

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

---

Инженерная школа энергетики  
Отделение Электроэнергетики и электротехники  
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
Профиль Электропривод и автоматика

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>ЭЛЕКТРОПРИВОД ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА</b>

УДК 62-83:622.691.4.05

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4А	Ларионов Никита Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Тимошкин В.В.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Калмыкова Е.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Отделение электроэнергетики и электротехники	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Дементьев Ю.Н.	Ph.D., Доцент		

Томск – 2018 г.

**Запланированные результаты обучения  
профессиональные и общекультурные компетенции  
по основной образовательной программе подготовки бакалавров  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,  
профиль «Электропривод и автоматика»**

Код результата	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные</i>		
<b>Р 1</b>	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа электроэнергетических систем и электрических сетей.	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4, ОПК-2, ОПК-3), <i>CDIO Syllabus</i> (1.1), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<b>Р 2</b>	Уметь формулировать задачи в области электроэнергетических систем и сетей, анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.	Требования ФГОС (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3), <i>CDIO Syllabus</i> (2.1), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<b>Р 3</b>	Уметь проектировать электроэнергетические системы и электрические сети.	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-3, ПК-4, ПК-9), <i>CDIO Syllabus</i> (4.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<b>Р 4</b>	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, объектов электрических сетей энергосистем, а также энергосистемы в целом, интерпретировать данные и делать выводы.	Требования ФГОС (ОПК-2, ОПК-3, ПК-1, ПК-2, ПК-5, ПК-12, ПК-14, ПК-15), <i>CDIO Syllabus</i> (2.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<b>Р 5</b>	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области электроэнергетических систем и электрических сетей.	Требования ФГОС (ОПК-2, ПК-11, ПК-13, ПК-18), <i>CDIO Syllabus</i> (4.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<b>Р 6</b>	Иметь практические знания принципов и технологий электроэнергетической отрасли, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-5, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9, ПК-16, ПК-17), <i>CDIO Syllabus</i> (4.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных

Код результата	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	работодателях.	стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Универсальные</i>		
<b>Р 7</b>	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области электроэнергетических систем.	Требования ФГОС (ПК-20, ПК-19, ПК-21), <i>CDIO Syllabus</i> (4.3, 4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</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 области электрических сетей энергосистем.	Требования ФГОС (ОК-5, ОК-1, ПК-2), <i>CDIO Syllabus</i> (3.2, 4.7), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<b>Р 9</b>	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области электроэнергетических систем и сетей.	Требования ФГОС (ОК-6), <i>CDIO Syllabus</i> (3.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<b>Р 10</b>	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-5, ОК-6), <i>CDIO Syllabus</i> (2.5), Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<b>Р 11</b>	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области электроэнергетических систем и сетей с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.	Требования ФГОС (ОК-4, ОК-8, ОК-9, ПК-3, ПК-4, ПК-10), <i>CDIO Syllabus</i> (4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<b>Р 12</b>	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области электроэнергетических систем и сетей.	Требования ФГОС (ОК-7, ОК-8), <i>CDIO Syllabus</i> (2.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Инженерная школа энергетики  
Отделение Электроэнергетики и электротехники  
Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
Профиль «Электропривод и автоматика»

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ОЭЭ ИШЭ  
\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата)      Дементьев Ю.Н.  
(Ф.И.О.)

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

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Г4А	Ларионову Никите Александровичу

Тема работы:

ЭЛЕКТРОПРИВОД ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	02.02 2018г. № 645/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.18
--	----------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

Исходные данные к работе	
<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>	Исследовать особенности эксплуатации электроприводного газоперекачивающего агрегата типа ЭГПА 4/8200-56/1,26 предназначенного для транспортировки газа по магистральным газопроводам; режим работы – продолжительный. Технические характеристики ЭГПА 4/8200-56/1,26 1. Для высоковольтного асинхронного двигателя: Номинальная мощность 4 МВт Скорость вращения ротора 8200 об/мин Номинальный КПД 95,8% 2. Для нагнетателя 220-111СМП Производительность 12,5 млн м <sup>3</sup> /сут. Давление газа конечное 4,41 МПа Степень повышения давления 1,26 Политропны КПД 85% Частота вращения: номинальная 8200 об/мин

	минимальная 5740 об/мин максимальная 8610 об/мин
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <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>	Произвести исследование применения векторного управления электроприводного газоперекачивающего агрегата; Моделирование режимов работы системы в MATLAB; Анализ полученных результатов.
<b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Калмыкова Екатерина Юрьевна
Социальная ответственность	Панин Владимир Филиппович
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Все разделы выпускной квалификационной работы написаны на русском языке.	

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Тимошкин В.В.	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4А	Ларионов Н.А.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Г4А	Ларионову Никите Александровичу

Инженерная школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавр	Направление	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Оклад руководителя - 100400 руб. Оклад инженера – 70000 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30 % премии 15 % надбавки 80 % накладные расходы 30 % районный коэффициент
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	30 % отчисления на социальные нужды

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

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

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

1. График Ганта
-----------------

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Калмыкова Е.Ю.	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4А	Ларионов Никита Александрович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5Г4А	Ларионову Никите Александровиу

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение</b>	Электроэнергетики и электротехники
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	Электроэнергетика и электротехника

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

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения: вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</p> <p>опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</p>	<p>Описание рабочего места дежурного инженера узла связи при работе с ИБП:</p> <p>-к вредным факторам производственной среды можно отнести повышенную или пониженную температуру воздуха рабочей зоны, подвижность воздуха, тепловое излучение, повышенные уровни шума, электромагнитные поля, освещённость;</p> <p>-к опасным факторам производственной среды можно отнести опасность поражения электрическим током. пожароопасность, получение механической травмы;</p> <p>- к негативным факторам воздействия на окружающую среду можно отнести химический вред неправильно утилизированных свинцово- кислотных аккумуляторных батарей</p>
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	ГОСТ 12.0.003-74; СанПиН 2.2.4.548-96; ГОСТ 12.1.033-81; СНиП2.01.51-90; НПБ 105-03; ГОСТ 12.1.029-80; ГОСТ 12.4.125-83; ГОСТ Р 50571.2-94

