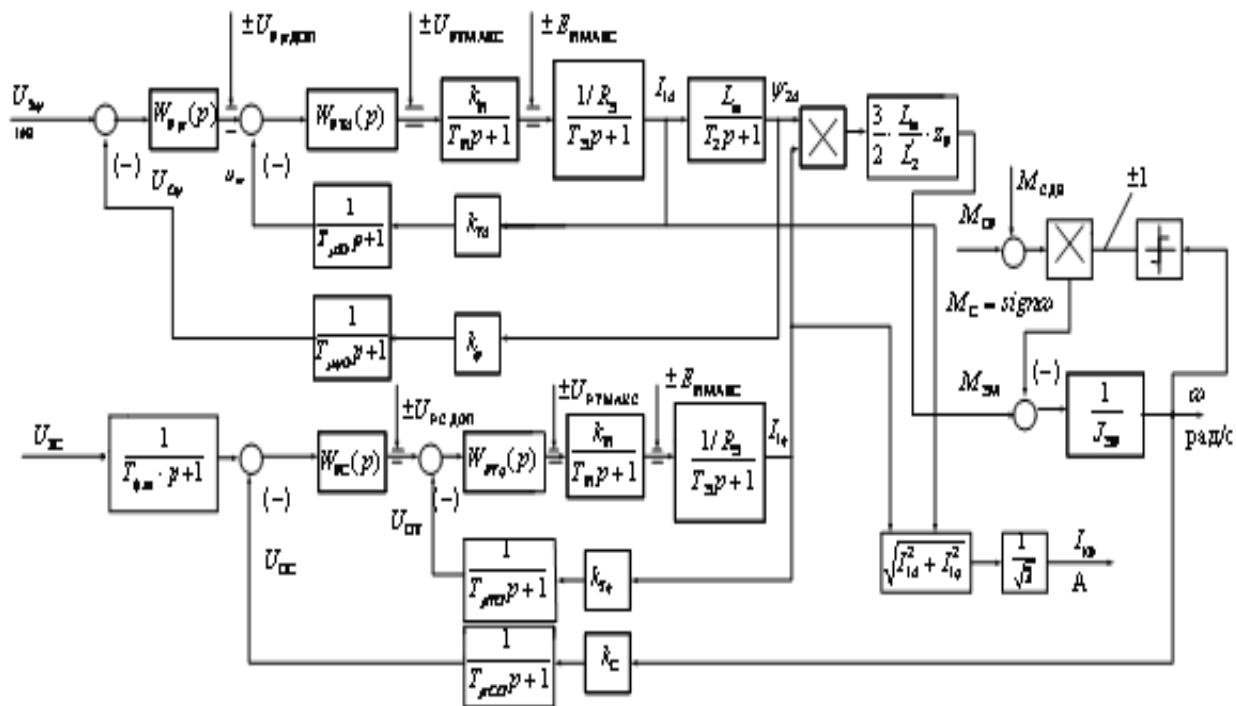


Рисунок 38 – Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно - регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении.

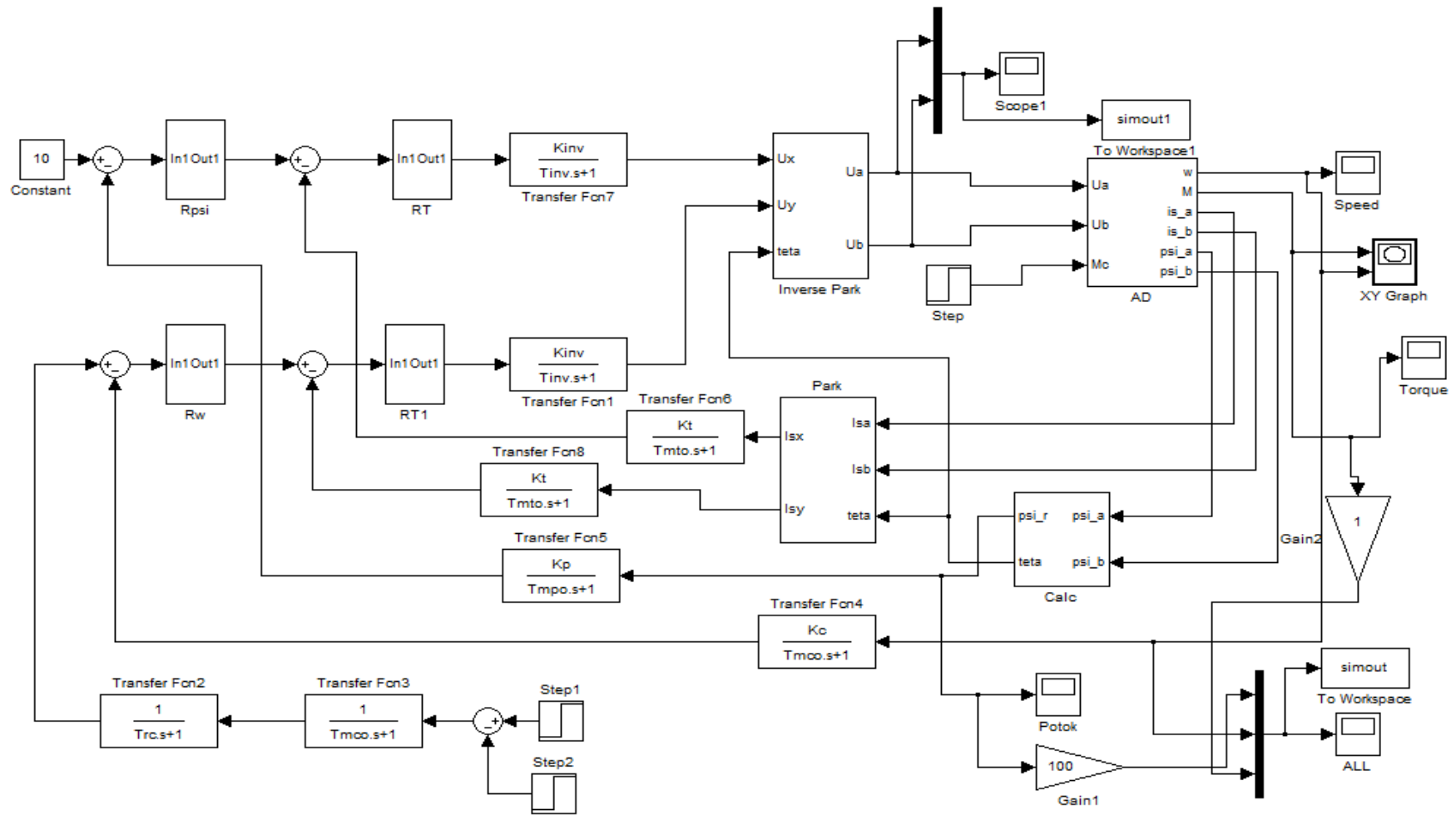


Рисунок 39 - Имитационная модель нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

**Описание схемы:**

**Модель асинхронного двигателя:**

Модель с ориентацией системы координат по вектору потокосцеплений ротора. Структурная схема модели асинхронного двигателя построена на системе уравнений

$$U_s = L_\sigma p I_s + (R_\sigma + \omega_k B L_\sigma) I_s + (\omega k_r B - k_r a_r + p k_r) \psi_r;$$

$$k_r R_r I_s = p \psi_r + (a_r + \beta_k B) \psi_r;$$

$$\psi_m + L_{r\sigma} I_m = \psi_r + C L_{r\sigma} I_s;$$

$$\psi_m = F_m I_m;$$

$$\beta_k = p(\theta_k - \theta);$$

$$I_s^{Fs} = A_s^{-1} I_s.$$

При допущении  $l_m = \text{const}$  структурная схема модели значительно упрощается и приобретает вид, представленный на рисунке 40.

