

Школа ИШЭ  
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение школы (НОЦ) электроэнергетики и электротехники

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Электропривод экструдера линии производства полипропиленовой нити УДК 62-83:678.742.3.057

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Евстратенко Павел Вадимович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора Игнат Валерьевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева Ирина Леонидовна			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютева Полина Васильевна	к.т.н.		

Результаты обучения по направлению

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Код результата	Результат обучения
<b>Р 1</b>	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем.</i>
<b>Р 2</b>	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
<b>Р 3</b>	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.</i>
<b>Р 4</b>	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
<b>Р 5</b>	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>Р 6</b>	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
<b>Р 7</b>	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
<b>Р 8</b>	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>Р 9</b>	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>Р 10</b>	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
<b>Р 11</b>	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
<b>Р 12</b>	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>

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

Школа ИШЭ  
 Направление подготовки (специальность) 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение школы (НОЦ) электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Тютёва П.В.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

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

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
5А6К	Евстратенко Павлу Вадимовичу

Тема работы:

Электропривод экструдера линии производства полипропиленовой нити	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	59-78/с 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>материалы производственной практики;</li> <li>техническая литература;</li> <li>техническая документация;</li> </ul>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• постановка задачи проектирования;</li> <li>• проектирование электропривода экструдера линии производства полипропиленовой нити;</li> <li>• выбор типа преобразователя частоты и способа регулирования скорости;</li> <li>• расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик электродвигателя;</li> <li>• разработка и исследование имитационной модели электропривода;</li> <li>• разработка раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»;</li> <li>• разработка раздела «социальная ответственность»;</li> <li>• заключение.</li> </ul>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• технологический процесс;</li> <li>• линеаризованная САУ;</li> <li>• нелинейная САУ;</li> <li>• функциональная схема электропривода с векторным управлением;</li> <li>• статические характеристики асинхронного электропривода с векторным управлением.</li> </ul>

<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p><b>Социальная ответственность</b></p>	<p>Мезенцева Ирина Леонидовна</p>
<p><b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b></p>	<p>Кандидат экономических наук Подопригора Игнат Валерьевич</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Все разделы выпускной квалификационной работы написаны на русском языке.</p>	

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

**Задание выдал руководитель:**

<p>Должность</p>	<p>ФИО</p>	<p>Ученая степень, звание</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>Доцент</p>	<p>Чернышев Александр Юрьевич</p>	<p>к. т. н.</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>5А6К</p>	<p>Евстратенко Павел Вадимович</p>		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5А6К	Евстратенко П.В.

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30 % премии; 20 % надбавки; 16% накладные расходы; 30% районный коэффициент.
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	27,1% отчисления на социальные нужды

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

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ конкурентных технических решений. Оценки перспективности проекта по технологии QuaD.
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки: -определение структуры работ; -определение трудоемкости работ; -разработка графика Ганта.
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Формирование бюджета затрат на научное исследование: -материальные затраты; -заработная плата (основная и дополнительная); -отчисления на социальные цели; -амортизация; -накладные расходы.

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

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Оценочная карта QuaD
3. Матрица SWOT
4. Альтернативы проведения НИ
5. График проведения и бюджет НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	к.э.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Евстратенко П.В.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5А6К	Евстратенко П.В.

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

Электропривод экструдера линии производства полипропиленовой нити	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Территория механического цеха с главным объектом рассмотрения исследования – электрооборудование линии производства полипропиленовой нити. Рабочее место – щит управления оператора в помещении распределительного пункта. Область применения – механический цех на нефтехимическом производстве.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	ГОСТ 12.1.003 – 2014 ССБТ; ГОСТ 12.1.009 – 2019 ССБТ; ГОСТ 12.1.019 – 2009 ССБТ; ГОСТ 12.4.002 – 97 ССБТ; ГОСТ 12.4.011 – 89 ССБТ; ГОСТ 17.2.3.02 – 2019; ГОСТ Р 55710 – 2013; ПУЭ; СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96; СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96; СП 52.13330.2016; ТК РФ Статья 92; ТК РФ Статья 96; ТК РФ Статья 147;

	<p>ТК РФ Статья 221;          Федеральный закон "Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний" от 24.07.1998 N 125-ФЗ.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b>          2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов          2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Наиболее значимые вредные факторы:          1. Превышение уровня шума          2. Превышение уровня вибрации          3. Недостаточная освещенность рабочей зоны          Наиболее вероятно воздействие на персонал следующих опасных факторов:          1. Опасность электро-поражения;</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность:</b></p>	<p>Способы борьбы с сбросами и выбросами в окружающую среду</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<p>Возможны следующие ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• пожар;</li> <li>• затопление;</li> <li>• землетрясение.</li> </ul> <p>Одно из наиболее вероятных ЧС – пожар.</p>

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Евстратенко П.В.		



## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Разработать главный электропривод экструдера, удовлетворяющий следующим требованиям:

- 1) Помещение для установки электропривода стационарное с температурой окружающего воздуха от плюс 5 °С до плюс 45 °С и с относительной влажностью не более 80 %.
- 2) Питающая сеть переменного тока напряжением 380 В (+10 %; -15 %), частотой 50 Гц ( $\pm 5$  %).
- 3) Режим работы экструдера - режим постоянный продолжительной нагрузки.
- 4) Характер движения шнека - односторонний нереверсивный.
- 5) Максимальная частота вращения шнека не более 250 об/мин.
- 6) Минимальная частота вращения шнека 16 об/мин.
- 7) Точность поддержания минимальной частоты вращения 10 %.
- 8) Пуск электропривода от задатчика интенсивности.
- 9) Перерегулирование скорости при скачке управляющего воздействия не более 10 %.

## РЕФЕРАТ

Настоящая выпускная квалификационная работа содержит: 121 страниц, 52 рисунка, 20 таблиц, 2 приложения

Выпускная квалификационная работа посвящена вопросам разработки главного электропривода экструдера нити. Рассмотрены основы технологии экструзии.

Произведен расчет и выбор элементов силовой цепи электропривода.

В данной выпускной квалификационной работе произведен синтез параметров регуляторов электропривода переменного тока шнекового экструдера STAREX фирмы Starlinger линии получения полипропиленовой нити. Электропривод выполнен на основе асинхронного двигателя и преобразователя частоты фирмы Siemens. Линия установлена в цехе производства упаковочных материалов ООО “Томскнефтехим”.

Исследования линеаризованного и нелинейного электропривода произведены в программной среде MathLab Simulink. Полученные результаты соответствуют требованиям технического задания.

Кроме того, в работе рассмотрены вопросы техники безопасности и экологичности проекта, проведено технико-экономическое обоснование выполненного проекта.

При оформлении дипломного проекта были использованы программы:

- Microsoft Office Word,
- Microsoft Office Excel,
- Microsoft Office PowerPoint,
- Microsoft Office Visio.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>14</b>
<b>1 ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСТРУЗИИ.....</b>	<b>16</b>
1.1 Характеристика технологического процесса.....	16
1.2 Описание работы линии производства полипропиленовой нити.....	17
1.3 Устройство экструдера .....	18
1.4 Передаточная функция экструдера .....	26
1.5 Первичный выбор технологического режима .....	32
1.6 Технические требования .....	34
<b>2 ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ, РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОЙ ЦЕПИ.....</b>	<b>36</b>
2.1 Расчёт основных параметров и характеристик двигателя 5АМ315М4 .	36
2.2 Расчет переходных процессов при прямом пуске двигателя.....	43
2.3 Выбор преобразователя частоты .....	49
2.3.1 Принципы построения статических преобразователей частоты для электроприводов переменного тока .....	49
2.3.2 Преобразователь частоты фирмы Siemens .....	52
<b>3 ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>	<b>54</b>
3.1 Система векторного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости.....	54
3.2 Оптимизация системы автоматического управления.....	60
регулируемого электропривода.....	60
3.2.1 Расчет параметров силовой цепи .....	60
3.2.2 Оптимизация контура тока .....	63
3.2.3 Оптимизация контура потокосцепления .....	66
3.2.4 Оптимизация САР скорости.....	69
<b>4 ИССЛЕДОВАНИЕ САУ РЭП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ В НЕПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ.....</b>	<b>73</b>
<b>5 НЕЛИНЕЙНАЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....</b>	<b>82</b>
5.1 Структурная схема нелинейной САУ РЭП асинхронного электропривода с векторным управлением.....	82
<b>6 СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ .....</b>	<b>88</b>

6.1	Расчет статических характеристик однозонного асинхронного электропривода с векторным управлением .....	88
6.2	Статические характеристики однозонного электропривода.....	98
<b>7</b>	<b>ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....</b>	<b>100</b>
7.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	100
7.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования .....	100
7.1.2	Анализ конкурентных технических решений .....	101
7.1.3	Технология QUAD .....	103
7.1.4	SWOT-анализ .....	105
7.2	Определение возможных альтернатив проведения научных исследований.....	108
7.3	Планирование научно-исследовательских работ .....	109
7.3.1	Структура работ в рамках научного исследования.....	109
7.3.2	Определение трудоемкости выполнения работ.....	110
7.3.3	Разработка графика проведения научного исследования .....	111
7.4	Бюджет затрат на проектирования .....	115
7.4.1	Расчет материальных затрат проектирования .....	115
7.4.2	Затраты на заработную плату исполнителей.....	115
7.4.3	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) ...	117
7.4.4	Амортизация.....	117
7.4.5	Накладные расходы .....	118
7.4.6	Формирование бюджета затрат на проектирование .....	118
	Заключение по разделу «Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение» .....	119
<b>8</b>	<b>СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....</b>	<b>120</b>
8.1	Введение .....	120
8.2	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	120
8.3	Производственная безопасность .....	122
8.4	Анализ опасных и вредных факторов производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего .....	123
8.4.1	Превышение уровня шума.....	123
8.4.2	Превышение уровня вибрации .....	124

8.4.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	125
8.4.4 Анализ опасных факторов .....	126
8.4.5 Опасность электро-поражения .....	127
8.5 Экологическая безопасность .....	128
8.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	132
8.7 Пожар (загорание) как источник ЧС .....	132
Выводы по разделу «Социальная ответственность» .....	133
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>134</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>136</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>139</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....</b>	<b>140</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, технологии развиваются с огромной скоростью, что и определило тот факт, что передовые разработки в первую очередь получали самые востребованные, ведущие отрасли. Химическая и нефтехимическая промышленность как раз являются таковыми, из-за высокого темпа развития химического и нефтехимического машиностроения появилась необходимость по внедрению в их производство устройств, которые будут управлять всем процессом, делать его проще и выгоднее. Решением оказался современный автоматизированный электропривод.

Переход в технике электропривода на современную элементную базу дал возможность повысить не только характеристики электроприводов, но и стандартизировать технические решения в области автоматизированного электропривода по функциональному принципу, независимо от области применения.

В последнее время рассматривают идею замены регулируемого электропривода вместо нерегулируемого с той целью, чтобы регулируемой электропривод стал силовой основой автоматизации производственных процессов, таким образом расширив его область применения. Рассматривая химическую промышленность, внедрение регулируемого электропривода даст возможность снизить удельные электрические затраты, которые на данном производстве довольно высоки.

В технологических процессах переработки резиновых смесей и пластмасс широкое распространение получили червячные машины (прессы)экструдеры, используемые в агрегатах для изготовления труб, листов, пленок, а также в процессах пластикации, смешения и гранулирования. В данный момент метод экструзии является основным методом переработки, им перерабатывают до 75-85% термопластичных полимеров.

Несмотря на широкое использование экструдеров в промышленности, до сих пор не существует строгого математического описания процессов

пластикации материала в экструдере. Для расчета экструдеров на практике используют эмпирические формулы.

Отсутствие четкой научной базы в вопросах технологии обработки термопластичных материалов вызывает определенные трудности при выборе системы электропривода.

На практике в качестве главных приводов экструдеров последнее десятилетие используют однозонный тиристорный электропривод постоянного тока (система ТП-Д).

# 1 ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСТРУЗИИ

## 1.1 Характеристика технологического процесса

Технология экструзии заключается в получении продукта путем продавливания вязкого расплава через щель в фильере, в процессе чего, пластмассы переходят из твердого состояния, в виде гранул или порошка, в расплав, а после выхода из формующего отверстия снова становится твердым телом [1].

Пластические массы (пластмассы) – материалы, которые образуются на основе полимеров (высокомолекулярных соединений), состоящих из циклически повторяющихся атомных звеньев и, в зависимости от структуры, могут находиться в двух состояниях: аморфном или кристаллическом.

Одним из важнейших технологических параметров является температура плавления полимера.

При увеличении температуры, энергия и скорость молекул увеличивается, что приводит к разрушению кристаллической решетки и полимер из твердого состояния переходит в жидкое (расплав). Для полимеров аморфной структуры такой переход отвечает широкому диапазону температур, а у кристаллических – узкому.

Однако, процесс экструзии происходит при вязкотекучем состоянии полимера, диапазон температур которого лежит между температурами плавления и разложения.

При затвердевании полимеров, происходит процесс зарождения кристаллических областей и их рост, что напрямую зависит от температуры.

Температура плавления ( $T_{пл}$ ) – температура, вблизи которой происходит из жидкого состояние в твердое.

Температура кристаллизации ( $T_{к}$ ) – температура, при воздействии которой процесс кристаллизации происходит с максимальной скоростью.

Так, было установлено, что для большинства полимеров пропорция имеет следующий вид:  $T_{к}=0,83T_{пл}$



## 1.2 Описание работы линии производства полипропиленовой нити

Схема линии по производству полипропиленовой нити представлена в приложении Б [2].

Работа линии происходит следующим образом: изначально, подготовленный для переработки материал, подается к загрузочному устройству (1) в виде гранул. Следующим звеном является дозирующее устройство, которое расположено вертикально в бункере, основной функцией которого является подача перерабатываемого материала в цилиндр экструдера (4). Далее, внутри цилиндра экструдера происходит процесс пластикации, под действием энергии обогрева, а также давления. Затем, шнек экструдера начинает выдавливать подаваемый пластифицированный материал в выходную часть, которая состоит из щелевой фильеры (4) и устройства для фильтрации расплава. Из фильеры в виде плёнки выдавливается расплав, который поступает на режущую кассету (5). Разрезанная на полосы плёнка попадает на удерживающие валки (6). Затем, плёнка протягивается через печь горячего воздуха (7), одновременно вытягиваясь между удерживающими (6) и выходными вытягивающими валками (10) приобретая дополнительную механическую прочность и после этого поступает в охлаждающую ванну (11). И наконец, с помощью вытягивающих валков плёнка поднимается из ванны и подается на узел намотки (9), где наматываются на гильзы.

### 1.3 Устройство экструдера

Обозначение машины [2]:

- экструдер STAREX фирмы Starlinger;
- количество шнеков:2;
- диаметр шнека, мм (типоразмер):125;
- номинальная мощность приводного двигателя, кВт :200;
- максимальное число оборотов, об/мин : 1500.

Экструдер типа STAREX является высокопроизводительной экструзионной машиной для переработки термопластов.

Перерабатываемый материал непрерывно подводится к экструдеру через загрузочное устройство. Внутри цилиндра экструдера под воздействием энергии нагрева, энергии среза и давления происходит пластификация материала.

После этого пластичная масса непрерывно выталкивается в формовочный инструмент фильеру, относящийся к устройствам, последовательно включенным за экструдером.

Для оптимального решения самых разнообразных технологических задач в распоряжении имеются соответствующие варианты машины. Основное устройство машин одинаково для всех вариантов.

В соответствии с областью применения могут быть приспособлены:

- привод (главный приводной двигатель);
- редукционный узел передачи;
- технологическая часть;
- станина машины;
- загрузочное устройство;
- электрооборудование.

Экструдер сконструирован по принципу унифицированных узлов, т.е., все узлы являются отдельно смонтированными и заменяемыми группами.

Экструдер состоит из следующих главных конструктивных узлов:

- главный приводной двигатель;
- станина передачи с агрегатом передачи (основная передача, редуктор, подшипник противодавления) и устройством охлаждения.
- станина машины;
- цилиндр;
- формующая головка;
- шнек;
- загрузочное устройство;
- теплообменник;
- электрооборудование.

Главный приводной двигатель (рисунок 1.1) Привод экструдера STAREX осуществляется двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением и с принудительной вентиляцией. Вентиляция осуществляется за счет находящегося над двигателем воздушно-вентиляционного агрегата (вентилятор, двигатель). Для измерения температуры в двигателе в обмотку возбуждения встроен терморезистор.

Число оборотов двигателя устанавливается бесступенчато в диапазоне 1:15 и регулируется с помощью тиристорного выпрямителя. На валу двигателя установлен тахогенератор постоянного тока, служащий в качестве датчика скорости для измерения действительного числа оборотов электропривода. На пульте обслуживания смонтирован показывающий прибор для указания числа оборотов шнека.

Передача крутящего момента от приводного двигателя на приводной шкив снижающего редуктора производится с помощью клиноременной передачи.

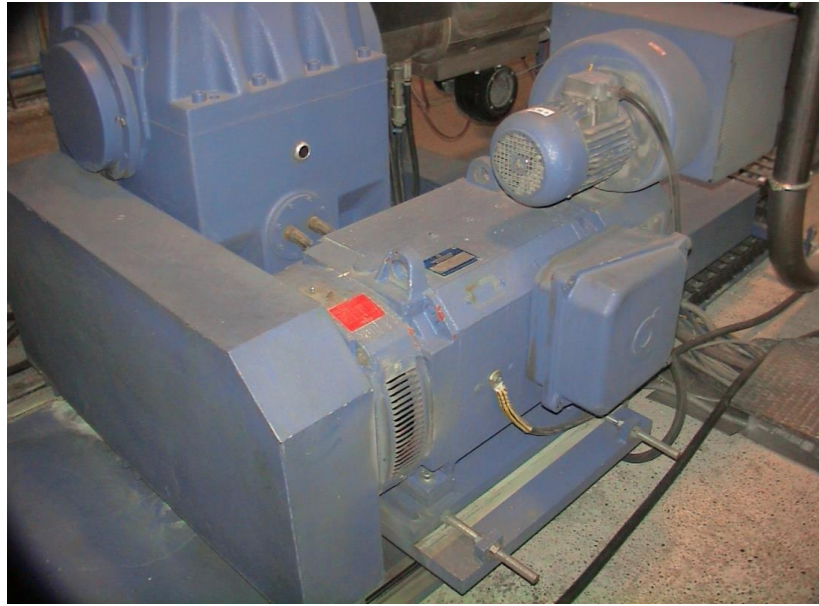


Рисунок 1.1 – Главный приводной двигатель

Агрегат передачи состоит из следующих узлов:

- редуктор;
- подшипник противодействия.

В редукторе (рисунок 1.2) осуществляется превращение крутящего момента привода в рабочий крутящий момент. При этом число оборотов привода уменьшается до соответствующего числа оборотов выходных валов. Редуктор сконструирован в виде передачи с совмещённым в одном корпусе упорным подшипником противодействия.



Рисунок 1.2 – Понижающий редуктор

Подшипник противодействия служит для восприятия осевых усилий, возникающих в процессе работы. Осевая нагрузка воспринимается сдвоенными роликоподшипником с цилиндрическими роликами, которые с осевым сдвигом расположены на валах подшипника противодействия.

Станина машины (рисунок 1.3) выполнена в виде сварной конструкции и расположена на закрепленных в фундаменте направляющих так, что может быть передвинута по ним. Внутри станины машины размещены арматура для водяного охлаждения цилиндра и приспособления для отвода цилиндра. Устройство для отвода цилиндра состоит из линейной зубчатой передачи и асинхронного двигателя с редуктором. Механизм расположен снизу от экструзионного цилиндра. Он служит для управления с целью пошагового подвода и отвода цилиндра от ванны. Имеется возможность отвести станину машины вместе с цилиндром настолько, что фильера окажется полностью свободной.

Подвод электроэнергии, охлаждающей воды, измерительной линии к термометрам сопротивления и защитного провода производится с помощью подвижной магистрали питания, расположенной рядом со станиной машины на фундаменте. При отводе станины машины вместе с цилиндром сохраняются присоединения энергоносителей к экструдеру. Мертвая точка подвижной магистрали питания находится снизу от узла присоединения цилиндра, в фундаменте, а подвижный конец ее закреплен под узлом загрузки цилиндра, где также расположена вставная соединительная муфта для безнапорного стока охлаждающей воды.

Электрическая разветвительная коробка (присоединительный ящик). Рядом со станиной машины, в непосредственной близости от пульта управления, устанавливается разветвительная коробка. Содержащая штекерные соединения для обогрева (4 штуки на каждую зону нагрева) и измерения температуры (1 штука на каждую зону нагрева) зон нагрева фильеры, для измерения температуры массы, а также для измерения давления массы, и являющаяся одновременно местом присоединения всех линий со стороны

подвижной магистрали питания.

Цилиндр с помощью опорных балок установлен на подвижной станине машины. Он состоит из следующих частей:

- узел загрузки цилиндра (для подачи перерабатываемого материала);
- цилиндрическая секция;
- зона фильтра.
- узел присоединения цилиндра.

Благодаря разделенному выполнению цилиндра имеется возможность варьировать число и расположение цилиндрических секций. Вследствие этого удастся достичь оптимального устройства цилиндра в соответствии с технологической задачей.

Для технологического процесса особое значение имеет нагревание отдельных цилиндрических секций. Нагревание осуществляется резистивными нагревательными лентами, охлаждение воздушное с помощью вентиляторов, расположенных на каждой зоне нагрева, термопары и термоконтроллеры служат для измерения и поддержания заданной температуры. Для обеспечения требуемого теплового режима цилиндр экструдера содержит регулируемые температурные зоны обогрева. Поверх цилиндра в каждой зоне крепится разъемный нагревательный элемент. Благодаря наличию гнезд в середине каждой температурной зоны, которые предназначены для установки термопары, в цилиндре экструдера создаются тепловые зоны, за счет которых задается и поддерживается необходимое распределение температур вдоль цилиндра.

Число и расположение нагревательных лент могут быть изменены для каждой зоны и, таким образом, приспособлены к технологической задаче. Для охлаждения цилиндра каждая зона нагрева имеет внешний кожух с закрепленным на нём вентилятором.

Узел загрузки не может обогреваться, он только охлаждается. Все остальные цилиндрические секции оснащены нагревательными и охлаждающими элементами. Охлаждение узла загрузки предотвращает:

- заклеивание загрузочной шахты пластмассовым материалом;
- тепловой поток от цилиндра к передаче и к подшипнику противодействия.



Рисунок 1.3 – Станина и цилиндр машины

Фильтра (рисунок 1.4) экструдера представляет собой конструктивно сложный узел, который включает в себя:

- элементы обогрева и регулирования зазоров в каналах, по которым течет расплав полимера;
- дросселирующие устройства;
- воздухопроводы и др.

В конструкцию формующей головки входят следующие детали детали, назначение которых не зависит от типа получаемого изделия

- корпус головки с расположенными на нем элементами обогрева и датчиками температуры;
- мундштук с дорном и матрицей, который оформляют внутреннюю и наружную поверхность изделия;

Для того, чтобы поддерживать необходимое технологическому процессу распределение температуры по площади цилиндра при малой

производительности экструдера, нагреватель должно автоматически включаться при охлаждении температурной зоны, а при перегреве – выключаться, таким образом и происходит регулировка количества энергии, подводимой к элементам обогрева. Однако, вероятна ситуация, при которой количество тепла, которое выделяется в расплаве термопласта за счет трения, будет больше, чем количество тепла, подводимого нагревателями.

Описанный режим может наступить, в следствии повышения оборотов червяка, в сопряжении гильза-расплав-червяк. Чтобы в вышеописанной ситуации предотвратить разложение материала и не понизить производительность экструзии, подается команда от термоконтроллера, включающая систему охлаждения температурной зоны, т.е. срабатывает пускатель вентилятора перегретой зоны.



Рисунок 1.4 – Фильера ванна

Шнек находится в цилиндре и состоит из гладкого вала, шнековой втулки, торпеды (острия шнека). В осевом направлении он удерживаются в переднем крепежном фланце соединения для восприятия осевого усилия.

Торпеда состоит из корпуса торпеды и острия (выступа) торпеды. С корпусом торпеды, ввинченным в гладкий вал, шнековые втулки затягиваются в осевом направлении.

Загрузочное устройство предназначено для подачи материала с



загрузочной детали цилиндра. Оно состоит из загрузочной воронки, и нисходящей шахты. Материал подводится с помощью пневмомагистрали к загрузочной воронке в зоны загрузки. В таблице 1.1 представлены главные параметры экструдера.

Таблица 1.1 – Главные параметры экструдера

Характеристика	Значение
Способ работы	Непрерывно
Направление работы	Горизонтально
Расположение шнека	В горизонтальной плоскости
Крутящий момент шнека	9515,7Н·м
Частота вращения шнека	250 об/мин
Исполнение цилиндра	Шестисекционный с заменяемыми секциями
Нагрев	6 зон обогрева (электрообогрев нагревательными лентами), 6 зон воздушного охлаждения
Измерение температуры зоны	Термопары
Регулятор температуры цилиндра и фильеры	Одноточечный ПИД-регулятор KS 40
Точность регулирования	±1 % значения шкалы регулятора
Измерение температуры расплава	Термопара
Главный привод	ДПТ $P_n=167$ кВт, $P_n=1500$ об/мин
Передаточное отношение редуктора	Понижающий ( $i=6$ ),
Производительность	1500 кг/ч

Воронка для материала оснащена устройством для измерения уровня и устройством для выпуска воздуха. Нисходящая шахта загрузочного устройства свинчивается с загрузочной вставкой в цилиндре. При отводе отключается привод экструдера через конечный выключатель.

## 1.4 Передаточная функция экструдера

Расчеты производительности прессов основаны на принципе наложения трех различных потоков в канале червяка. Помимо основного потока массы - прямого потока  $Q_{пр}$ , рассматриваются обратный поток  $Q_{обр}$  и поток утечки  $Q_{ут}$ . Поток  $Q_{обр}$  направлен на встречу основному потоку по каналу червяка, а поток  $Q_{ут}$  проходит по зазору между стенками цилиндра и витками резьбы червяка. Потоки  $Q_{обр}$  и  $Q_{ут}$  вызваны наличием противодействия в цилиндре пресса. Следует иметь в виду, что в действительности имеет место движение результирующего потока  $Q$ , а не отдельных указанных составляющих. Применяя принцип суперпозиции, можно записать [3]:

$$Q = Q_{пр} - Q_{обр} - Q_{ут}$$

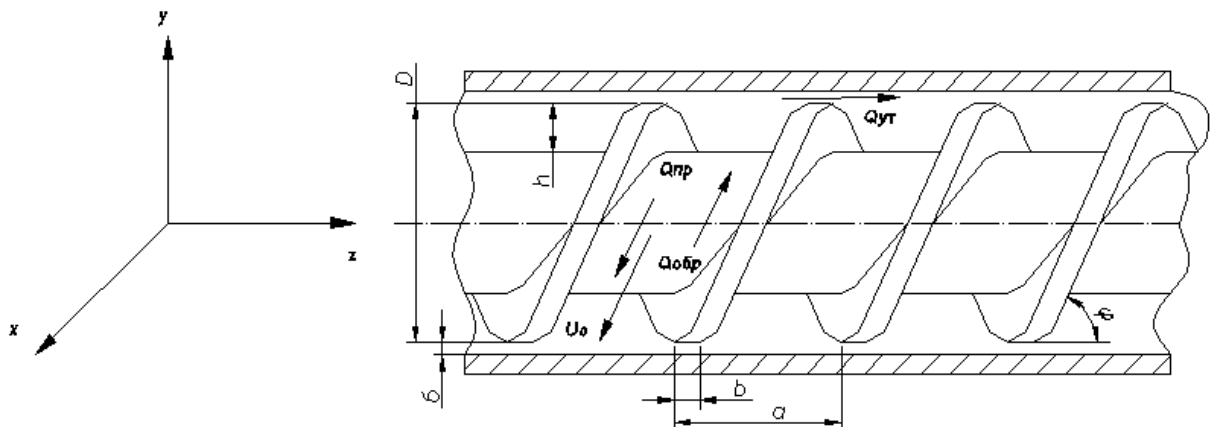


Рисунок 1.5 – Часть цилиндра пресса и червяка

Течение жидкости в общем случае описывается линейным дифференциальным уравнением Навье-Стокса, которое связывает скорость потока с градиентом давления:

$$\text{grad } P = m \cdot DU;$$

где:

- $P$  – локальное давление;
- $m$  – вязкость, зависящая только от температуры;
- $U$  – вектор локальной скорости расплавленного материала;

- $D$  – оператор Лапласа.

Применяя для описания ламинарного течения несжимаемой изотропной жидкости вдоль канала червяка, получаем:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \cdot \left[ \frac{\partial^2 U_x}{\partial U^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial U_x}{\partial z} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial z} + \frac{\partial U_x}{\partial y} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial y}$$

Обычно вязкость расплава очень мало изменяется от  $Z$  в поперечном сечении канала. Поэтому можно считать  $\frac{\partial \mu}{\partial Z} = 0$  :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \cdot \left[ \frac{\partial^2 U_x}{\partial Z^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial U_x}{\partial y} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial y}$$

Ввиду большой сложности решения данного уравнения обычно ограничиваются частными решениями, описывающими изотермический или адиабатический режимы работы и применимыми для большинства практических случаев. Предположив, что вязкость расплава по всей площади поперечного сечения канала постоянна, получим  $\frac{\partial \mu}{\partial y} = 0$ . Это допущение предполагает изотермический режим работы, то есть что температура расплава по всей площади сечения канала постоянна.

Для червяков с малым отношением глубины канала к его ширине можно пренебречь изменением скорости по оси  $Z$ . В этом случае  $\frac{\partial^2 U_x}{\partial Z^2} = 0$  и принимает вид:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$$

Это уравнение описывает однополярное течение ньютоновской жидкости в канале. В этом случае задача сводится к рассмотрению двухпластинчатой модели (рисунок 1.6 а).

Более удобно для анализа работы червячного пресса считать, что червяк неподвижен, а цилиндр пресса вращается в направлении противоположном действительному вращению червяка. При этом относительные скорости цилиндра и червяка будут такими же, как в реальном случае.

Таким образом, вязкая ньютоновская жидкость находится между неподвижной (1) (червяк) и движущейся (2) (цилиндр) пластинами.

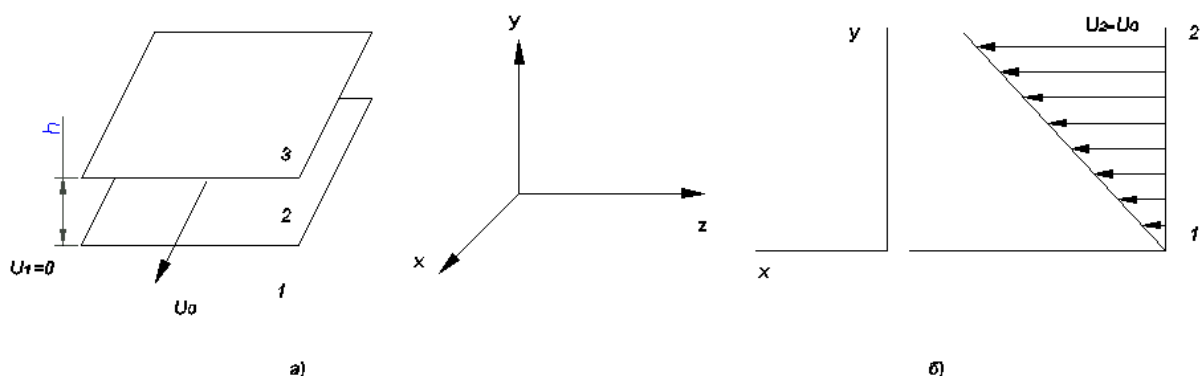


Рисунок 1.6 – Двухпластинчатая модель винтового канала червяка:

а) - двухпластинчатая модель: 1- неподвижная пластина; 2- движущаяся пластина; 3- вязкая жидкость; б) - распределение скоростей вязкой жидкости по оси  $y$

Граничные условия для решения дифференциального уравнения вытекают из предположения, что жидкость смачивает как поверхность движущейся пластины 2, с которой она соприкасается, так и поверхность неподвижной пластины 1, то есть:

$$U_1 = 0, U_2 = U_0,$$

где:

$U_0$  – скорость перемещения пластины (линейная скорость вращения цилиндра).