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

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны, подвижность воздуха, тепловое излучение методы предотвращения их вредного воздействия - устройство отопления, вентиляции, применение средств индивидуальной защиты ГОСТ 12.4.011-89;</li> <li>- Повышенные уровни шума методы уменьшения вредного воздействия уменьшение в источнике, изменение направленности излучения ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ</li> <li>- Освещённость методы предотвращения вредного воздействия – правильное проектирование системы освещения СНиП 23.05-95</li> </ul>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов произведённой среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Меры, предотвращающие опасность поражения электрическим током ГОСТ 12.1.030 – 81, ПУЭ;</li> <li>- Противопожарные меры ГОСТ 12.1.004-91, ППР</li> </ul>

профилактикт.мероприятия)	
3. Охрана окружающей среды: — защита селитебной зоны — анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); — анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); — анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); — разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	- разработать или описать систему обращения с выбросами механического цеха. - разработать или описать систему обращения со сбросами. - описать систему обращения с твердыми отходами цеха в соответствии с постановлениями Правительства РФ от 03.09.2010 №681 и Администрации г. Томска от 11.11 2009 №1110(с изменениями от 24.12. 2014г.).
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: — перечень возможных ЧС на объекте; — выбор наиболее типичной ЧС; — разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; — разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; — разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	- Чрезвычайные ситуации на магистральном газопроводе могут возникнуть в результате внезапной разгерметизации линейной части
<b>Перечень графического материала:</b>	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	16.03.2018 г.
---	---------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Подпись	Дата
Профессор	Панин В.Ф.		16.03.18г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4А	Ларионов Н.А.		16.03.18г.

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 132 с., 58 рис., 17 табл., 30 источников, 1 прил.

*Ключевые слова:* компрессорная станция, газопровод, электроприводной газоперекачивающий агрегат, асинхронный двигатель, векторное управление, электропривод.

*Объект исследования.* Электроприводной газоперекачивающий агрегат типа ЭГПА 4/8200 – 56/1,26.

*Цель работы* - проектирование электропривода для газоперекачивающего агрегата с векторным управлением, исследование рабочего места инженера с целью определения вредных и опасных экологических и производственных факторов и средств защиты от них, экономическое планирование проектных работ и оценка ресурсоэффективности научно-исследовательской работы.

*В процессе выполнения работы применялись* программные комплексы «MATLAB Simulink» и «MathCAD», а также офисный пакет приложений Microsoft Office (Word, Visio, Exel).

*В результате исследования* был спроектирован современный асинхронный частотно-регулируемый электропривод с векторным управлением.

*Область применения:* газотранспортные системы природного газа.

*Экономическая эффективность/значимость работы* в ходе исследования были рассмотрены мероприятия по пусконаладочным работам, необходимые для введения в эксплуатацию электропривода газоперекачивающего агрегата.

## Список условных сокращений

- АД – Асинхронный двигатель;
- АРМ - Автоматизированное рабочее место;
- АО – Аварийный останов;
- БЭО – Блок экстренного останова;
- ВПНА - входного поворотного направляющего аппарата;
- ГКС – Газокомпрессорная станция;
- ЗРУ – Защитно-распределительное устройство;
- КПД – Коэффициент полезного действия
- МГ – Магистральный газопровод;
- МПН – Магнитный подвес нагнетателя;
- МПД – Магнитный подвес двигателя;
- МП – Магнитный подшипник;
- МПКИ – Местный пульт управления и индикации;
- НО – Нормальный останов;
- ПЧ – Преобразователь частоты;
- ПКУ – Пульт контроля и управления;
- РПУ – Резервная панель управления;
- СО – Система охлаждения;
- СГУ – Система сухих газовых уплотнений;
- САУ – Система автоматического управления;
- ЦБН – Центробежный нагнетатель;
- ШУ – Шкаф управления;
- ШИМ – Широтно-импульсная модуляция;
- ЭГПА – Электропривод газоперекачивающего агрегата;
- ЭО – Экстренный останов;

## Оглавление

Реферат .....	9
Список условных сокращений.....	10
Введение.....	14
Глава 1. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....	16
1.1 Анализ технологического процесса как объекта управления .....	16
1.1.1 Описание технологического оборудования и процесса.....	16
1.1.2 Перечень основного оборудования ЭГПА и их параметры .....	22
1.2 САУ газоперекачивающего агрегата .....	24
1.2.1 Описание САУ газоперекачивающего агрегата .....	24
1.2.2 Основные элементы САУ.....	28
1.3 Сравнительный анализ газоперекачивающих агрегатов разных типов.....	33
1.4 Основные способы управления ЭГПА .....	35
1.5 Современные требования к ЭГПА .....	40
Глава 2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	43
2.1 Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя ЭГПА.....	43
2.2 Построение статических механических и электромеханических характеристик .....	46
Глава 3. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭГПА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ .....	50
3.1 Моделирование асинхронного двигателя .....	50
3.1.1 Математическое описание асинхронного двигателя .....	50
3.1.2 Модель АД в неподвижной системе координат.....	54
3.1.3 Модель АД во вращающейся системе координат.....	57
3.1.4 Проверка адекватности разработанных имитационных моделей.....	61

3.2	Разработка линеаризованной системы векторного управления.....	61
3.2.1	Оптимизация контуров регулирования .....	61
3.2.2	Расчёт ожидаемых показателей качества системы.....	70
3.2.3	Исследование переходных процессов в линеаризованной системе ...	72
3.3	Разработка нелинейной системы асинхронного электропривода с векторным управлением.....	74
3.3.1	Ограничения в системе управления в электроприводе с векторным управлением.....	74
3.3.2	Адаптация системы управления к нелинейностям.....	76
3.3.3	Исследование переходных процессов в системе электропривода.....	76
3.4	Модуль идентификации составляющих вектора потокосцепления .....	80
3.4.1	Разработка системы идентификации .....	80
3.4.2	Исследование переходных процессов в системе электропривода с векторным управлением на базе модуля идентификации. ....	86
3.5	Разработка математического описания технологического процесса ЭГПА88	
	Глава 4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ВКР .....	98
4.1	Технико-экономическое обоснование применения регулируемого электропривода.....	98
4.2	Структура пусконаладочных работ.....	99
4.3	Исполнители работ.....	101
4.4	Определение сметной стоимости пусконаладочных работ .....	105
	Глава 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	111
5.1	Анализ вредных факторов.....	111
5.1.1	Шум .....	112
5.1.2	Вибрация .....	113
5.1.3	Недостаток естественного света.....	114