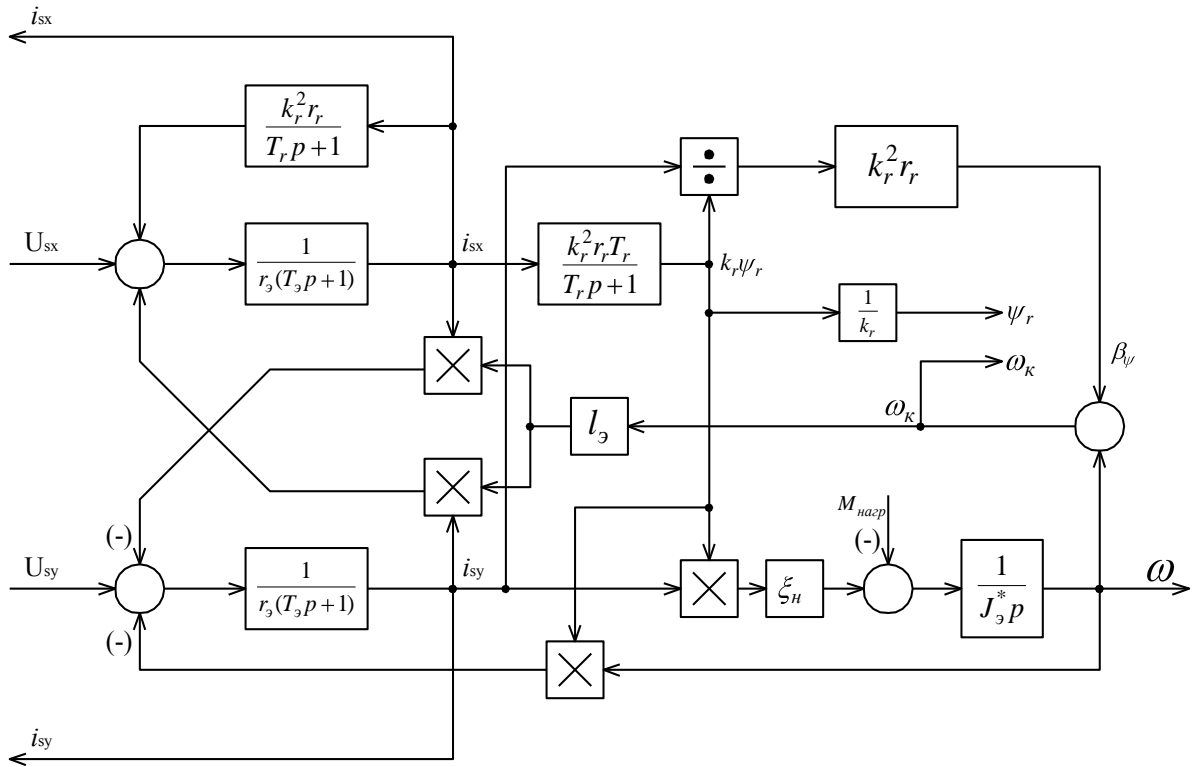


Рисунок 40 – Структурная схема модели асинхронного двигателя

### Прямой координатный преобразователь:

Прямой координатный преобразователь (ПКП) осуществляет последовательные преобразования от вращающейся декартовой системы координат  $x, jy$  к неподвижной системе координат – с координатными осями  $a, jb$ , а затем к трехфазной –  $A, B, C$  системе координат.

Преобразование напряжений из вращающейся  $x, jy$  к неподвижной  $a, jb$  системе координат производится в соответствии с соотношениями:

$$U_a = U_x \cos \theta - U_y \sin \theta$$

$$U_b = U_x \sin \theta + U_y \cos \theta$$

Преобразование напряжений из неподвижной системы координат  $a, jb$  в трехфазную  $A, B, C$  производится в соответствии с уравнениями:

$$U_A = U_a; U_B = -\frac{1}{2}U_a + \frac{\sqrt{3}}{2}U_b; U_C = -\frac{1}{2}U_a - \frac{\sqrt{3}}{2}U_b$$

Структурная схема последовательности преобразования напряжений прямым координатным преобразователем из вращающейся системы координат  $x, jy$  в неподвижную  $a, jb$ , а затем в трехфазную  $A, B, C$  систему координат приведена на рисунке 41:

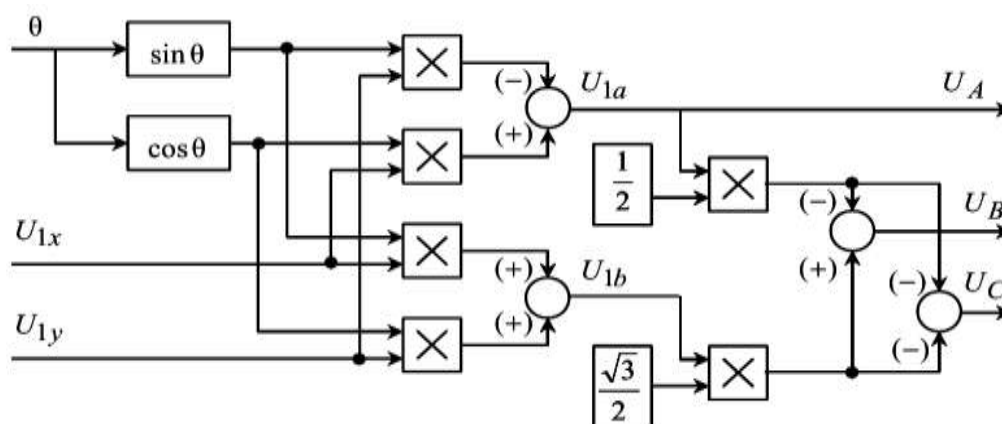


Рисунок 41 - Структурная схема последовательности преобразования прямым координатным преобразователем

Прямое координатное преобразование выполняется микропроцессором электропривода в реальном масштабе времени. Для прямого координатного преобразования необходимо определять

мгновенные значения угла поворота  $\theta$  между вращающимися  $x$ ,  $jy$  и неподвижными  $a$ ,  $jb$  осями систем координат, которые рассчитываются по выражению

$$\theta = \int_0^t \omega_\kappa dt$$

где  $\omega_\kappa$  – скорость вращения координатной сетки вращающейся системы координат.

### **Обратный координатный преобразователь:**

Обратный координатный преобразователь (ОКП) осуществляет последовательные преобразования от трехфазной системы координат  $A, B, C$  к неподвижной декартовой системе координат  $a, jb$ , а затем к вращающейся системе координат – с координатными осями  $x, jy$ .

Преобразование напряжений из трехфазной системы координат  $A, B, C$  в неподвижную правую декартовую систему координат  $a, jb$  производится в соответствии с выражениями:

$$U_a = \operatorname{Re} \bar{U} = U_A$$

$$U_b = \operatorname{Im} \bar{U} = \frac{2}{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} U_B - \frac{\sqrt{3}}{2} U_C \right) = \frac{U_B - U_C}{\sqrt{3}}$$

Последовательность преобразования напряжений из неподвижной системы координат  $a, jb$  к вращающейся системе координат  $x, jy$  производится в соответствии с соотношениями:

$$U_x = U_a \cos \theta + U_b \sin \theta$$

$$U_y = -U_a \sin \theta + U_b \cos \theta$$

где  $\theta$  – угол между действительными осями вращающейся  $x, jy$  и неподвижной  $a, jb$  системами координат.