Если расстояние между двумя пластинами (высота нарезки червяка или глубина канала) равна  $h$  (рисунок 1.6), то путем двукратного интегрирования по переменной  $y$  с учетом граничных условий получаем:

$$U_x(y) = \frac{U_0 \cdot y}{h} - \frac{h \cdot y - y^2}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}.$$

Первый член этого уравнения представляет собой скорость прямого потока, второй - обратного.

Для определения объема массы, проходящей через поперечное сечение

канала червяка в единицу времени (объемная производительность), нужно проинтегрировать по сечению канала (рисунок 1.7), произведение скорости в данной точке на площадь элементарного участка  $S=b \cdot y$ , соответствующего этой точке:

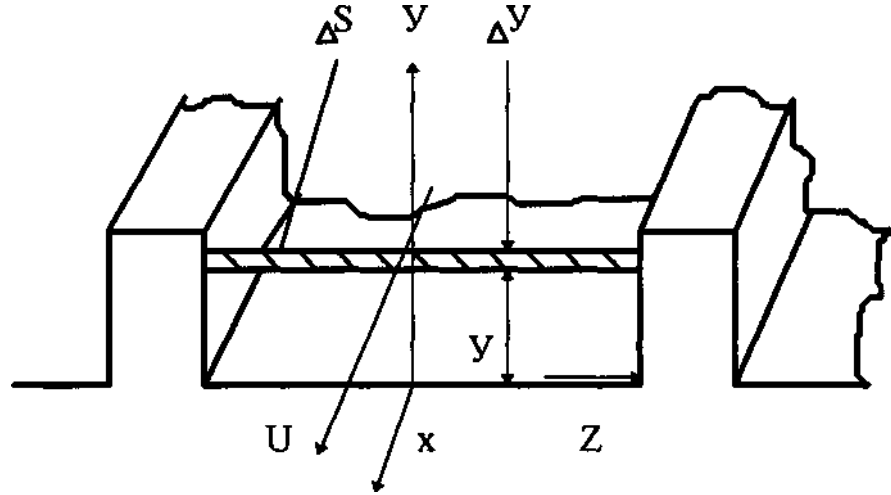


Рисунок 1.7 – Схема канала червяка

$$Q = Q_{np} - Q_{обр} = \int_0^h U_x \cdot ds = \int_0^h U_x \cdot b \cdot dy =$$

$$= \int_0^h \left( \frac{U_0 \cdot y}{h} - \frac{h \cdot y - y^2}{2\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \right) \cdot b \cdot dy = \frac{U_0 \cdot b \cdot h}{2} - \frac{b \cdot h^3}{12\mu} \cdot \frac{dp}{dx}$$

Выразим  $U_0$ ,  $b$  и  $dx$  через параметры прессы- частоту вращения, диаметр и длину червяка. Из рисунка 1.7 имеем:

$$U_0 = \pi \cdot D \cdot n \cdot \cos \varphi, \quad b = (a - b) \cdot \cos \varphi,$$

$$a - \text{ шаг резьбы } (a = \pi \cdot D \cdot \text{tg} \varphi)$$

$$dx = dl / \sin \varphi$$

где:

$dl$  – расстояние вдоль оси червяка, соответствующее расстоянию  $dx$  по оси канала червяка.

Считаем, что ширина гребня нарезки  $b$  значительно меньше шага резьбы  $a$ , поэтому

$$b = \pi \cdot D \cdot \text{tg} \varphi \cdot \cos \varphi = \pi \cdot D \cdot \sin \varphi.$$

В итоге получаем:

$$Q = \frac{\pi \cdot D \cdot \cos \varphi \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \varphi \cdot h}{2} - \frac{\pi \cdot D \cdot \sin \varphi \cdot h^3}{12\mu} \cdot \frac{dP \cdot \sin \varphi}{dl} =$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n \cdot h \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{2} - \frac{\pi \cdot D \cdot \sin^2 \varphi \cdot h^3}{12\mu} \cdot \frac{dP}{dl}$$

Уравнение не учитывает потока утечки  $Q_{ут}$ . Выражение для этого потока можно получить при рассмотрении прохождения жидкости через прямоугольный паз шириной  $p \cdot D \cdot \cos \phi$ , длиной  $b \cdot \cos \phi$  и высотой  $d$ .

Здесь сделано допущение, что, увеличение давления начинается с начала дозирующей зоны, а в загрузочной и переходных зонах давление равно атмосферному.

В конечном виде уравнение для объёмной производительности имеет вид:

$$Q = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n \cdot h \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{2} - \frac{\pi \cdot D \cdot \sin^2 \varphi \cdot h^3}{12\mu} \cdot \frac{P_2 - P_1}{l_{1,2}} -$$

$$\frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot \delta^2 \cdot \text{tg} \varphi}{12\mu \cdot b} \cdot \frac{P_2 - P_1}{l_{1,2}}$$

В этом выражении линейные размеры измеряются в метрах, частота вращения червяка в оборотах в секунду; эффективная динамическая вязкость имеет размерность паскаль в секунду; давление - паскаль.

Из выходной зоны цилиндра расплавленный полимер попадает в головку пресса, где расположен формирующий инструмент за единицу времени, прямо пропорционально перепаду давления в головке  $\Delta P$  и обратно пропорционально сопротивлению  $R$ , оказываемому потоку стенками головки, и вязкости материала:

$$Q = \Delta P / R_m$$

При расчётах часто вводят величину, обратную сопротивлению  $R$ , и обозначают её как константу головки  $K$ . Наибольшее влияние на значение  $K$  оказывает зазор между щеками фильеры.

Поэтому в первом приближении константу головки можно определить следующим образом:

$$K = \frac{l_{щ} \cdot \Delta^3}{12 \cdot h_{щ}},$$

где:

- $l_{щ}$  – длина щели;
- $D$  – ширина щели;
- $h_{щ}$  – высота щёк щели.

Видно, что производительность пресса при изотермическом выдавливании ньютоновской жидкости определяется в первую очередь геометрическими размерами червяка, цилиндра и формирующего инструмента и частотой вращения червяка.

Таким образом, согласно, экструдер можно представить безынерционным звеном:

$$Q' = K_{эк} \cdot \omega,$$

где:

- $Q'$  – площадь щели фильеры ( $Q' \approx Q$ ), мм;
- $K_{эк}$  – коэффициент передачи экструдера;
- $\omega = 2\pi \cdot n / 30$  – угловая частота вращения червяка,  $c^{-1}$

Однако более точным будет представить червячный пресс аperiodическим звеном первого порядка:

$$Q' = \frac{K_{эк} \cdot \omega}{1 + T_{эк} \cdot p},$$

где:

$T_{эк}$  – постоянная времени экструдера, обусловленная, главным образом, вязкостью изоляционного материала. Определяется экспериментально и является индивидуальной для каждого червячного пресса.

## 1.5 Первичный выбор технологического режима

Оптимальный режим переработки полимера – это те значения температур и давлений в формующей фильере, которые обеспечивают наибольшую производительность экструзионной машины при хорошем качестве изделий [3].

Оптимальная область экструзии лежит, в диапазоне температур 180-250°C. Эти температуры устанавливаются в формующей фильере. В зоне загрузки экструдера температура должна быть примерно равной половине температуры плавления материала, чтобы избежать налипания материала на червяк. Например, при переработке полипропилена в зоне загрузки поддерживается температура 180°C.

От зоны загрузки к фильере температура цилиндра повышается. В зоне сжатия она должна быть на 30-40°C выше температуры плавления.

На производственных машинах с помощью термопар, вмонтированных в тело головок, измеряется не температура расплава, а температура формующего инструмента. При установившемся режиме и относительно небольших скоростях экструзии значения температур расплава и показания прибора близки. При больших скоростях экструзии для поддержания необходимой температуры расплава температура головки должна быть значительно выше.

В настоящее время наблюдаются тенденции к увеличению скоростей экструзии, что обуславливает увеличение производительности. Однако при повышенных скоростях на поверхности изделий появляются волнистость, бугры. Эти явления часто связаны с характерной для расплавов полимеров эластической турбулентностью - при продавливании расплава через гладкий канал при определенных скоростях появляется искажение поверхности экструдата.

Скорость сдвига и напряжение сдвига, при которых наблюдаются волнистость, бугристость и иногда рваный характер поверхности, называются критическими. Последнее связано, в основном, с тем, что расплавы полимеров являются вязкоупругими жидкостями. Известно, что при продавливании вязкой



жидкости расходуемая энергия переходит в тепло и рассеивается, а при продавливании упругой жидкости часть энергии накапливается в ней, вызывает эластическую турбулентность. Величина критического напряжения сдвига определяется природой, молекулярной массой и структурой полимера, содержанием высокомолекулярной фракции и степенью неоднородности полимера. Значение ее можно повысить, добиваясь плавного входа в формующую фильеру, увеличивая длину формующего участка фильеры, деформируя расплав.

Накопление упругой энергии приводит и к внутренним напряжениям в готовых изделиях. Если эти напряжения не успеют отрелаксировать при формировании в зоне фильеры, то они могут оказаться «замороженными» в изделии и привести к его деформации (короблению, изменению размеров) в процессе хранения и эксплуатации. Поэтому необходимо выходящий из экструдера профиль охлаждать постепенно.

Эластическое восстановление проявляется в том, что площадь экструдата, выдавливаемого из фильеры, оказывается несколько большей, чем внутренняя площадь самой щели фильеры.

Способность к разбуханию, эластическому восстановлению приводит к тому, что размеры профилей оказываются больше, чем размеры формующего инструмента, и их необходимо корректировать, уменьшая размеры формующего зазора или увеличивая вытяжку изделия.

## 1.6 Технические требования

Разработка электропривода механизма осуществляется на основании требований, выдвинутых самим механизмом [4].

От стабильной и бесперебойной работы экструдера зависит работа всей линии. Так как процесс производства пленки полипропилена технологически непрерывен, то выход из строя оборудования экструдера может привести к потере части полипропилена и созданию аварийной обстановки. Поэтому к приводу экструдера предъявляются повышенные требования в отношении бесперебойности работы, надежности.

Для обеспечения надёжной и бесперебойной работы экструдера необходимо соблюдать ряд требований по обслуживанию установки.

- формующую фильеру необходимо тщательно очищать от остатков ранее перерабатываемых термопластов;
- пуск экструдера осуществляется только в том случае, если зоны корпуса и фильеры прогреты до заданных температур, а выдержка при этих температурах составляет 20-30 минут, для полного нагрева головки и шнеков;
- при запуске, экструдер работает на минимальной частоте вращений шнеков, составляющая 15-25 об/мин, при периодическом (голодном) питании;
- увеличение частоты вращения до заданной, происходит только после появления расплава из фильеры. При нарушении этого правила может произойти перегрузка и поломка экструдера;

Так как материал из загрузочной воронки поступает непрерывно, то большое перерегулирование вызывает неравномерное распределение материала в витках шнека. Поэтому рекомендуется ограничивать значение перерегулирования на уровне 5-10 %.

На величину статического момента экструдера оказывают влияние температура, пластичность и состав поступающей смеси, температурный режим в цилиндре и профилирующей головке, интенсивность питания смесью.

Исследования агрегатов показали, что изменения температуры и пластичности поступающей смеси, приводят к изменениям нагрузки в пределах  $\pm(5-7)\%$ . Отклонение температурного режима может вызывать изменение статического момента на  $\pm 8 \%$ . Неравномерность заполнения канавки шнека смесью приводит к колебаниям статического момента в пределах  $\pm 5\%$ . Максимальные изменения статического момента под действием различных факторов при работе экструдера составляют 15-25% номинального значения. Обычно плавное регулирование частоты вращения пресса требуется в диапазоне 1:15. Это объясняется тем, что экструдеры входят в состав агрегатов для производства изделий из полимерных материалов. Поэтому экструдеры выполняют с двигателем постоянного тока. Требуемая точность стабилизации частоты вращения шнека зависит от вида получаемой продукции и составляет  $\pm 5\%$  при смешении и пластикации пластических масс. В рабочих режимах реверсирование частоты вращения двигателя обычно не требуется.

## 2 ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ, РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОЙ ЦЕПИ

### 2.1 Расчёт основных параметров и характеристик двигателя 5АМ315М4

Произведём расчёт основных параметров асинхронной машины для построения механической и электромеханической характеристик асинхронного электродвигателя [5].

- $U_{1Н} = 380$  В – номинальное линейное напряжение;
- $U_{1ф} = 220$  В – номинальное фазное напряжение;
- $P_H = 200$  кВт – номинальная мощность двигателя;
- $n_H = 1485$  об/мин – номинальная частота вращения;
- $n_0 = 1500$  об/мин – синхронная частота вращения;
- $\eta_H = 0,96$  - КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка);
- $\cos \phi_H = 0,9$  – коэффициент мощности;
- $k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_H} = 1,8$  о.е. – кратность пускового момента;
- $k_i = \frac{I_{\Pi}}{I_H} = 6,6$  о.е. – кратность пускового тока;
- $k_{\max} = \frac{M_K}{M_H} = 2$  о.е. – кратность максимального момента.

Ток ХХ АД определяется из выражения:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(\frac{p_* \cdot I_{1H} \cdot (1-s_H)}{1-p_* \cdot s_H}\right)^2}{1 - \left(\frac{p_* \cdot (1-s_H)}{1-p_* \cdot s_H}\right)^2}} = \sqrt{\frac{265,704^2 - \left(\frac{0,75 \cdot 350,73 \cdot (1-0,01)}{1-0,75 \cdot 0,01}\right)^2}{1 - \left(\frac{0,75 \cdot (1-0,01)}{1-0,75 \cdot 0,01}\right)^2}} = 63,097 \text{ A,}$$

где:

$$I_{1н} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \phi_n \cdot \eta_n} = \frac{200000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,96} = 350,73 \text{ А} - \text{номинальный ток}$$

статора двигателя;

$$\eta_{p*} = \eta_n = 0,96 - \text{КПД двигателя при частичной нагрузке};$$

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_n}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \phi_{p*} \cdot \eta_{p*}} = \frac{0,75 \cdot 200000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,96} = 265,704 \text{ А} - \text{ток статора при}$$

частичной нагрузке двигателя;

$$\cos \phi_{p*} = \cos \phi_n \cdot 0,98 = 0,891 - \text{коэффициент мощности при частичной}$$

нагрузке двигателя;

$$p_* = \frac{P}{P_n} = 0,75 - \text{коэффициент нагрузки двигателя.}$$

По формуле Клосса найдем соотношение для расчёта критического скольжения:

$$s_k = s_n \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0,01 \cdot \frac{2 + \sqrt{2^2 - (1 - 2 \cdot 0,01 \cdot 1 \cdot (2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,01 \cdot 1 \cdot (2 - 1)} = 0,038 \text{ о.е.}$$

В первом приближении принимаем  $\beta = 1$ .

Далее определяем ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1н}} = 1 + \frac{63,097}{2 \cdot 6,6 \cdot 350,73} = 1,014;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_n} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,01)}{2 \cdot 1,014 \cdot 2 \cdot 200000} = 0,177,$$

Рассчитаем активное сопротивление ротора, приведенного к обмотке статора АД:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) \cdot C_1} = \frac{0,177}{\left(1 + \frac{1}{0,038}\right) \cdot 1,014} = 6,425 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Определим активное сопротивление статорной обмотки по следующей формуле:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,014 \cdot 6,425 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 6,513 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Найдем индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{кн}$  :

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 26,199 \cdot 1,014 \cdot 6,425 \cdot 10^{-3} = 0,171 \text{ Ом, где}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,038^2} - 1^2} = 26,199$$

Воспользовавшись соотношениями, справедливыми для всех серийных АД, определим сопротивления рассеяния фаз статора и ротора из индуктивного сопротивления  $X_{кн}$

Вычислим индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведённое к статорной по следующей формуле:

$$X_{2н}' = \frac{0,58 \cdot X_{кн}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,171}{1,014} = 0,098 \text{ Ом.}$$

Далее определим индуктивное сопротивление статорной обмотки исходя из следующего выражения:

$$X_{1н} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 0,171 = 0,072 \text{ Ом}$$

ЭДС ветви намагничивания равна:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \phi_n - R_1 \cdot I_{1н})^2 + (U_{1н} \cdot \sin \phi_n - X_{1н} \cdot I_{1н})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,9 - 6,513 \cdot 10^{-3} \cdot 350,73)^2 + (220 \cdot 0,436 - 0,072 \cdot 350,73)^2} = 208,115 \text{ В.} \end{aligned}$$

Рассчитаем индуктивное сопротивление намагничивания по следующей формуле:

$$X_{\mu н} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{208,115}{63,097} = 3,298 \text{ Ом.}$$

По полученным значениям промежуточного коэффициента  $C_1$ , активного сопротивления ротора, приведённого к обмотке статора асинхронного двигателя  $R_2'$ , а также индуктивного сопротивления короткого замыкания  $X_{кн}$ , найдем значение критического скольжения:

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} = \frac{1,014 \cdot 6,425 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{(6,513 \cdot 10^{-3})^2 + 0,171^2}} = 0,038.$$

Для того, чтобы построить, естественную механическую характеристику двигателя определяется критический момент машины в двигательном режиме:

$$M_{\kappa} = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157,08 \cdot 1,014 \cdot \left[ 6,513 \cdot 10^{-3} + \sqrt{(6,513 \cdot 10^{-3})^2 + 0,171^2} \right]} = 2572 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Задаваясь диапазоном изменения скольжения от 1 до 0, с шагом 0,001, строим механическую характеристику асинхронного электродвигателя по формуле Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\kappa} \cdot (1 + a \cdot s_{\kappa})}{\frac{s_{\kappa}}{s} + \frac{s}{s_{\kappa}} + 2 \cdot a \cdot s_{\kappa}},$$

где:

$$\text{коэффициент } a \text{ равен: } a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{6,513 \cdot 10^{-3}}{6,425 \cdot 10^{-3}} = 1,014.$$

Тогда расчётное выражение для механической характеристики примет следующий вид:

$$M(s) = \frac{5342,21}{\frac{0,038}{s} + \frac{s}{0,038} + 0,077}.$$

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя 5АМ315М4 изображена на рисунке 2.1.

Необходимо провести анализ получившейся механической характеристики, а именно:

- выяснить, корректны ли получившиеся данные;
- сравнить основные данные с номинальными.

Определим номинальный момент по следующей формуле:

$$M_{n(\text{паспорт})} = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{200 \cdot 10^3}{157,08} = 1273,24 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Пересчитаем номинальный момент по формуле Клосса:

$$M_n = \frac{5342,21}{\frac{0,038}{s_n} + \frac{s_n}{0,038} + 0,077} = 1290,39 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вычислим момент критический:

$$M_k = k_{\text{max}} \cdot M_{n(\text{паспорт})} = 2 \cdot 1273,24 = 2546,48 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определим пусковой момент:

$$M_n = k_n \cdot M_{n(\text{паспорт})} = 1,8 \cdot 1273,24 = 2291,83 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Пересчитаем пусковой момент по формуле Клосса:

$$M_n = \frac{5342,21}{\frac{0,038}{1} + \frac{1}{0,038} + 0,077} = 212,71 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что получившаяся механическая характеристика корректна лишь в области близкой к номинальным скоростям. Пунктирной линией отображена характеристика, соответствующая паспортным данным

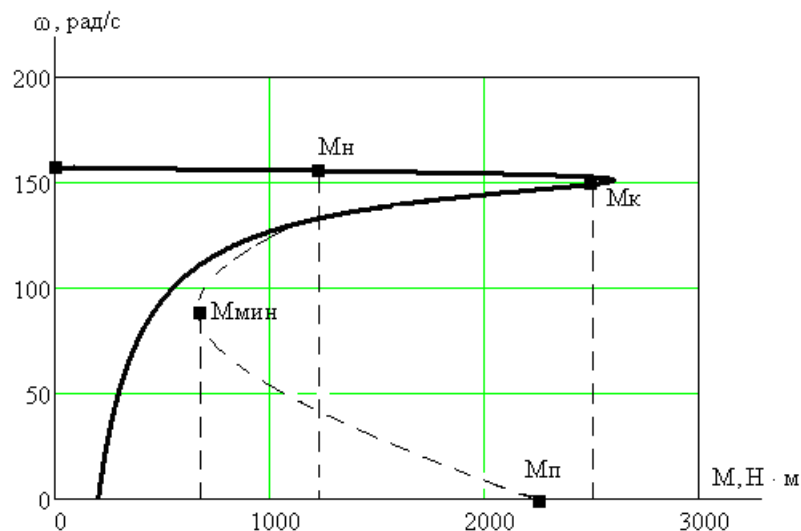


Рисунок 2.1 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя 5AM315M4



Также, следует рассмотреть электромеханическую характеристику  $I_1 = f(\omega)$  для короткозамкнутого асинхронного двигателя, которая отражает зависимость тока статора от скорости.

Ток статора  $I_1$  через приведённый ток ротора  $I_2'$  находится по следующей формуле (полагая ток намагничивания асинхронного двигателя  $I_0$  реактивным ( $I_{0A} = 0$ )):

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + (I_2'(\omega))^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \phi_2(\omega)} = \\ = \sqrt{63,097^2 + (I_2'(\omega))^2 + 2 \cdot 63,097 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \phi_2(\omega)}$$

где:

$$I_2'(\omega) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + X_{кн}^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left( 6,513 \cdot 10^{-3} + \frac{6,425 \cdot 10^{-3}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + 0,171^2}},$$

$$\sin \phi_2(\omega) = \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + X_{кн}^2}} = \frac{0,171}{\sqrt{\left( 6,513 \cdot 10^{-3} + \frac{6,425 \cdot 10^{-3}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + 0,171^2}}.$$

Электромеханическая характеристика АД строится по формулам для токов обмоток ротора и статора, задаваясь диапазоном изменения скорости. Электромеханическая характеристика двигателя представлена на рисунке 2.2.

Далее проведем сравнение полученной электромеханической характеристики с паспортными данными:

$$I_n = k_i \cdot I_{1н} = 6,6 \cdot 350,73 = 2314,818 \text{ А},$$

$$I_{1(s=1)} = 2238 \text{ А}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что полученная электромеханическая характеристика схожа с характеристикой, построенной по каталожным значениям.

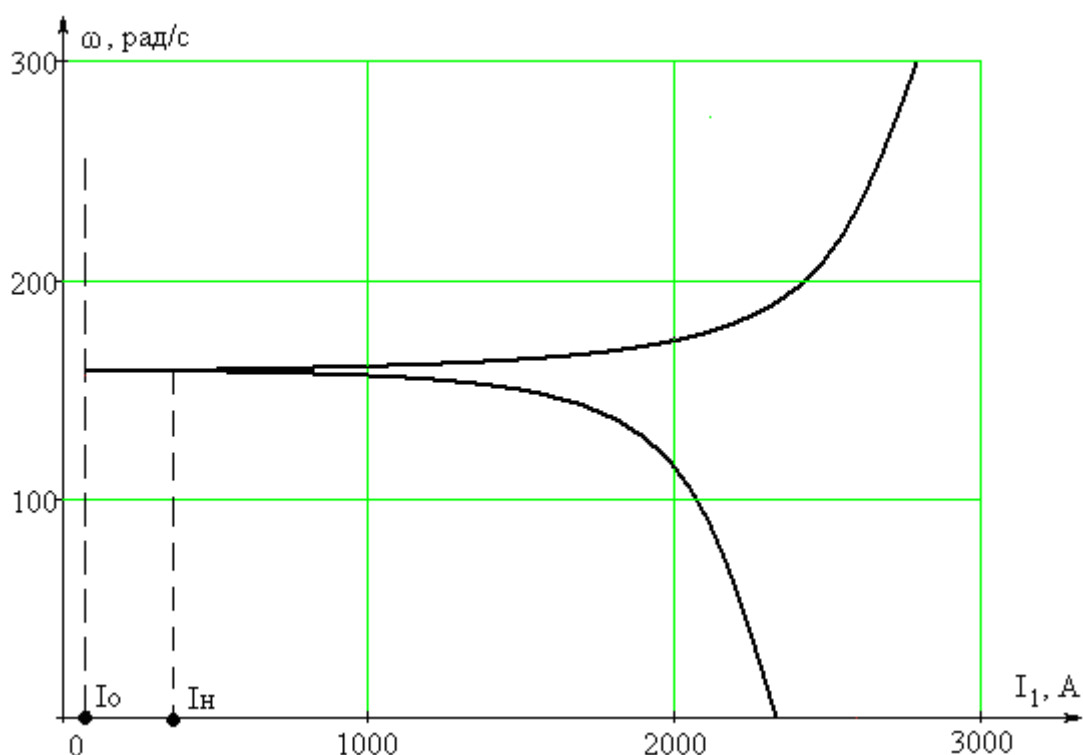


Рисунок 2.2 – Естественная электромеханическая характеристика асинхронного электродвигателя 5AM315M4

Вывод: контрольные точки удовлетворительно совпадают с полученными графиками электромеханической и механической характеристик, из чего следует, что нахождение параметров схемы замещения, исходя из каталожных данных асинхронного двигателя, выполнено верно.

## 2.2 Расчет переходных процессов при прямом пуске двигателя

Структурная схема модели асинхронного двигателя в неподвижной системе координат представлена на рисунке 2.3, согласно [6]

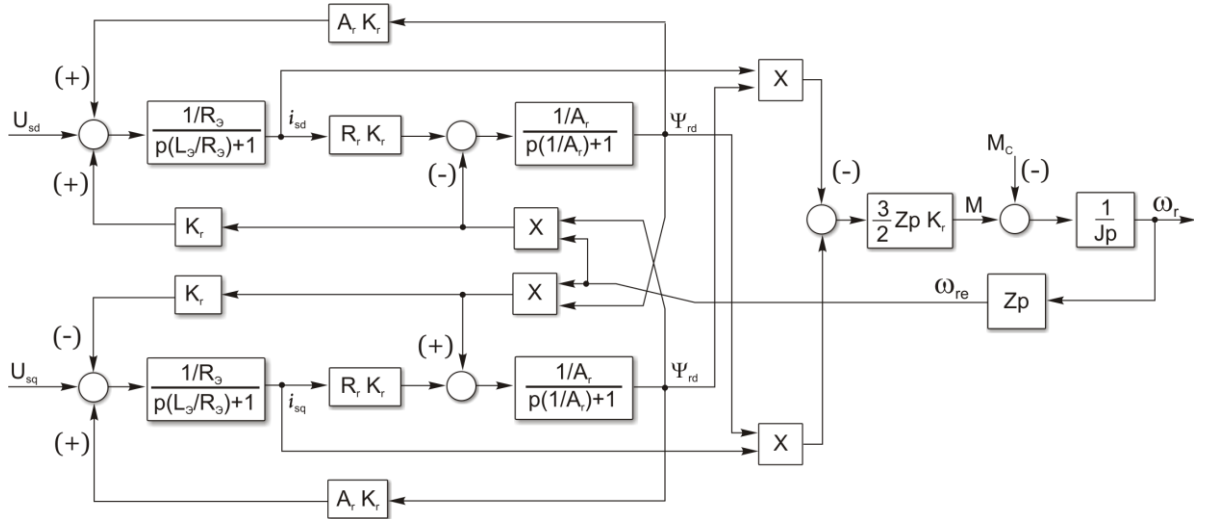


Рисунок 2.3 – Структурная схема модели асинхронного двигателя в неподвижной системе координат

Динамическую модель асинхронного двигателя составим в соответствии с его структурной схемой. Моделирование асинхронного двигателя будем производить в абсолютных единицах.

Определим значения коэффициентов структурной схемы асинхронного двигателя, а также требуемые параметры, для анализа динамики модели.

Амплитудное значение номинального фазового напряжения:

$$U = \sqrt{2} \cdot U_{1H} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,127 \text{ (В)}.$$

Амплитудное значение номинального фазного тока:

$$I = \sqrt{2} \cdot I_{1H} = \sqrt{2} \cdot 350,73 = 496,01 \text{ (А)}.$$

Номинальная угловая частота питающего напряжения двигателя:

$$\omega_{1H} = 2 \cdot \pi \cdot f_{1H} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ (рад/с)}.$$

Индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора:

$$L_{s\sigma} = \frac{X_{s\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,072}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00023 \text{ (Гн)},$$

$$L_{r\sigma} = \frac{X'_{r\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{ин}}} = \frac{0,098}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00031 \text{ (Гн)}.$$

Взаимная индуктивность [6]:

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{ин}}} = \frac{3,298}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,011 \text{ (Гн)}.$$

Полные индуктивности обмоток статора и ротора:

$$L_s = L_{s\sigma} + L_m = 0,00023 + 0,011 = 0,01123 \text{ (Гн)},$$

$$L_r = L_{r\sigma} + L_m = 0,00031 + 0,011 = 0,01131 \text{ (Гн)}.$$

Определим безразмерные коэффициенты:

$$L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} = 0,01123 - \frac{0,011^2}{0,01131} = 0,00053,$$

$$K_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0,011}{0,01131} = 0,973,$$

$$R_e = R_s + K_r^2 \cdot R_r = 6,513 \cdot 10^{-3} + 0,973^2 \cdot 6,485 \cdot 10^{-3} = 0,0127,$$

$$A_r = \frac{R_r}{L_r} = \frac{6,485 \cdot 10^{-3}}{0,01131} = 0,573,$$

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0,00053}{0,0127} = 0,0417,$$

$$T_{\text{АИН}} = \frac{1}{f_{\text{нec}}} = \frac{1}{10 \text{ кГц}} = 0,0001 \text{ (с)}.$$

Следует заметить, что введение абсолютных величин существенно приближает модель к реальной системе.

Имитационное моделирование динамических процессов в асинхронном двигателе произведем в соответствии со структурной схемой в программной среде MATLAB R2008a.

Имитационная модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат в программной среде Simulink представлена на рисунке 2.4. А также, имитационная модель подсистемы «Source», представляющей собой источник синусоидальных напряжений, сдвинутых на  $90^\circ$  относительно друг друга представлена на рисунке 2.5.