5.1.4 Микроклимат .....	117
5.2 Анализ опасных факторов.....	118
5.2.1 Электропоражение .....	118
5.2.2 Возгорание .....	119
5.3 Защита окружающей среды .....	120
5.4 Предотвращение ЧС и устранение их последствий .....	122
5.4.1 Пожар (загорание) – как источник ЧС.....	123
5.4.2 Электропоражение как источник ЧС .....	123
Заключение .....	126
Список использованных источников .....	128
Приложение А .....	131

## **Введение**

Большое количество экономически развитых стран в жилищно-коммунальном хозяйстве и промышленности используют природный или попутно-нефтяной газ. Однако большинство источников природного газа находится на большом расстоянии от потребителей, и требуют транспортировки к месту назначения.

Для транспортировки газа используются промысловые, магистральные и распределительные газопроводы. Длина таких газопроводов может достигать сотен тысяч километров, а то и больше. При прохождении газа по трубопроводу возникает трение потока о стены трубы, что вызывает потерю давления (энергии) поэтому, для того чтобы газ дошел до потребителя в достаточном количестве через большое расстояние требуется постоянное поддержание давления в газопроводе. С этой функцией справляется газокompрессорные станции (ГКС) в состав которых входят газоперекачивающие агрегаты. ГКС устанавливают на трассе газопровода через каждые 80 – 120 километров. При прохождении транспортируемого газа через ЭГПА газ компримируется до давления, необходимого для транспортировки его от источников газа до газораспределительных станций потребителей.

Газоперекачивающий агрегат предназначен для повышения давления и перемещения газа, поступающего из входного коллектора компрессорной станции магистрального газопровода. Используются как электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) так и газотурбинные. В настоящее время стараются перейти от газотурбинных к более современным и эффективным ЭГПА. Это связано с тем, что электроприводные станции обладают более высоким коэффициентом полезного действия (КПД), чем газотурбинные. Поэтому при наличии мощных энергетических систем является целесообразным для привода центробежных нагнетателей использовать электродвигатели. В этом случае упрощается технологическая схема станций и улучшаются их эксплуатационные показатели.

Основные функции ЭГПА:

- прием технологического газа из магистрального газопровода (МГ) и подача его к центробежным нагнетателям (ЦБН);
- очистка технологического газа от примесей;
- компримирование (повышение давления) в ЦБН;
- охлаждение технологического газа;
- подача газа после компримирования в МГ.

В данной работе будет делаться упор именно на компримирование газа в ЦБН.

Оборудование и обвязка компрессорных станций (КС) приспособлены к переменному режиму работы газопровода. Количество газа, перекачиваемого через КС, можно регулировать включением и отключением числа работающих газоперекачивающих агрегатов (ГПА), а также изменением частоты вращения вала двигателя. С развитием полупроводниковой технологии стало возможным создание мощных и надежных преобразователей частоты, которые могли осуществлять управление асинхронными двигателями (АД) большой мощности. Данный способ управления АД является наиболее предпочтительным по сравнению с другими (изменение напряжения статора, реостатное) так как имеет более высокий диапазон регулирования скорости, так же это позволяет повысить эффективность и оперативность регулирования и снизить потери энергии при компримировании в сравнении с другими методами регулирования производительности.

Тема развития ЭГПА стала актуальной в последнее время, так как ведущая компания в России по добыче газа начала реконструкцию своих компрессорных станций. Одна из них находится в Томской области. В скором будущем она станет образцовым технологическим объектом двадцать первого века. Там будет использоваться самая современная техника, которая ранее в данной отрасли не использовалась. Это позволит автоматизировать

технологический процесс, повысит КПД компрессорной станции, а также откроет новые производственные мощности. [1]

## Глава 1. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 1.1 Анализ технологического процесса как объекта управления

#### 1.1.1 Описание технологического оборудования и процесса

В данной работе будет рассмотрен газоперекачивающий агрегат ЭГПА 4/8200-56/1,26, где:

- 4 МВт – мощность привода на частоте вращения 8200 об/мин;
- 8200 об/мин – номинальная частота вращения вала нагнетателя;
- $56 \text{ кгс/см}^2$  – Рабочее давление (4.41 МПа);
- 1,26 – степень повышения давления (степень сжатия) нагнетателя. [1]

На рисунке 1 представлена технологическая схема ЭГПА, которая наглядно отражает принцип работы.