Структурная схема последовательности преобразования обратным координатным преобразователем переменных из трехфазной системы координат  $A, B, C$  в неподвижную систему координат  $a, jb$ , а затем во вращающуюся –  $x, jy$  приведена на рисунке 42:

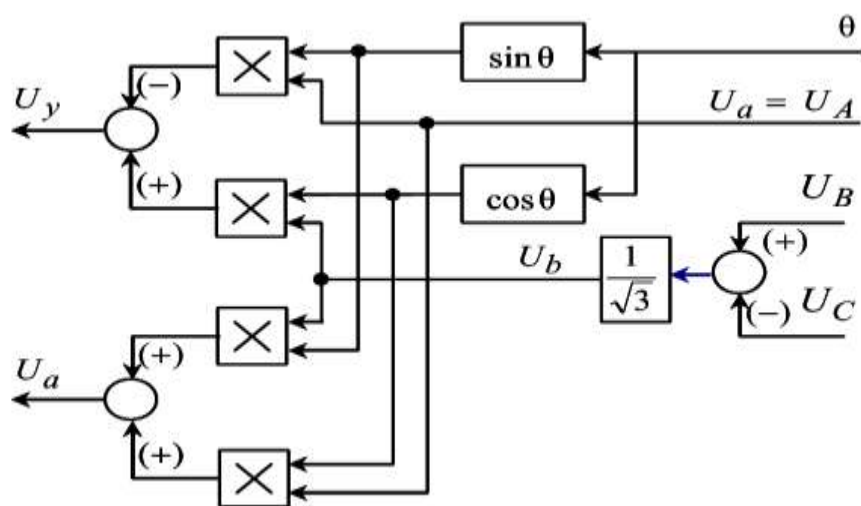


Рисунок 42 - Структурная схема последовательности преобразования обратным координатным преобразователем

Обратное координатное преобразование выполняется микропроцессором электропривода в реальном масштабе времени.

**Идеализированный преобразователь частоты:**

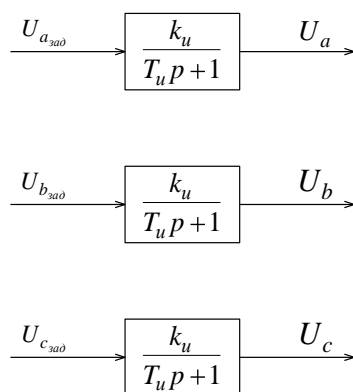


Рисунок 43 – Структурная схема идеализированного преобразователя частоты

$k_u$  – коэффициент передачи инвертора.

Для системы относительных единиц  $k_u = 1$ .

$T_u$  – постоянная времени инвертора. Определяется несущей частотой коммутации транзисторов ( $f_n=5$  кГц) с учётом относительного времени ( $t_{\sigma}=1/314.15$  с)

$$T_u = \frac{1}{f_n} t_{\sigma} = \frac{1}{5000} \cdot 314.15 = 0.063.$$



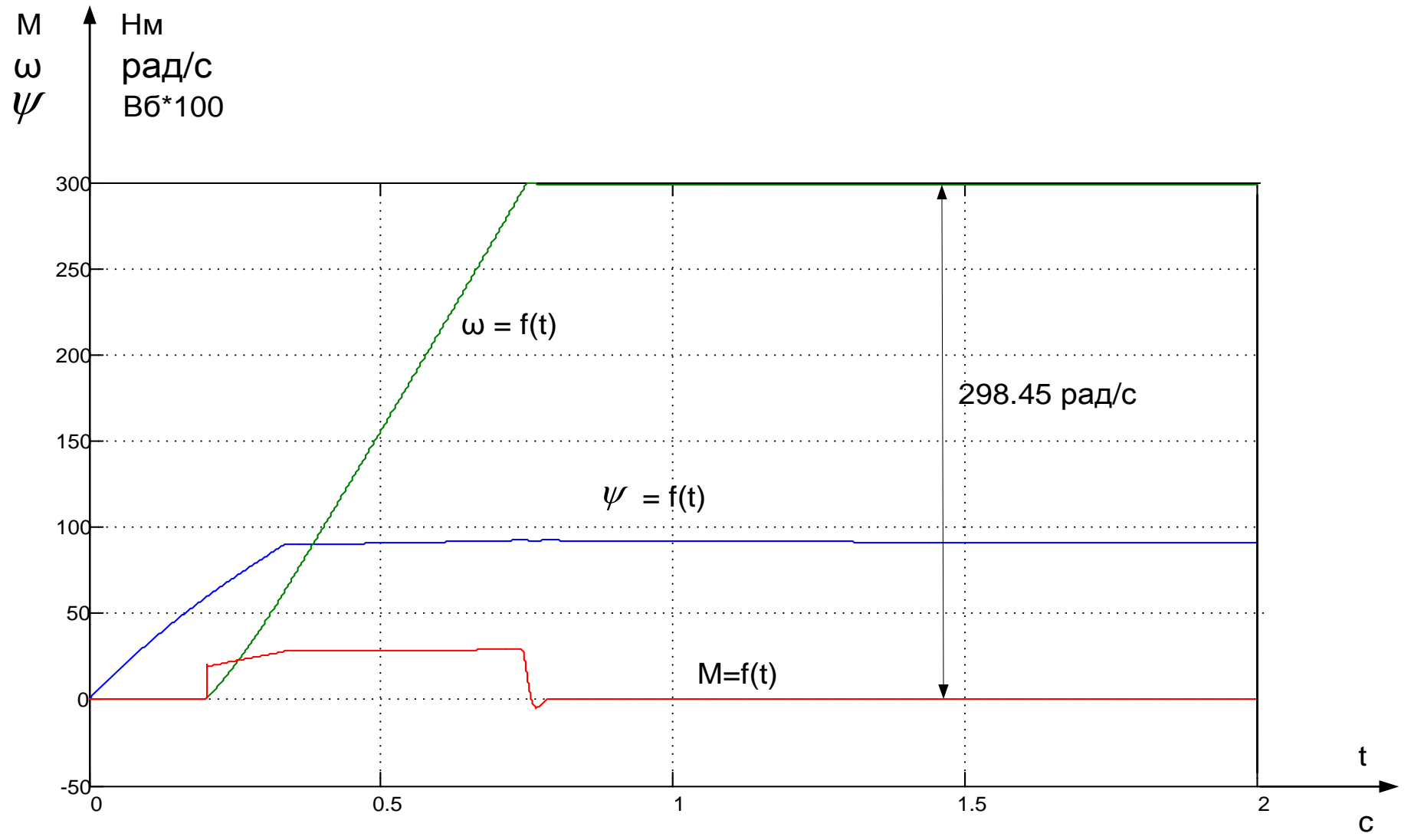


Рисунок 44 – Переходная характеристика нелинейной непрерывной САУ на холостом ходу