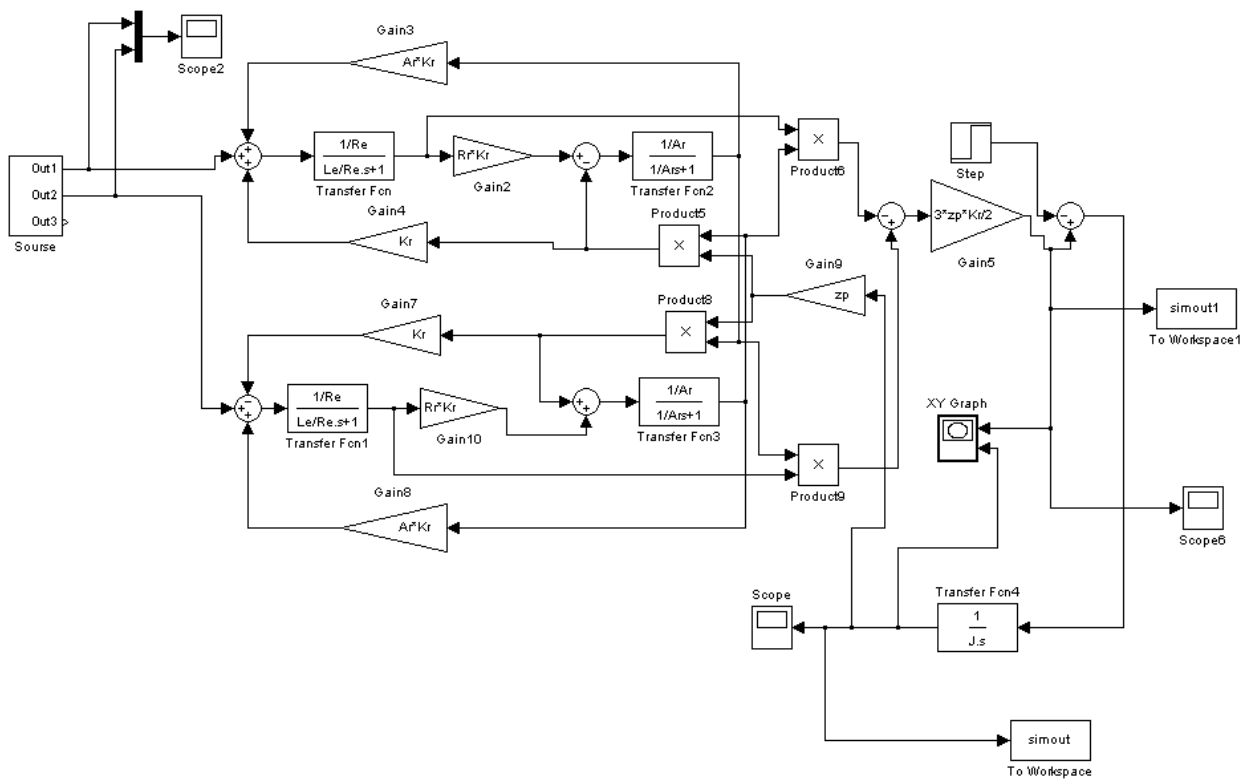


Рисунок 2.4 – Имитационная модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат в программной среде MATLAB Simulink

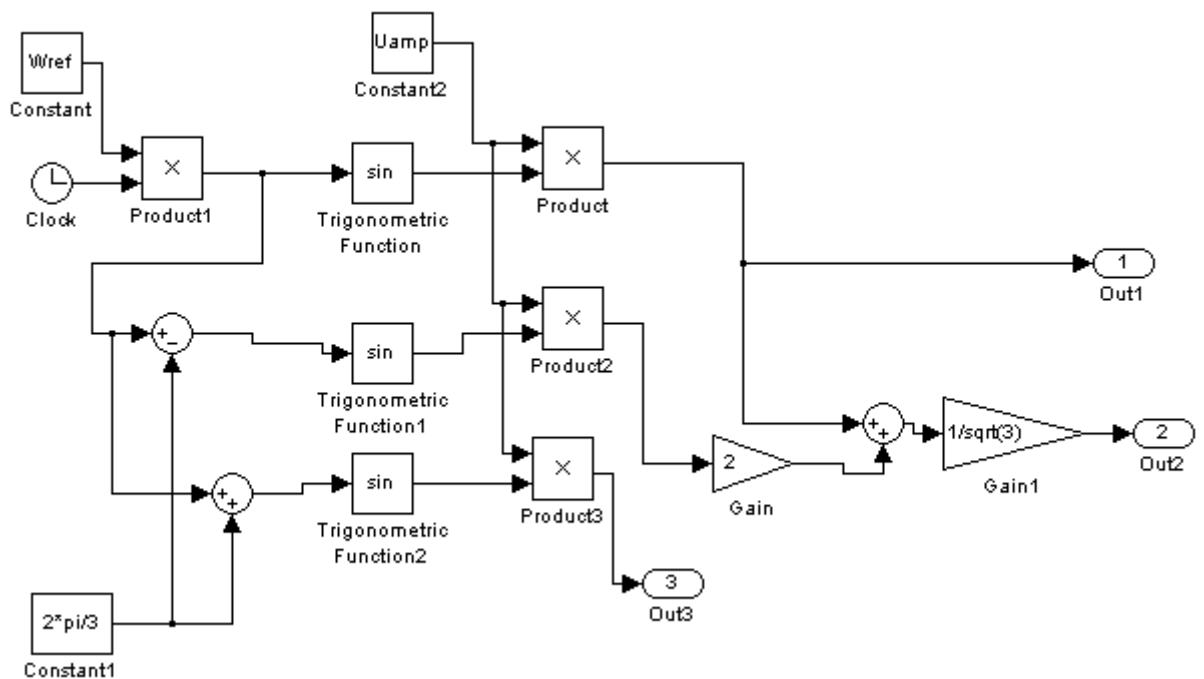


Рисунок 2.5 – Имитационная модель подсистемы «Source»

### *Протокол вводимых параметров:*

*%Параметры двигателя*

```
f=50;  
Rs=0.006513;  
Rr=0.006485;  
Ls_=0.072/(2*pi*f);  
Lr_=0.098/(2*pi*f);  
Lm=3.298/(2*pi*f);  
p=4;  
J=3.97;  
Ls=Ls_+Lm;  
Lr=Lr_+Lm;  
zp=p/2;  
Kr=Lm/Lr;  
Re=Rs+Rr*Kr^2;  
Le=Ls-Lm^2/Lr;  
Uamp=220*sqrt(2);  
Ar=Rr/Lr;  
Wref=2*pi*f;
```

Для того, чтобы исследовать динамику асинхронного двигателя проведем следующие действия: при прямом пуске осуществим пуск двигателя на холостом ходу, далее, в момент времени  $t=0,25$  с произведем наброс номинальной нагрузке, которая составляет:  $M_{\text{н(паспорт)}} = 1273,24 \text{ Н} \cdot \text{м}$

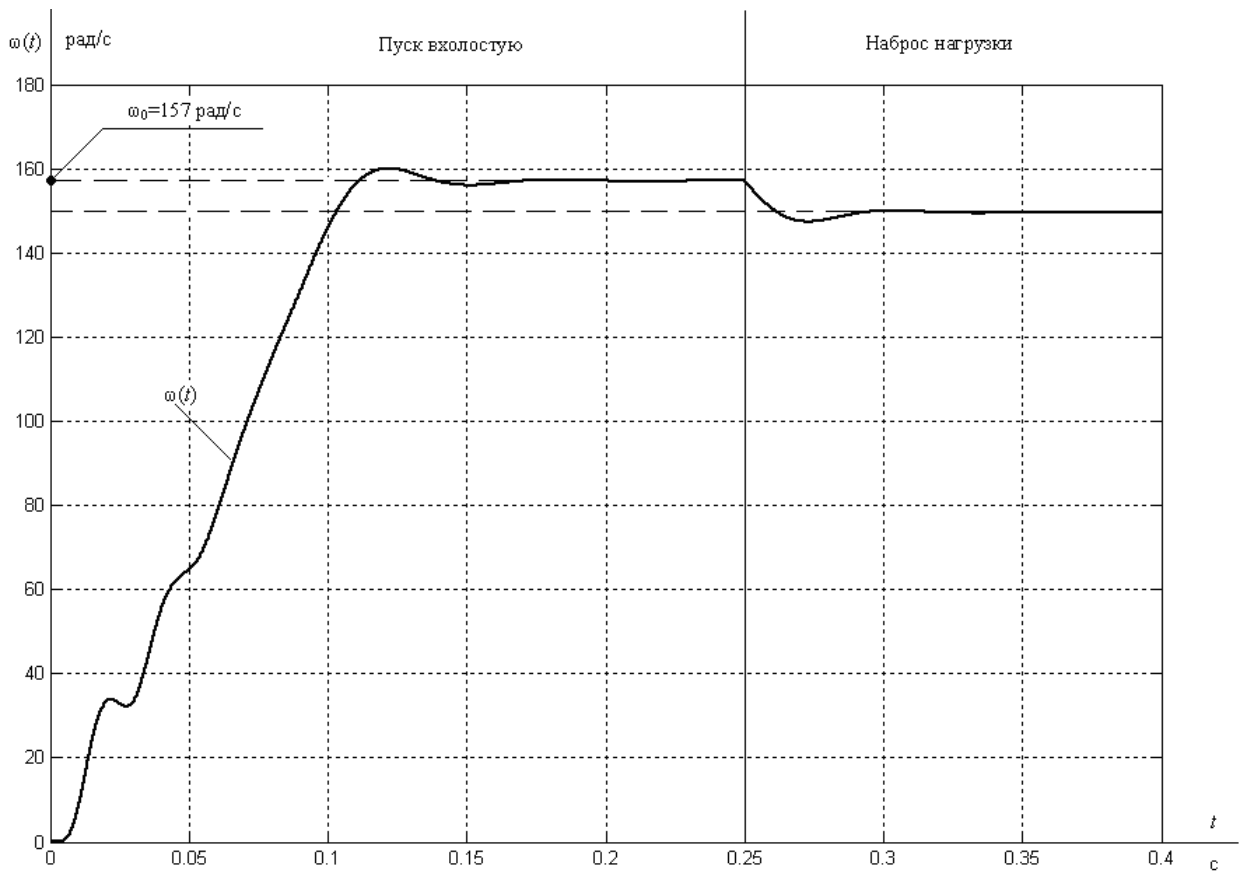


Рисунок 2.6 – Переходный процесс скорости при прямом пуске АД

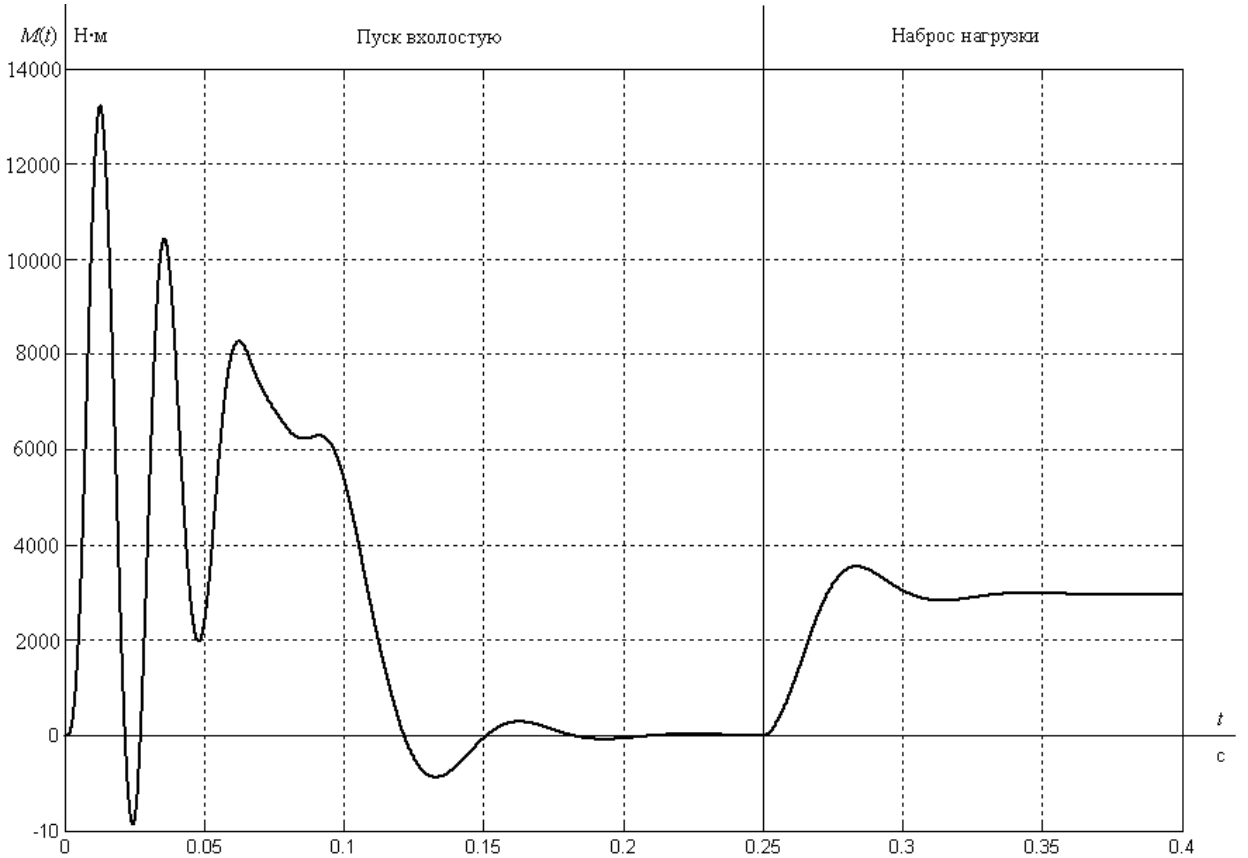


Рисунок 2.7 – Переходный процесс момента при прямом пуске АД

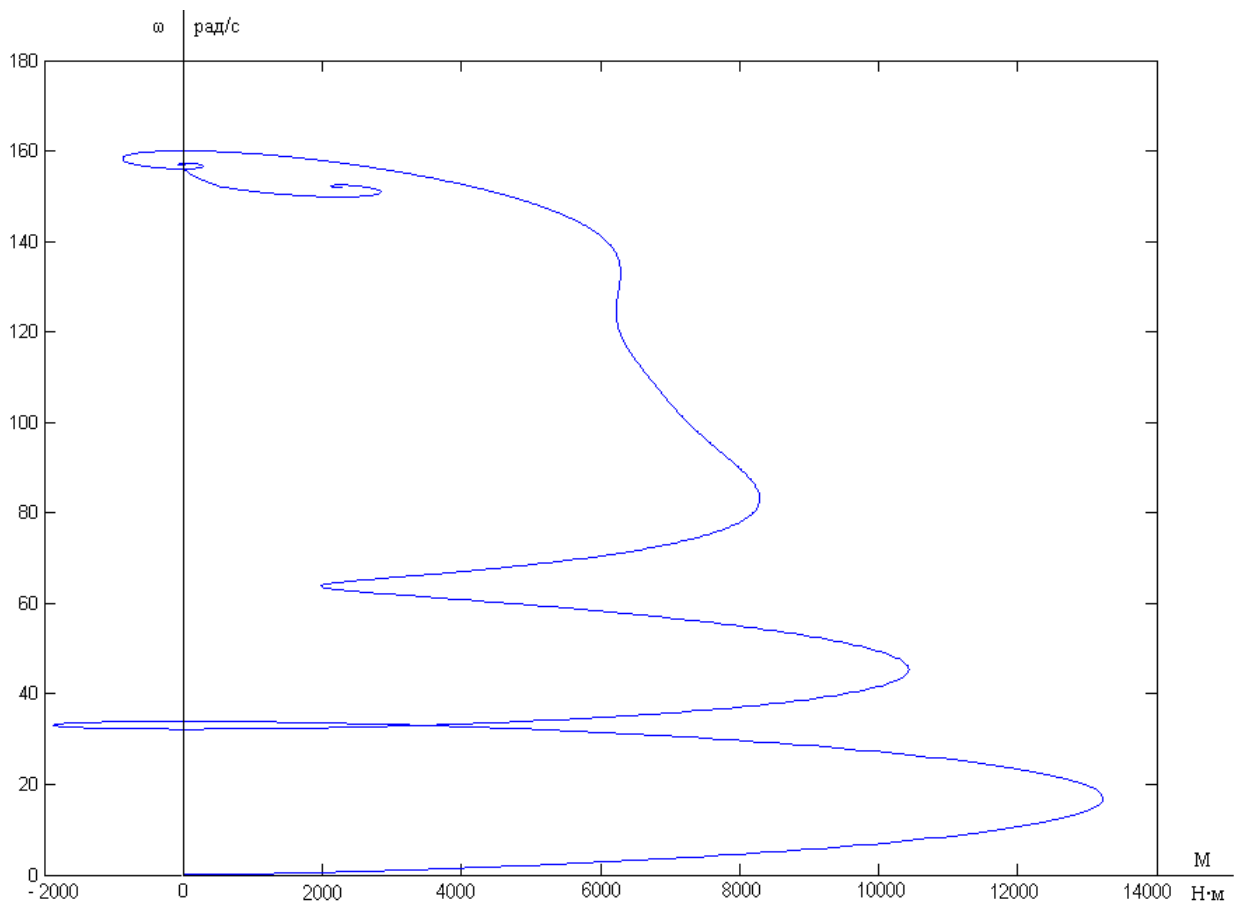


Рисунок 2.8 – Динамическая механическая характеристика АД

При анализе полученных графиков переходных процессов асинхронного двигателя при прямом пуске видно, что присутствует колебательная составляющая в кривой электромагнитного момента, которая изменяется в диапазоне от -1900 до 13900 Н·м и далее затухает по степени разгона двигателя.

Полученные графики переходных процессов доказывают, что двигатель является устойчивым звеном.

Вывод: исходя из полученных результатов расчета динамических и статических характеристик, можно сделать вывод, что параметры схемы замещения асинхронного двигателя верны.



## 2.3 Выбор преобразователя частоты

### 2.3.1 Принципы построения статических преобразователей частоты для электроприводов переменного тока

Основной функцией преобразователя частоты (ПЧ) для электрических приводов является конвертация переменного напряжения сети в переменное трехфазное напряжение с возможностью регулирования частоты, тока и напряжения. В современном приборостроении ПЧ, в основном, изготавливается на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых коммутаторов, таких как [7]:

- силовые транзисторы;
- запираемые тиристоры.

Преобразователи частоты, по типу связи с питающей сетью, делятся на 2 класса:

1. ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока, которые делятся на:

- автономные инверторы напряжения (АИН);
- автономные инверторы тока (АИТ).

Оба вышеописанных типа в своей структуре содержат управляемый или неуправляемый выпрямитель, силовой фильтр в звене постоянного тока и инвертор, конвертирующий постоянное напряжение или ток в цепи постоянного тока в соответствующие переменные величины заданной частоты.

2. Преобразователи частоты с непосредственной связью (ПЧНС).

Современное состояние рынка преобразователей частоты свидетельствует, что с появлением новейших конструкций и материалов полупроводниковых силовых элементов практически все производители приводной техники освоили серийный выпуск универсальных комплектных ПЧ на базе АИН. В связи с инвариантностью предложений производителей и активное позиционирование данного товара рассмотрим более подробно данную структуру ПЧ.

В звене постоянного тока, АИН может содержать ёмкостный, либо

индуктивно-ёмкостный фильтры. При работе инвертора в качестве источника напряжения на активно-индуктивную нагрузку, каковым и является рассматриваемый АД, из-за наличия ёмкости обеспечивается обмен реактивной энергией между АД и звеном постоянного тока. Для протекания вышеописанного процесса, кроме конденсаторов также необходимо использовать обратные диоды, VD1–VD6, который подключены параллельно основным ключам VT1–VT6. В моменты возврата реактивной энергии именно по этим диодам проходит ток от двигателя в ёмкость. Однако, на участке между ёмкостью и инвертором, ток в цепи может менять направление при низких значениях коэффициента. Что касается формы напряжения на выходе инвертора, то она определяется порядком переключения ключей VT1–VT6.

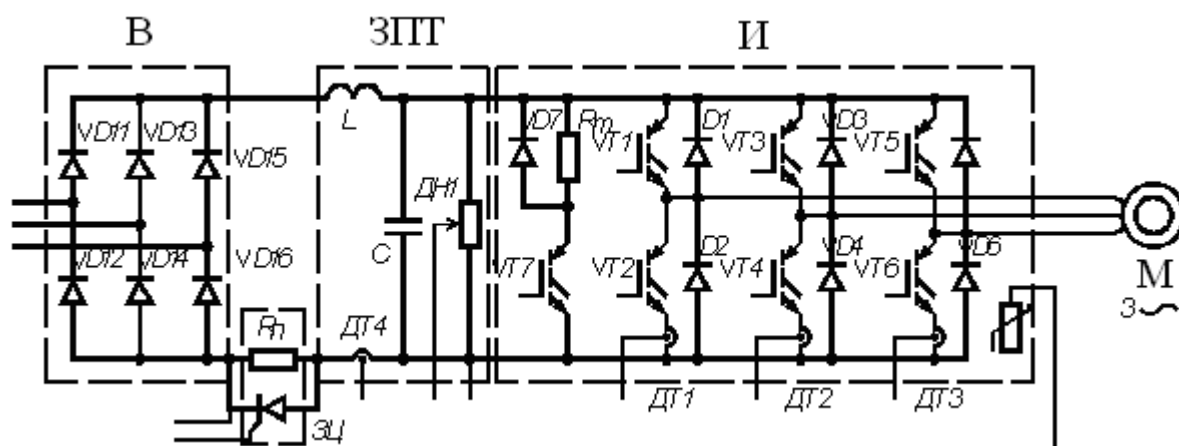


Рисунок 2.9 – Схема силовой части АИН

Для регулирования напряжения на выходе инвертора применяются следующие способы:

Путем изменения напряжения  $U_d$  в звене постоянного тока. Для реализации данного способа используется управляемый выпрямитель, а инвертор отвечает за коммутирование фаз, формируя требуемую частоту. Описанный ПЧ называется АИН с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ);

Путем широтно-импульсного регулирования напряжения (как в нашем случае) в инверторе, реализация которого происходит модуляцией напряжения

несущей частоты сигналом основной частоты. Описанный ПЧ называется АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Для повышения КПД системы, в них используется неуправляемый выпрямитель. В таком случае в АИН рекуперация энергии в питающую сеть не осуществляется.

В соответствии с требованиями технологического процесса электрический привод должен обеспечивать регулирование скорости в диапазоне  $D = 1 \div 100$  с погрешностью поддержания скорости  $\delta_{\%} \leq 10\%$  на нижней регулировочной характеристике. Для технологического процесса необходимо векторное управление без датчика скорости.

### 2.3.2 Преобразователь частоты фирмы Siemens

В соответствии с указанными основными особенностями работы ПЧ с АИН, важно отметить, что на данной силовой схеме реализовать основные законы управления АД возможно.

Выбор ПЧ зависит от множества факторов, как экономического, так и технического характера. Среди основных можно отметить наличие компаний-производителей в разных ценовых категориях.

Выбор ПЧ выполнен в соответствии с требованиями и задачами к приводу. На основе данных мощности двигателя, характера нагрузки и характеристиками питающей сети, выбран преобразователь с воздушным охлаждением 6SE7033-7EG60, с необходимыми функциями, производства фирмы Siemens [8].

Преобразователь можно подключать к питающей сети 3 АС от 200В до 690В с частотой питания 50/60 Гц.

#### *Конструкция блока:*

1. клеммы для подключения трехфазного питания и шины постоянного тока;
2. выпрямитель с устройством предварительного заряда, защищенный от замыкания на землю;
3. корзина электроники с платой управления;
4. панель управления РМУ;
5. звено постоянного тока с инвертором на IGBT транзисторах;
6. клеммы для подключения двигателя.

Преобразователь можно устанавливать в шкаф или монтировать на стену. При установке на стену должна соблюдаться требуемая степень защиты.

Для электрического отключения привода от питающей сети используется главный выключатель или разъединитель нагрузки. Рабочее включение преобразователя возможно с помощью главного контактора, управление которым можно осуществлять с помощью преобразователя. Для этого необходимы внешний источник питания электроники преобразователя DC 24В.

*Применяемые защиты привода:*

- от недопустимых отклонений технологического параметра (в режиме автоматического регулирования).
- от замыкания на землю;
- от токов перегрузки и короткого замыкания;
- от недопустимых отклонений и исчезновения напряжения;
- от перенапряжения на силовых элементах схемы;

В таблице 2.1 приведены Основные характеристики преобразователя частоты фирмы Siemens, согласно.

Таблица 2.1 – Основные характеристика преобразователя частоты фирмы Siemens

Номинальная мощность	Номинальный выходной ток	Базовый ток нагрузки	Ток перегрузки	Номинальный ток DC звена	Потребляемый ток	Преобразователь	Потери при 2,5 кГц	Примерный вес	Габаритные размеры
кВт	А	А	А	А	А	Заказной номер	кВт	кг	мм
200	370	337	503	440	407	6SE7033-7EG60	5,05	180	508×1450×465

Более подробная информация приведена в руководстве по эксплуатации.

### 3 ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

#### 3.1 Система векторного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости

Применение бездатчиковых систем асинхронных электроприводов с векторным управлением актуально лишь в тех ситуациях, где в соответствии с требованиями технологического процесса, диапазон регулирования скорости асинхронного двигателя не должен превышать  $D \leq 1:100$  [9]

В бездатчиковых системах, по мгновенным значениям токов и напряжений фаз двигателя на основе математической модели асинхронного двигателя, косвенно определяется вся информация о пространственных положениях и текущих значениях векторов потокосцепления, а также значениях скорости вращения асинхронного двигателя.

Выражение для вычисления электромагнитного момента асинхронного двигателя представляет собой произведение векторов  $\overline{\phi_2^*}$ , который комплексно сопряжен с вектором потокосцепления обмотки ротора  $\overline{\phi_2}$ , и вектора тока статора  $\overline{I_1}$ .

В случае, если система координат сориентирована по действительной составляющей потокосцепления ротора  $\phi_{2x}$ , то мнимая составляющая вектора потокосцепления ротора  $\phi_{2y}$  будет равняться нулю, тогда момент АД пропорционален произведению мнимой составляющей тока статора  $I_{1y}$  и действительной составляющей потокосцепления ротора  $\phi_{2x}$ . Соответствующее выражение представлено далее:

$$M = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_2'} (\phi_{2x} \cdot I_{1y}).$$

На основе представленной формулы строятся системы векторного управления асинхронным электроприводом с ориентацией по вектору потокосцепления ротора.

На рисунке 3.1. представлена функциональная схема асинхронного электропривода с бездатчиковым векторным управлением с ориентацией по вектору потокосцепления ротора.

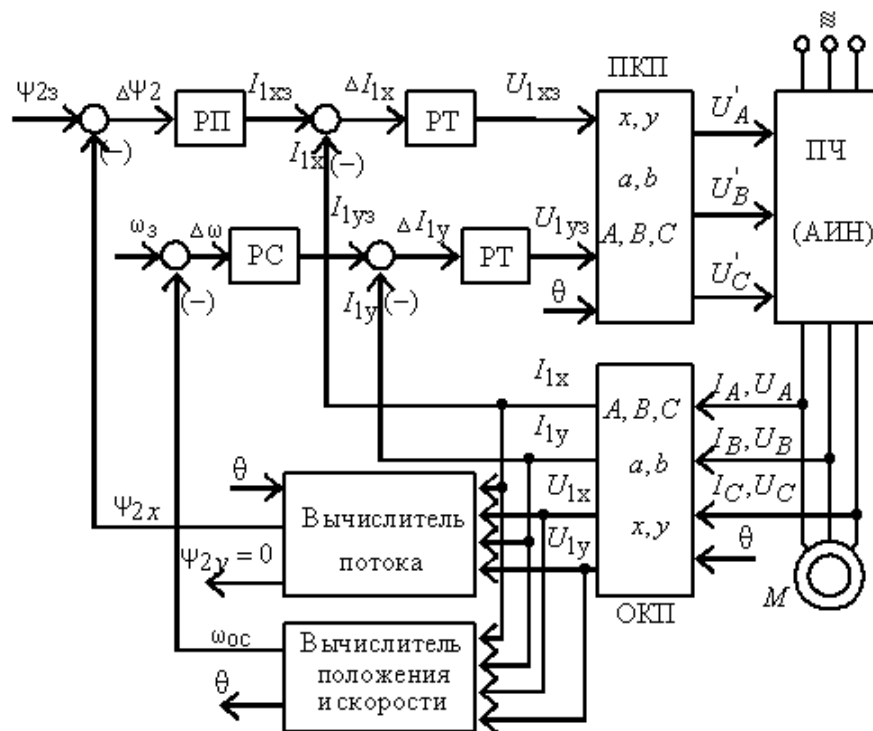


Рисунок 3.1 – Функциональная схема асинхронного электропривода с бездатчиковым векторным управлением с ориентацией по вектору потокосцепления ротора

В представленной функциональной схеме содержатся обратный (ОКП) и прямой (ПКП) координатные преобразователи. Построение системы управления электроприводом переменного тока реализуется только во вращающейся системе координат, в то время как токи и напряжения обмоток асинхронного двигателя являются гармоническими сигналами неподвижной трехфазной системы координат, именно отсюда и вытекает основная функция координатных преобразователей – взаимный перевод из одной системы координат в другую.

В зависимости от задающих сигналов скорости, а также потокосцепления и сигналов обратной связи, регуляторами системы управления сформируются сигналы управления во вращающейся системе координат.

Так, на примере прямого координатного преобразователя, управляющие сигналы в нем переводятся в сигналы  $U'_A, U'_B, U'_C$  неподвижной системы координат, которые в свою очередь и управляют инвертором.

Изначально, обратный координатный преобразователь производит расчет мгновенных значений напряжений трехфазной системы координат  $A, B, C$  в неподвижную систему координат  $a, jb$ :

$$U_{1a} = \frac{2}{3} \left[ U_{1A} - \frac{1}{2}(U_{1B} + U_{1C}) \right],$$

$$U_{1b} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{1B} - U_{1C}).$$

Далее происходит перевод напряжений во вращающуюся систему координат  $x, jy$ :

$$U_{1x} = U_{1a} \cos \theta + U_{1b} \sin \theta,$$

$$U_{1y} = -U_{1a} \sin \theta + U_{1b} \cos \theta.$$

Таким же образом производится обратное преобразование для расчета токов  $I_{1x}, I_{1y}$ .

На основании скорости вращения поля статора вычисляются мгновенные значения пространственных углов поворота векторов таких величин, как: потокосцепление, ток, напряжение.

$$\theta = \int_0^t \omega dt.$$

Система уравнений для составления структурной схемы АД с короткозамкнутым ротором в системе координат, вращающейся со скоростью  $\omega_k$ , имеет вид:



$$\left. \begin{aligned}
U_{1x} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1x} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_{\dot{e}} \cdot I_{1y} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2y} \\
U_{1y} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1y} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2y} + L'_1 \cdot \omega_{\dot{e}} \cdot I_{1x} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} \\
0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2x} - L_m \cdot I_{1x} - T_2 \cdot (\omega_{\dot{e}} - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2y} \\
0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2y} - L_m \cdot I_{1y} + T_2 \cdot (\omega_{\dot{e}} - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2x} \\
M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \\
p \cdot \omega &= \frac{1}{J} \cdot (M - M_c)
\end{aligned} \right\},$$

$$\text{где } K_2 = \frac{L_m}{L_2}, \quad T_1 = \frac{L'_1}{R'} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R'}, \quad R' = R_1 + R_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}, \quad L' = \sigma \cdot L_1.$$

Если во вращающейся системе координат совместить ось  $x$  с вектором потокоцепления ротора, то  $|\bar{\Psi}_2| = \Psi_{2x}$ ,  $\Psi_{2y} = 0$  и система (7.17) приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned}
I_{1x} &= \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \left[ U_{1x} + \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} + L'_1 \cdot \omega_{\dot{e}} \cdot I_{1y} \right] \\
I_{1y} &= \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \left[ U_{1y} - K_2 \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_{\dot{e}} \cdot I_{1x} \right] \\
\Psi_{2x} &= \frac{L_m}{T_2 \cdot p + 1} \cdot I_{1x} \\
\omega_{\dot{e}} &= z_p \cdot \omega + \frac{L_m}{T_2} \cdot \frac{I_{1y}}{\Psi_{2x}} \\
M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot \Psi_{2x} \cdot I_{1y} \\
\omega &= \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M - M_c)
\end{aligned} \right\}$$

Наилучшим вариантом осуществить систему регулирования скорости в такой системе координат, где присутствует связь с обобщенным вектором  $\Psi_2$ . Также, следует учесть, что систему регулирования скорости следует проектировать в двух осях, то есть она должна являться двухкоординатной.

Рассматриваемые каналы регулирования содержат следующие апериодические звенья:

- канал потокосцепления  $\psi_{2x}$  :  $W(p) = \frac{1/R'}{T_1' \cdot p + 1}$  и  $W(p) = \frac{L_m}{T_2 \cdot p + 1}$  ;
- канал регулирования тока  $i_{1y}$  и момента:  $W(p) = \frac{1/R'}{T_1' \cdot p + 1}$ .

Исходя из этого, важно отметить, что систему регулирования канала потокосцепления  $\psi_{2x}$  необходимо создавать как двухконтурную систему подчиненного регулирования, контуры которой будут настраиваться при помощи ПИ-регуляторов на модульный оптимум.

Для того, чтобы спроектировать и построить систему регулирования скорости хорошего качества, необходимо каким то образом скомпенсировать действие перекрестных связей, в данном случае будем осуществлять компенсацию путем введения соответствующих компенсирующих сигналов, в результате чего, возникают независимые каналы регулирования, в данном случае два, расчет параметров регуляторов которых производится рассмотренными ранее способами. Получившаяся структурная схема системы представлена на рисунке 3.2.

В данной системе, следует принять в качестве преобразователя частоты транзисторный инвертор напряжения, работающего по алгоритму синусоидальной широтно-импульсной модуляции на высокой несущей частоте.