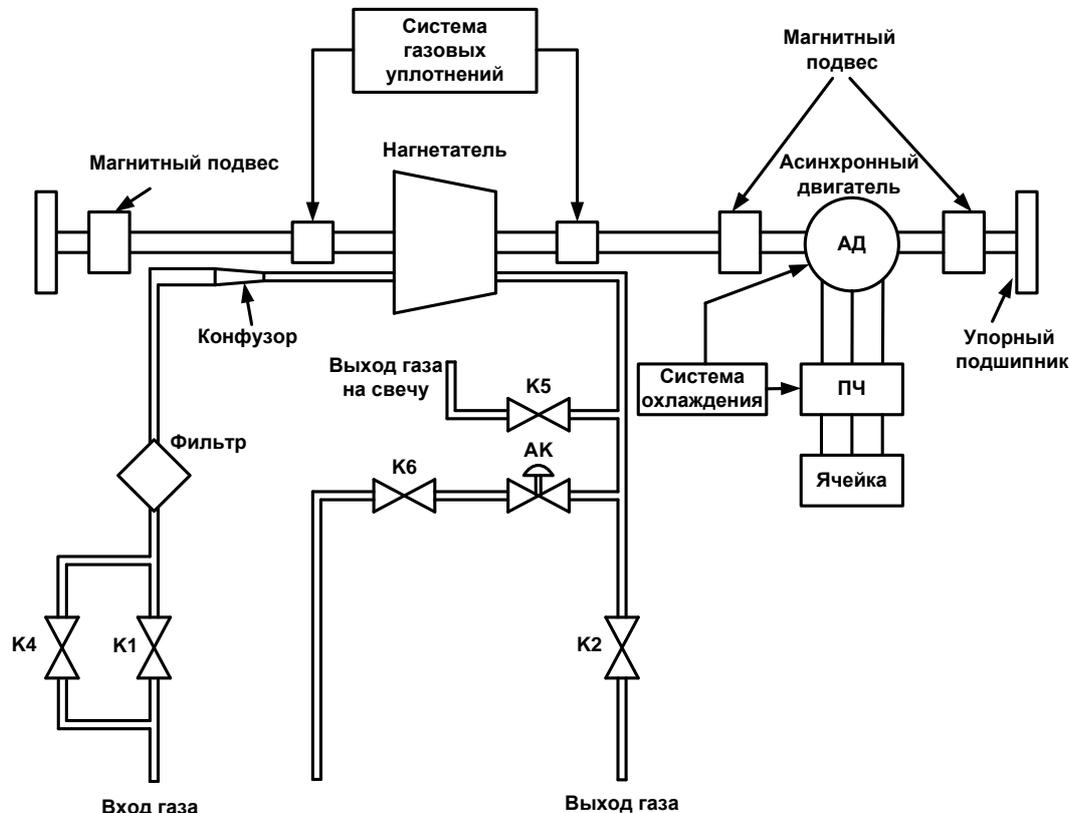


Рисунок 1 – Технологическая схема ЭГПА 4/8200-56/1,26

Асинхронный двигатель (АД) питается от преобразователя частоты (ПЧ) с помощью трехфазных шин. ПЧ задает электродвигателю требуемую частоту и амплитуду питания напряжения.

Двигатель имеет собственную систему охлаждения, где поток охлаждающего воздуха создается двумя вентиляторами типа RG63T-2DN.K7.3R с приводом от асинхронных двигателей BG160L/B3 18,5 кВт, 400 В. Это связано с тем, что когда двигатель работает на малых скоростях, то охлаждение, которое создается вентиляторами, установленными на валу двигателя, может не хватать. Также воздух на охлаждение магнитных подшипников отводится из внутреннего контура системы охлаждения двигателя. Температура охлаждающего воздуха должна находиться в пределах от +5 до +40 °С, при относительной влажности 45-80 %.

Асинхронный двигатель передает вращающий момент на центробежный нагнетатель. Соединение валов электродвигателя с валом нагнетателя осуществляется трансмиссией с гибкой муфтой. В данной системе между нагнетателем и ПЧ отсутствует мультипликатор (повышающий редуктор). Это стало возможно благодаря частотному управлению, где двигатель обеспечивает требуемый диапазон скорости вращения. Отсутствие мультипликатора в системе дало возможность избавиться от смазывающей и охлаждающей системы для него и значительно облегчило конструкцию агрегата.

Двигатель имеет специальное конструктивное исполнение и является высокоскоростным. Он имеет малый диаметр ротора и бандаж из углепластика. Это сделано, для того чтобы уменьшить влияние центробежных сил на вал ротора.

ЦБН это турбомашина центробежного типа, которая повышает давление газа на необходимый уровень. Он имеет две последовательные ступени (два рабочих колеса) для увеличения максимального выходного давления, два главных патрубка для входа и выхода газа. Процесс повышения давления происходит следующим образом. Поток газа поступает из

всасывающего патрубка во всасывающую камеру, затем в рабочее колесо. В рабочем колесе повышается кинетическая и потенциальная энергия газа, возрастает его скорость и давление. Далее поток газа направляется в лопаточный диффузор, где происходит преобразование скоростного напора в давление и через сборную кольцевую камеру газ направляется в нагнетательный патрубок. Нагнетатель оснащен также системой магнитного подвеса и системой сухих газовых уплотнений (СГУ).

Вход газа осуществляется через кран К1. Этот кран соединяет ЦБН с газовым коллектором, откуда непосредственно получают газ все остальные агрегаты газокompрессорной станции. Коллектор напрямую соединен с магистральным газопроводом. Основная задача крана К1 состоит в отключении ЦБН от коллектора. Это необходимо, когда требуется остановить работу агрегата или произошла авария. Далее газ проходит через грубый фазовый фильтр (фильтрующая решетка). Фильтр нужен для защиты агрегата от опасных, твердых частиц, которые могут находиться в газовом потоке. Попадание таких частиц в центробежный нагнетатель может негативно сказаться на его работе. Затем газ проходит через конфузор. Он представляет собой сужение трубы длиной около полуметра и необходим для измерения расхода газа, прокачиваемого через трубу. Измерение расхода газа делается по величине падения давления газа на конфузоре. Далее газ попадает в ЦБН, где происходит увеличение давления с 3,5 МПа до 4,41 МПа, что соответствует степени сжатия ЭГПА равной 1,26. После этого сжатый газ проходит через кран К2, который соединяет ЦБН с выпускным коллектором и выходит в магистральный газопровод. [1]

Важным звеном в крановой обвязке является антипомпажный клапан (АК). Он предназначен для предотвращения срыва центробежных и осевых нагнетателей в помпаж. Если давление на выходе компрессора становится слишком большим (или выходное давление – слишком маленьким), то поток газа, перекачиваемого компрессором, уменьшается и в результате стремится изменить направление движения. Высокое давление на выходе компрессора

заставляет идти газ против направления, куда пытается его качать центробежный нагнетатель. Основная опасность помпажа заключается в том, что поток газа начинает колебаться, то идет по ходу перекачки, то против хода. Газ подается рывками, наблюдаются резкие сотрясения машины с повышением вибрации. Помпаж опасен тем, что развивается за доли секунд.

Для того, чтобы обезопасить компрессор от помпажа, используют антипомпажный клапан. В результате происходит увеличение объемного расхода, проходящего через нагнетатель, за счет перепуска части газа со стороны нагнетания на вход. Это дает возможность добиться устойчивой работы нагнетателя, хотя снижает поток газа. Помпаж на практике в основном может развиваться в двух случаях:

- во входной трубе магистрального газопровода возникло газовое разряжение с областью низкого давления(неравномерное протекание газа по трубе, сгустками);
- слишком сильно была снижена частота вращения ротора двигателя.