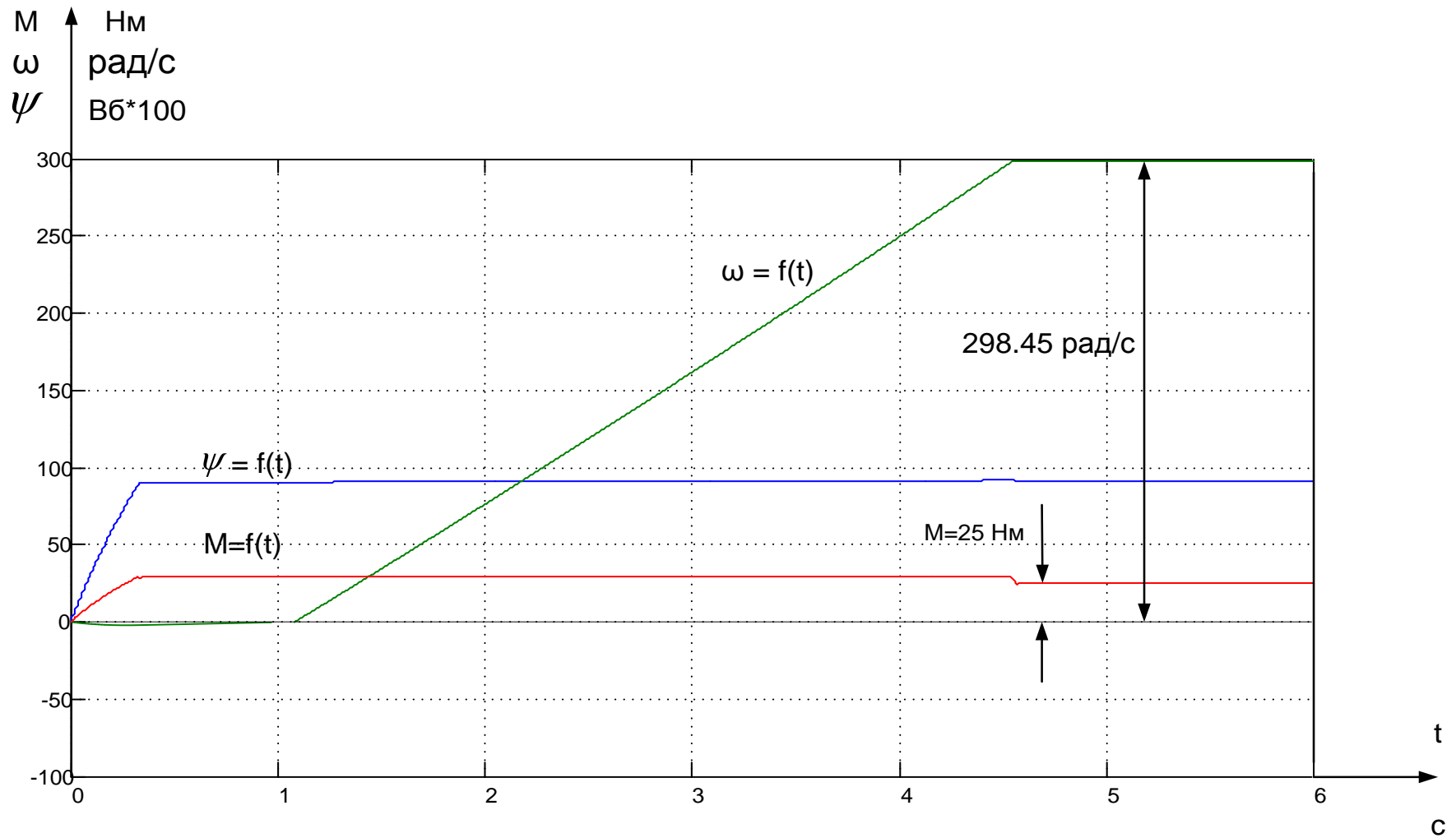


Рисунок 45 – Переходная характеристика нелинейной непрерывной САУ при отработке возмущающих воздействий ( $M_c=25$  Нм)

## **6 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Целью данного раздела является обоснование целесообразного использования технического проекта, выполняемого в рамках выпускной квалификационной работы, при этом рассматриваются планово-временные и материальные показатели процесса проектирования.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности выполнения технического проекта;
- планирование технико-конструкторских работ;
- определение ресурсной эффективности проекта.

### **6.1. SWOT-анализ проекта**

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [14].

Применительно к проектируемой АСР уровня, 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 13.

Таблица 13- Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны проекта:</b>  С1. Высокая энергоэффективность и энергосбережение технологии.  С2. Экологичность технологии.  С3. Квалифицированный персонал.  С4. Повышение безопасности производства  С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования	<b>Слабые стороны проекта:</b>  Сл1. Трудность монтажа системы  Сл2. Дороговизна оборудования  Сл3. Сложность эксплуатации электрооборудования
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1. Увеличение производительности электрооборудования</p> <p>В2. Уменьшение себестоимости путем внедрения новых технологий.</p> <p>В3. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые на производстве .</p> <p>В4. Появление более простых универсальных электрических систем .</p>	<p>С1С2С3С4;</p> <p>С1С5;</p> <p>С5;</p> <p>С1С4С5;</p>	<p>Сл1;</p> <p>Сл2;</p> <p>Сл1Сл2Сл3;</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>У1. Отсутствие спроса на технологии производства</p> <p>У2. Ограничения на экспорт технологии</p> <p>У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции</p>	<p>С3;</p> <p>С5;</p>	<p>Сл1Сл2;</p> <p>Сл2;</p>

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

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения : С – сильные стороны проекта; Сл – слабые стороны проекта; В – возможности; У – угрозы; «+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие;

Таблица 14- Матрица SWOT

Возможности	Сильные стороны проекта					
		С1	С2	С3	С4	С5
	В1	+	+	+	+	-
	В2	+	-	-	-	-
	В3	-	+	-	-	+
	В4	+	+	-	+	+
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2	Сл3		
	В1	-	-	-		
	В2	+	+	+		
	В3	-	+	-		
	В4	-	-	-		

Таблица 15- Матрица SWOT

Угрозы	Сильные стороны проекта					
		С1	С2	С3	С4	С5
	У1	-	-	+	-	-
	У2	+	-	-	+	-
	У3	-	-	-	+	+
	У4	+	-	+	-	+
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2	Сл3		
	У1	+	+	-		
	У2	-	-	+		
	У3	-	+	+		
	У4	-	-	+		

В результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные (высокая энергоэффективность и энергосбережение технологии и повышение безопасности производства.) и слабые (трудность монтажа системы) стороны выбора технического проекта, проведена оценка надежности и возможностей данного проекта. Анализ интерактивных матриц, приведенных в таблицах 14 и 15, показывает, что угрозы имеют малую вероятность осуществления, что говорит о надежности проекта.

## **6.2. Организация работ технического проекта**

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

### **6.2.1. Структура работ в рамках технического проектирования**

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой могут входить преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения проектирования и произведено распределение исполнителей по видам работ представленные в таблице 19.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ:

№ 1 – Составление и утверждение технического задания –изучение первичной информации об объекте, формулировку требований к техническому проекту, составление задания и плана на работу;

№ 2 – Подбор и изучение материалов по теме – ознакомление с предметом работы, изучение различных источников, касающихся различных сторон технического проекта;

№ 3 – Выбор оборудования – электродвигателя, преобразователя частоты, входного и выходного фильтра, автоматического выключателя, магнитных пускателей;

№ 4 – Построение характеристик – расчет статических характеристик для разомкнутой системы регулируемого электропривода, расчет естественных и искусственных характеристик;

№ 5 – Определение дополнительных параметров – расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода и параметров схемы замещения; оптимизация контуров тока, потокосцепления, скорости, построение структурных схем и переходных характеристик;

№ 6 – Оценка эффективности полученных результатов – проверка соответствия выполненного проекта исходным требованиям с учетом ресурсо- и энергоэффективности;

№ 7 – Оформление пояснительной записки;

№8 - Сдача проекта – окончательная проверка руководителем, устранение недочетов дипломником, подготовку к защите и защиту проект.

Таблица 16 - Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Исполнители
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления технического проектирования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	3	Выбор оборудования	Научный руководитель, инженер,
	4	Построение характеристик	Научный руководитель, инженер

	5	Определение дополнительных параметров	Научный руководитель, инженер
Обобщение и оценка результатов	6	Оценка эффективности полученных результатов	Научным руководителем, инженер
Оформление отчета по техническому проектированию	7	Составление пояснительной записки	Инженер
	8	Сдача проекта	Научный руководитель, инженер

### 6.2.2. Определение трудоемкости выполнения технического проекта

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

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов. Методика оценки приведена в [14].