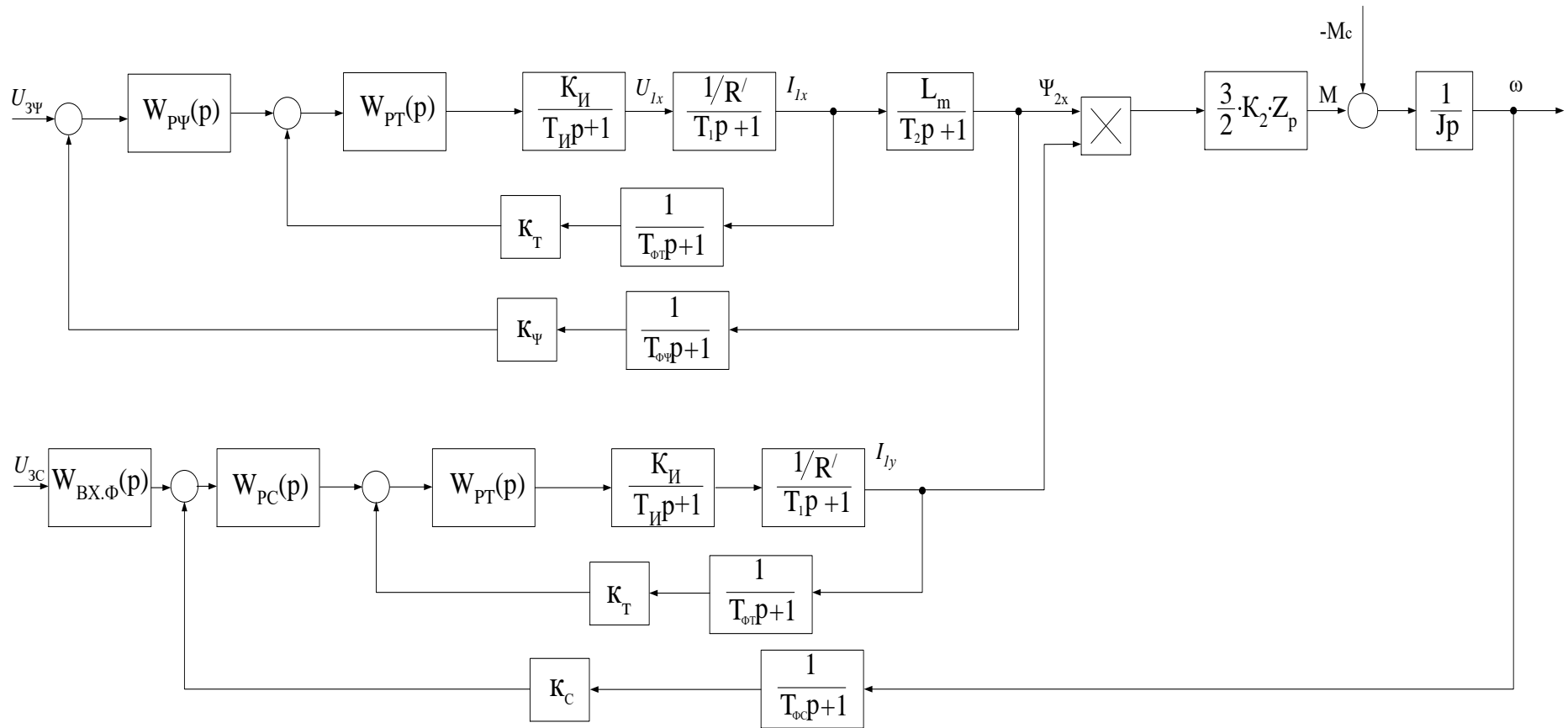


Рисунок 3.2 – Структурная схема асинхронного электропривода с векторным управлением

## 3.2 Оптимизация системы автоматического управления регулируемого электропривода

### 3.2.1 Расчет параметров силовой цепи

Коэффициент обратной связи по току [10]:

$$k_{mx} = k_{my} = \frac{U_{zt.макс}}{I_{эп.макс}} = \frac{10}{702} = 0,0142 \text{ В/А},$$

принять  $U_{zt.макс} = 10 \text{ В}$ ;

Коэффициент обратной связи по потокосцеплению:

$$k_{\Psi} = \frac{U_{з\Psi.макс}}{\Psi_n} = \frac{10}{0,937} = 10,67 \text{ В/Вб},$$

принять  $U_{з\Psi.макс} = 10 \text{ В}$ ,

$$\Psi_i = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 63,097 \cdot 0,0105 = 0,937 \text{ Вб}.$$

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$k_c = \frac{U_{зс.макс}}{\omega_{эп.макс}} = \frac{10}{157,08} = 0,064 \text{ В} \cdot \text{с/рад},$$

принять  $U_{зс.макс} = 10 \text{ В}$ ;

Минимальное время запаздывания в вычислении мгновенного значения тока статора можно определить исходя из положения теоремы В. А. Котельникова. Искажение информации не произойдет при выполнении следующего условия:

$$k_K \cdot f_H \leq f_{ТО},$$

где:

- $f_H$  – несущая частота инвертора напряжения;
- $f_H$  – частота вычислений мгновенного значения тока статора;
- $k_K \geq 2$  – коэффициент.

Тогда минимальное время запаздывания в вычислении мгновенного значения тока статора

$$T_{\text{ТО}} \geq \frac{1}{f_{\text{ТО}}} = \frac{1}{k_{\text{К}} \cdot f_{\text{Н}}}.$$

Высокая несущая частота  $f_{\text{н}}$  инвертора приближает ток статора двигателя к синусоидальному. Это одна из причин, из-за которой несущую частоту работы инвертора увеличивают до десятков килогерц. Однако чрезмерное увеличение несущей частоты приводит к увеличению коммутационных потерь в ключах инвертора. Оптимальное значение несущей частоты должно обеспечивать близкое к синусоидальному значению тока статора при приемлемых коммутационных потерях в ключах инвертора. Как правило, в современных инверторах напряжения несущая частота находится в диапазоне от 5 кГц до 20 кГц и определяется на практике при окончательной настройке преобразователя.

Принимаем значение несущей частоты  $f_{\text{Н}}=10000$  и  $k_{\text{К}}=2$ .

Тогда период вычислений тока статора:

$$T_{\text{ТО}} \geq \frac{1}{f_{\text{ТО}}} = \frac{1}{k_{\text{К}} \cdot f_{\text{Н}}} = \frac{1}{2 \cdot 10000} \geq 0,00005.$$

Для исключения случайностей в вычислении тока статора двигателя его сглаживают фильтрами. В этом случае окончательно принимаем:

$$T_{\mu\text{ТО}} = 5 \cdot T_{\text{ТО}} = 5 \cdot 0,00005 = 0,00025 \text{ с}.$$

Постоянная времени запаздывания в контуре потокосцепления:

$$T_{\mu\psi_0} = 8 \cdot T_{\mu\text{ТО}} = 8 \cdot 0,00025 = 0,002 \text{ с}.$$

Постоянная времени запаздывания в контуре скорости:

$$T_{\mu\omega_0} = 4 \cdot T_{\mu\text{ТО}} = 4 \cdot 0,00025 = 0,001 \text{ с}.$$

Постоянная времени инвертора:

$$T_{\text{И}} = \frac{1}{f_{\text{И}}} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{ с}.$$

Полное индуктивное сопротивление обмотки статора:

$$X_1 = X_m + X_{1\sigma} = 3,298 + 0,072 = 3,37 \text{ Ом}.$$

Полное индуктивное сопротивление обмотки ротора:

$$X'_2 = X_m + X'_{2\sigma} = 3,298 + 0,098 = 3,396 \text{ Ом.}$$

Коэффициент рассеяния [10]:

$$\sigma = 1 - \frac{X_m^2}{X_1 \cdot X'_2} = 1 - \frac{3,298^2}{3,37 \cdot 3,396} = 0,049.$$

Тогда:

$$K_2 = \frac{X_m}{X'_2} = \frac{3,298}{3,396} = 0,971.$$

Значение индуктивности цепи ротора:

$$L_2 = \frac{X'_2}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{3,396}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0108 \text{ Гн.}$$

Постоянная времени роторной цепи:

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0,0108}{0,168} = 1,68 \text{ с.}$$

Значение индуктивности статорной цепи:

$$L_1 = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{3,37}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0107 \text{ Гн.}$$

Приведенное значение индуктивности роторной цепи:

$$L'_2 = s \cdot L_2 = 0,049 \cdot 0,0108 = 0,00053 \text{ Гн.}$$

Приведенное значение полного активного сопротивления:

$$R' = R_1 + K_2^2 \cdot R_2 = 0,006513 + 0,971^2 \cdot 0,006425 = 0,0126 \text{ Ом.}$$

Постоянная времени статорной цепи:

$$T_1 = \frac{L'_2}{R'} = \frac{0,00053}{0,0126} = 0,042 \text{ с.}$$

Значение индуктивности контура намагничивания:

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{3,298}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0105 \text{ Гн.}$$

### 3.2.2 Оптимизация контура тока

Структурная схема контура тока с инерционной обратной связью представлена на рисунке 3.3 [10].

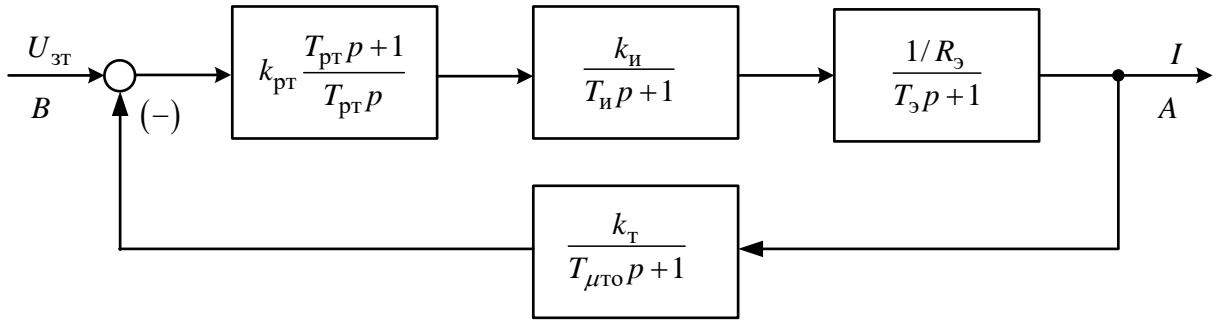


Рисунок 3.3 – Структурная схема контура тока

Контур содержит инерционные звенья первого порядка с постоянными времени:  $T_1 = 0,042\text{ с}$  ,  $T_{и} = 0,0001\text{ с}$  и  $T_{фТ} = 0,001\text{ с}$  .

Принимаем малую некомпенсированную постоянную времени контура:

$$T_{ит} = T_{\muПК} + T_{\muОК} ,$$

где:

- $T_{\muПК}$  – постоянная времени прямого канала контура тока,
- $T_{\muОК}$  – постоянная времени обратного канала контура тока.
- $T_{\muПК} = 0,5 \cdot T_{и} = 0,5 \cdot 0,0001 = 0,00005\text{ с}$ ;
- $T_{\muОК} = T_{фТ} + T_{\DeltaЦП} = 0,001\text{ с}$ ;
- $T_{ит} = T_{\muПК} + T_{\muОК} = 0,00005 + 0,001 = 0,00105\text{ с}$ .

Контур тока настраиваем на модульный оптимум (МО). С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией:

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

где:

- $T_{pT} = T_1 = 0,042 \text{ с}$  – постоянная времени регулятора;
- $k_{pT} = \frac{T_1 \cdot R'}{k_{И} \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\mu T}} = \frac{0,042 \cdot 0,0126}{31,1 \cdot 0,0143 \cdot 2 \cdot 0,00105} = 0,567$  – коэффициент

усиления регулятора;

- $k_T = \frac{U_{зт.макс}}{I_{1макс}} = \frac{10}{702} = 0,0143 \frac{\text{В}}{\text{А}}$  – коэффициент обратной связи по току;
- $U_{зт.макс}$  – максимальное напряжение задания на ток  $U_{зт.макс} = 10 \text{ В}$ ;
- $a_T = 2$  – коэффициент оптимизации контура тока по МО;
- $I_{1макс} = 702 \text{ А}$  – максимальный кратковременный ток преобразователя

$$W_{pT}(p) = 0,567 \cdot \frac{0,042 \cdot p + 1}{0,042 \cdot p},$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура тока:

- $\sigma = 4,3\%$  – перерегулирование;
- $t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,00105 = 0,004305 \text{ с}$  – время первого согласования;
- $t_{py2}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,00105 = 0,004305 \text{ с}$  – время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего задания;
- $\omega_n^{(m)} = \omega_n^{(\phi)} = \frac{0,71}{T_{\mu m}} = \frac{0,71}{0,00105} = 676,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  – полоса пропускания по модулю

и фазе.

На рисунке 3.4 представлена имитационная модель контура тока

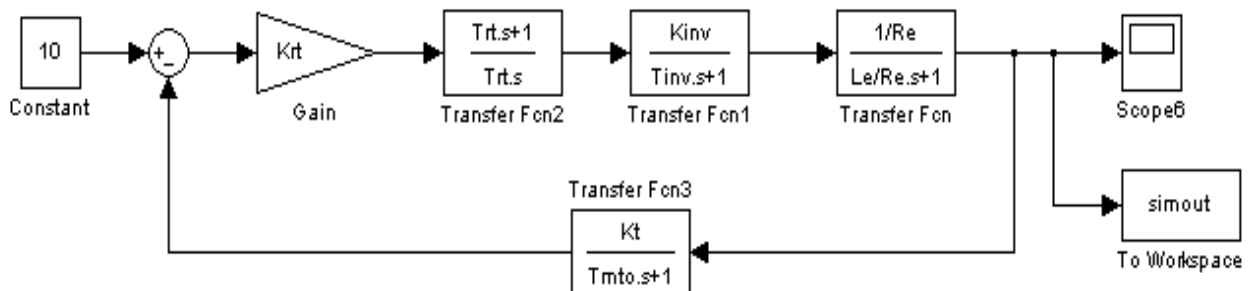


Рисунок 3.4 – Имитационная модель контура тока в программной среде MATLAB Simulink



### Протокол вводимых параметров:

```

%Оптимизация
Kinv=31.1;
finv=10000;
Tinv=0.5/finv;
Tmto=0.00025;
Kt=10/(351*2);

Te=Le/Re;
Krt=(Te*Re)/(Kinv*Kt*2*(Tmto+Tinv));
Trt=Te;

Tmco=0.0031;
Kp=10/1%39.6;
Krp=(Kt)/(Kp*Kr*Rr*2*(Tmco+2*(Tmto+Tinv)));
Trp=1/Ar;

Kc=10/157.08;
Tmco=0.0124;
Krc=(J*Kt)/(2*(Tmco+2*(Tmto+Tinv))*Kc*Kr*zp*3/2);
Trc=2*2*(Tmco+2*(Tmto+Tinv));

%Параметры двигателя
f=50;
Rs=0.006513;
Rr=0.006485;
Ls_=0.072/(2*pi*f);
Lr_=0.098/(2*pi*f);
Lm=3.298/(2*pi*f);
p=4;
J=3.97;
Ls=Ls_+Lm;
Lr=Lr_+Lm;
zp=p/2;

Kr=Lm/Lr;
Re=Rs+Rr*Kr^2;
Le=Ls-Lm^2/Lr;
Uamp=380*sqrt(2);
Ar=Rr/Lr;
Wref=2*pi*f;

```

На рисунке 3.5. приведены результаты моделирования ПП в контуре тока при  $U_{зт} = 10$  В, в виде переходной характеристики  $i(t)$ , настроенного на модульный оптимум.

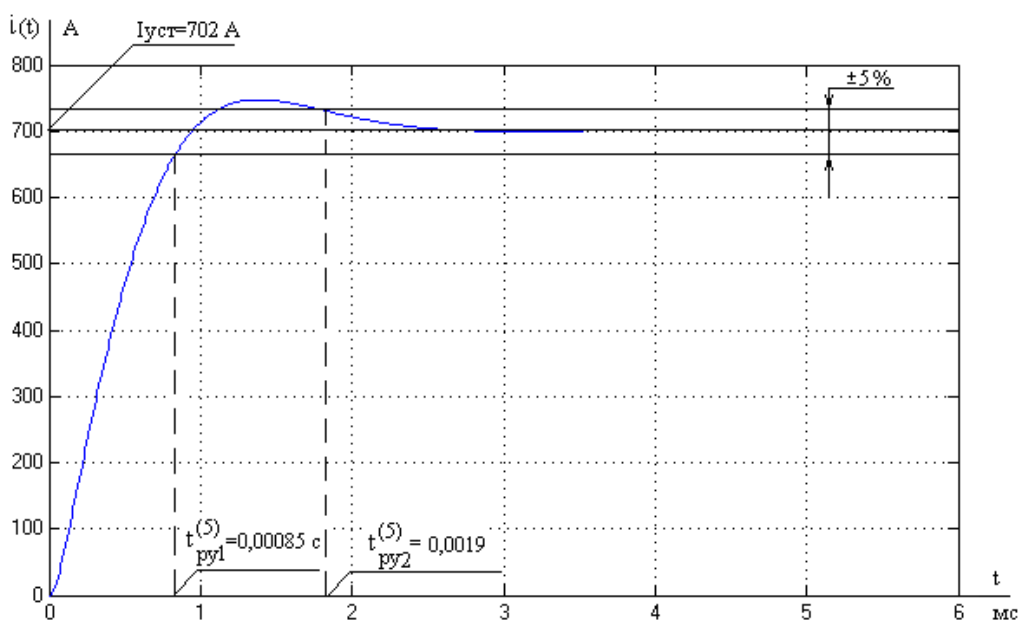


Рисунок 3.5 – Переходный процесс в контуре тока при  $U_{зт}=10$  В

При анализе результатов моделирования можно сделать вывод, что данная конфигурация удовлетворяет ожидаемые показатели работы контура.

Для наглядности сведем результаты моделирования в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Показатели работы контура тока

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	4,3	6,4
$t_{py1}^{(5)}, c$	0,00435625	0,00085
$t_{py2}^{(5)}, c$	0,00435625	0,0019

### 3.2.3 Оптимизация контура потокосцепления

Структурная схема контура потокосцепления с инерционной обратной связью представлена на рисунке 3.6, согласно [10].

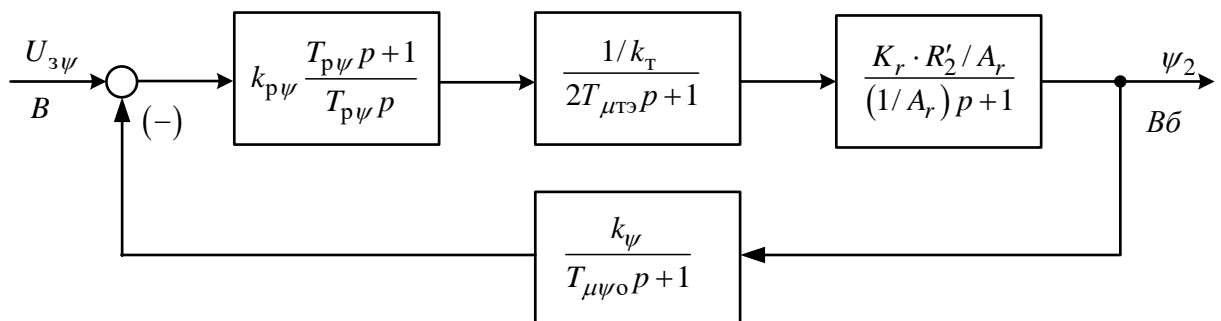


Рисунок 3.6 – Структурная схема контура потокосцепления

#### Параметры элементов контура

Контур потокосцепления настраиваем на модульный оптимум (МО). С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией:

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

где:

- $k_{p\psi} = \frac{k_T \cdot T_2}{k_{\psi} \cdot L_m \cdot 2 \cdot T_{\mu\psi}} = \frac{0,0143 \cdot 1,68}{10 \cdot 0,0105 \cdot 2 \cdot 0,0031} = 36,9$  – коэффициент усиления

регулятора потокосцепления;

- $T_{\mu\psi} = a_m \cdot T_{\mu m} + T_{\phi\psi} = 2 \cdot 0,00105 + 0,001 = 0,0031 \text{ с}$  – малая постоянная времени контура потокосцепления;
- $L_m = L_m = 0,07455$  – индуктивность контура намагничивания.

$$W_{p\psi}(p) = k_{p\psi} \cdot \frac{T_{p\psi} \cdot p + 1}{T_{p\psi} \cdot p} = 36,9 \cdot \frac{1,68 \cdot p + 1}{1,68 \cdot p};$$

На вход контура потокосцепления устанавливаем фильтр, передаточная функция которого определяется выражением [10]:

$$W_{BX.\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi\psi} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,001 \cdot p + 1}.$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости, настроенного на МО:

- $\sigma = 8,1\%$  – перерегулирование;
- $t_{py1}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu\tau} = 7 \cdot 0,00105 = 0,00735 \text{ с}$  – время первого согласования;
- $t_{py2}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu\tau} = 12 \cdot 0,00105 = 0,0126 \text{ с}$  – время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего задания;
- $\omega_n^{(M)} = \frac{0,5}{T_{\mu m}} = \frac{0,5}{0,00105} = 476,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  – полоса пропускания по модулю;
- $\omega_n^{(\phi)} = \frac{0,35}{T_{\mu m}} = \frac{0,35}{0,00105} = 333,3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  – полоса пропускания по фазе.

На рисунке 3.7 представлена имитационная модель контура потокосцепления

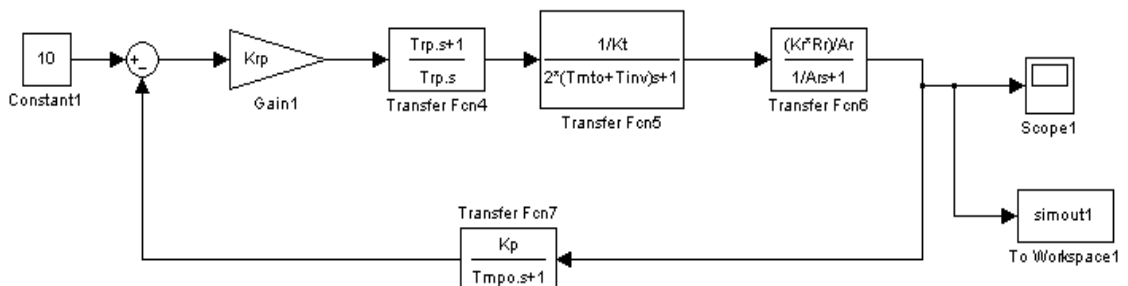


Рисунок 3.7 – Имитационная модель контура потокосцепления в программной среде MATLAB Simulink

## Протокол вводимых параметров:

```

%Параметры двигателя
f=50;
Rs=0.006513;
Rr=0.006485;
Ls_=0.072/(2*pi*f);
Lr_=0.098/(2*pi*f);
Lm=3.298/(2*pi*f);
p=4;
J=3.97;
Ls=Ls_+Lm;
Lr=Lr_+Lm;
zp=p/2;
Kr=Lm/Lr;
Re=Rs+Rr*Kr^2;
Le=Ls-Lm^2/Lr;
Uamp=380*sqrt(2);
Ar=Rr/Lr;
Wref=2*pi*f;

%ОПТИМИЗАЦИЯ
Kinv=31.1;
finv=10000;
Tinv=0.5/finv;
Tmto=0.00025;
Kt=10/(351*2);
Te=Le/Re;
Krt=(Te*Re)/(Kinv*Kt*2*(Tmt
o+Tinv));
Trt=Te;
Tmto=0.0031;
Kp=10/1%39.6;
Krp=(Kt)/(Kp*Kr*Rr*2*(Tmto+
2*(Tmto+Tinv)));
Trp=1/Ar;

```

Результаты моделирования переходных процессов в контуре потокосцепления, настроенного на модульный оптимум, при отработке ступенчатого входного воздействия  $U_{3\psi} = 10$  В приведены на рисунке 3.8.

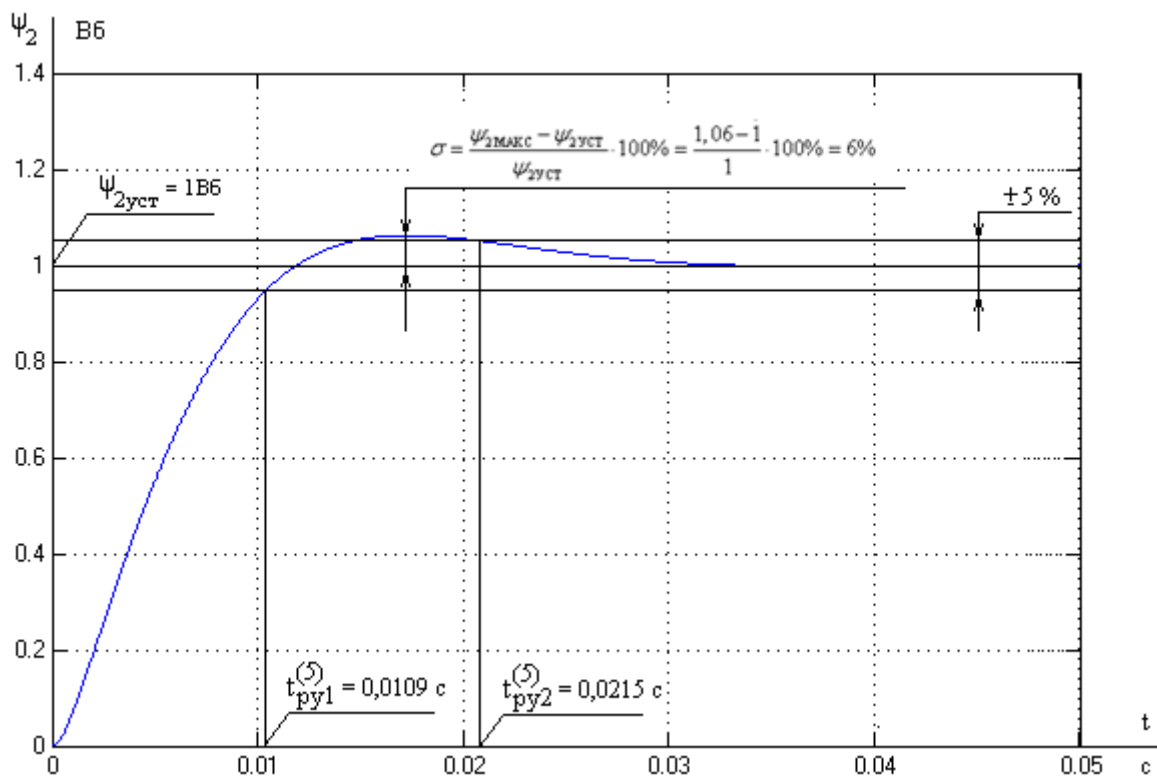


Рисунок 3.8 – Переходный процесс в контуре потокосцепления при  $U_{3\psi} = 10$  В

В таблице 3.2 приведены показатели работы замкнутого контура потокосцепления

Таблица 3.2 – Показатели работы замкнутого контура потокосцепления

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	8,1	6
$t_{py1}^{(5)}, c$	0,0074375	0,0109
$t_{py2}^{(5)}, c$	0,01275	0,0215

Разница экспериментальных и ожидаемых параметров связана с наличием апериодического звена первого порядка в цепи обратной связи контура и на его входе.

Анализ переходных процессов пуска двигателя показывает, что они полностью удовлетворяют требованиям технического задания.

### 3.2.4 Оптимизация САР скорости

Структурная схема линейризованной САР скорости приведена на рисунке 3.9, согласно

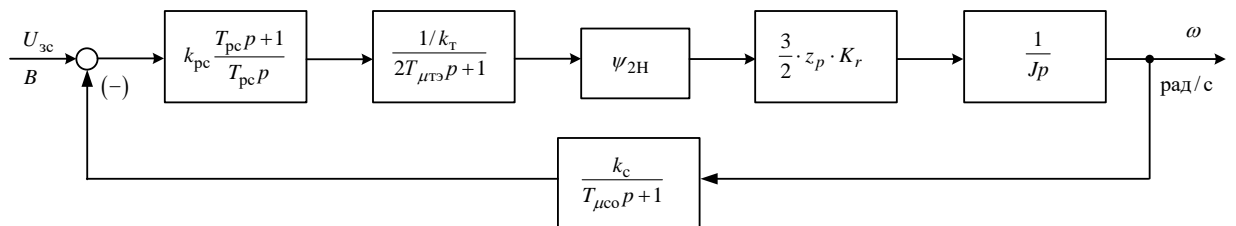


Рисунок 3.9 – Структурная схема контура скорости

#### *Оптимизация контура скорости*

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

$$W(p)_{\text{зам.т}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\text{тэ}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{k_r}$$

Коэффициент обратной связи по скорости [10]:

$$k_c = \frac{U_{\text{эс макс}}}{\omega_{\text{эп макс}}} = \frac{10}{157,08} = 0,064 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}},$$

где:  $\omega_{\text{эп макс}} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  – номинальная скорость электродвигателя.

Постоянная времени запаздывания в контуре скорости:

$$T_{\mu\text{со}} = 4 \cdot T_{\mu\text{то}} = 4 \cdot 0,00025 = 0,001 \text{ с.}$$

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости:

$$W_{\text{рс}}(p) = k_{\text{рс}} \cdot \frac{T_{\text{рс}} \cdot p + 1}{T_{\text{рс}} \cdot p}$$

Коэффициент усиления регулятора скорости:

$$k_{\text{рс}} = \frac{J \cdot k_m}{\psi_{2\text{н}} \cdot \frac{3}{2} \cdot K_r \cdot z_p \cdot k_c} \cdot \frac{1}{a_c \cdot (2 \cdot T_{\mu\text{тэ}} + T_{\mu\text{со}})} =$$

$$= \frac{3,97 \cdot 0,0143}{0,937 \cdot \frac{3}{2} \cdot 0,973 \cdot 2 \cdot 0,064} \cdot \frac{1}{2 \cdot (2 \cdot 0,00035 + 0,001)} = 89,417,$$

где  $a_c = 2$  – коэффициент оптимизации.

Постоянная времени регулятора скорости:

$$T_{\text{рс}} = b_c \cdot a_c \cdot (2 \cdot T_{\mu\text{тэ}} + T_{\mu\text{со}}) = 2 \cdot 2 \cdot (2 \cdot 0,00035 + 0,001) = 0,0068 \text{ с.}$$

При обработке ступенчатого управляющего воздействия контуром скорости с ПИ-регулятором, выяснили, что перерегулирование переходного процесса скорости превышает 43%. Для того, чтобы удержать перерегулирование в диапазоне 8,1%, необходимо на входе контура скорости установить два апериодических фильтра 1-ого порядка, передаточные функции которых описаны далее:

$$W_{\text{ф.вх1}}(p) = \frac{1}{T_{\text{рс}} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,0068 \cdot p + 1};$$

$$W_{\text{ф.вх2}}(p) = \frac{1}{T_{\mu\text{co}} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,001 \cdot p + 1}.$$

Ожидаемые показатели качества работы контура скорости с ПИ-регулятором и фильтрами на входе:

- перерегулирование  $\sigma = (8,1 \div 10) \%$  ;
- время первого и окончательного вхождения в 5% зону при обработке ступенчатого задания:

$$t_{\text{py1}}^{(5)} = (7 \div 5,8) \cdot (2 \cdot T_{\mu\text{тэ}} + T_{\mu\text{co}}) = (7 \div 5,8) \cdot (2 \cdot 0,00035 + 0,001) = 0,0119 \div 0,01 \text{ с};$$

$$t_{\text{py2}}^{(5)} = (12 \div 9,5) \cdot (2 \cdot T_{\mu\text{тэ}} + T_{\mu\text{co}}) = (12 \div 9,5) \cdot (2 \cdot 0,00035 + 0,001) = 0,0204 \div 0,0162 \text{ с}.$$

Имитационная модель контура скорости с фильтрами на входе представлена на рисунке 3.10.

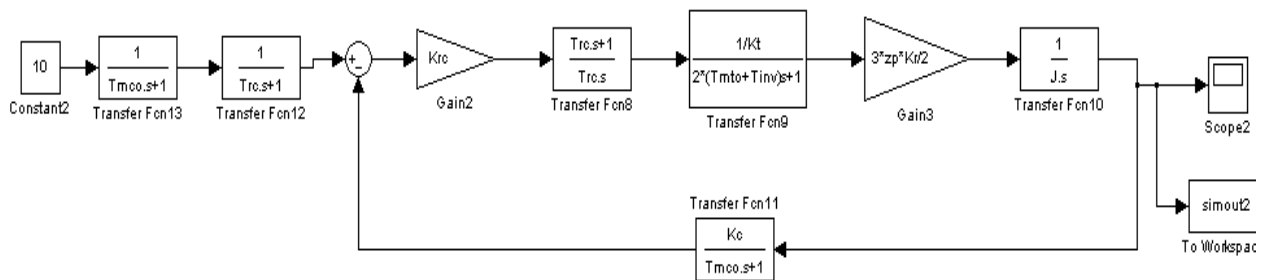


Рисунок 3.10 – Имитационная модель контура скорости с фильтрами на входе в программной среде MATLAB Simulink

Результаты моделирования переходных процессов в контуре скорости, настроенного на симметричный оптимум, при обработке ступенчатого входного воздействия  $U_{\text{зс}} = 10 \text{ В}$  приведены в виде переходной характеристики  $\omega(t)$  на рисунке 3.11.