В первом случае компрессор не сможет поднять столь низкое давление на необходимый уровень. Во втором случае расход газа опустится на такой уровень, что компрессор не сможет прокачивать газ против внешнего давления. В обоих случаях наступит помпаж. Для предотвращения этой ситуации нужно уменьшить влияние разницу между выходным и входным давлением т.е. облегчить прокачку газа в нужном направлении. Это делается за счет перепуска части газа с выхода нагнетателя на вход. В итоге часть газа с выходного коллектора возвращается обратно на вход компрессора. Это конечно снижает поток газа в нужном направлении, но предотвращает срыв нагнетателя в помпаж, так как прокачивать газ по кругу через антипомпажный клапан легче. Антипомпажный клапан регулируется плавно, что позволяет гибко управлять обратным потоком газа.

Кран К5 нужен для спуска газа в атмосферу из системы и вывода ЭГПА в холодный резерв. Если требуется перевести агрегат в горячий резерв, то газ из системы не спускают в атмосферу.

Газ внутри ЦБН находится под давлением 50 атмосфер и пытается пройти наружу через зазоры между вращающимся валом и корпусом. Для герметизации зазоров обычно используют сальники либо масляные жидкостные уплотнения. Сальники на высокой частоте вращения долго работать не могут. Масляные уплотнения довольно сложны. Одно из достоинств этого ЭГПА заключается в том, что здесь используется система газовых уплотнений, где нет вообще масла, никаких систем смазки и масляных уплотнений. Работа СГУ основана на двух степенях. На каждой из ступеней используются комбинация из центробежного, дроссельного и эффекта противодействия. На первые ступени под соответствующим давлением подается буферный газ, который отличается от газа в газопроводе тем, что он очищенный и обезвоженный. На первой ступени СГУ буферный газ противодействует газу из компрессора. На вторую ступень подается барьерный газ, который запирает уже сам буферный газ. Смесь, которая скапливается между первой и второй ступенями удаляется на свечу. После этих двух ступеней идут полости магнитных подшипников ЦБН, которые окончательно продуваются воздухом и после чего этот воздух также удаляется на свечу. Наружу практически ничего из компрессора не попадает в воздух. Для безопасности измеряется концентрация метана в линиях сброса газа на свечу, если она будет слишком велика то ЭГПА необходимо остановить.

Справа и слева на валу двигателя и нагнетателя находится магнитный подвес. В процессе работы вал двигателя и нагнетателя находятся практически в воздухе и не с чем не соприкасается. Основные преимущества использования магнитного подвеса:

- возможна длительная работы на высоких частотах вращения;
- отсутствие смазки;
- практически неограниченный ресурс использования;
- бесшумность;
- может работать в агрессивных средах и на высоких температурах;
- гашение резонансов и вибраций;

- возможно вращение несбалансированных валов;
- отсутствие нагрева в отличии у подшипников.

К основным недостаткам магнитного подвеса можно отнести:

- необходимость питания;
- невысокие удельные нагрузки в сравнении с подшипниками качения.

Проблему с невысокими удельными нагрузками можно решить, увеличив диаметр вала. Это возможно благодаря тому, что магнитные подшипники могут работать на высоких частотах вращения в отличии от подшипников качения и трения, которые при таком же диаметре вала не выдержали такой высокой окружной скорости. Рабочий зазор между валом и подшипником составляет 0,3 мм. Кроме четырех радиальных магнитных подшипников используется еще один упорный магнитный подшипник, который не дает системе валов передвигаться в осевом направлении.

Параллельно каждому магнитному подшипнику располагается обычный шарикоподшипник, который посажен на вал с большим зазором и в работе не участвует. Шарикоподшипники нужны для того, чтобы после отключения магнитного подвеса или при возникновении аварийной ситуации вал ложился на них.

Система охлаждения необходима для того, чтобы двигатель и преобразователь частоты работали в зоне допустимых температур. Охлаждение у ПЧ двухконтурное. Внутренний контур охлаждения ПЧ находится непосредственно в нем и на рисунке 1 не показан. В этом контуре циркулирует очищенная и подготовленная вода, которая охлаждает непосредственно силовые транзисторы ПЧ. Через встроенный в ПЧ теплообменник происходит обмен теплом внутреннего с внешним контуром, где циркулирует обычная вода.

К ПЧ подключена ячейка, которая представляет собой предохранитель всего агрегата. Она фиксирует любые превышения по мощности, току или напряжению и отключает агрегат при помощи механического разъединителя, если это необходимо.[1]

## 1.1.2 Перечень основного оборудования ЭГПА и их параметры

Двигатель высокоскоростной трехфазный асинхронный с короткозамкнутым ротором 1TA2832-4AU01-Z (далее по тексту – двигатель) предназначен для привода нагнетателей в составе газоперекачивающего агрегата ЭГПА 4,0/8200, служащего для сжатия и транспортировки природного газа по магистральным газопроводам.

Двигатель состоит из ротора, статора, корпуса, подшипниковых узлов и системы охлаждения.

Разработчиком и изготовителем двигателя является компания Siemens AG Automation and Drives Large Drives, Germany. Двигатель так же может изготавливаться в ООО «Сименс Электропривод», Россия, Санкт Петербург.

В двигателе, так же как и в нагнетателе применен магнитный подвес ротора.

Разработчиком и изготовителем шкафа управления E300/30, предназначенного для управления магнитным подвесом двигателя, является S2M, France. [2]

Конструктивной особенностью двигателя является использование короткозамкнутой обмотки, уложенной в пазы массивного ротора. Ротор изготовлен из никелевой стали, обмотка закреплена в пазах термомодиффузионной сваркой. Подобная конструкция позволяет поднять значение критических частот и сдвинуть их вверх за границы рабочего диапазона частот, увеличить общий ресурс двигателя.

Гладкая наружная поверхность ротора позволяет снизить вентиляционные потери двигателя.

Конструкцией двигателя предусмотрено:

- измерение температуры обмоток статора. Двигатель оснащается встроенными в пазы обмотки девятью температурными датчиками сопротивления. Шесть основных и три резервных датчика;

- измерение температуры нагретого воздуха на выходе из двигателя. По два датчика в одном корпусе (основной и резервный);
- измерение температуры охлаждающего воздуха на входе в двигатель. По два датчика в одном корпусе (основной и резервный), со стороны привода и с неприводной стороны;
- измерение температуры катушек магнитных подшипников;
- измерение вибрации вала;
- измерение положения и удлинения вала в аксиальном направлении;
- измерение частоты вращения ротора (один импульс на оборот).