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожи}$  используется следующая формула [14]:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{мини} + 2t_{макси}}{5},$$

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

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

$t_{макси}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.



В таблице 17 приведены ожидаемая трудоемкость и время выполнения работ.

Таблица 17 - Определение трудоемкости выполнения работ

Название работы	Минимально возможная трудоемкость выполнения заданной <i>i</i> -ой работы		Максимально возможная трудоемкость выполнения заданной <i>i</i> -ой работы		Максимально возможная трудоемкость выполнения заданной <i>i</i> -ой работы	
	Науч. рук-ль	Инженер	Науч. рук-ль	Инженер	Науч. рук-ль	Инженер
1 Составление и утверждение технического задания	1	-	1	-	1	-
2 Подбор и изучение материалов по теме	-	8	-	16	-	14
3 Выбор электрооборудования	1	18	1	25	1	22
4 Построение характеристик	2	15	2	25	2	19
5 Определение дополнительных параметров	1	10	2	14	2	11
6 Оценка эффективности полученных результатов	1	5	1	7	1	6
7 Составление пояснительной записки	-	20	-	25	-	22
8.Сдача проекта	3	6	3	8	3	7

На основе данных строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках

технического проекта с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Исходя из 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).

Далее, по диаграмме Ганта можно предварительно оценить показатели рабочего времени для каждого исполнителя табл.18.

Продолжительность выполнения проекта в рабочих днях составит 101 дней. Из них:

101 дней – продолжительность выполнения работ инженером;

10 дней – продолжительность выполнения работ руководителем.

### **6.3. Составление сметы затрат на разработку технического проекта**

Смета затрат – это полный расчет затрат на создание технического проекта.

Смета затрат включает в себя:

- материальные затраты;
- полную заработную плату исполнителей технического проекта;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

Таблица 18 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исполнитель работ	$T_{pib}$ раб. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Фев.			Март			Апр.			Май			Июнь
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1		
1	Составление и утверждение ТЗ	Руководитель	1	■												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	14	■	■											
3	Выбор оборудования	Инженер	22		■	■	■									
		Руководитель	1		■											
4	Построение характеристик	Инженер	19				■	■	■							
		Руководитель	2				■									
5	Определение дополнительных параметров	Инженер	11						■	■						
		руководитель	1						■							
6	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер	6									■				
		Руководитель	1									■				
7	Составление ПЗ	Инженер	22									■	■	■		
8	Сдача проекта	Инженер	7											■		
		руководитель	3											■ ■		

### 6.3.1. Расчет материальных затрат

Под материальными затратами в данном случае следует понимать затраты на канцелярские товары, печать с электронных носителей. Их стоимость включается в накладные расходы.

### 6.3.2. Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую 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.

Полная заработная плата сотрудника ТПУ:

$$Z_{полн} = Z_{осн} + Z_{доп} ,$$

где

$Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата .

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} ,$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы .

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат.

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  руководителя от предприятия рассчитывается по формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p ,$$

где

$Z_{осн}$  – основная заработная плата работника, руб.;

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых техническим работником, раб.дн. (таблица 17);

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 19.

Среднедневная заработная плата для сотрудника ТПУ рассчитывается по формуле:

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

где

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

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

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

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

Таблица 19 - Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	Доплата, руб	Доплата с учетом районного коэффициента, руб	Месячный должностной оклад работника, руб	Среднедневная заработная плата, руб.	Продолжительность работ, раб.дн.	Основная заработная плата, руб.
Руководитель	23265	2200	7640	33105	1273	10	12730
Инженер	8000	-	2400	10400	400	101	40400
Итого $Z_{\text{осн}}$ , руб.							53130

Таблица 20- Расчет дополнительной заработной платы

Исполнители	Коэффициент дополнительной заработной платы	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Полная заработная плата, руб.
Руководитель	0,15	12730	1870	14600
Инженер	0,12	40400	4800	45200
Итого, руб.		53130	6770	59800

### 6.3.3. 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:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

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

На 2016 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Отчисления во внебюджетные фонды:

$$Z_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot (53130 + 6760) = 18,1 \text{ тыс.руб.}$$

### 6.3.4. 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.

Величина коэффициента накладных расходов в условиях ТПУ принята в размере 16%.

### 6.3.5. Формирование сметы технического проекта

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 технический проект приведен в таблице 21.

Таблица 21 - Определение сметы затрат на технический проект

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
1. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	59,8	64,5
2. Отчисления во внебюджетные фонды	18,1	19,5
3. Накладные расходы	15,1	16,0
Итого	93,0	100,0

Исходя из представленной выше таблицы, можно сделать вывод, что общие затраты на реализацию технического проекта составят 93,0 тыс. руб., из которых большую часть (64,5%) составят затраты на оплату труда. Все результаты проекта могут быть реализованы.

## 6.4 Определение ресурсоэффективности проекта

Определение конкурентоспособности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

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

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент разработки;

$b_i$  – бальная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Для оценки ресурсоэффективности проекта были подобраны следующие критерии эффективности:

- Производительность труда – показатель, характеризующий его результативность. Рост производительности труда пользователя осуществляется, благодаря повышению уровня автоматизации, который способствует увеличению производительности труда предприятия.
- Удобство в эксплуатации – критерий, гарантирующий эксплуатационную надежность оборудования.
- Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в условиях применения, технического обслуживания.
- Безопасность – свойство системы сохранять с некоторой вероятностью безопасное состояние при выполнении заданных функций в условиях, установленных нормативно-технической документацией (монтаж, эксплуатация и проведение ремонтных работ).
- Простота в эксплуатации – система автоматизированных устройств должна обеспечиваться ясностью и простотой схемы,



чтобы персонал даже средней квалификации мог успешно выполнять все необходимые операции.

- Конкурентоспособность продукта – способность продукции быть привлекательной по сравнению с другими изделиями аналогичного вида и назначения, благодаря лучшему соответствию ее качественных и стоимостных характеристик .
- Уровень проникновения на рынок – процесс увеличения объема продажи, за счет активной маркетинговой деятельности.

Расчет показателя конкурентоспособности приведен в таблице 22.

Таблица 22 - Оценочные критерии проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Бальная оценка разработки
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4
3.Надежность	0,15	5
4.Безопасность	0,2	5
5.Простота эксплуатации	0,1	4
6.Конкурентоспособность продукта	0,1	4
7.Уровень проникновения на рынок	0,2	4
ИТОГО	1,0	30

$$I_{p-исп1} = 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,2 = 4,6$$

Показатель конкурентоспособности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-бальной шкале), что говорит об эффективности использования

технического проекта. Высокие баллы надежности и помехоустойчивости позволяют судить о надежности системы.

Таким образом, выполнив поставленные задачи по данному разделу, можно сделать следующие выводы:

- при планировании технических работ был разработан график занятости для исполнителей проекта, составлена ленточная диаграмма Ганта, которая позволяет оценить и лучше спланировать рабочее время исполнителей.
- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальный бюджет затрат на реализацию технического проекта.
- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала хороший результат (4,25 по 5-бальной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

Реализация данного технического проекта позволяет увеличить эффективность производства, как социальную, путем улучшения безопасности, так и ресурсосберегающую, путем внедрения более универсального, но не менее надежного оборудования, требующего меньше затрат при эксплуатации.