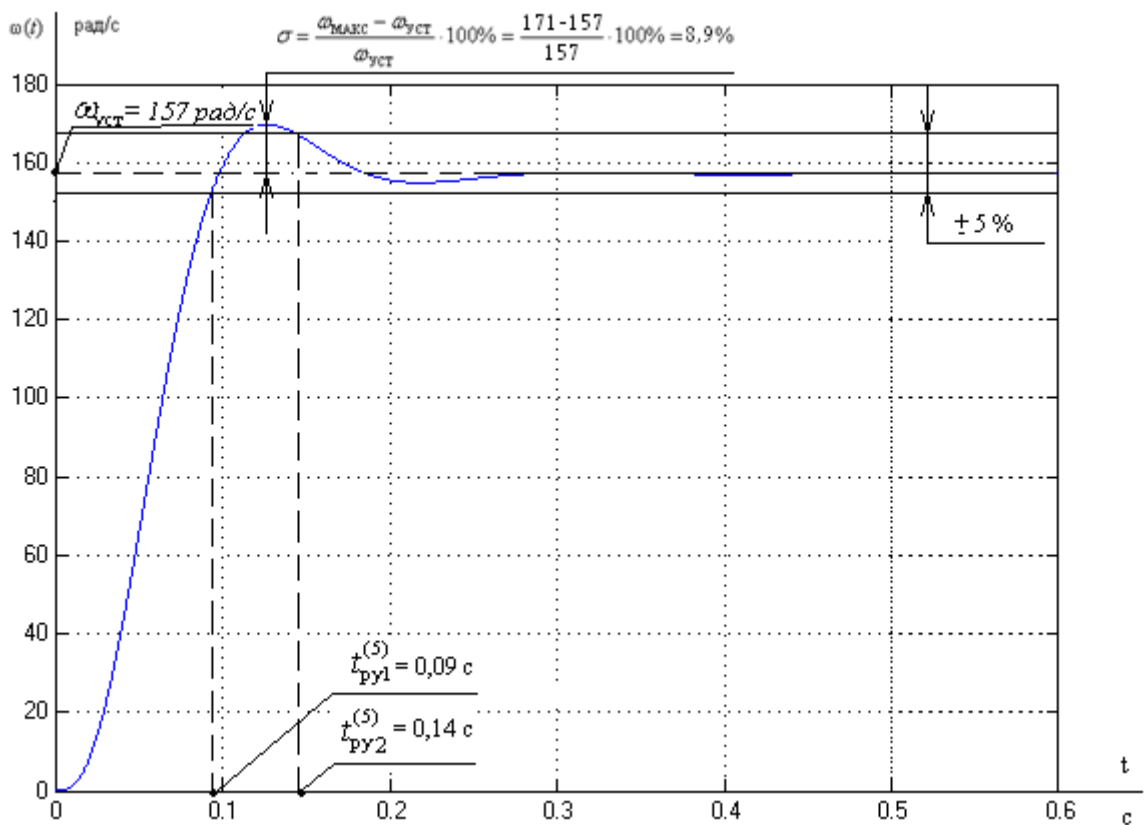


Рисунок 3.11 – Переходный процесс в контуре скорости при  $U_{3C}=10 \text{ В}$

Результаты моделирования сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Показатели работы замкнутого контура скорости

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	8,1 ÷ 10	8,9
$t_{\text{ру1}}^{(5)}, \text{ с}$	0,0119 ÷ 0,01	0,09
$t_{\text{ру2}}^{(5)}, \text{ с}$	0,0204 ÷ 0,0162	0,14

Отличие экспериментальных показателей качества переходных процессов от ожидаемых, объясняется наличием малой постоянной времени не только в прямом, но и в обратном канале контура.



#### 4 ИССЛЕДОВАНИЕ САУ РЭП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ В НЕПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Необходимость согласование регуляторов координат электропривода и модели двигателя в неподвижной системе координат появляется из-за того, что система управления может быть создана лишь во вращающейся системе координат, в то время как реальные токи и напряжения – это токи в неподвижной системе координат. В связи с данным фактом и появляется необходимость согласования посредством координатных преобразователей. [11]

Применяя прямое и обратное преобразование Парка, произведем преобразование координат из неподвижной системы координат во вращающуюся и наоборот исходя из следующих формул:

$$\left. \begin{aligned} i_x &= i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \\ i_y &= -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta \end{aligned} \right\},$$
$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= i_x \cos \theta - i_y \sin \theta \\ i_\beta &= i_x \sin \theta + i_y \cos \theta \end{aligned} \right\}.$$

На структурной схеме эти преобразования осуществляются блоками ПКП (прямой преобразователь координат) и ОКП (обратный преобразователь координат).

Блок ВП (вычислитель потока) рассчитывает модуль и угол поворота вектора потокосцепления ротора, используя информацию о проекциях вектора потокосцепления на оси  $\alpha$  и  $\beta$  неподвижной системы координат. Расчет производится по следующим формулам:

$$|\psi_2| = \sqrt{\psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2};$$
$$\theta_{\psi_2} = \arctg \left( \frac{\psi_{2\beta}}{\psi_{2\alpha}} \right).$$

Структурная схема асинхронного двигателя в неподвижной системе координат и его имитационная модель в программной среде MATLAB Sim-

ulink представлена на рисунках 4.1 и 4.2 соответственно.

Сигнал задания на скорость подается на вход системы с задержкой после окончания переходных процессов в контуре потокосцепления. Для исследования работы САУ РЭП производится пуск электропривода вхолостую и дальнейший наброс номинальной нагрузки

$$M_{n(\text{паспорт})} = 1273,24 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$



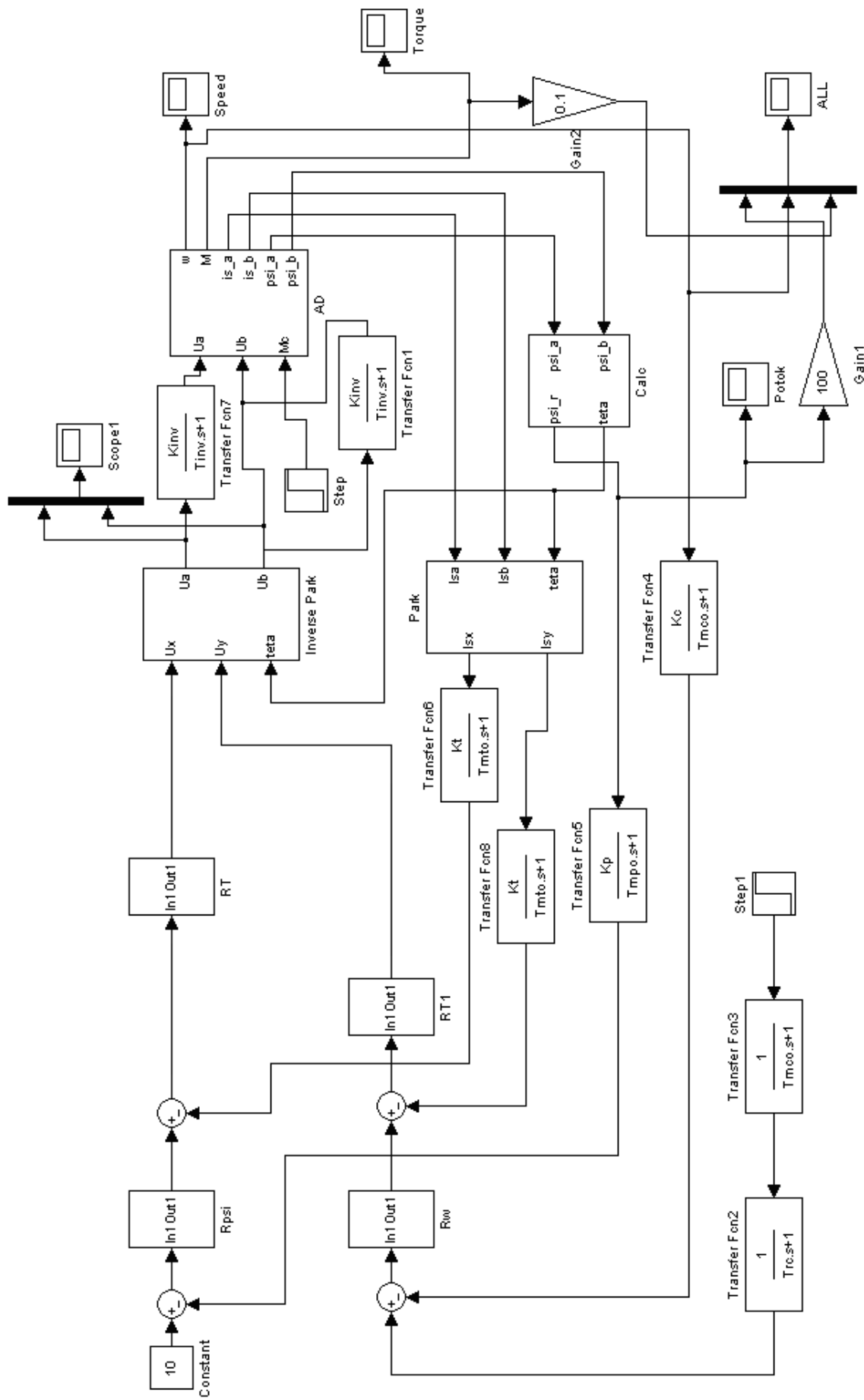


Рисунок 4.2 – Имитационная модель САУ РЭП с использованием модели двигателя в неподвижной системе координат

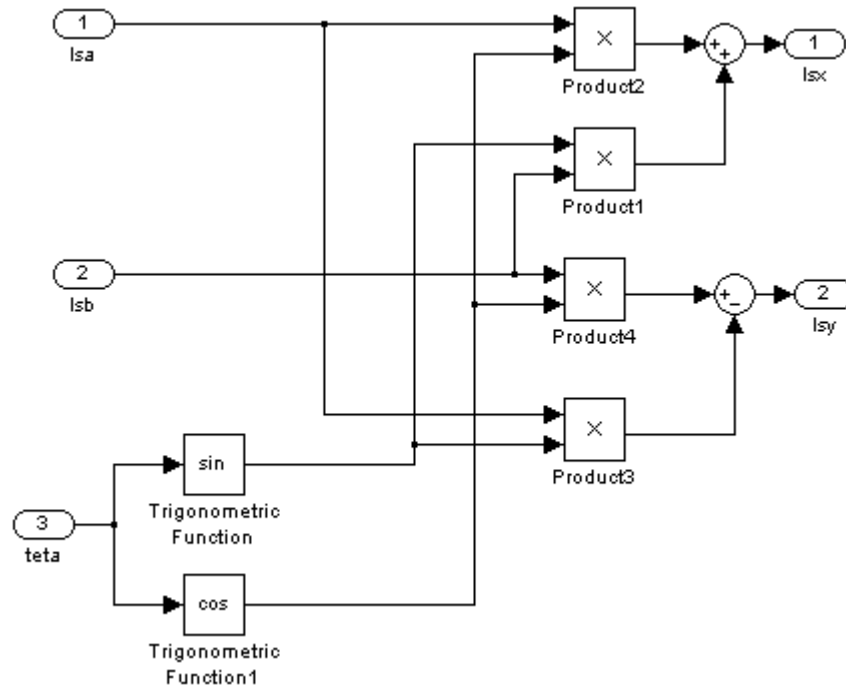


Рисунок 4.3 – Подсистема «Park»

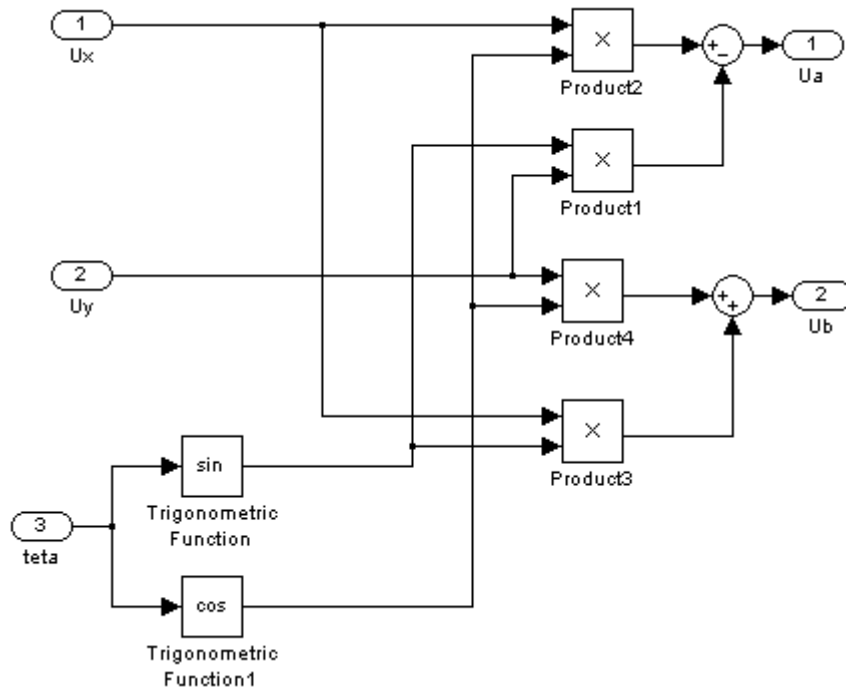


Рисунок 4.4 – Подсистема «Inverse Park»

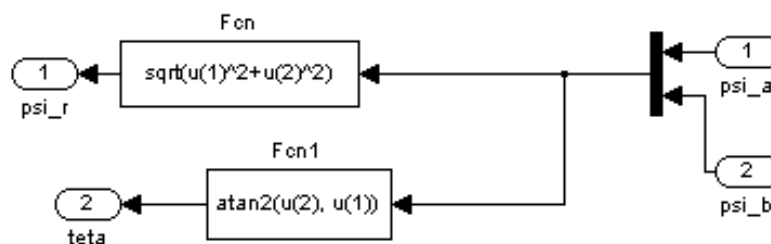


Рисунок 4.5 – Подсистема «Calc»

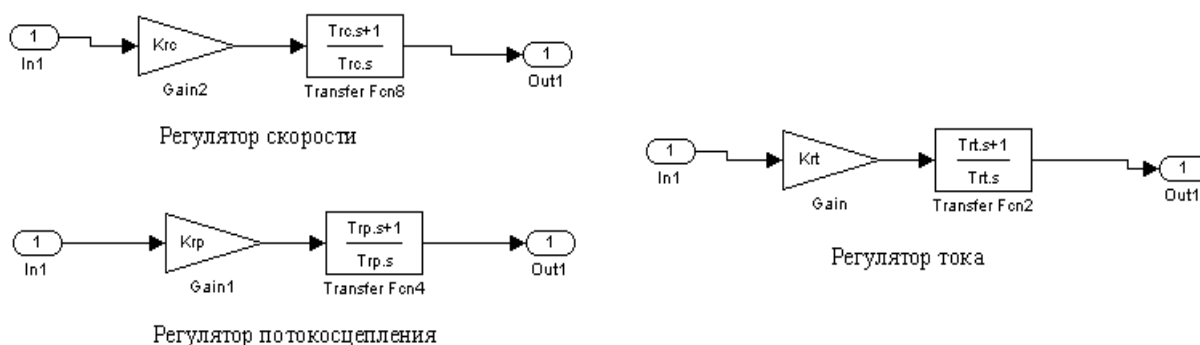


Рисунок 4.6 – Подсистемы «Rw», Rpsi» и «RT»

*Протокол вводимых параметров:*

**%Параметры двигателя**

```
f=50;
Rs=0.006513;
Rr=0.006485;
Ls_=0.072/(2*pi*f);
Lr_=0.098/(2*pi*f);
Lm=3.298/(2*pi*f);
p=4;
J=3.97;
Ls=Ls_+Lm;
Lr=Lr_+Lm;
zp=p/2;

Kr=Lm/Lr;
Re=Rs+Rr*Kr^2;
Le=Ls-Lm^2/Lr;
Uamp=220*sqrt(2);
Ar=Rr/Lr;
Wref=2*pi*f;
```

**%Оптимизация**

```
Kinv=31.1;
finv=10000;
Tinv=0.5/finv;
Tmto=0.00025;
Kt=10/702;

Te=Le/Re;
Krt=(Te*Re)/(Kinv*Kt*2*(Tmto+Tinv));
Trt=Te;
Tmto=0.0031;
Kp=10/1;
Krp=(Kt)/(Kp*Kr*Rr*2*(Tmto+2*(Tmto+Tinv)));
Trp=1/Ar;
Kc=10/157.08;
Tmco=0.001;
Krc=(J*Kt)/(2*(Tmco+2*(Tmto+Tinv))*Kc*Kr*
*zp^3/2);
Trc=2*2*(Tmco+2*(Tmto+Tinv));
```

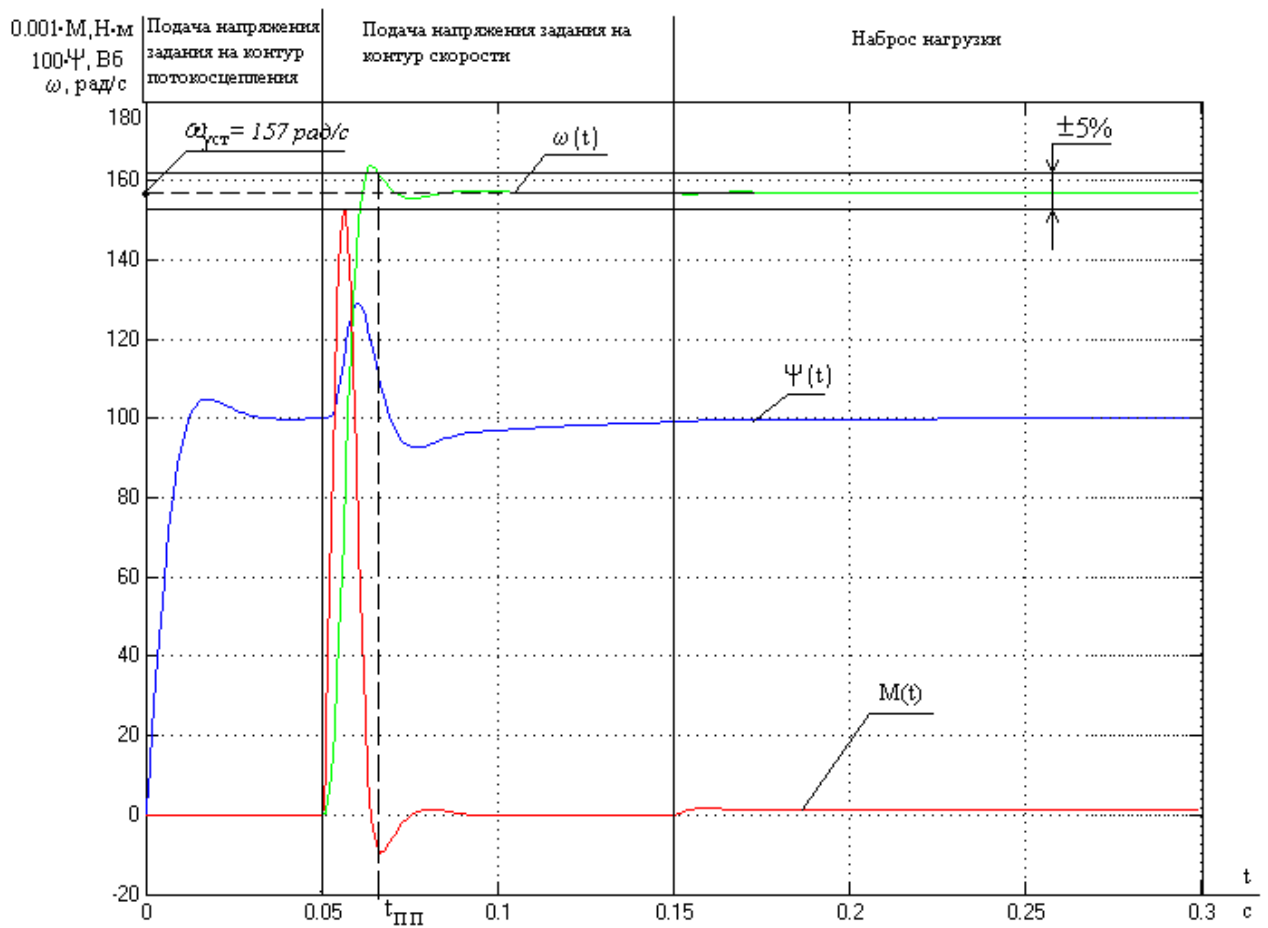


Рисунок 4.7 – Переходные процессы скорости, электромагнитного момента и потокосцепления векторного электропривода

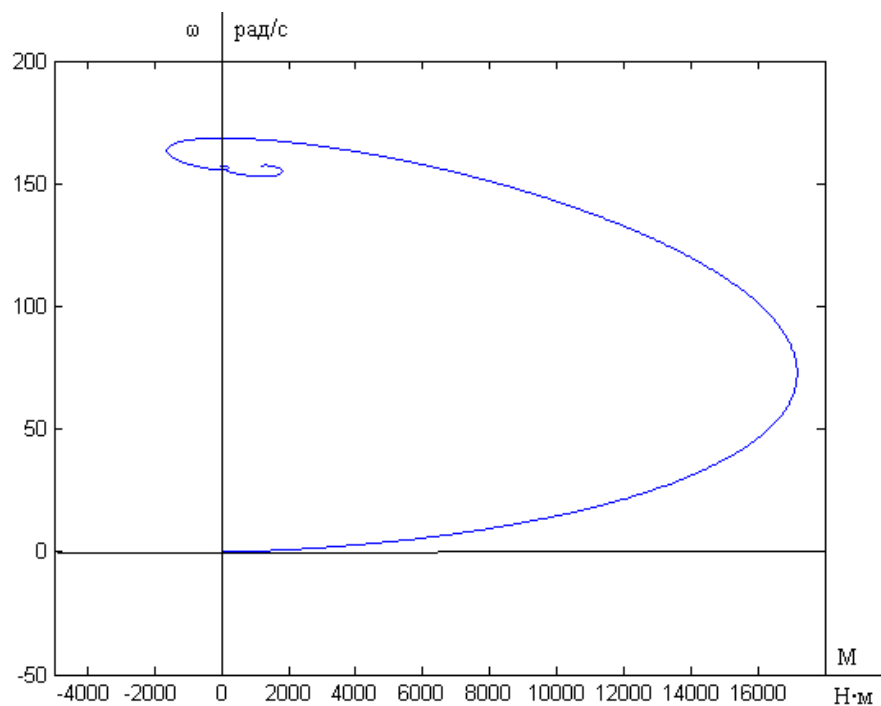


Рисунок 4.8 – Динамическая механическая характеристика линейной модели векторного асинхронного электропривода

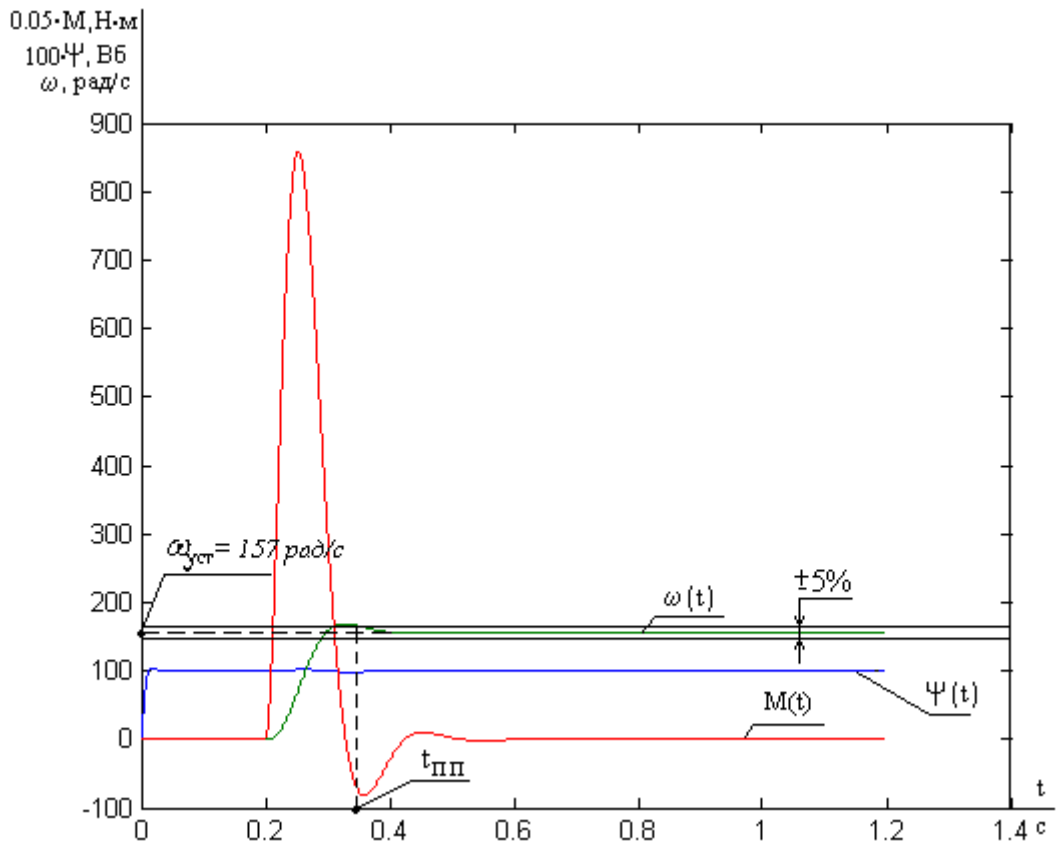
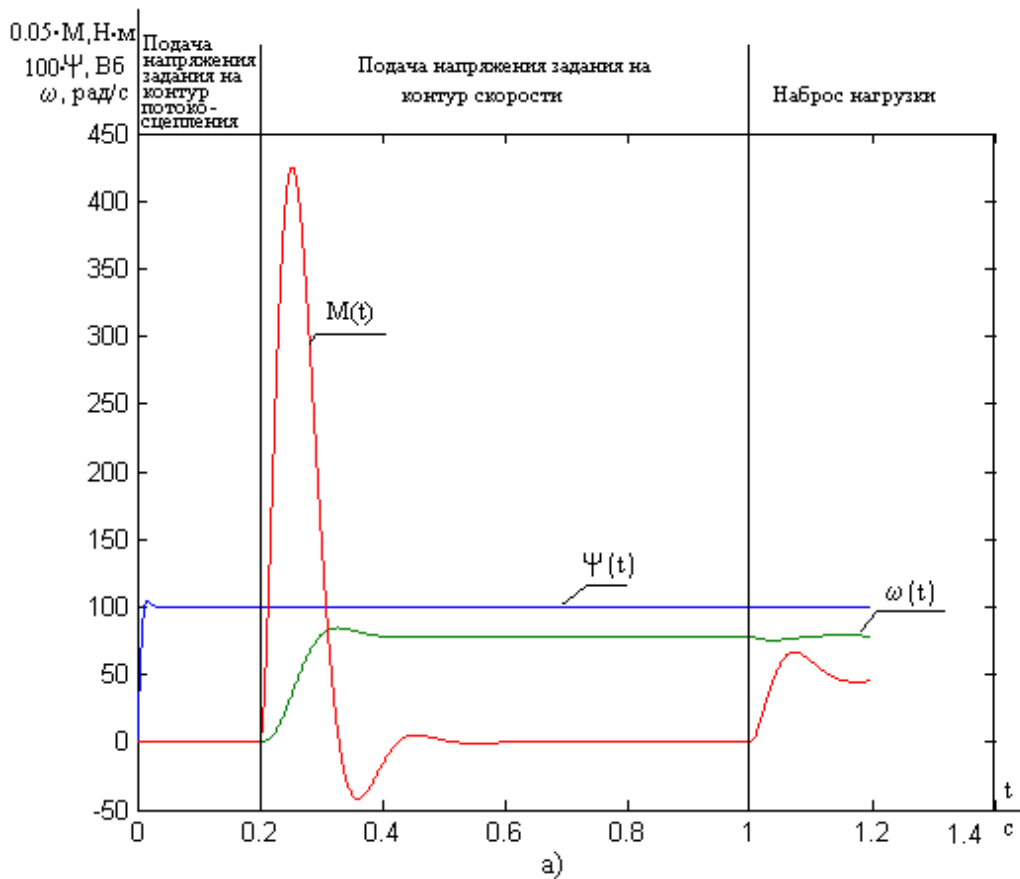


Рисунок 4.9 – Переходная характеристика линейризованной САУ на холостом ходу ( $U_{зс} = 10В$ ,  $M_c = 0$ )





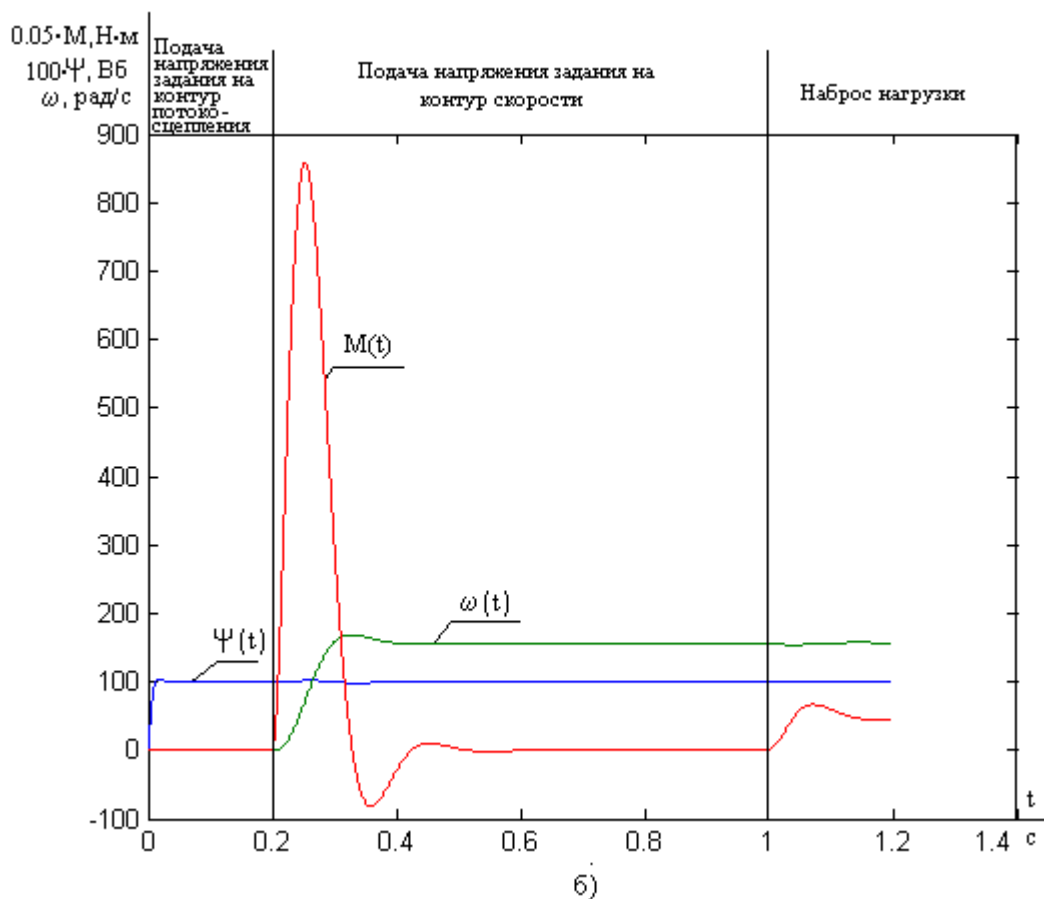


Рисунок 4.10 – Переходная характеристика линейризованной САУ при:  
 а) -  $U_{зс} = 5\text{В}$ ; б) –  $U_{зс} = 10\text{В}$ , с  $M_c=939 \text{ Нм}$

**Вывод:** после анализа полученных графиков, можно заключить, что время переходного процесса момента превышает, допустимый момент должен быть ограничен. Время переходного процесса по скорости равно  $0,34\text{с}$ , линейная система позволяет оценить качество переходного процесса. Электропривод работает устойчиво, во всех диапазонах одинаково. Окончательный вывод о соответствии требованиям технического задания можно будет сделать при исследовании нелинейной системы.

## 5 НЕЛИНЕЙНАЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

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

На рисунке 5.1. приведена структурная схема нелинейной системы автоматического управления (САУ) частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением, которая построена на основании структурной схемы линеаризованной системы САУ электропривода (рисунок 4.1), с учетом нижеприведенных основных нелинейностей элементов СУ электропривода [12]:

- насыщение регулятора скорости ( $U_{PCMAXC} = \pm 10B$ ), тока ( $U_{PTMAXC} = \pm 10B$ ) и потокосцепления ( $U_{P\psi MAXC} = \pm 10B$ );
- ограничение выходного напряжения регулятора скорости происходит на уровне  $U_{PCDOП}(\omega) = \pm k_T \cdot I_{ЭП MAXC}(\omega)$ , для достижения постоянного по величине ограничения максимального тока электропривода в переходных режимах и кратковременных нагрузках;
- реактивный характер нагрузки  $M_C(\omega) = M_C \cdot \text{sign } \omega$ ;
- где величина момента изменяется в интервале от  $(M_{CXX} + M_{CДВ})$  до  $(M_{C MAXC} + M_{CДВ})$ ;
- ограничение выходного напряжения инвертора  $E_{И} = \sqrt{2} \cdot U_{1Н}$ .

Для проведения исследований на имитационной модели нелинейной САУ электропривода, приведенной на рисунке 5.2, необходимо добавить линейный задатчик интенсивности, чтобы пронаблюдать влияние величины задания момента  $M_C$  и скорости  $U_{ЗС}$  на характер переходных процессов, а также динамические показатели качества работы электропривода, учитывая ограничения выходных напряжений регуляторов и преобразователя частоты

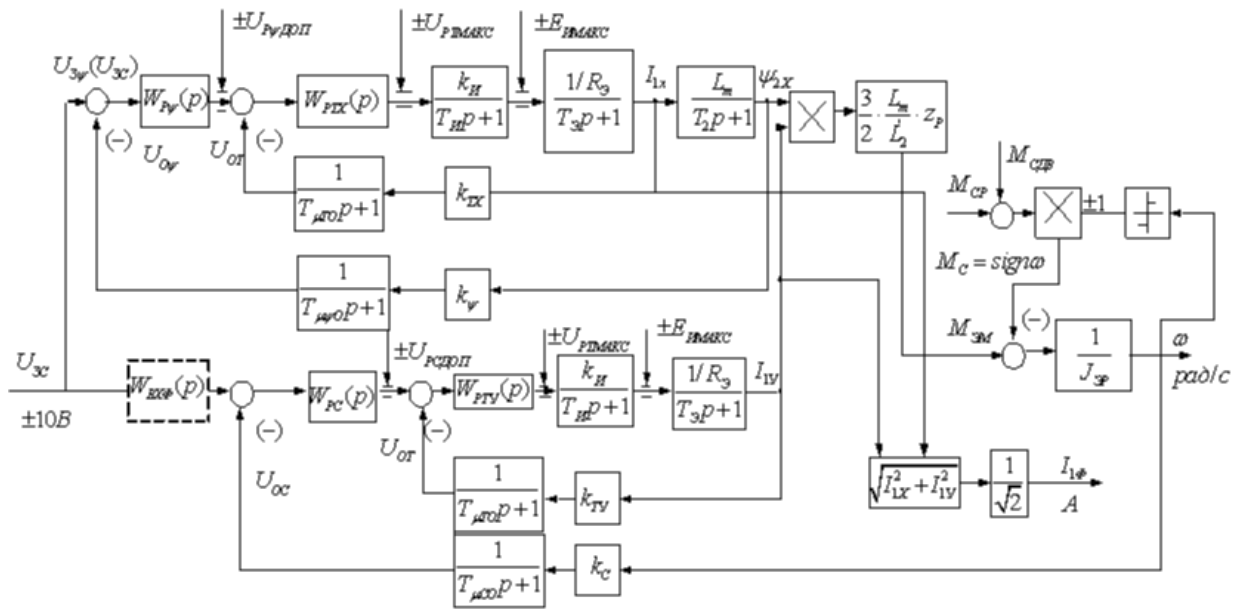


Рисунок 5.1 – Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

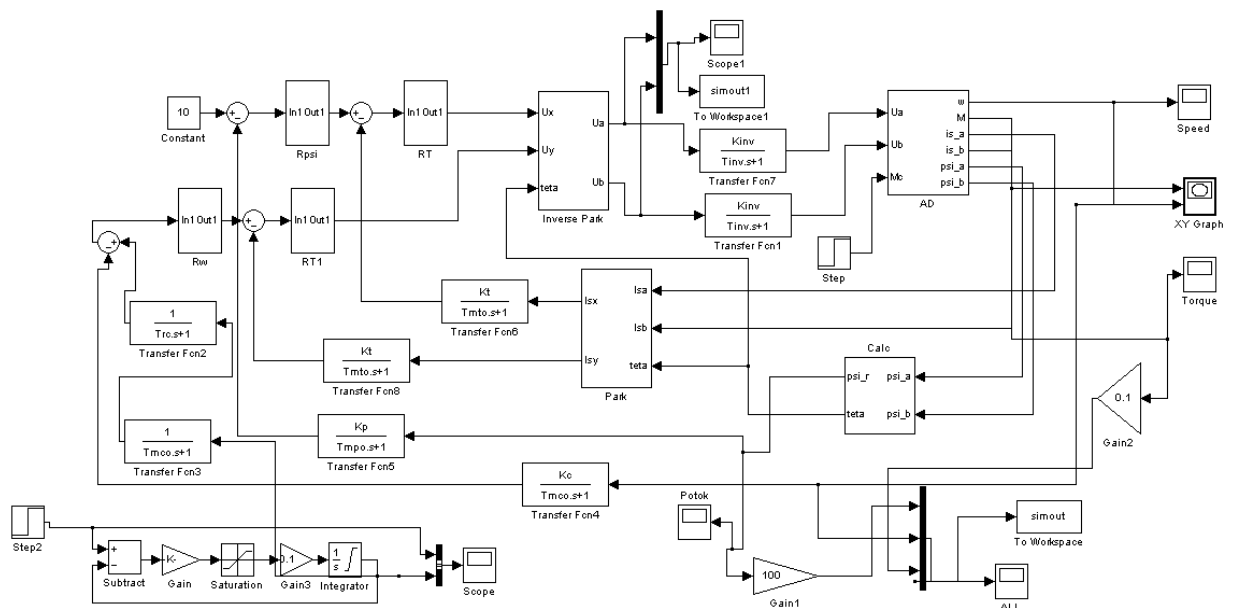


Рисунок 5.2 – Имитационная модель нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

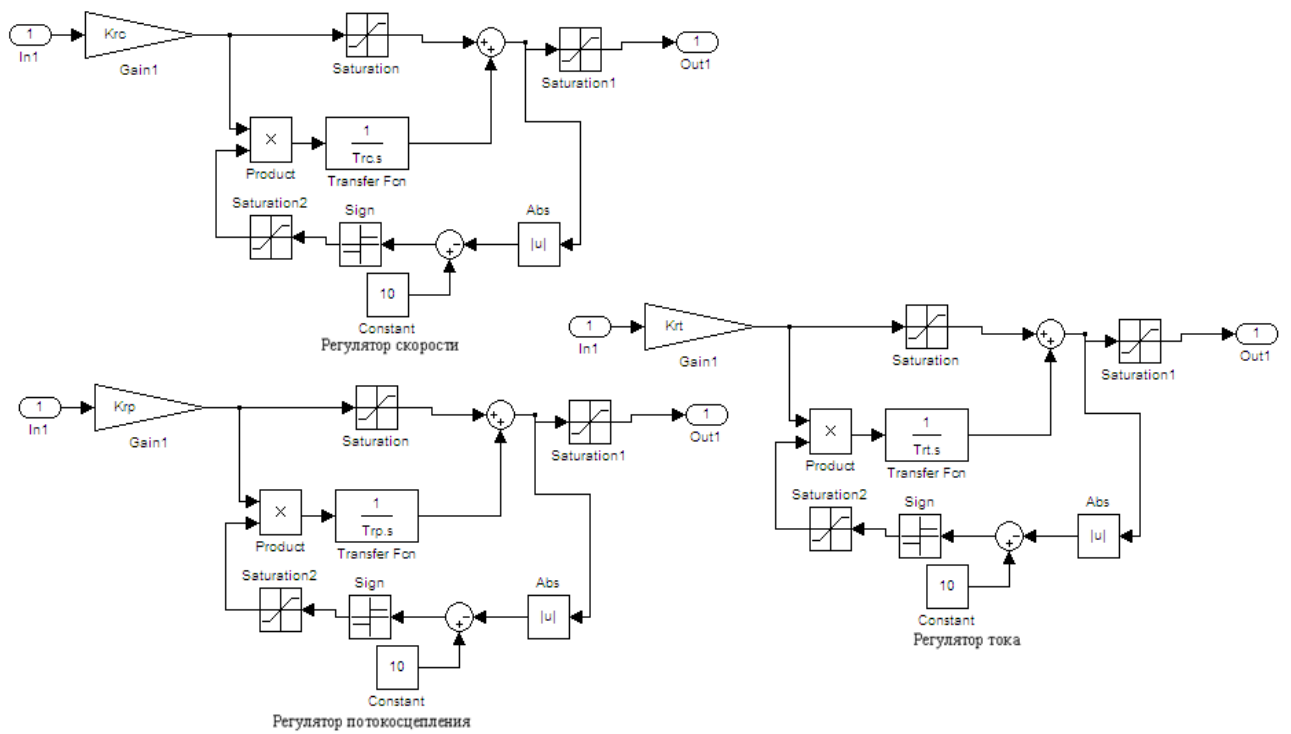


Рисунок 5.3 – Подсистемы «Rw», Rpsi» и «RT»

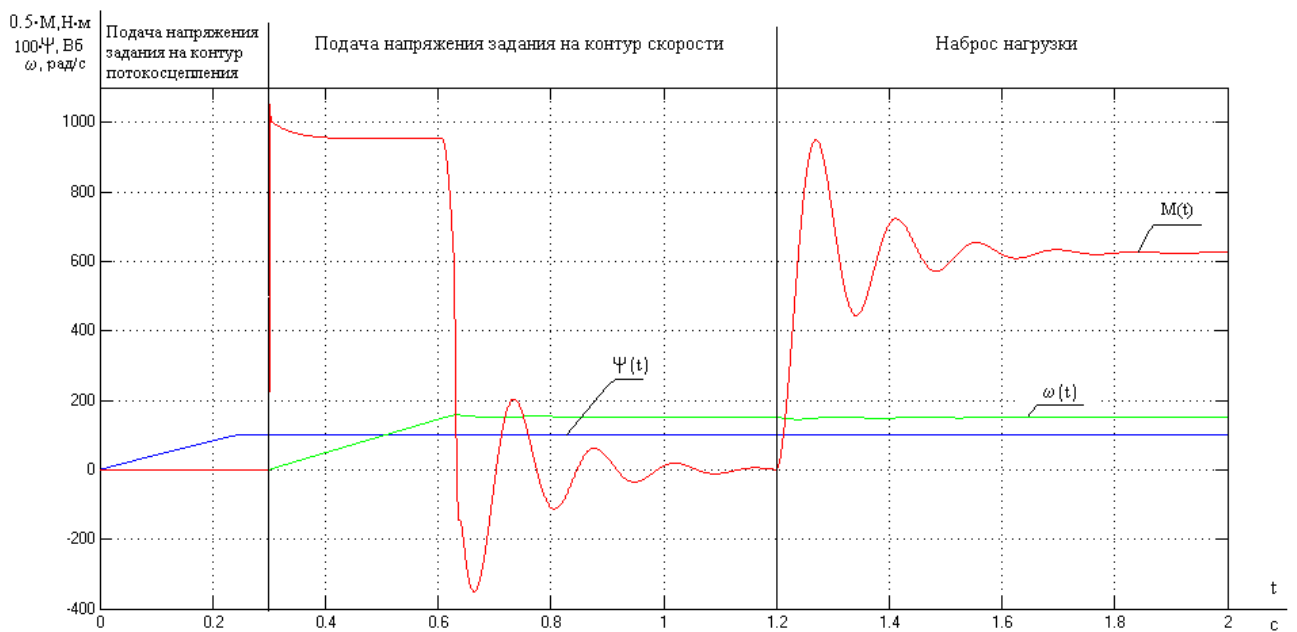


Рисунок 5.4 – Переходная характеристика нелинейной непрерывной САУ при прямом пуске без задатчика интенсивности ( $U_{zc} = 10В$ ,  $M_c = 939Нм$ )

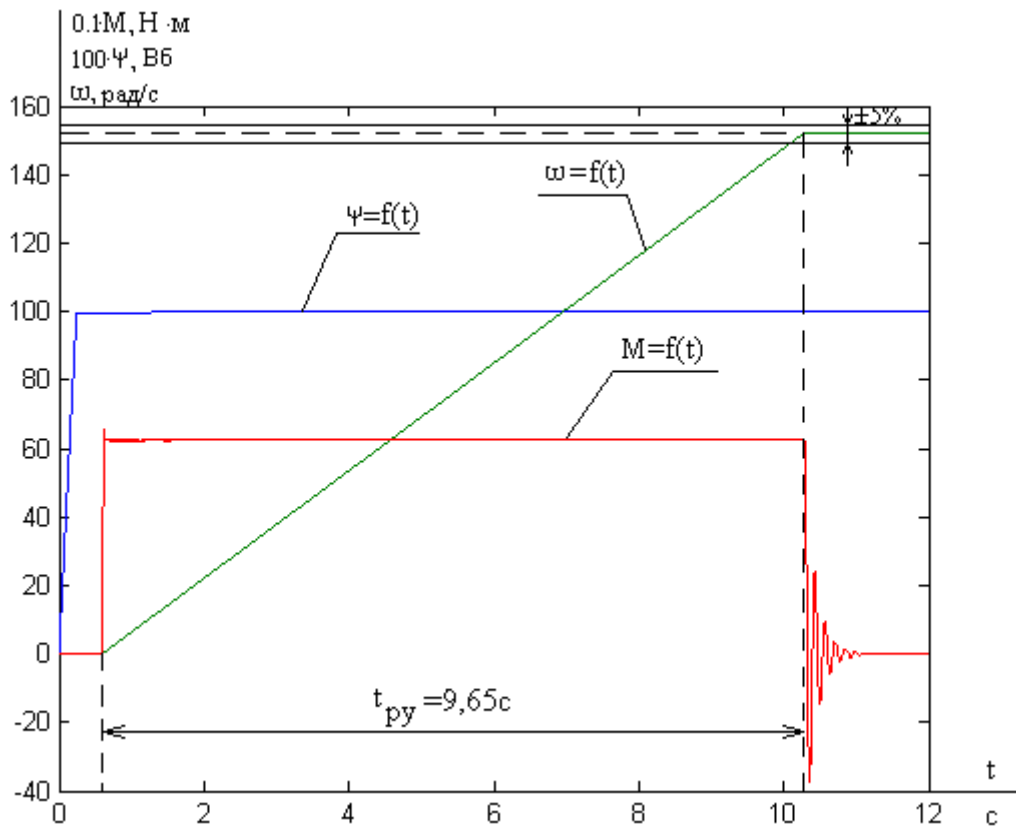


Рисунок 5.5 – Переходная характеристика нелинейной непрерывной САУ на холостом ходу

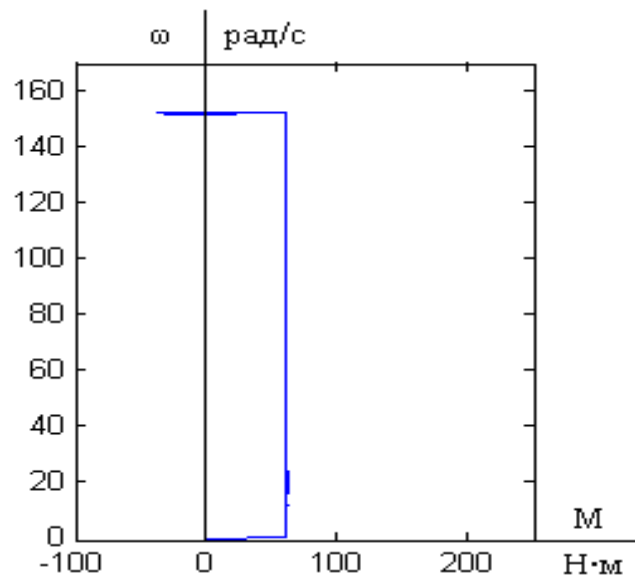


Рисунок 5.6 – Динамическая механическая характеристика нелинейной непрерывной САУ асинхронного электропривода с векторным управлением на холостом ходу

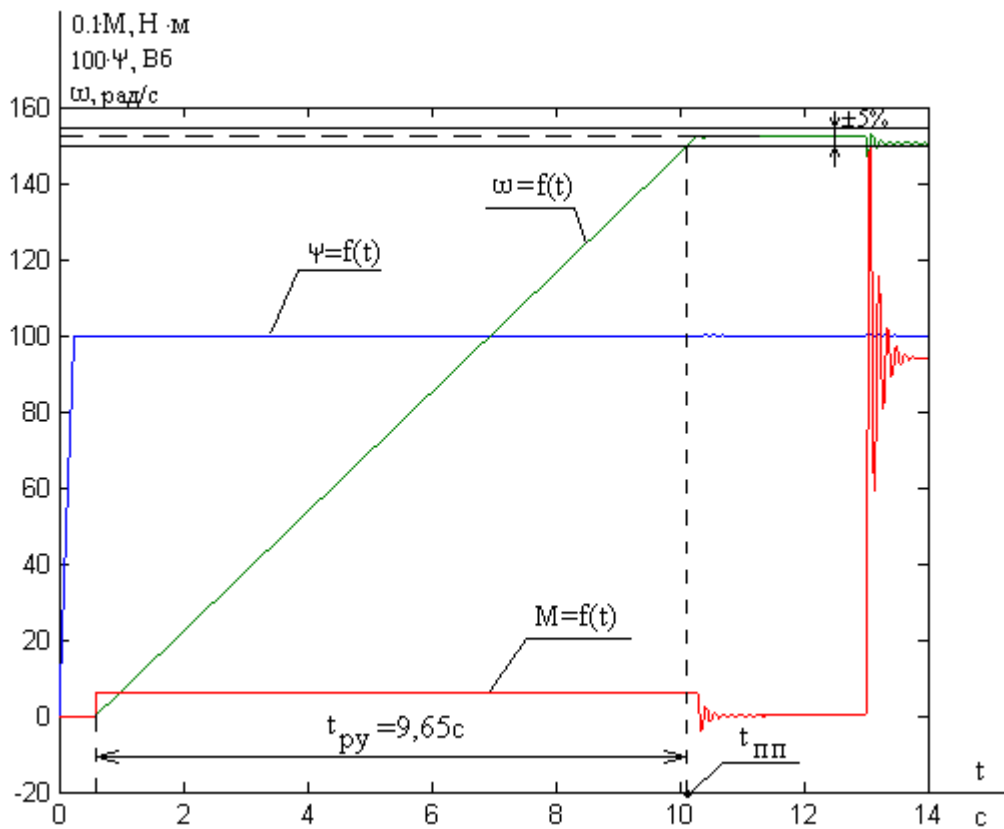
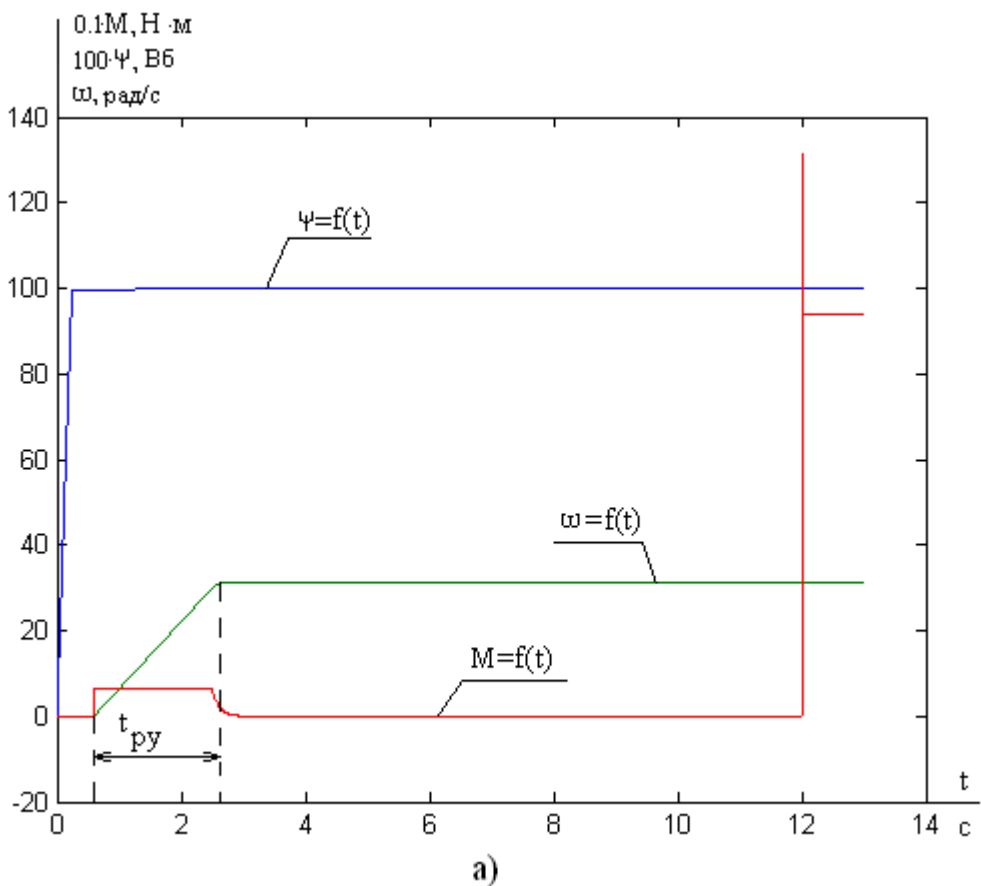


Рисунок 5.7 – Переходная характеристика нелинейной непрерывной САУ при обработке возмущающих воздействий ( $M_c=939\text{ Нм}$ )



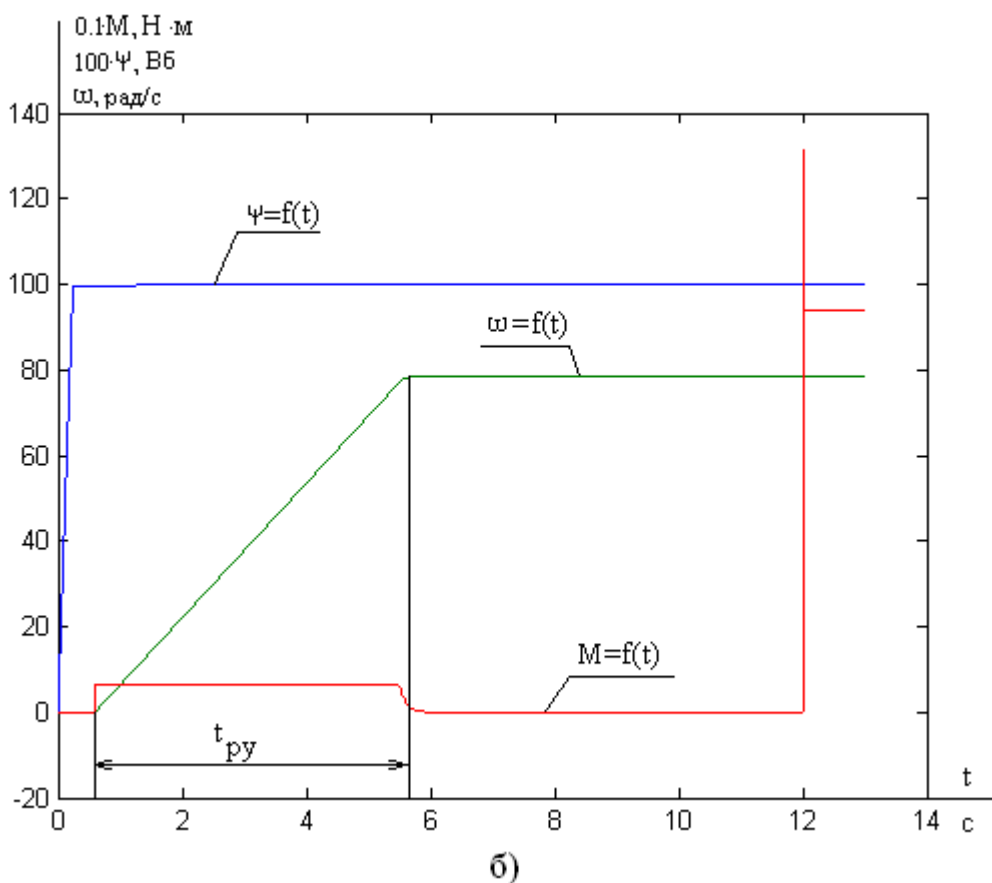


Рисунок 5.8 – Переходная характеристика нелинейной непрерывной САУ при обработке возмущающих воздействий ( $M_c=939$  Нм):

а) – при  $U_{зс} = 2$  В; б) - при  $U_{зс} = 5$  В

**Вывод:** после анализа полученных результатов, можно сделать вывод, что нелинейности значительно влияют на работу системы управления, главным образом на быстродействие, снижая его. Работа нелинейной системы управления значительно отличается от работы линеаризованной системы управления. Перерегулирование практически отсутствует, время переходного процесса равно 9,65с, что удовлетворяет требованию технического задания.

## 6 СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Статический режим работы электропривода представляет собой режим, при котором не изменяется величина главной координаты электропривода, для регулируемого электропривода такой координатой является скорость [12].

САУ электропривода состоит из двух независимых двухконтурных систем регулирования:

- системы стабилизации потокосцепления  $\Psi_{2X}$ ;
- системы стабилизации скорости вращения двигателя в области изменения рабочих нагрузок и стабилизации (ограничения) момента двигателя на заданном максимальном уровне в режиме больших перегрузок.

### 6.1 Расчет статических характеристик однозонного асинхронного электропривода с векторным управлением

#### *Режим стабилизации скорости*

На рисунке 6.1 приведена структурная схема САУ однозонного электропривода в режиме стабилизации скорости, при условии, что [12]:

- САУ потокосцепления способна удерживать заданное номинальное значение потокосцепления  $\psi_{2ХН}$ ;
- регулятор скорости в режиме стабилизации скорости ненасыщен  $U_{PC} < U_{PCДОП}$ .



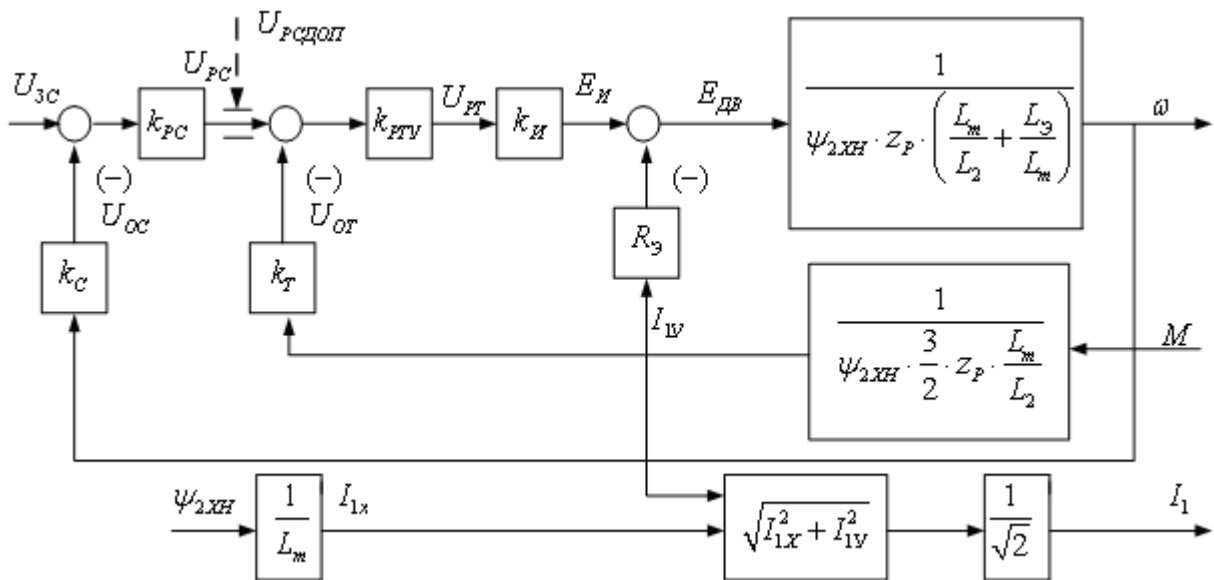


Рисунок 6.1 – Структурная схема САР скорости однозонного электропривода для статического режима стабилизации скорости

Структурная схема рисунка 6.1 описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} (U_{3C} - k_C \cdot \omega) \cdot k_{PC} &= U_{PC}; \\ (U_{PC} - k_{TY} \cdot I_{1Y}) \cdot k_{PTY} \cdot k_{И} &= U_{1Y}; \\ \psi_{2XH} \cdot z_P \cdot \frac{3}{2} \cdot z_P \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{1Y} &= M; \\ U_{1Y} - I_{1Y} \cdot R_{Э} &= E_{ДВ}; \\ \frac{E_{ДВ}}{\psi_{2XH} \cdot z_P \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right)} &= \omega, \end{aligned}$$

где при ПИ-регуляторах тока и скорости следует принять:

$$\begin{aligned} k_{PC} \gg 1, \text{ принимаем } k_{PC} &= 100, \\ k_{PTY} \gg 1, \text{ принимаем } k_{PTY} &= 100. \end{aligned}$$

Путем совместного решения приведенной системы уравнений относительно  $\omega$ , находится выражения для механической и электромеханической характеристик электропривода в режиме стабилизации скорости.