Для предотвращения повреждения поверхностей роторных и статорных поверхностей при обесточивании обмоток магнитных подшипников предусмотрены страховочные шариковые подшипники.

Режим работы электродвигателя продолжительный – S1. [2]

Технические параметры электродвигателя указаны в таблице 1

Таблица 1 – Технические характеристики электродвигателя 1TA2832-4AU01-Z

Наименование	Условное обозначение	Единицы измерения	Значение
Напряжение питания во всех режимах работы	$U_{1л}$	В	3300
Мощность электродвигателя	$P_{дв}$	кВт	4000
Мощность максимальная длительная, не менее	$P_{дв.мах}$	кВт	4200
Номинальная скорость вращения	N	об/мин	8000
КПД	$\eta_H$	о.е.	0,958
Коэффициент мощности номинальный	$\cos\varphi_H$	о.е.	0,75
Номинальный момент	$M_H$	кНм	4426
Ток номинальный	$I_H$	А	970
Частота	f	Гц	0-143,7

Продолжение таблицы 1

Максимальный длительный ток в течении 30 с.	$I_{\max}$	А	1000
Рабочий диапазон регулирования скорости	$n_1$	об/мин	5740
	$n_2$		8610
Масса двигателя (в сборе)	$m$	кг	15500
Система охлаждения		-	воздушная
Степень защиты двигателя по ГОСТ 17494-87		-	IP44
Исполнение электродвигателя по способу монтажа		-	IM1001
Исполнение по способу охлаждения		-	IC06
Максимальное осевое перемещение ротора		мм	$\pm 2,5$

## 1.2 САУ газоперекачивающего агрегата

### 1.2.1 Описание САУ газоперекачивающего агрегата

САУ представляет собой иерархическую систему контроля и управления ЭГПА. Структурная схема САУ показана на рисунке 2.

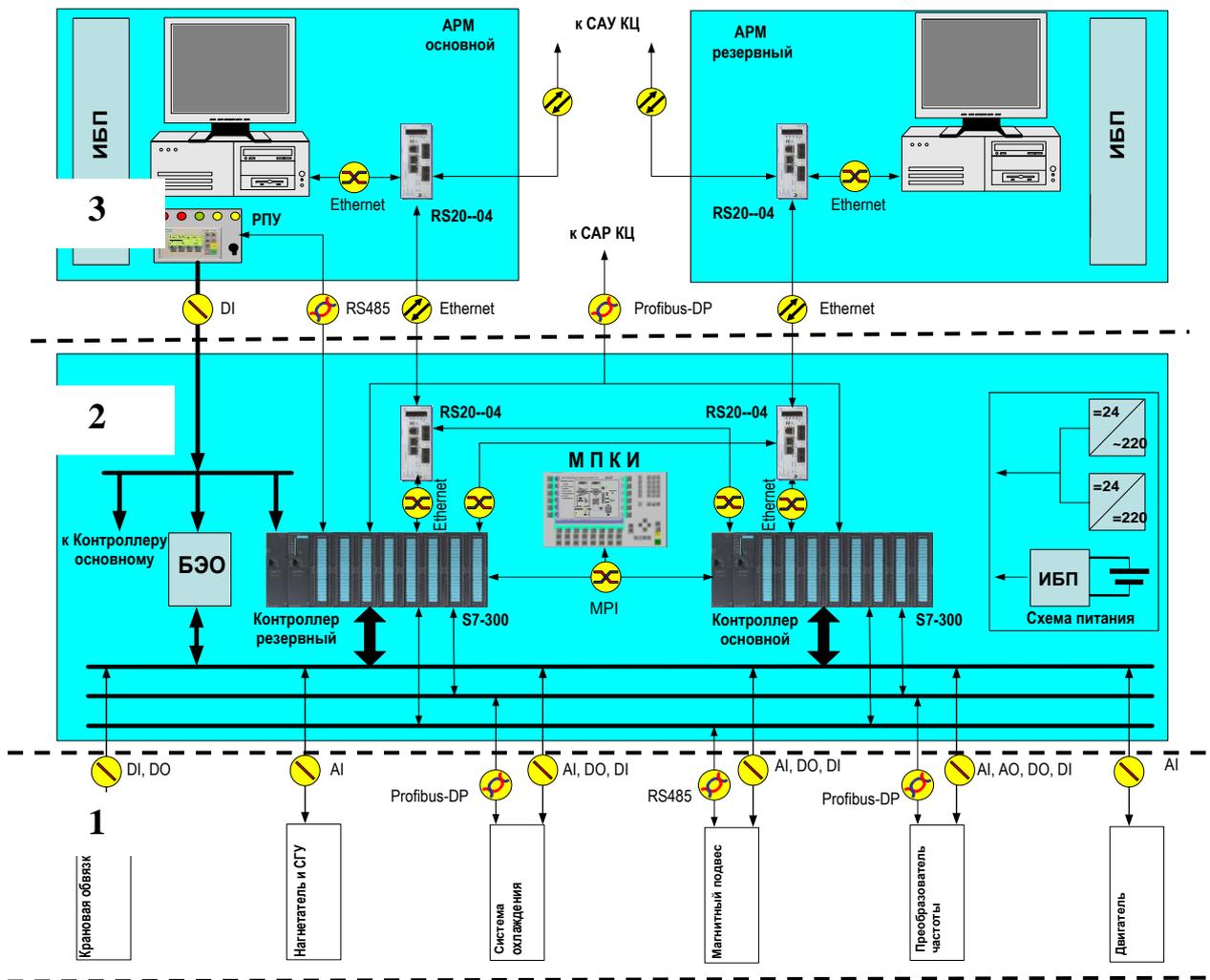


Рисунок 2 – Структурная схема САУ

Основными объектами управления ГПА являются: крановая обвязка; нагнетатель СГУ; система охлаждения; магнитный подвес; преобразователь частоты; двигатель.