## **7 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Целью данного раздела является анализ опасных и вредных факторов при работе горизонтально-фрезерного станка (по нормативно-технической документации на оборудование ПО «НМЗ», инструментального цеха), разработка требований и мероприятий по технике безопасности, производственной санитарии, анализ пожарной безопасности и выработка мероприятий, направленных на предотвращение пожаров.

### **7.1 Характеристика помещения**

Исследуемый электропривод работает в помещении, которое согласно ПУЭ относится к помещению без повышенной опасности, сухое не запылённое. Для безопасной работы человека большое значение имеет покрытие, сопротивление которого более 0,2 МОм и относится к токонепроводящему. Помещение цеха выполнено из негорючих материалов первой степени огнестойкости. Здание цеха состоит из сборных железобетонных конструкций, которые относятся к негорючим материалам первой степени огнестойкости и имеют предел огнестойкости R 120 (СНиП 21-01-97 Пожарная безопасность зданий и сооружений. М.: Госстрой России, 1997-с.12)

Напряжение питания линии 220 и 380 В. Линия относится к электроустановкам до 1000 В. Обслуживание поручается лицам, имеющим квалификацию, соответствующую действующим требованиям.

### **7.2 Анализ опасных и вредных факторов**

Основные факторы относятся к физической группе воздействий. Данные травмы могут возникнуть:

- при попадании частей одежды и волос в крутящиеся механизмы линии;
- возможность поражения электрическим током.

Опасности психологической группы связаны с шумом и монотонностью в обслуживании станка, что приводит к снижению внимания, повышению травматизма.

К вредным факторам относятся:

- вибрация оборудования;
- неблагоприятный микроклимат.

В таблице 23 приведены уровни звукового давления, измеренные в восьми октавных полосах со среднегеометрическими частотами.

Таблица 23 - Уровни звукового давления

Рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами,									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Постоянные рабочие места и рабочие зоны в производственных помещениях на предприятии	<b>107</b>	<b>95</b>	<b>87</b>	<b>82</b>	<b>78</b>	<b>75</b>	<b>73</b>	<b>71</b>	<b>69</b>	<b>80</b>

Необходимые условия для снижения шума:

- На данном участке, при выполнении мероприятий по сокращению проникновения шумов на улицу, световые проемы целесообразно закладывать стеклоблоками. Вредным производственным фактором является вибрация - механические

колебания твердых тел, передаваемые организму человека. Они могут быть причиной расстройства сердечнососудистой и нервной системы.

### 7.3 Техника безопасности

Общие требования безопасности, предъявляемые к металлообрабатывающему оборудованию, определены ГОСТ 12.2.009–75, а дополнительные требования, вызванные особенностями их конструкции и условий эксплуатации, указываются в нормативно-технической документации на оборудование. К отдельным станкам стандартом обусловлены дополнительные требования безопасности.

Защитные устройства, ограждающие зону обработки, должны ограждать работающего от отлетающей стружки и смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Конструкция защитных устройств не должна ограничивать технологических возможностей станка и вызывать неудобства при работе, уборке, наладке, а при открывании — не загрязнять пол смазочно-охлаждающей жидкостью

Во всех случаях крепление защитных устройств должно быть надежным и не допускать самооткрытия.

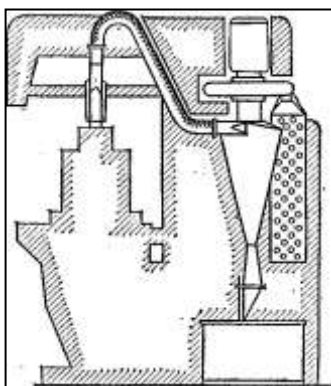


Рисунок 46 – Оборудование фрезерного станка для удаления из зоны резания стружки и пыли

К работе в цехе допускаются лица, хорошо изучившие правила обслуживания и управления станком и прошедшие инструктаж по соблюдению правил техники безопасности.

К работам по наладке электропривода допускаются не менее двух человек по письменному разрешению руководителя.

При настройке схем, замене предохранителей и т.д. необходимо использовать приборы и средства защиты, предназначенные для работ на электроустановках до 1000 В. Средства защиты, к которым относятся резиновые галоши, коврики, изоляция инструмента и т.д., должны проверяться перед каждым использованием. При наладке привода необходимо применение запрещающих и предупреждающих плакатов. Испытание электропривода осуществляется сначала на холостом ходу затем под нагрузкой.

Для безопасной работы механической части электропривода необходимо иметь ограждения, обладающие соответствующей прочностью.

Все токопроводящие части электропривода, проводка должны быть ограждены и не доступны для случайного прикосновения. С этой целью электропривод размещается в корпусе, защищенном от доступа. Часть проводки в рабочей зоне линии заключается в металлорукав или в специальные защитные щитки. Все металлические части, которые могут оказаться под напряжением, должны быть заземлены. Электропривод должен быть обеспечен аварийным выключателем для полного снятия напряжения с электродвигателя, проводки и приборов.

#### **7.4 Производственная санитария**

Неблагоприятные условия окружающей среды, вредно воздействуют на организм работающего, снижают реакцию, повышают утомляемость. К

производственным вредностям относятся неблагоприятный микроклимат, производственная пыль, вредные газы и пары, недостаточная освещенность.

Категория работ по энергозатратам, связанная с производством нагревательных ТЭНов, IIa (физическая средней тяжести, энергозатраты до 200 ккал/ч) [21].

Микроклимат производственного помещения согласно СанПиН 2.2.4.548-96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» характеризуются:

• температурой воздуха:                      Оптимальное значение:                      Допустимое значение:

- в холодный период года                       $t=(19\div 21)^{\circ}\text{C}$ ;                       $t=(17\div 23)^{\circ}\text{C}$

- в тёплый период года                       $t=(18\div 20)^{\circ}\text{C}$ ;                       $t=(18\div 27)^{\circ}\text{C}$ ;

• влажностью воздуха:

- в холодный период года                       $(40\div 60)\%$ ;                       $(15\div 75)\%$ ;

- в тёплый период года                       $(40\div 60)\%$ ;                       $(15\div 675)\%$ ;

Система отопления цеха - водяная, со встроенными в строительные конструкции нагревательными элементами.

Работа выполняется в спецодежде. Вспомогательные помещения имеют гардеробное оборудование и душевые комнаты. Производство относится к третьей категории вибрации, производственные шумы не значительны.

Безопасность на производстве в значительной мере зависит от освещения. Основная задача освещения на производстве - создание наилучших условий для зрения трудящихся. Эту задачу можно решить только осветительной системой. Освещённость на рабочем месте должна соответствовать

характеру зрительной работы. В данном случае работа на вертикально-фрезерном станке относится к зрительной работы IV Г (СНиП 23-05-95). Требуемая норма освещения  $E_{НОР}=200$  ЛК. Для создания  $E_{НОР}$  применяется совмещенное освещение: естественное и общее люминесцентное освещение.

Для создания рациональных условий освещения важное значение имеет тщательный и регулярный уход за установками естественного и искусственного освещения. Необходимо следить за исправностью схем включения, регулярно заменять перегоревшие лампы. На предприятиях должно быть специально выделенное лицо, заведующее эксплуатацией освещения.

На производстве для защиты органов зрения от ультрафиолетового и инфракрасного излучения и слепящей яркости видимого света применяют защитные очки.

Для защиты органов слуха применяют: наушники, антифоны, беруши.

На предприятиях необходимо регулярно проводить организационные мероприятия по обеспечению безопасности труда.