Выражение для электромеханической характеристики  $\omega(I_{1Y})$  САР электропривода выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega(I_{1Y}) &= \omega_0(U_{3C}) - \Delta\omega_B(I_{1Y}) = \\ &= \frac{k_{PC} \cdot k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C}{\psi_{2XH} \cdot z_P \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) + k_{PC} \cdot k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C} \cdot \frac{U_{3C}}{k_C} - \\ &= \frac{R_{\Sigma} + k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C}{\psi_{2XH} \cdot z_P \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) + k_{PC} \cdot k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C} \cdot I_{1Y} = \\ &= \frac{98,44 \cdot 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064}{0,97 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01} \right) + 98,44 \cdot 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064} \cdot \frac{10}{0,064} - \\ &= \frac{0,013 + 100 \cdot 31,113 \cdot 0,073}{0,97 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01} \right) + 98,44 \cdot 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064} \cdot 48,67 = 154,987, \end{aligned}$$

где:

$$\begin{aligned} \omega_0(U_{3C}) &= \frac{k_{PC} \cdot k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C}{\psi_{2XH} \cdot z_P \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) + k_{PC} \cdot k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C} \cdot \frac{U_{3C}}{k_C} = \\ &= \frac{98,44 \cdot 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064}{0,97 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01} \right) + 98,44 \cdot 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064} \cdot \frac{10}{0,064} = 155,482 \text{ рад/с} \end{aligned}$$

– скорость идеального холостого хода при управляющем напряжении  $U_{3C}$ .

$$\omega_{3AD}(U_{3C}) = \frac{U_{3C}}{k_C} = \frac{10}{0,064} = 155,497 \text{ рад/с} \text{ – заданное значение скорости.}$$

$$\begin{aligned} \Delta\omega_B(I_{1Y}) &= \frac{R_{\Sigma} + k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C}{\psi_{2XH} \cdot z_P \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) + k_{PC} \cdot k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C} \cdot I_{1Y} = \\ &= \frac{0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064}{0,97 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01} \right) + 98,44 \cdot 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064} \cdot 48,67 = 0,494 \text{ рад/с} \end{aligned}$$

– абсолютная погрешность скорости электропривода в замкнутой системе по возмущению при изменении тока  $I_{1Y}$  (нагрузка электропривода).

$$\begin{aligned} \Delta\omega(U_{3C}) &= \omega_{3AD}(U_{3C}) - \omega_0(U_{3C}) = \\ &= \frac{\Psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{\Psi_{2XH} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{PC} \cdot k_{PTY} \cdot k_I \cdot k_C} \cdot \frac{U_{3C}}{k_C} = \\ &= \frac{0,97 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01}\right)}{0,97 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01}\right) + 98,44 \cdot 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064} \cdot \frac{10}{0,064} = 0,016 \text{ рад/с} \end{aligned}$$

– абсолютная погрешность скорости электропривода в замкнутой системе по управлению:

Таким образом, характеристика  $\omega(I_{1Y})$  дает представление о принципе работы САР скорости в соответствии со структурной схемой САР скорости однозонного электропривода для статического режима стабилизации скорости, а также косвенно определяет статические характеристики частотно регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

Далее, чтобы построить электромеханическую характеристику  $\omega(I_{1\phi})$ , следует рассчитать величину действующего тока  $I_{1\phi}$  двигателя, для соответствующих значений тока  $I_{1Y}$ , по следующей формуле:

$$I_{1\phi} = \sqrt{\frac{I_{1X}^2 + I_{1Y}^2}{2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Psi_{2XH}}{L_m}\right)^2 + I_{1Y}^2}{2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{0,97}{0,01}\right)^2 + 48,67^2}{2}} = 73,87 \text{ А.}$$

Выражение для механической характеристики  $\omega(M)$  электропривода:

$$\begin{aligned} \omega(M) &= \omega_0(U_{3C}) - \Delta\omega_B(M) = \frac{k_{PC} \cdot k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C}{\psi_{2XH} \cdot z_P \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) + k_{PC} \cdot k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C} \cdot \frac{U_{3C}}{k_C} - \\ &\quad - \frac{R_{\mathcal{E}} + k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C}{\psi_{2XH} \cdot z_P \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2}} \cdot M = \\ &= \frac{98,44 \cdot 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064}{0,97 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01} \right) + 98,44 \cdot 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064} \cdot \frac{10}{0,064} - \\ &\quad - \frac{(0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064)}{\left( 0,97 \cdot 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,01}{0,011} \right)} \cdot 939 = 27,72 \text{ рад} / \text{с} \end{aligned}$$

где  $M$  – момент нагрузки с учетом момента трения на валу двигателя, Н·м;

$$\begin{aligned} \Delta\omega(M) &= \frac{(R_{\mathcal{E}} + k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C) / (\psi_{2XH} \cdot z_P \cdot \frac{3}{2} \cdot z_P \cdot \frac{L_m}{L_2})}{\psi_{2XH} \cdot z_P \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) + k_{PC} \cdot k_{PTY} \cdot k_H \cdot k_C} \cdot M = \\ &= \frac{(0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064)}{\left( 0,97 \cdot 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,01}{0,011} \right)} \cdot 939 = 3,37 \text{ рад} / \text{с} \end{aligned}$$

– абсолютная погрешность скорости электропривода в замкнутой системе по возмущению (при изменении момента нагрузки), рад/с.

Относительная погрешность скорости электропривода по возмущению (при изменении момента нагрузки) находится по выражению:

$$\Delta_H(U_{3C}) = \frac{\omega(U_{3C}; M_{\text{МИН}}) - \omega(U_{3C}; M_{\text{МАКС}})}{\omega(U_{3C}; M_{\text{МИН}}) + \omega(U_{3C}; M_{\text{МАКС}})} \cdot 100\%,$$

где минимальное и максимальное значение момента нагрузки соответствуют предельным значениям заданного диапазона изменения нагрузки электропривода и принимаются равными:

$$M_{\text{МИН}} = 0,15M_{\text{дв.н}} + M_{\text{с.дв}} = 192,915 + 92,443 = 285,358 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{МАКС}} = M_{\text{дв.н}} + M_{\text{с.дв}} = 1286 + 92,443 = 1031 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

– при определении погрешности электропривода производственного механизма.

Результаты расчетов электромеханических  $\omega(I_{1Y})$  и  $\omega(I_{1\phi})$  и механических  $\omega(M)$  характеристик и погрешности скорости  $\Delta_H$  по выражениям представленных выше для нескольких значений задающего напряжения  $U_{3C}$  в заданном диапазоне регулирования сведены в таблицу 6.1.

#### *Режим стабилизации тока*

В однозонном электроприводе с постоянным токоограничением при условии, что потокосцепление поддерживается постоянным  $\psi_{2X} = \psi_{2XH}$ , при больших перегрузках ток и момент двигателя будут ограничиваться на постоянном уровне вследствие насыщения регулятора скорости. Структурная схема САР скорости однозонного электропривода с постоянным токоограничением для статического режима стабилизации тока приведена на рисунке 6.2, согласно.



$$I_{1Y}(\omega) = I_{1Y\text{СТОП}}(U_{РСДОП}) - \Delta I_{1Y}(\omega) = \frac{k_{РТУ} \cdot k_{И} \cdot k_{Т}}{R_{\Sigma} + k_{РТУ} \cdot k_{И} \cdot k_{Т}} \cdot \frac{U_{РСДОП}}{k_{Т}} - \frac{\psi_{2ХН} \cdot z_{Р} \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right)}{R_{\Sigma} + k_{РТУ} \cdot k_{И} \cdot k_{Т}} \cdot \omega =$$

$$= \frac{100 \cdot 31,1 \cdot 0,025}{(0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064)} \cdot \frac{10}{0,025} - \frac{0,97 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01} \right)}{(0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064)} \cdot 155,497 = 392,267 \text{ A}$$

где:  $I_{1Y\text{МАКС}} = \frac{U_{РСДОП}}{k_{Т}}$  – заданное значение максимального тока, А;

$$I_{1Y\text{СТОП}}(U_{РСДОП}) = \frac{k_{РТУ} \cdot k_{И} \cdot k_{Т}}{R_{\Sigma} + k_{РТУ} \cdot k_{И} \cdot k_{Т}} \cdot \frac{U_{РСДОП}}{k_{Т}} =$$

– фактическое значение

$$= \frac{100 \cdot 31,1 \cdot 0,025}{0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064} \cdot \frac{10}{0,025} = 396,194 \text{ A},$$

максимального тока  $I_{1Y}$  при  $\omega = 0$  (в режиме стопорения).

$$\Delta I_{1Y}(\omega) = \frac{\psi_{2ХН} \cdot z_{Р} \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right)}{R_{\Sigma} + k_{РТУ} \cdot k_{И} \cdot k_{Т}} \cdot \omega =$$

$$= \frac{0,97 \cdot 2 \cdot \left( \frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01} \right)}{0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,064} \cdot 155,497 = 3,927 \text{ A},$$

– абсолютная погрешность тока при скорости  $\omega$ .

Полученная характеристика  $I_{1Y}(\omega)$  косвенно характеризует статические характеристики электропривода в рассматриваемом режиме стабилизации тока, а также, в соответствии со структурной схемой, поясняет принцип работы САР скорости.

Для того, чтобы получить электромеханическую характеристику  $I_{1\phi}(\omega)$  в рассматриваемом режиме стабилизации тока, далее необходимо по полученным значениям тока  $I_{1Y}$  и вышеуказанному выражению рассчитать соответствующие значения тока двигателя  $I_{1\phi}$ .

Для механической характеристики  $M(\omega)$  электропривода в режиме стабилизации(ограничения) выражение выглядит следующим образом:

$$M(\omega) = M_{\text{СТОП}}(U_{\text{РСДОП}}) - \Delta M(\omega) = \frac{k_{\text{РТ}} \cdot k_{\text{И}} \cdot k_{\text{Т}}}{R_{\text{Э}} + k_{\text{РТГ}} \cdot k_{\text{И}} \cdot k_{\text{Т}}} \cdot \psi_{2\text{ХН}} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_{\text{Р}} \cdot \frac{L_{\text{м}}}{L_2} \cdot \frac{U_{\text{РСДОП}}}{k_{\text{Т}}} -$$

$$\frac{\psi_{2\text{ХН}}^2 \cdot z_{\text{Р}}^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\text{м}}}{L_2} \cdot \left( \frac{L_{\text{м}}}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_{\text{м}}} \right)}{R_{\text{Э}} + k_{\text{РТГ}} \cdot k_{\text{И}} \cdot k_{\text{Т}}} \cdot \omega =$$

$$= \frac{100 \cdot 31,1 \cdot 0,025}{0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,025} \cdot 0,97 \cdot \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,01}{0,011} \cdot \frac{10}{0,025} -$$

$$\frac{0,97^2 \cdot 2^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,01}{0,011} \cdot \left( \frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01} \right)}{0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,025} \cdot 155,497 = 1109 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

где:

$$M_{\text{МАКС}}(U_{\text{РСДОП}}) = \psi_{2\text{ХН}} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_{\text{Р}} \cdot \frac{L_{\text{м}}}{L_2} \cdot \frac{U_{\text{РСДОП}}}{k_{\text{Т}}} = 0,97 \cdot \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,01}{0,011} \cdot \frac{10}{0,025} = 1120 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

– заданное значение максимального электромагнитного момента двигателя;

$$M_{\text{СТОП}}(U_{\text{РСДОП}}) = \frac{k_{\text{РТ}} \cdot k_{\text{И}} \cdot k_{\text{Т}}}{R_{\text{Э}} + k_{\text{РТГ}} \cdot k_{\text{И}} \cdot k_{\text{Т}}} \cdot \psi_{2\text{ХН}} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_{\text{Р}} \cdot \frac{L_{\text{м}}}{L_2} \cdot \frac{U_{\text{РСДОП}}}{k_{\text{Т}}} =$$

$$= \frac{100 \cdot 31,1 \cdot 0,025}{0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,025} \cdot 0,97 \cdot \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,01}{0,011} \cdot \frac{10}{0,025} = 1120 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

– фактическое значение максимального электромагнитного момента двигателя при  $\omega = 0$  ( в режиме стопорения двигателя);

$$\Delta M(\omega) = \frac{\psi_{2\text{ХН}}^2 \cdot z_{\text{Р}}^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\text{м}}}{L_2} \cdot \left( \frac{L_{\text{м}}}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_{\text{м}}} \right)}{R_{\text{Э}} + k_{\text{РТГ}} \cdot k_{\text{И}} \cdot k_{\text{Т}}} \cdot \omega =$$

$$= \frac{0,97^2 \cdot 2^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,01}{0,011} \cdot \left( \frac{0,01}{0,011} + \frac{0,05 \cdot 0,011}{0,01} \right)}{0,013 + 100 \cdot 31,1 \cdot 0,025} \cdot 155,497 = 11,102 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

– абсолютная погрешность электромагнитного момента двигателя при скорости  $\omega$ .



На основании данных таблицы 6.1, в которой сведены полученные расчетные данные механических  $M(\omega)$  и электромеханических  $I_{1Y}(\omega), I_{1\phi}(\omega)$  характеристик в режиме стабилизации тока, а также электромеханические  $\omega(I_{1Y})$  и  $\omega(I_{1\phi})$  и механические  $\omega(M)$  в режиме стабилизации скорости, строятся характеристики привода в режимах стабилизации тока и скорости соответственно.

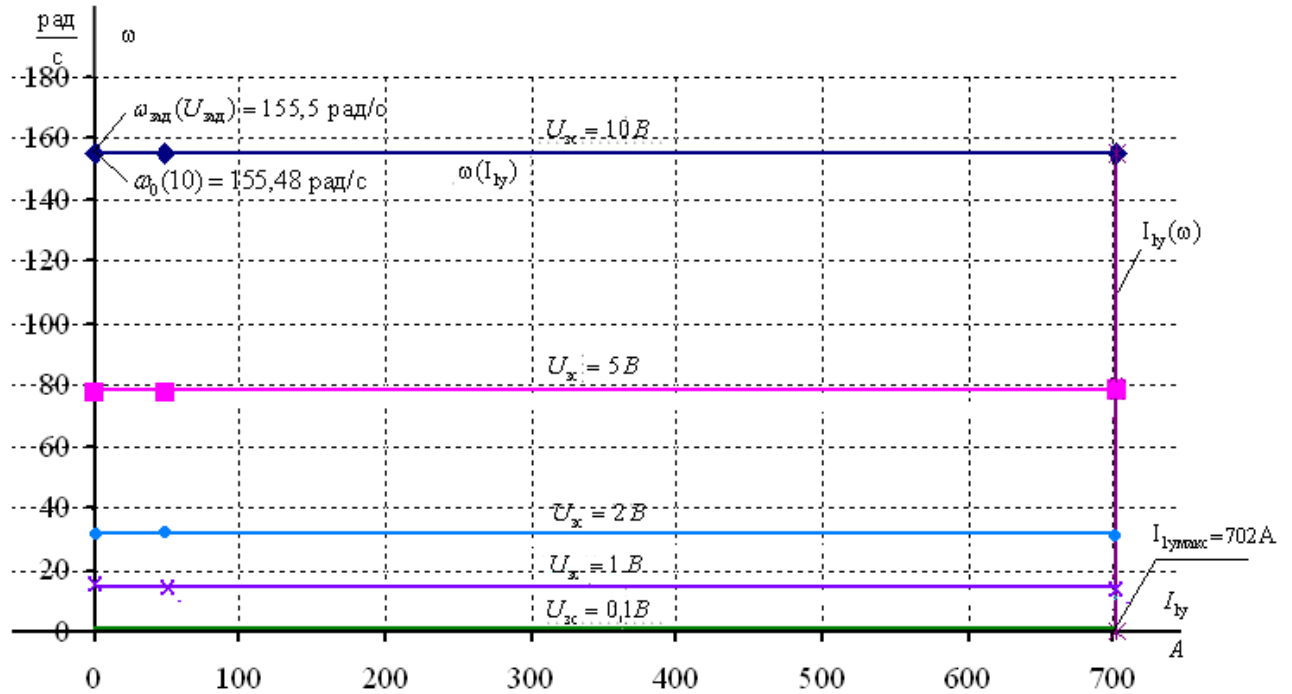
Получившиеся механические характеристики электропривода в режиме стабилизации скорости  $\omega(M)$  и в области ограничения тока  $M(\omega)$  совпадают по форме и представляют собой горизонтальные (жесткие) характеристики в первом режиме работы. Аналогичная ситуация и с электромеханическими характеристиками в режиме стабилизации скорости  $\omega(I_{1Y}), \omega(I_{1\phi})$  и в области ограничения тока  $I_{1Y}(\omega), I_{1\phi}(\omega)$ , которые также идентичны по форме и имеют вид горизонтальных (жестких) характеристик в первом режиме работы.

Таблица 6.1 – Статические характеристики однозонного электропривода с постоянным токоограничением

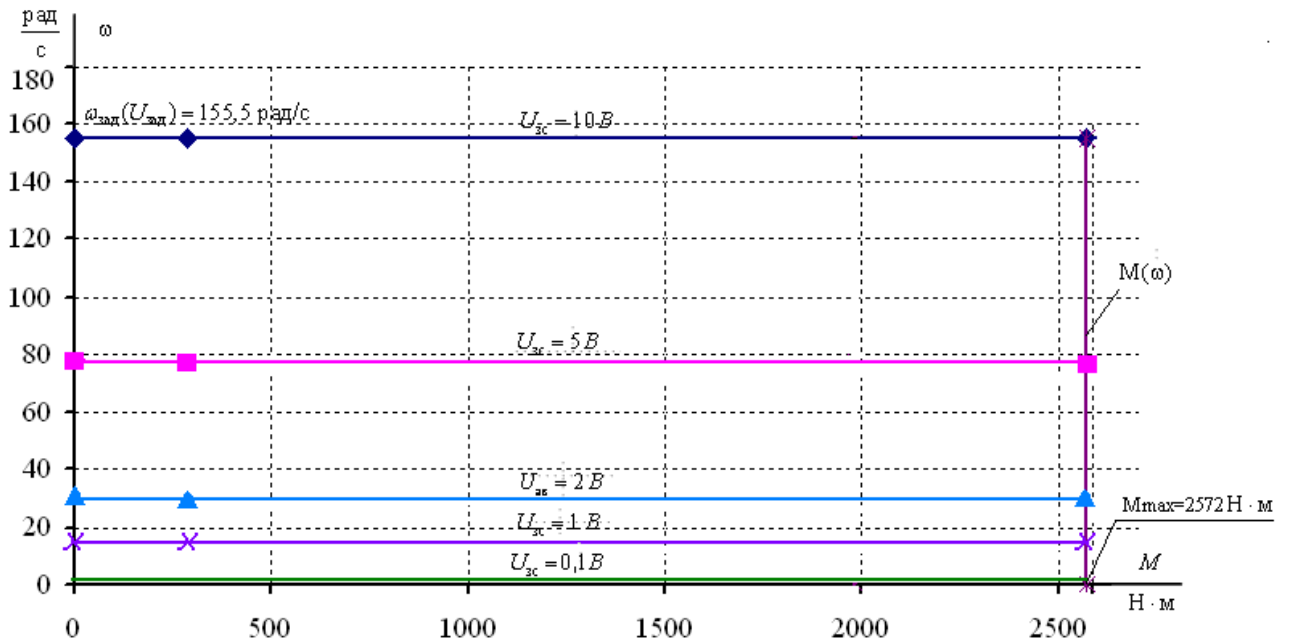
$U_{ЗС}, В$	$I_{1Y}, А$	0	48,67	396,2	487,32	$\Delta_H, \%$
	$I_{1\phi}, А$	$I_0 = 63,097$	73,84	500,67	$I_{ДВ.Н} = 350,7$	
	$M, Н \cdot м$	0	$M_{МИН} = 285,36$	$M_{МАКС} = 2572$	$M_H = 1286$	
10	$\omega = \omega_{ЭП.МАКС}$ , рад/с	155,48	155,44	155,42	155,41	0,03
5		77,7	77,62	77,59	77,32	0,05
2		31,1	31,01	30,94	30,48	0,13
$U_{ЗС.МИН} = 0,1$		6,804	6,77	6,45	6,46	0,26
$U_{рс.доп} = 10В$	$\omega, рад/с$	0		$0,5 \cdot \omega_{ЭП.МАКС} = 77,75$		$\omega_{ЭП.МАКС} = 155,5$
	$I_{1Y}, А$	702		701,979		701,96
	$I_{1\phi}, А$	500,67		500,66		500,65
	$M, Н \cdot м$	1985,12		1985,1		1985,02

## 6.2 Статические характеристики однозонного электропривода

На рисунках 6.3 а, б, в, представлены статические характеристики однозонного электропривода



а)



б)

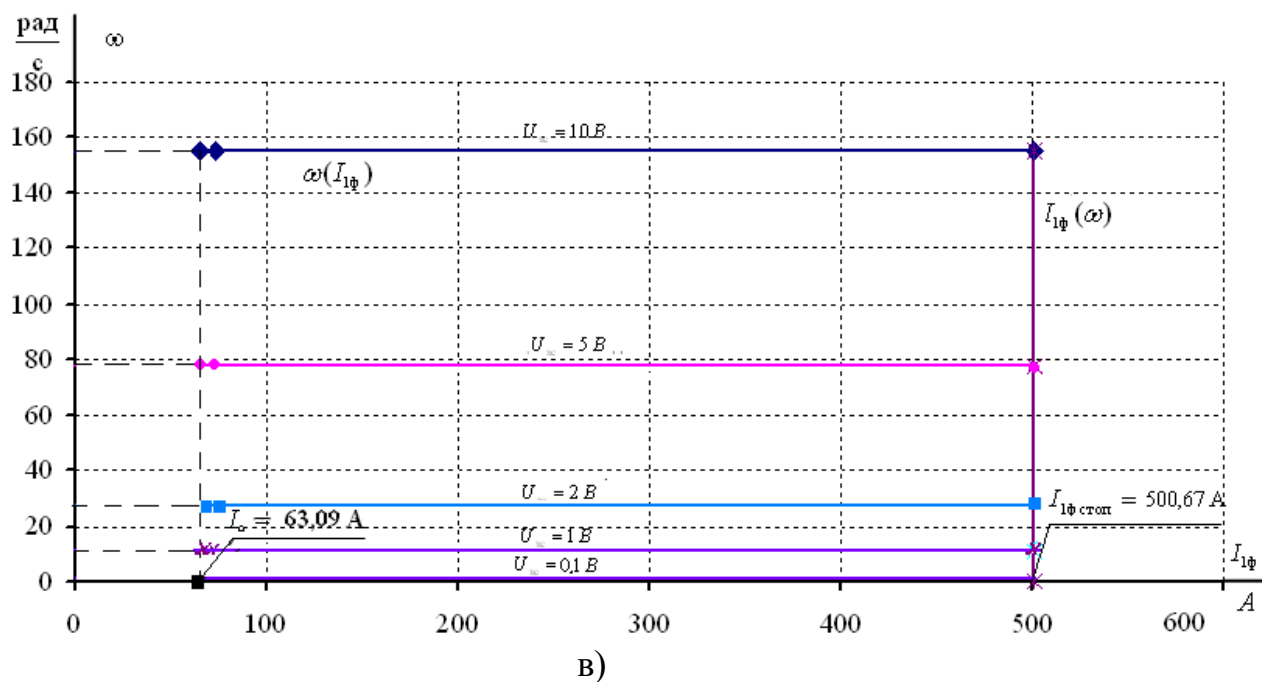


Рисунок 6.3 – Статические характеристики однозонного электропривода:  
 а, в, - электромеханические, б - механическая

По требованию технического задания погрешность поддержания скорости при изменении нагрузки (от нуля до номинальной) на минимальной скорости работы электропривода, не превышает 10%, что соответствует требованию технического задания.

В соответствии с расчетными графиками механических характеристик определим погрешность поддержания скорости на нижней регулировочной характеристике:

$$\delta_{\%} = \frac{\omega_0(0,1) - \omega(0,1)}{\omega(0,1)} = \frac{6,804 - 6,45}{6,804} \cdot 100 = 5,2\% < 10\%$$

Таким образом, требование выполняется.

## **7 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Данный раздел работы посвящен определению экономических показателей проектирования электрооборудования линии производства полипропиленовой нити с точки зрения ресурсоэффективности. Достижение цели обеспечивается выполнением следующих задач:

- определение конкурентоспособности электрооборудования линии производства полипропиленовой нити;
- планирование работ в рамках данного научного исследования;
- формирование бюджета на проектирование.

### **7.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

#### **7.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

В данном случае сегментирование целесообразно провести по критерию точности, т.к. для разных типов режимов работы, требуется разная величина подачи перерабатываемого материала в установки соответствующей мощности.

А также следует выделить сегменты рынка:

- по разработке, проектированию и производству;
- по установке и пуско-наладке;

Исходя из сегмента рынка, произведем сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Сегментирование коммерческих организаций

	Не регулируемые асинхронные электропривода	Электроприводы с реостатным регулированием	Электроприводы системы ТП Д
Проектирование и производство			
Установка и пуско-наладка			
Обслуживание и ремонт			
Фирма А		Фирма Б	

Результаты сегментирования:

- основными сегментами рынка являются все виды деятельности для электроприводов переменного тока;
- наиболее сильно предприятие должно быть ориентировано на сегменты рынка, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой электроприводов переменного тока;
- наиболее привлекательными сегментами рынка являются отрасли, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой электроприводов переменного тока.

### 7.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Данный анализ помогает методом сравнения оценить сильные и слабые стороны рассматриваемых способов получения полипропиленовой нити, чтобы наиболее обосновано выбрать способ для дальнейшего проектирования. Наиболее часто один вариант не может обладать сразу всеми техническими и экономическими показателями в высшей степени, поэтому данный анализ позволяет выбрать тот вариант, который в целом обладает наивысшей конкурентоспособностью. Оценочная карта представлена в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Оценочная карта конкурентоспособности

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентно-способность	
		Р	К	Р	К
1	2	3	4	6	7
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
КПД	0,45	5	4	2,25	1,8
Расход электроэнергии	0,15	4	3	0,6	0,45
Бесперебойность работы	0,08	5	3	0,4	0,24
Надежность	0,12	4	3	0,48	0,36
Устойчивость к высоким температурам	0,04	3	5	0,12	0,2
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Габариты	0,04	5	3	0,2	0,12
2. Цена	0,02	5	3	0,1	0,06
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	4	0,5	0,4
Итого	1	36	28	4,65	3,63

где:

- «Р» — способ получения синтетической пленочной нити путем формования продольно профилированной пленки;
- «К» — способ получения синтетической пленочной нити путем кручения.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,45 \cdot 5 = 2,25;$$

где:

- $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;
- $B_i$  – вес  $i$ -го показателя (в долях единицы);
- $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

В результате анализа конкурентных технических решений можно сделать вывод, что наибольшим преимуществом обладает способ получения синтетической пленочной нити путем формования продольно профилированной пленки.

### 7.1.3 Технология QUAD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность.
- правовая защищенность и др.

Показатели оценки качества разработки:

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (таблица 7.3).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 7.3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)x100
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	65	100	0,65	4,55
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям)	0,13	75	100	0,75	9,75
3. Помехоустойчивость	0,03	50	100	0,5	1,5
4. Энергоэкономичность	0,1	70	100	0,7	7
5. Надежность	0,09	100	100	1	9
6. Уровень шума	0,04	40	100	0,4	1,6
7. Безопасность	0,01	80	100	0,8	2,4
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	75	100	0,75	1,5
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	85	100	0,85	3,4
10. Простота эксплуатации	0,04	98	100	0,98	3,92
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	96	100	0,96	4,8
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,06	100	100	1	6
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
1. Конкурентоспособность продукта	0,03	70	100	0,7	2,1



2. Уровень проникновения на рынок	0,04	80	100	0,8	3,2
3. Цена	0,06	45	100	0,45	2,7
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	100	100	1	8
5. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7
6. Финансирование научной разработки	0,05	78	100	0,78	3,9
7. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,71	2,13
8. Наличие сертификации разработки	0,02	78	100	0,78	3,2
Итого	1				83,35

#### 7.1.4 SWOT-анализ

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента, позволяет оценить такие параметры как: сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы. Для проведения SWOT-анализа необходимо построить матрицу, в которую записываются приведенные ранее параметры.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

- С – сильные стороны проекта;
- Сл – слабые стороны проекта;
- В – возможности;
- У – угрозы.

В таблице 7.4 представлен SWOT-анализ, сведенные к матрице:

Таблица 7.4 – Матрица SWOT

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	С1. Надежная конструкция; С2. Высокая производительность; С3. Уменьшение затрат на ремонт оборудования; С4. Простота эксплуатации.	Сл1. Накладные расходы;  Сл2. Повышение уровня вибрации; Сл3. Высокая техническая ответственность;  Сл4. Значительный износ конвейерной ленты.
Возможности:		
В1. Экономия электроэнергии;	В1: С2, С3.	В1: Сл1, Сл3.
В2. Модернизация оборудования;	В2: С1, С2, С3, С4.	В2: Сл2, Сл4.
В3. Увеличение производительности оборудования;	В3: С2, С3.	В3: Сл1, Сл2, Сл3, Сл4.
Угрозы:		
У1. Развитая конкуренция; У2. Выход из строя оборудования; У3. Отсутствие финансового обеспечения.	У1: С2, С3.  У2: С1, С3, С4  У3: С3.	У1: Сл1, Сл4.  У2: Сл1, Сл2, Сл3, Сл4.  У3: Сл1.

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

При построении интерактивных матриц используются обозначения аналогичные самой матрицы SWOT с дополнением знаков (+ / -) для подробного представления наличия возможностей и угроз проекта («+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие).

Полагаясь на проанализированные данные, можно сделать вывод, что значительный износ конвейерной ленты оказывает сильное негативное влияние на технический проект в целом. В таблице 7.5 и 7.6 приведены интерактивная матрица возможностей и интерактивная матрица угроз соответственно

Таблица 7.5 – Интерактивная матрица возможностей

Возможности	Сильные стороны проекта			
	С1	С2	С3	С4
В1	-	+	+	-
В2	+	+	+	+
В3	-	+	+	-
	Слабые стороны проекта			
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
В1	+	-	+	-
В2	-	+	-	+
В3	+	+	+	+

Таблица 7.6 – Интерактивная матрица угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта			
	С1	С2	С3	С4
У1	-	+	+	-
У2	+	-	+	+
У3	-	-	+	-
	Слабые стороны проекта			
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
У1	+	-	-	+
У2	+	+	+	+
У3	+	-	-	-

Swot-анализ позволяет оценить такие параметры как: сильные и слабые стороны проекта. В данном проекте преобладают сильные стороны, но не исключен случай, когда какая-либо одна из слабых сторон окажется наиболее сильным фактором, негативно влияющим на работу устройства, чем все вместе взятые сильные стороны.

## **7.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований**

В предыдущем разделе были описаны методы, которые позволяют выявить и предложить возможные альтернативы проведения исследования и доработки результатов. К их числу относятся технология QuaD, оценка конкурентных инженерных решений, SWOT-анализ. К ним можно добавить ФСА-анализ, метод Кано. Однако, в большей степени все приведенные методы ориентированы на совершенствование результатов научного исследования, находящегося на стадии создания макета, модели системы, прототипа, конечного продукта. Если разработка находится на перечисленных стадиях жизненного цикла нового продукта, можно предложить не менее трех основных вариантов совершенствования разработки или основных направлений научного исследования.

Разработка относится к вышеописанным стадиям, поэтому нет необходимости использовать морфологический подход.

## 7.3 Планирование научно-исследовательских работ

### 7.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения проектных работ формируется группа, которая включает в себя руководителя проекта и инженера. Для каждого типа запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. Порядок этапов и работ, распределение исполнителей по этим видам работ приведено в таблице 7.7.

Таблица 7.7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель проекта
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследований	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель проекта
Теоретическое исследование	5	Проведение предварительных расчетов и обоснований	Инженер
	6	Выбор экструдера	Инженер
	7	Выбор электродвигателя	Инженер
	8	Выбор преобразователя частот	Инженер
	9	Выбор входного и выходного Дросселей	Инженер
	10	Выбор магнитных пускателей	Инженер
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель проекта
Разработка технической документации и проектирование	12	Разработка схемы управления	Инженер
	13	Разработка схемы электропривода	Инженер

Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	14	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер
--	----	--	---------

### 7.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Важным моментом является определение трудоемкости каждого из участников проекта. Сложность работы оценивается экспертно в человеко-днях и носит вероятностный характер. Для определения ожидаемой (средней) величины трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3 \cdot t_{\min\ i} + 2 \cdot t_{\max\ i}}{5};$$

где:

- $t_{ож\ i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;
- $t_{\min\ i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;
- $t_{\max\ i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Рассчитанная продолжительность работ в рабочих днях приведена в таблице 6.8.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{C_i};$$

где:

- $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

- $t_{ож1}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.
- $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

В таблице 7.8. приведены ожидаемая трудоемкость и время выполнения работы.

### 7.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и очевидным является построение графика проектирования работ в виде диаграммы Ганта. Диаграмма Ганта – это горизонтальный график, в котором работа над темой представлена длительными промежутками времени, характеризующимися датами начала и завершения работы. Для удобства составления графика продолжительность каждого из этапов работы с рабочих дней должна быть переведена на календарные дни. Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}};$$

где:

- $T_{кал}$  – количество календарных дней в году;
- $T_{вых}$  – количество выходных дней в году;
- $T_{пр}$  – количество праздничных дней в году.

$$\frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22;$$

$$t_{ож1} = \frac{3 \cdot t_{min1} + 2 \cdot t_{max1}}{5};$$

$$\frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 3}{5} = 2 \text{ – дня.}$$

Временные показатели проведения научного проектирования и календарный план график проведения проектирования приведены в таблицах 7.8, 7.9.

Таблица 7.8 – Временные показатели проведения проектирования

Название работы	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$		
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожжi}$ , чел-дни					
	Руководитель проекта	Инженер	Руководитель проекта	Инженер	Руководитель проекта	Инженер	Руководитель проекта	Инженер		
Составление ТЗ	3		4		3		3		4	
Подбор и изучение материалов по теме		6		7		6		6		7
Выбор направления исследований		6		8		7		7		9
Календарное планирование работ по теме	4		5		4		4		5	
Проведение предварительных расчетов и обоснований		8		12		10		10		12
Выбор экструдера		1		2		1		1		1
Выбор электродвигателя		3		4		3		3		4
Выбор преобразователя частот		2		8		4		4		5
Выбор входного и выходного дросселей		4		10		6		6		7
Выбор магнитных пускателей		4		5		4		4		5



Оценка эффективности полученных результатов	4		6		5		5		6	
--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Окончание таблицы 7.8.