Управление ЭГПА осуществляется с помощью основного и резервного контроллера. Основной контроллер обеспечивает 90% функций управления и защиты ЭГПА, а оставшиеся резервный. Управление возможно как с верхнего уровня с помощью АРМ (автоматизированное рабочее место) так и с МПКИ (местный пульт контроля и индикации). Для более высокой надежности работы САУ ЭГПА используется резервный АРМ, а также резервная панель управления (РПУ). При пропадании основного питания САУ срабатывает источник бесперебойного питания, который дает возможность с помощью МПКИ произвести останов ЭГПА в течении определенного времени. [3]

Первый уровень САУ представляет собой совокупность датчиков, расположенных на объекте управления и обеспечивающих сбор информации о технологических параметрах ЭГПА и параметрах работы его оборудования. Информация с датчиков поступает в шкаф управления (ШУ) в виде унифицированных аналоговых сигналов 4-20 мА, дискретных сигналов на напряжение 24 В, и цифровых по стандартным интерфейсам RS485 и Profibus DP.

Второй уровень САУ – ШУ, в котором на базе центральных процессоров и модулей связи с объектом серии Simatic S7 фирмы «Siemens», реализуются функции управления, регулирования, контроля и защиты ЭГПА.

Третий уровень САУ – АРМ. В АРМ реализуются информационные функции, а также поддерживается постоянный человеко-машинный интерфейс. Третий уровень выполнен с учетом возможности подключения двух независимых АРМ, обеспечивающих параллельную работу.

Функции управления:

- управление в автоматическом режиме в соответствии с командами и заданиями от САУ КЦ и АРМ оператора;
- согласованное управление магнитный подвес нагнетателя (МПН), магнитный подвес двигателя (МПД), ПЧ, закрытое распределительное устройство (ЗРУ), система охлаждения (СО) и информационно-управляющий обмен по цифровым каналам связи с локальными системами управления этих устройств.
- автоматическая защита ЭГПА по технологическим параметрам и параметрам работы основного и вспомогательного оборудования;
- автоматическая или автоматизированная проверка каналов защит;
- автоматическая проверка пусковой готовности и положения кранов газовой обвязки перед пуском ЭГПА;
- автоматический пуск, нормальный останов (НО), аварийный останов (АО), экстренный останов (ЭО) ЭГПА по заданному алгоритму.

Функции регулирования:

- автоматическое регулирование частоты вращения вала ЦБН, объемной производительности или степени сжатия по командам цехового регулятора;
- антипомпажное регулирование.

#### Функции контроля и защиты:

- автоматический непрерывный контроль исправности цепей управления особо ответственными исполнительными механизмами и вспомогательным оборудованием ЭГПА;
- автоматический непрерывный контроль входных цепей аналоговых и особо ответственных дискретных датчиков;
- контроль состояния оборудования и отклонений технологических параметров от заданных предельных значений (уставок).

#### Информационные функции:

- представление на дисплее МПКИ и мониторах АРМ в форме элементов оборудования, текущего состояния основного и вспомогательного оборудования, положение клапанов и кранов, измерительной, диагностической и служебной информации.
- представление текстовых сообщений при предупредительных и аварийных ситуациях.
- предоставление сигналов, вызвавших аварийный останов, а также формирование массивов значений основных технологических параметров агрегата при срабатывании аварийной защиты
- представление трендов изменения параметров технологического процесса по запросу оператора;
- формирование и предоставление по запросу оператора суточного отчета по основным параметрам ЭГПА;
- ведение журнала событий;
- создание (удаление) отчетов, редактирование форм и содержания отчетов;

- передача измерительной и контрольной информации на САУ КЦ. [3]

### 1.2.2 Основные элементы САУ

В состав шкафа управления (ШУ) входят следующие элементы системы управления:

- контроллер с комплектом модулей связи фирмы Siemens(основной);
- контроллер с комплектом модулей связи фирмы Siemens(резервный);
- местный пульт индикации;
- блок экстренного останова (БЭО);
- трансиверы Ethernet для связи САУ с КЦ или с АРМ оператора;
- блок питания переменного напряжения 220В/24В;
- блок питания постоянного напряжения 220В/24В. [3]

Основной контроллер SIMATIC S7-300 с комплектом модулей связи фирмы Siemens(основной) обеспечивает все функции управления защиты и более 90 % контроля параметров ЭГПА (кроме контроля целостности цепей управления кранами 1 и 2 и контроля целостности цепей кнопок аварийного и экстренного остановов, положения дверей ШУ). Модульная структура контроллеров SIMATIC S7-300 обеспечивает возможность последующего наращивания и модернизации системы управления путем добавления дополнительных модулей.



Рисунок 3 – Контроллер SIMATIC S7-300

САУ ЭГПА строится на базе двух контроллеров (резервный и основной). Для решения сложных задач и построения многорядных конфигураций могут подключаться до трех стоек расширения на один базовый блок, в данном случае в САУ используются две. Соединение стоек осуществляется с помощью интерфейсных модулей. Каждая стойка

снабжается собственным интерфейсным модулем, устанавливаемым в смежный с центральным процессором разъем и обеспечивающим автономное обслуживание связи с другими стойками системы.

Основные модули контроллера SIMATIC S7-300 рассмотрены ниже.

Процессорный модуль CPU 315-2DP предназначен для решения основных задач управления, контроля и защиты ЭГПА. Установлен на первое посадочное место базового блока контроллера. Он имеет встроенные интерфейсы MPI и PROFIBUS DP, а также оснащен микрокартой памяти, используемой для загрузки управляющей программы и архивных данных. Модуль имеет светодиодную индикацию состояния и ошибок.

ММС используется для сохранения данных при перебоях в питании CPU, хранения архива проекта с символьной таблицей и комментарии, а также для архивирования промежуточных данных.

MPI интерфейс позволяет поддерживать одновременную связь с программаторами, компьютерами, устройствами человеко-машинного интерфейса, программируемыми контроллерами S7-300/ S7-400/ C7.

В центральных процессорах S7-300 отсутствует встроенная загружаемая память. Функции загружаемой памяти выполняет микрокарта памяти (3В NVFlash-EEPROM). [3]

Интерфейсный модуль IM 360 используется для построения многорядных конфигураций контроллера. Установлен на второе посадочное место базового блока контроллера. Модуль позволяет произвести подключение к базовому блоку до трёх стоек расширения. В каждой стойке может размещаться до восьми модулей.