### **7.5 Расчет искусственного освещения**

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

Помещение имеет размеры: длина  $A=16$ м, ширина  $B=8$ м, высота  $H=5$ м.  
Площадь помещения:

$$S = A \times B = 16 \times 8 = 128 \text{ м}.$$

В цехе производятся работы средней точности, (минимальная величина различия составляет 0.5-1мм).



Рекомендуемая, при освещенность помещения среднем контроле различия с тёмным фоном, составляет  $E_0=200\text{лк}$  [22], учитывая коэффициент запаса (загрязнение светильника)  $K=1,5$ , получаем освещенность в помещении:

$$E = E_0 \times K = 200 \times 1,5 = 300\text{лк} .$$

Коэффициент отражения светового потока от потолка, стен и пола соответственно равны:  $q_{\text{п}}=70\%$ ,  $q_{\text{с}}=50\%$ ,  $q_{\text{з}}=10\%$ . Уровень от рабочей поверхности до потолка составляет:

$$h = H - h_p = 5 - 1,1 = 3,9\text{м} ,$$

где  $h_p$  - высота рабочей поверхности.

Для освещения используются светильники типа ЛБ-40, для которых оптимальное отношение световых потоков составляет  $g=1,3$ . Расчетная длина между двумя рядами светильников:

$$L = g \times h = 1,3 \times 3,9 = 5,07\text{м} .$$

Число рядов светильников:

$$n = \frac{B}{L} = \frac{8}{5,07} = 1,58 ,$$

где  $B$  – ширина помещения.

Выбираем  $n=2$  ряд светильников. Тогда индекс освещения:

$$i = \frac{S}{(A+B) \times n} = \frac{128}{(16+8) \times 2} = 2,7 .$$

Зная коэффициенты отражения световых потоков от потолка, стен, пола в лаборатории, можно определить коэффициент использования светового потока:

$$\eta = \frac{q_n + q_c + q_3}{3} = \frac{70\% + 50\% + 10\%}{3} = 43\%.$$

Световой поток лампы ЛБ-40 составляет  $F_0=2480\text{лм}$ . Тогда световой поток светильника, состоящего из двух ламп:  $F = 2 \times F_0 = 2 \times 2480 = 4960\text{лм}$ .

Определим необходимое число светильников в ряду:

$$N = \frac{E \times S \times Z}{n \times F \times \eta \times \gamma} = \frac{300 \times 128 \times 1}{2 \times 4960 \times 0,43 \times 1} = 9,002 \approx 9,$$

где  $Z=1$ —коэффициент непрерывности;

$\gamma=1$ —коэффициент затемнения.

При длине светильника  $l_{\text{св}}=1,27\text{м}$  [22], их общая длина составляет:

$$l_{\text{общ}} = N \times l_{\text{св}} = 9 \times 1,27 = 11,43\text{м}.$$

Расстояние между светильниками

$$l = \frac{A - l_{\text{общ}}}{N + 1} = \frac{16 - 11,43}{9 + 1} = 0,46\text{м}.$$

Таким образом, в лаборатории необходимо установить девять светильников в один ряд.

## 7.6 Пожарная безопасность

Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага, наносящего материальный ущерб. Согласно ГОСТ 12.1.033-81 понятие пожарная безопасность означает состояние объекта, при котором с установленной вероятностью исключается возможность возникновения и развития пожара и воздействия на людей опасных факторов пожара, а также обеспечивается защита материальных ценностей.

Пожарная безопасность является одним из важнейших разделов охраны труда на производстве. Существенную роль в профилактике и

предотвращении пожаров играет правильный выбор режима работы электрооборудования с учётом класса по пожароопасности. Все производственные помещения по пожароопасности разделяются на пять основных категорий. В процессе получения изделия на линии видимые признаки, обуславливающие возникновения пожара, отсутствуют и, следовательно, данное производство согласно [16] можно отнести к категории «Д» (Категория пожароопасности Д предназначается для производств, в которых используются, в холодном состоянии, негорючие вещества и материалы). Помещение по пожарной опасности относится к классу П-1 (ПУЭ). Однако, в данном технологическом процессе пожар может возникнуть из-за таких короткого замыкания, вызывающих высокую температуру нагревания проводников, что приводит к их выплавлению из изоляционного материала. В этом отношении опасны недопустимые электрические перегрузки проводов и обмоток электрических машин. В местах плохого контакта соединения проводников вследствие большого переходного сопротивления выделяется большое количество тепла. Это приводит к повышению температуры и воспламенения изоляции. Были установлены общие требования пожарной безопасности к объектам различного назначения всех отраслей народного хозяйства при строительстве и эксплуатации. Пожарная безопасность должна обеспечиваться:

- системой предотвращения пожара;
- системой противопожарной защиты;
- организационно-техническими мероприятиями.

Системы предотвращения пожара и противопожарной защиты, обеспечивающих сохранность материальных ценностей, следует применять при наличии экономической эффективности от их внедрения. Экономическая эффективность должна рассчитываться с учётом вероятности возникновения пожара и возможного ущерба от него. Предотвращение пожара должно

достигаться предотвращением образования горючей среды. Это должно обеспечиваться минимально возможным применением горючих материалов.

Автоматические установки пожаротушения и установки пожарной сигнализации, введённые в объект, должны удовлетворять требованиям проектной документации и отраслевым стандартам.

Огнетушители различных видов относятся к классу переносных средств пожаротушения. Огнетушители, годные к эксплуатации, должны иметь бирку и маркировку и должны быть окрашены в красный цвет. Зарядка и перезарядка всех типов огнетушителей должна выполняться в соответствии с инструкциями по эксплуатации. Огнетушители должны располагаться в заметных и легко доступных местах, где исключено попадание солнечных лучей. Количество первичных средств пожаротушения определяется по [16]:

Таблица 24 - Количество первичных средств пожаротушения

Цех	S <sub>цеха</sub> , м <sup>2</sup>	Огнетушители		Ящик с песком, м <sup>2</sup>	Пожарный рукав + пожарный гидрант
		ОУ-5	ОП-10(з)		
Инструментальный цех	300	2	2	2	1

Пожарный ручной инструмент и инвентарь, размещенный на объекте, подлежит периодическому обслуживанию, включающему следующее:

1. Очистка от пыли, грязи и коррозии;
2. Восстановление соответствующей окраски.

Ящики с песком должны быть укомплектованы лопатой и иметь вместимость до 3 м<sup>3</sup>.

На рабочем месте каждый станок должен быть оснащен защищенной аппаратурой. Должна быть предусмотрена блокировка и защита на случай короткого замыкания и перегрузок, обеспечения возможности снятия напряжения всего оборудования с помощью расположенных вне помещения рубильников. Для курения должны быть отведены специальные места. В производственных помещениях должна обеспечиваться возможность эвакуации людей и оборудования в случае пожара. План эвакуации на случай пожара представлен на рисунке 31.