Разработка схемы управления		7		10		8		8		10
Разработка схемы электропривода		6		9		7		7		9
Составление пояснительной записки (эксплуатационно - технической документации)		8		12		10		10		12

Таблица 7.9 – Календарный план-график проведения проектирования

№	Вид работ	Исполнители	T <sub>кi</sub> дн	Продолжительность выполнения работ													
				Фев.		март			апрель			май			июн ь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление ТЗ	Руководитель проекта	4	■													
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	7	▨													
3	Выбор направления исследований	Инженер	9		▨												
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель проекта	5		■												
5	Проведение предварительных расчетов и обоснований	Инженер	12			▨											
6	Выбор экструдера	Инженер	1				▨										
7	Выбор электродвигателя	Инженер	4					▨									
8	Выбор преобразователя частот	Инженер	5						▨								
9	Выбор входного и выходного дросселей	Инженер	7							▨							
10	Выбор магнитных пускателей	Инженер	5								▨						
11	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель проекта	6									■					
12	Разработка схемы управления	Инженер	10										▨				
13	Разработка схемы электропривода	Инженер	9											▨			
14	Составление пояснительной записки	Инженер	12												▨		

## 7.4 Бюджет затрат на проектирования

### 7.4.1 Расчет материальных затрат проектирования

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, приведены в таблице 7.10.

Таблица 7.10 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед. руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Тетрадь	Штука	1	70	70
Карандаш Механический	Штука	1	30	30
Стержни для карандаша	Упаковка	1	15	15
Распечатка	Лист	150	2	300
<b>Итого</b>				<b>415</b>

Из таблицы видно, что материальные затраты для проектирования составляют 415 рублей.

### 7.4.2 Затраты на заработную плату исполнителей

Основная заработная плата научных и инженерных работников, непосредственно вовлеченных в выполнение работ по этому предмету проектирования, определяется на основе трудоемкости выполняемой работы и существующей системы окладов и тарифных ставок. Статья включает в себя основную заработную плату сотрудников, непосредственно занимающихся проектированием и дополнительной заработной платы:

$$Z_{zn} = Z_{осн} + Z_{доп};$$

где:

- $Z_{осн}$  – основная заработная плата;
- $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20% от  $Z_{осн}$ ).

Определим основную заработную плату инженера:

$Z_{осн} (инж) = 17000 \cdot 1,3 = 22100$  руб., где 1,3 - районный коэффициент.

Определим зарплату за 1 день:

$$Z_{день} (инж) = \frac{22100}{26} = 850 \text{ руб.},$$

где 26 – число рабочих дней за месяц.

Определим основную заработную плату за отработанное количество дней:

$$Z_{осн} (инж) = 850 \cdot 66 = 56100 \text{ руб.}$$

Определим основную заработную плату руководителя проекта:

$$Z_{осн} (\text{рук. пр.}) = 26300 \cdot 1,3 = 34190, \text{ где } 1,3 \text{ – районный коэффициент.}$$

Определим зарплату за 1 день:

$$Z_{день} (\text{рук. пр.}) = \frac{34190}{26} = 1315 \text{ руб.}, \text{ где } 26 \text{ – число рабочих дней за месяц.}$$

Определим основную заработную плату за отработанное количество дней:

$$Z_{осн} (\text{рук. пр.}) = 1315 \cdot 12 = 15780 \text{ руб.}$$

Расчет дополнительной заработной платы ведется по формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн};$$

где:

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

$$Z_{доп} (инж) = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 56100 = 8415 \text{ руб.};$$

$$Z_{доп} (\text{рук. пр.}) = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 15780 = 2367 \text{ руб.};$$

$$Z(\text{инж}) = 56100 + 8415 = 64515 \text{ руб.};$$

$$Z(\text{рук. пр.}) = 15780 + 2367 = 18147 \text{ руб.}$$

### 7.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

где:

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

$$Z_{внеб}(\text{рук. пр}) = 0,271 \cdot 18147 = 4918 \text{ руб.};$$

$$Z_{внеб}(\text{инж}) = 0,271 \cdot 64515 = 17484 \text{ руб.}$$

### 7.4.4 Амортизация

Расчет амортизационных отчислений для полного восстановления основных фондов производится по нормам амортизации, утвержденным в порядке, установленном действующим законодательством, и определяется в зависимости от стоимости оборудования. Для проектирования требуется следующее оборудование: компьютер - 41000 рублей.

$$I_{ам} = \frac{T_{ис}}{T_{г}} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \cdot C_{обор};$$

где:

- $T_{ис}$  – время использования оборудования = 81 дней;
- $T_{г}$  – количество использования в год = 365 дней;
- $C_{обор}$  – стоимость оборудования;
- $T_{сл}$  – срок службы оборудования = 3 года.

$$I_{ам} = \frac{T_{ис}}{T_{г}} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \cdot C_{обор} = \frac{81}{365} \cdot \frac{1}{3} \cdot 41000 = 3033 \text{ руб.}$$

### 7.4.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают другие расходы организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печатные и фотокопировальные исследовательские материалы, оплату услуг связи, электричество, почтовые и телеграфные расходы, воспроизведение материалов и т. д. Их стоимость определяется следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма\_статей}_{(1:4)}) \cdot k_{\text{нр}};$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = 108512 \cdot 0,16 = 17362 \text{ руб.}$$

### 7.4.6 Формирование бюджета затрат на проектирование

Рассчитанная величина затрат проектирования работы является основой для формирования бюджета затрат проекта. Определение бюджета затрат на проектирование по каждому варианту исполнения приведен в таблице 7.11.

Таблица 7.11 – Бюджет затрат на проектирование

Наименование статьи	руб.	%
Материальные затраты НТИ	415	0,33
Затраты на заработную плату исполнителей темы	82662	65,67
Отчисления во внебюджетные фонды	22402	17,79
Амортизация	3033	2,41
Накладные расходы	17362	13,8
Итого	125874	100

## **Заключение по разделу «Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение»**

В данном разделе было осуществлено сравнение способов получения полипропиленовой нити, и был выбран наиболее конкурентоспособный, такой оказался способ получения синтетической пленочной нити путем формования продольно профилированной пленки. Затем, был определен бюджет затрат на проектирования, который составил 125874 рублей. Данная линия производства полипропиленовой нити установлена в цехе производства упаковочных материалов ООО — Томскнефтехим.

## **8 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

### **8.1 Введение**

Целью данного раздела является анализ опасных и вредных факторов при работе экструзионной линии производства полипропиленовой нити, разработка требований и мероприятий по технике безопасности, анализ пожарной безопасности и выработка мероприятий, направленных на предотвращение пожаров.

Объектом изучения в ВКР является комплектный тиристорный электропривод постоянного тока фирмы Baumuller главного привода шнекового экструдера STAREX фирмы Starlinger линии получения полипропиленовой нити. Линия установлена в цехе производства упаковочных материалов ООО «Томскнефтехим».

### **8.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Отношения между организацией и работниками, касающиеся оплаты труда, трудового распорядка, специфики работы, социальных отношений и страхования регулируются законодательством РФ. Далее будут приведены нормативные документы, которые регулируют вышеописанные вопросы.

На работах с вредными или опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением, выдаются прошедшие обязательную сертификацию или декларирование соответствия средства индивидуальной защиты в соответствии с типовыми нормами, утвержденными в порядке, установленном Правительством Российской Федерации. Также, работодатель за счет своих средств обязан в соответствии с установленными нормами обеспечивать своевременную выдачу специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты, а также их хранение, стирку, сушку, ремонт и замену [ТК РФ Статья 221] [27].



Каждому работнику должно быть предоставлено рабочее место с учётом специфики работы – оператор по управлению экструдера должен иметь в распоряжении место, подходящее по размеру и другим параметрам, уровень света по [СП 52.13330.2016] [23] должен быть достаточен для работы. Оно должно соответствовать нормам по шумам [СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96] [21] и вибрации по [СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96] [22].

Согласно [Федеральный закон "Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний" от 24.07.1998 N 125ФЗ], работник имеет право на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний [28].

Согласно [ТК РФ Статья 92], продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю. Для работников до 16 лет – не более 24 часов в неделю, от 16 до 18 лет – не более 35 часов, как и для инвалидов I и II группы. Для работников, работающих на местах, отнесенных к вредным условиям труда 3 и 4 степени – не более 36 часов [24].

Согласно [ТК РФ Статья 147] Оплата труда работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, устанавливается в повышенном размере (часть первая в ред. Федерального закона от 28.12.2013 N 421-ФЗ). Минимальный размер повышения оплаты труда работникам, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, составляет 4 процента тарифной ставки (оклада), установленной для различных видов работ с нормальными условиями труда. (часть вторая в ред. Федерального закона от 28.12.2013 N 421-ФЗ) [26].

Согласно [ТК РФ Статья 96], ночное время - время с 22 часов до 6 часов. Продолжительность работы (смены) в ночное время сокращается на один час без последующей отработки (в ред. Федерального закона от 30.06.2006 N 90-ФЗ). Не сокращается продолжительность работы (смены) в ночное время для работников, которым установлена сокращенная продолжительность рабочего времени [25].

### 8.3 Производственная безопасность

Перечень опасных и вредных факторов, характерных для рассматриваемой производственной среды представлен в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ	Нормативные документы
	Эксплуатация	
1. Превышение уровня шума	+	СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96; ГОСТ 12.1.003 – 2014;
2. Превышение уровня вибрации	+	СанПиН 2.2.4/2.1.8.566–96; ГОСТ 12.4.002 – 97; ГОСТ Р 55710-2013; СП 52.13330.2016;
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	ГОСТ 12.4.011–89; ГОСТ 12.1.009 – 2017; ГОСТ 12.1.019 – 2009.
4. Опасность электро- поражение	+	

## 8.4 Анализ опасных и вредных факторов производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего

### 8.4.1 Превышение уровня шума

Одним из самых распространенных вредных факторов на производстве является шум. На предприятии, где постоянно ведутся те или иные работы на станках, включены в нагрузку насосы, вентиляторы — присутствует высокий уровень шума, который оказывает отрицательное влияние на организм человека, например [13]:

- учащается пульс, дыхание;
- повышается артериальное давление;
- изменяются двигательная, секреторная функции желудка и других органов;
- негативное влияние на нервную систему (головные боли, бессонница).

Вышеперечисленные факторы пагубно влияют на работника и, в конечном счете, приводят к понижению его работоспособности и, в связи с этим, на предприятиях введены следующие меры по защите от шума, согласно [СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96]:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны.

Предельно допустимые уровни шума, на рассматриваемом рабочем месте, представлены в таблице 8.2, согласно [СанПиН 2.2.4/2.1.8.562–96] [21].

Таблица 8.2 – Предельно допустимые уровни шума

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

## 8.4.2 Превышение уровня вибрации

Также, вредным к производственным факторам, относится фактор «превышение уровня вибрации». В данном случае, на производстве, под вибрацией понимается колебание твердых тел, а основными источниками выступают различные станки, экструдеры и прочее крупногабаритное оборудование.

Превышение уровня вибрации негативно влияет на отделы центральной нервной системы, желудочно-кишечного тракта и вестибулярного аппарата человека. Одним из самых распространенных профессиональных заболеваний при длительном воздействии вибрации – является виброболезнь, побочными факторами которой являются: головокружение, онемение нижних конечностей и потеря ориентации в пространстве. На предприятии, в целях профилактики данной болезни, для работающих с вибрирующим оборудованием, регламентируется режим работы – продолжительность рабочей смены, обязательные перерывы, отдых.

Для того, чтобы защитить работника от вибрации на производстве (согласно [ГОСТ 12.4.002 – 97]), применяются следующие средства защиты [16]:

- антивибрационные рукавицы (для защиты от вибрирующих объектов);
- специальная обувь на антивибрационной подошве (для защиты от вибрирующего пола);
- резино-войлочные маты;
- антивибрационные площадки;
- антивибрационные сидения.

Технические нормы вибрации в рассматриваемом цеху представлены в таблице 8.3., согласно [СанПиН 2.2.4/2.1.8.566–96] [22].

Таблица 8.3 – Технические нормы вибрации

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

### 8.4.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Основная задача освещения на производстве – создание наилучших условий для зрения трудящихся. Согласно научным исследованиям, отсутствие или недостаток естественного освещения на рабочем месте может вызвать ухудшение самочувствия, привести к потере сна и ослаблению здоровья. Специалисты полагают, что причина отрицательного воздействия может заключаться в изменении циркадных ритмов из-за недостатка естественного света. Поэтому следует уделять большее внимание достаточному дневному освещению для укрепления здоровья и морального состояния работников.

На рабочих местах, где трудовая деятельность ведется в условиях отсутствия естественного освещения, необходимо проводить мероприятия, направленные на уменьшение уровня вредности условий труда. В их число входят следующие (согласно [ГОСТ Р 55710–2013]) [19]:

- улучшение условий путем использования искусственного освещения;
- защита временем, то есть сокращение продолжительности пребывания работников в помещении без естественного освещения;
- профилактическое ультрафиолетовое облучение работников. В этом случае источники ультрафиолетового излучения устанавливаются рядом с обычными осветительными лампами, за счет чего достигается обогащение обычного искусственного освещения ультрафиолетовым излучением.

При недостатке естественного освещения в помещениях также возможно принятие следующих мер:

- анализ степени загрязненности стекол в светопроемах, их очистка и дальнейшие контрольные измерения коэффициента естественной освещенности, который показывает, какая часть наружного освещения попадает на рабочие места производственного помещения;
- при наличии в помещении зон с недостаточным и достаточным уровнем естественного освещения изменение размещения рабочих мест с их переносом в зону с достаточным уровнем естественного освещения;

- косметический ремонт помещения с применением светлых отделочных материалов.

Минимальная освещенность на рабочих местах не должна отличаться от нормируемой средней освещенности в помещении более чем на 10% согласно [СП 52.13330.2016] [23].

Система освещения должна быть сконструирована таким образом, чтобы не существовало ни затененных зон способных вызвать неудобство, ни раздражающего ослепляющего света, ни опасного стробоскопического эффекта на движущихся частях из - за освещения. Внутренние элементы, требующие частой проверки и регулировки, а также зоны технического обслуживания должны быть обеспечены достаточным освещением. Уровень освещенности (согласно [ГОСТ Р 55710 – 2013]) в зонах, требующих частой проверки и регулировки, должны быть не менее 500 ЛК [19].

Согласно [ГОСТ 12.4.011–89] к средствам нормализации освещенности производственных помещений рабочих мест относятся [17]:

- источники света;
- осветительные приборы;
- световые проемы.

#### **8.4.4 Анализ опасных факторов**

Проведем анализ опасных производственных факторов в вышеописанном технологическом процессе. Основным опасным фактором является возможность поражения человека электрическим током, так как работа производится с рабочими электрическими установками, в частности двигателями. Для снижения уровня опасности проводится заземление электроустановок и полное или частичное ограждение токоведущих частей.

Следующая опасность заключается в том, что работа проводится с рабочим двигателем, соответственно вал двигателя находится в движении, что может привести к механическим повреждениям частей тела человека. Однако,

благодаря конструкции двигателей, опасность представляют лишь выходные концы валов и места соединений. Для снижения риска устанавливают кожухи или защитные экраны в местах открытых движущихся механических частей.

#### **8.4.5 Опасность электро-поражения**

Электро-поражение персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках.

В соответствии с [ГОСТ 12.1.009 – 2017] к поражению электрическим током может привести прикосновение человека к токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением. Поражение проявляется в парализующем и разрушительном воздействии тока на внешние и внутренние органы – кожный покров, мышцы, органы дыхания, сердце, нервную систему [14].

При разработке коллективных и индивидуальных средств защиты от электро-поражения необходимо, согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), рассмотреть следующие вопросы [20]:

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

Необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты: изоляция проводов и ее непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; защитное заземление и защитное отключение.

Также (согласно [ГОСТ 12.1.019–2009]), используются индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000 В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками [15].

## 8.5 Экологическая безопасность

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.

Обмен веществ и энергии ООО «Нефтехим» с окружающей средой представлен на рисунке 8.1.

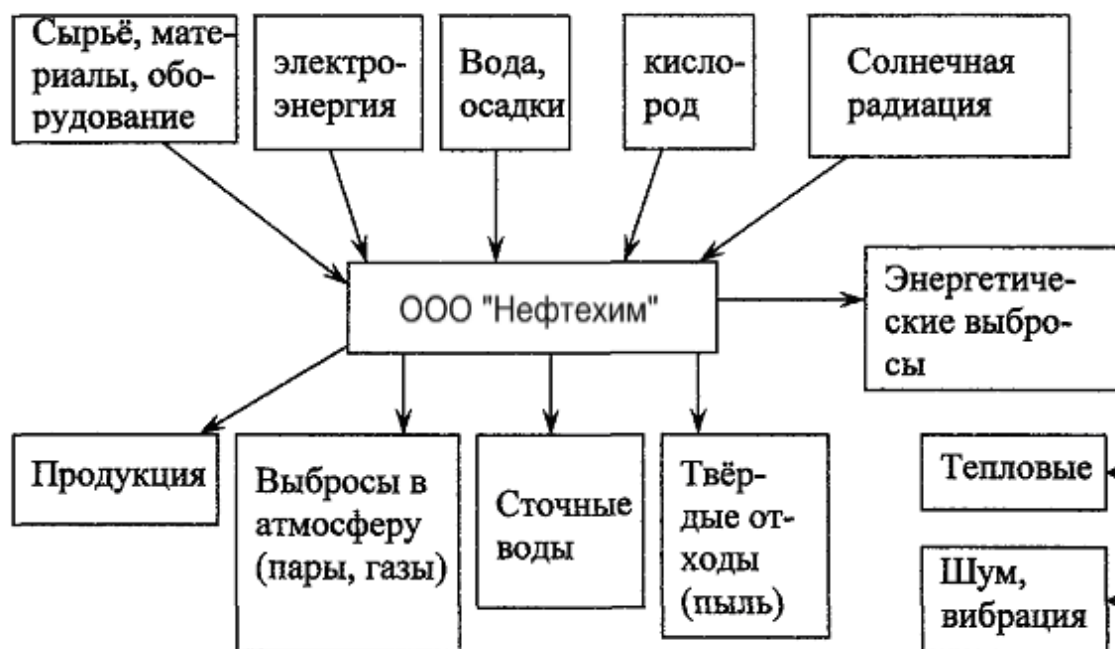


Рисунок 8.1 – Обмен веществ и энергии ООО "Нефтехим"



В соответствии с [ГОСТ 17.2.3.02–2019], определяются правила установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ проектируемыми или действующими хозяйствующими субъектами и методы определения этих нормативов [18].

Основой для проведения работ по нормированию выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух являются инвентаризации выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и их источников (в отношении действующих хозяйствующих субъектов) и данные проектной документации (в отношении вводимых в эксплуатацию новых и (или) реконструируемых хозяйствующих субъектов).

Исходя из данных о результатах инвентаризации, определяются источники выбросов и перечни загрязняющих веществ, подлежащих государственному учету и нормированию, в соответствии с действующими нормативными документами.

Радикальное решение проблем охраны окружающей среды от негативных воздействий промышленных предприятий возможно при широком применении безотходных и мало отходных технологий. Использование очистных устройств, сооружений позволяет локализовать выброс, а применение более современных систем очистки всегда сопровождается экспоненциальным ростом затрат на осуществление процесса очистки, даже в тех случаях, когда это технически возможно.

Под понятием “безотходная технология” следует понимать комплекс мероприятий в технологических процессах, от обработки сырья до использования готовой продукции, в результате чего сокращается до минимума количество вредных выбросов и уменьшается воздействие отходов на окружающую среду до приемлемого уровня.

В связи с этим предлагается следующий комплекс мероприятий, для решения проблемы, в который входят:

- создание и внедрение новых процессов получения продукции образованием наименьшего количества отходов;

- разработка систем переработки отходов производства во вторичные материальные ресурсы;
- разработка различных типов бессточных технологических систем и водооборотных систем на базе способов очистки сточных вод;
- создание территориально – промышленных потоков сырья и отходов внутри комплекса.

Вода на ООО «Нефтехим» 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 растворами и нерастворимыми примесями, поэтому здесь применяется система оборотного водоснабжения.

«Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами» запрещает выбрасывать в водоемы сточные воды, если этого можно избежать, используя более рациональную технологию и системы повторного и оборотного водоснабжения.

При эксплуатации линии выделяется много пыли, масел и эмульсий. Отработанные эмульсии и масла собираются в специальных сборниках, проходят очистку и снова запускаются в технологический процесс. Отходы от этой очистки подлежат уничтожению. В цехе работает принудительная вентиляция, снабженная пылеулавливающими аппаратами типа циклонный пылеуловитель.

Важнейшим звеном в обеспечении качества окружающей среды является система контроля за ее состоянием, включающая:

- наблюдение за состоянием окружающей среды и прогноз измерений;
- выявления и оценку источников загрязнения;
- предупреждение появления повышенных загрязнений.

Данные по расходу воды, воздуха на линии:

- номинальный расход сжатого воздуха 25 м<sup>3</sup>/час;
- расход воды 12 м<sup>3</sup>/час.



## **8.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Наиболее вероятная чрезвычайная ситуация на рассматриваемом рабочем месте в механическом цехе – возникновение пожара, которая и будет рассмотрена далее.

### **8.7 Пожар (загорание) как источник ЧС**

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

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

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м<sup>3</sup>.

Организационно-технические мероприятия: инструктаж работающих по пожарной безопасности; разработка схемы действий администрации и работающих в случае пожара и организация эвакуации людей.

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

## **Выводы по разделу «Социальная ответственность»**

В данной работе были рассмотрены следующие проблемы:

Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:

- организация труда на рабочем месте.

Проблемы производственной безопасности:

- уменьшение влияние вредных факторов на сотрудников (шум, вибрация, недостаточная освещенность рабочей зоны);
- предотвращение электро-поражения персонала.

Вопросы экологической безопасности:

- внедрение «безотходной технологии»;
- снижение воздействий на окружающую среду.

Безопасность в чрезвычайных ситуациях:

- предотвращение ЧС.

На основании чего на предприятии могут быть приняты решения по исключению вышеперечисленных проблем, путем внедрения необходимой аппаратуры в соответствии с проблемой, оптимизирована работа персонала и установок, введена необходимая защита. Также, в работе были предложены меры по защите окружающей среды, предотвращению пожаров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью выпускной квалификационной работы являлось изучение системы автоматического регулирования диаметра проволоки на основе системы асинхронного двигателя. Таким образом, было получено, что показатели качества установленной системы управления диаметром провода на базе системы асинхронного двигателя не хуже показателей системы управления на базе двигателя постоянного тока.

В настоящей работе был разработан привод переменного тока. Были рассчитаны и построены электромеханические и механические характеристики этого привода. Проведен синтез и анализ линеаризованной системы автоматического управления электроприводом переменного тока. Были отрегулированы и оптимизированы контуры тока и скорости привода переменного тока. Были сделаны следующие выводы, что полученные показатели качества путем моделирования в программе MATLAB полностью удовлетворяют искомым показателям качества.

Исследована нелинейная система автоматического управления электроприводом переменного тока на основе линеаризованной системы автоматического управления. В нелинейной системе были учтены основные нелинейности электрической системы управления. В программе MATLAB разработана имитационная модель нелинейной системы автоматического управления электроприводом переменного тока. Полученные переходные процессы данной модели соответствуют требованиям технического задания.

Кроме того, в программе MATLAB была разработана и спроектирована система автоматического регулирования диаметра изолированного провода.

В процессе моделирования различных режимов работы было установлено, что разработанная система автоматического управления следует заданной позиционной кривой и обеспечивает требуемые показатели качества:

- значение диаметра достигает заданного значения без превышения;
- определяется время переходного процесса.

В части технико-экономической оценки рассмотрена возможность применения энергосбережения с использованием частотно-регулируемых приводов и применения системы автоматического управления. Были проанализированы виды пусконаладочных работ и их стоимость. По полученным данным была составлена оценка. В настоящей работе также рассматривались проблемы безопасности и экологической совместимости.

Таким образом, разработанная система автоматического регулирования диаметра изолированного провода полностью соответствует всем техническим требованиям.

В заключение следует еще раз подчеркнуть тот факт, что в современных условиях экструдер, как таковой, редко способен справиться с задачами, стоящими перед переработчиками пластмасс. В соответствии с технологическими схемами, используемыми в настоящее время, в них возникает необходимость в экструзионных линиях. В дополнение к экструдеру могут быть включены:

1. Калибровочное устройство;
2. Со-экструдеры;
3. Охлаждающая ванна;
4. Перетаскивание с блока;
5. Устройство обнаружения;
6. Установка для ламинирования;
7. Режущее-намоточное устройство;
8. Другая вспомогательная технологическая единица.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Примеры и задачи по курсу оборудования заводов химической промышленности/Н. А. Козулин.-М.: Машиностроение, 1966.-490 с.
2. Завгородний В.К., Калинин Э.Л., Махаринский Е.Г. Оборудование предприятий по переработке пластмасс Москва, изд-во "Химия", 1972 г., 464 с.
3. Иванов Г.М., Онищенко Г. Б. Автоматизированный электропривод в химической промышленности.-М. Машиностроение, 1975.-321 с.
4. Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. Елисеева и Шинянского. – М.: Энергоатомиздат: 1983. 616 с.
5. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Автоматизированный электропривод: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 224 с.
6. Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кирякин А. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. – Электричество, 2015.
7. Поздеев А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах, Изд-во Чувашского Университета, 1998, 173 с.
8. Преобразователь частоты 6SE7033-7EG60 фирмы Siemens: Руководство по эксплуатации.
9. Электроприводы переменного тока фирмы DANFOSS: методические указания по выполнению лабораторных работ / А.Ю. Чернышев, С.В. Ланграф, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. –151с.
10. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М: Издательский центр «Академия», 2014. 576 с.]:
11. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студентов высших учебных заведений. – М., «Академия», 2011. 368 с.]

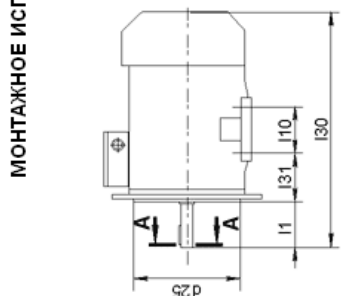
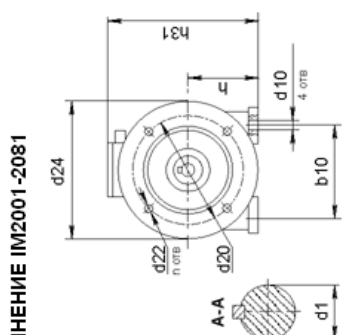
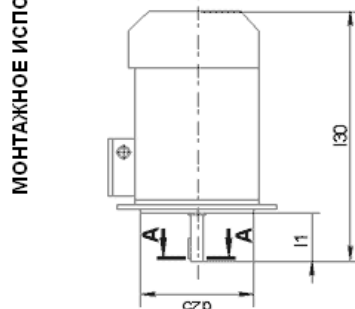
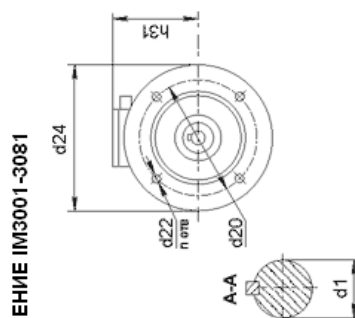
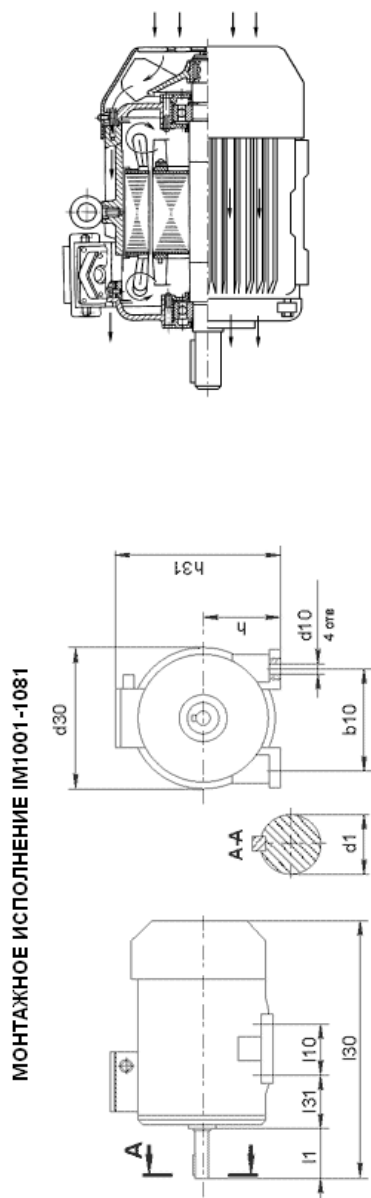


12. Системы управления электроприводов.: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 82 с.
13. ГОСТ 12.1.003 – 2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
14. ГОСТ 12.1.009 – 2017 ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения.
15. ГОСТ 12.1.019 – 2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
16. ГОСТ 12.4.002 – 97 ССБТ. Средства индивидуальной защиты рук от вибрации. Общие технические требования.
17. ГОСТ 12.4.011 – 89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
18. ГОСТ 17.2.3.02 – 2019. Правила установления допустимых выбросов загрязняющих веществ промышленными предприятиями.
19. ГОСТ Р 55710 – 2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений.
20. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 1.7. Заземление и защитные меры электробезопасности (Издание седьмое).
21. СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
22. СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы.
23. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.
24. ТК РФ Статья 92. Сокращенная продолжительность рабочего времени.
25. ТК РФ Статья 96. Работа в ночное время.
26. ТК РФ Статья 147. Оплата труда работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.
27. ТК РФ Статья 221. Обеспечение работников средствами индивидуальной защиты.

28. Федеральный закон "Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний" от 24.07.1998 N 125-ФЗ.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Монтажные исполнения и габаритные и монтажные размеры двигателя 5AM315M4



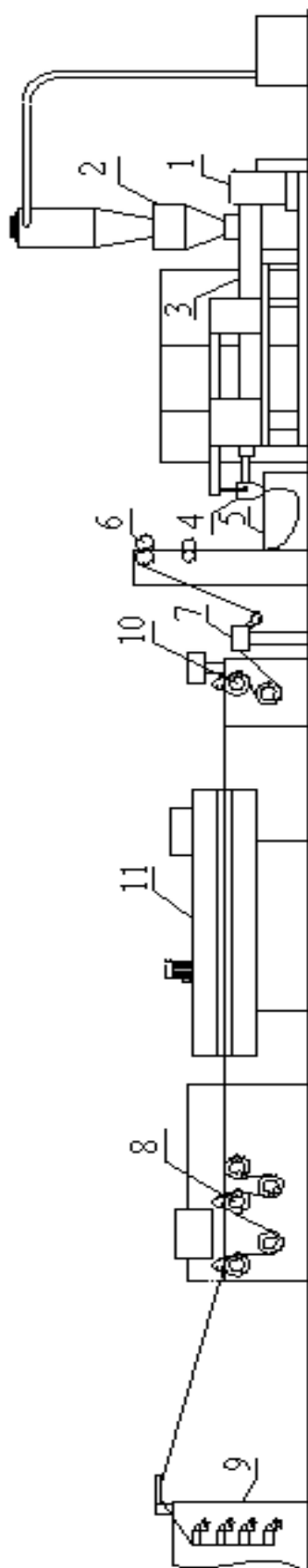
**ГАБАРИТНЫЕ И МОНТАЖНЫЕ РАЗМЕРЫ, мм**

Двигатель	l30	h31	d30	d24	h37	l1	l10	l31	d1	d10	b10	d20	d22	d25	h	n отв
5AM315M4	1290	765	680	660	-	170	457	216	90	28	508	600	24	550	315	8

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Линия производства полипропиленовой нити

#### Линия производства полипропиленовой нити



1. Редуктор
2. Загрузочное устройство
3. Цилиндр экструдера
4. Филера
5. Режущая касета
6. Удерживающие балки
7. Печь горячего воздуха
8. Выталкивающие балки
9. Узел намотки
10. Вытягивающие балки над ванной
11. Охлаждающая ванна