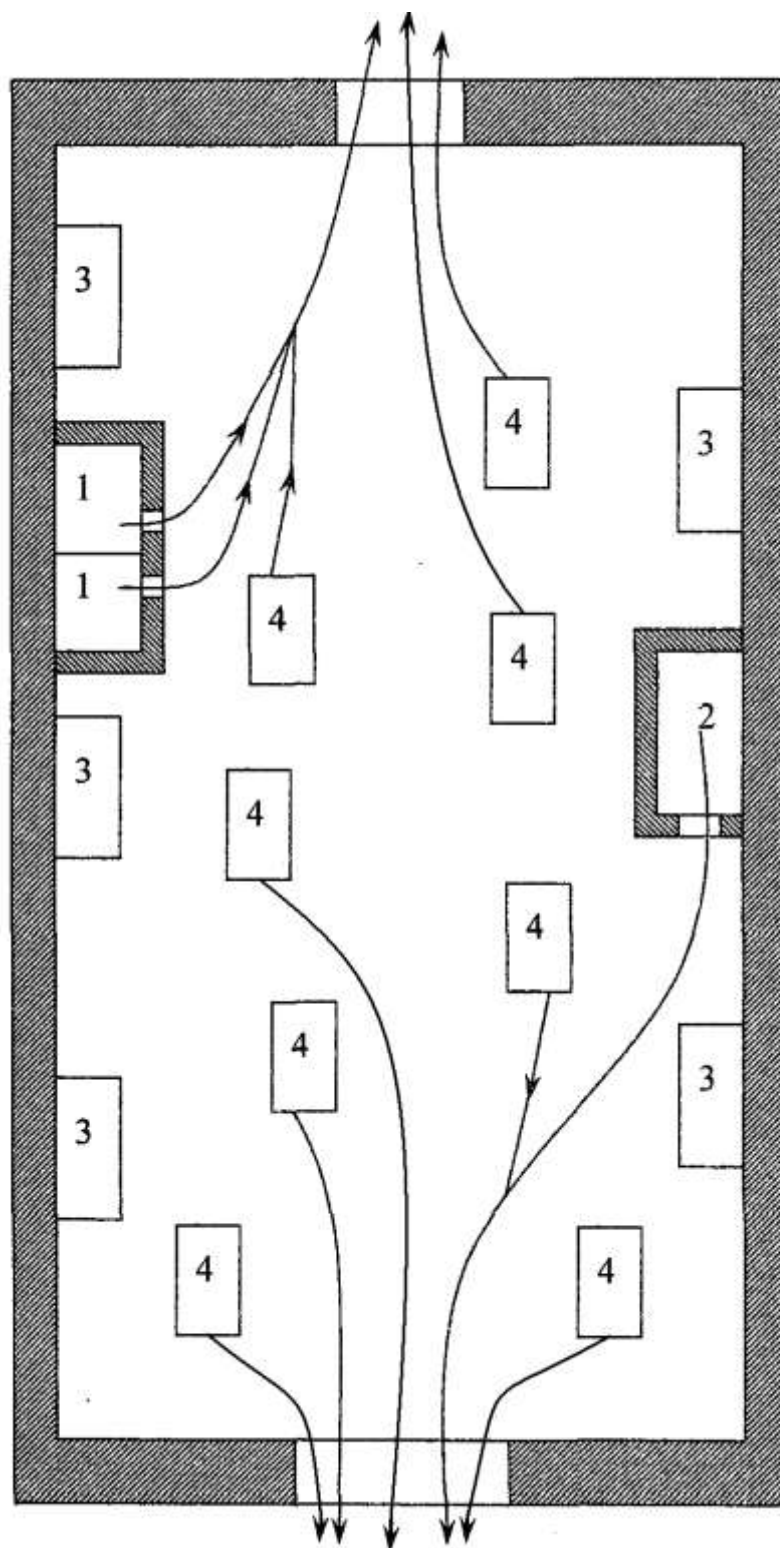


Рисунок 47 – План эвакуации на случай пожара: 1- руководство цеха; 2- ОТК; 3- первичные средства пожаротушения; 4- рабочие места.

## 7.7 Охрана окружающей среды

Проблема защиты окружающей среды - одна из важнейших задач современности. Выбросы промышленных предприятий в атмосферу, водоёмы и недра на современном этапе развития достигли таких размеров, что в ряде районов земного шара, особенно в крупных промышленных центрах, уровень загрязнений существенно превышает допустимые санитарные нормы.

Вода используется для вспомогательных целей: охлаждение (подогрева) исходных материалов и продукции предприятия, охлаждение деталей и узлов технологического оборудования, промывки и очистки продукции, что приводит к загрязнению воды растворимыми и нерастворимыми примесями; хозяйственно бытового обслуживания работников предприятия.

Из этого можно сделать простой вывод, что необходимо стремиться к снижению ресурсо- и энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять электрооборудование с малым энергопотреблением.

## **Заключение**

В данной выпускной квалификационной работе был спроектирован асинхронный электропривод главного движения металлообрабатывающего центра с частотным регулированием. Система ПЧ-АД позволяет повысить производительность, а также надежность производства, так как в системе используется самая простейшая электрическая машина – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. В настоящее время система ПЧ-АД получает широкое распространение, так как это экономически целесообразнее, чем применение тех же двигателей постоянного тока или АД с фазным ротором. Высокая плавность регулирования скорости также является одним из основных достоинств такой системы.

Произведен выбор двигателя АИР 160 S2. Затем был произведен выбор преобразователя частоты, способный обеспечить управление двигателем – Micromaster 440 «Siemens». После выбора преобразователя были определены параметры основных силовых элементов электропривода. Рассчитаны статические характеристики для разомкнутой системы регулируемого электропривода. Также была составлена структурная и функциональная схема регулируемого электропривода. Была составлена имитационная модель САУ асинхронного электропривода с векторным управлением, обеспечивающее регулирование скорости в заданном диапазоне регулирования.



## Список литературы

1. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 218 с.
2. Электротехнический справочник: В 4т. Т.4. Использование электрической энергии / Под общей редакцией профессора МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: издательство МЭИ, 2002. – 696 с.
3. Мальцева О.П., Удуг Л.С., Кояин Н.В. Системы управления электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 152 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. –2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.: ил.
5. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 304 с.: ил.
6. Чернышев А.Ю., Кояин Н.В. Проектирование электрических приводов: Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 120 с.
7. М.А. Мельников Внутрицеховое электроснабжение Изд-во ТПУ, 2007.- 166с.
8. Васильев Д.В. Системы автоматического управления. / Васильев Д.В. Чуич В.Г. – М.: Высшая школа, 1967. – 418с.
9. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода / Чиликин М.Г., Сандлер А.С. – Москва.: Энергоатомиздат. 1981. – 367с.
10. Башарин А.В. Управление электроприводами / Башарин А.В., Новиков В.А. – Л.: Энергоиздат. 1982. – 1982с., ил.
11. Соколов Н.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. – М.: Энергия. 1976. – 516с., ил.
12. А.С. Проников «Расчет и конструирование металлорежущих станков». - М.: 1967 г.
13. В.Э. Пуш «Металлорежущие станки». - М.: Машиностроение, 1985 г.
14. А.Г. Косилова «Справочник технолога машиностроителя». - М.: Машиностроение-1, 2003 г.

15. Проектирование приводов главного движения металлорежущих станков: метод. указания для студентов спец. 151001 / сост. Г. И. Киреев.– Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 46 с.
16. Проектирование технологического металлообрабатывающего оборудования: Методические указания для курсового и дипломного проектов /Сост. Н. А. Кутний. Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002. 78 с.
17. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями./ Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
18. Мартынов А.А. Проектирование электроприводов: Учеб. пос./ СПбГУАП: СПб., 2004. – 97 с.
19. Черпаков Б.И. Металлорежущие станки: Учебник для нач. проф. образования / Б.И. Черпаков, Т.А. Альперович. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 368 с
20. [http://pstu.ru/files/file/Kaf\\_eagp/4.pdf](http://pstu.ru/files/file/Kaf_eagp/4.pdf)
21. <http://www.siemens.com/answers/ru/ru/>
22. <http://www.all-ready.ru/stati/tehnologii--frezernoe-oborudovanie/vidy-frez>
23. [http://tehnoved.ru/metallorzhushiy\\_instrument/frezy/](http://tehnoved.ru/metallorzhushiy_instrument/frezy/)
24. <http://instrez.ru/osnovy-rezaniya-metallov/41-frezerovanie.html>
25. <http://www.ls-lg.ru>