Два интерфейсных модуля IM 361 используются для подключения к базовому блоку двух стоек расширения. Установлены на первые посадочные места 1 и 2 стоек расширения контроллера.

Ethernet CP 343-1 Lean(два коммуникационных модуля) – позволяют производить подключение программируемого контроллера SIMATIC S7-300 к

сети Industrial Ethernet. Установлены на третье и четвертое посадочные места базового блока контроллера. Модули оснащены встроенным микропроцессором и позволяют получать дополнительные коммуникационные соединения, а также разгружать центральный процессор контроллера от обслуживания коммуникационных задач.

Profibus-DP CP 342-5(коммуникационный модуль) – обеспечивают поддержку протокола PROFIBUS DP в соответствии с требованиями IEC 61158/ EN 50170. Установлен на пятое посадочное место базового блока контроллера. Модуль позволяет разгрузить центральный процессор контроллера от выполнения коммуникационных задач и способен поддерживать широкий спектр коммуникационных функций.

RS 485 CP 341(коммуникационный процессор) – обеспечивает скоростной обмен данными через PtP интерфейс. Установлен на шестое посадочное место базового блока контроллера.

SM 331(девять модулей аналогового ввода) – выполняют аналого-цифровое преобразование входных аналоговых сигналов контроллера и формируют цифровые значения мгновенных значений аналоговых величин. Модули занимают с 7 по 10 посадочные места базового блока, и с 2 по 6 посадочные места 1 стойки расширения контроллера. К модулям подключены датчики агрегатного уровня с унифицированными сигналами напряжения и силы тока. На боковой панели модулей установлены заглушки, положением которых выбираются характеристики входных каналов (напряжение, ток, термосопротивление).

SM 332 (модуль вывода аналоговых сигналов) – быстродействующий модуль предназначены для цифро-аналогового преобразования внутренних цифровых величин контроллера S7-300 в его выходные аналоговые сигналы. Установлен на седьмое посадочное место 1 стойки расширения контроллера. Модуль используется для задания уставки по скорости АД и положения антипомпажного клапана.

SM 321(Четыре модуля ввода дискретных сигналов) – предназначены для ввода логической информации о состоянии исполнительных механизмов агрегатного уровня. Модули занимают с 2 по 5 посадочные места 2 стойки расширения контроллера.

SM 322(шесть модулей вывода дискретных сигналов) предназначены для преобразования внутренних логических сигналов контроллера в его выходные дискретные сигналы. Модули занимают 8, 9 посадочные места 1 стойки расширения, и с 6 по 9 посадочные места 2 стойки расширения контроллера. Модули используются для вывода управляющих сигналов на исполнительные механизмы агрегатного уровня.

Резервный управляющий контроллер необходим для повышения надежности функционирования системы, поэтому он имеет ограниченные возможности и меньшее количество модулей. В его функции также входит антипомпажное регулирование. Резервный контроллер обеспечивает 100 % резерв по выходным дискретным сигналам. При неисправности выходных модулей основного контроллера и при наличии резервированного модуля система продолжает работать, используя исправный модуль. В каждом случае на мониторе АРМ появляется соответствующее сообщение. Резервный контроллер отвечает за контроль целостности цепей управления кранами 1 и 2 и за контроль целостности цепей кнопок аварийного и экстренного останова, функции антипомпажного регулирования и поддерживает работу пульта РПУ. В состав резервного контроллера входят следующие модули: процессорный модуль CPU 315-2DP; интерфейсный модуль IM 360; интерфейсный модуль IM 361; коммуникационный процессор Ethernet CP 343-1 Lean; коммуникационный процессор Profibus-DP CP 342-5; коммуникационный процессор RS 485 CP 341; модуль аналогового ввода SM 331; модуль вывода аналоговых сигналов SM 332; модуль ввода дискретных сигналов SM 321; модуль вывода дискретных сигналов SM 322.

Блок экстренного останова предназначен для экстренного останова ЭГПА в случае отказа САУ дистанционно с АРМ и РПУ или можно

произвести отключение местно от кнопки ЭО. Останов производится по «жесткому» алгоритму в автоматическом режиме. БЭО полностью автономен от программно-технических средств САУ по питанию и средствам управления исполнительными механизмами.

Для деблокировки работы котроллеров в течении 1...10 с. с момента выработки команды экстренного останова, а также после завершения алгоритма экстренного останова срабатывания реле в ШУ предусмотрена цепь деблокировки. Команда на деблокировку выдается с РПУ.

В ШУ предусмотрен постоянный контроль наличия напряжения питания основного и резервного. При перерыве более 10 с. основного электропитания и отсутствии в этот момент резервного электропитания БЭО вызывает экстренный останов агрегата

Кроме БЭО для останова агрегата в ШУ имеется аварийная кнопка. При нажатии на кнопку запускается алгоритм аварийного останова. На время выполнения аварийного и экстренного остановов загорается световая индикация.

В целях увеличения надежности функционирования системы автоматического управления и регулирования питание ШУ осуществляется от основного или резервного источника питания. Кроме того, ШУ оснащен источником бесперебойного электропитания с аккумуляторной батареей, который начинает работать при напряжении основного или резервного питания менее 22 В.

Для защиты от перенапряжений в цепях питания датчиков агрегатного уровня внутри шкафа управления установлены блоки защиты от перенапряжения с рабочим напряжением 24 В, рассчитанные на общий рабочий ток 6 А.

Электропитание для функциональных групп датчиков децентрализовано. В цепях питания датчиков аналоговых сигналов установлены самовосстанавливающиеся предохранители на индивидуальный ток 0,4 А. В цепях питания групп датчиков дискретных сигналов

установлены самовосстанавливающиеся предохранители на групповой ток 0,75 А.

При пропадании напряжения основной и резервной сетей сохраняется питание БЭО и МПКИ от источника бесперебойного питания. Время автономного питания от аккумуляторной батареи составляет 320 с., достаточное для реализации алгоритма ЭО при пропадании основного и резервного питаний ШУ. [3]

### 1.3 Сравнительный анализ газоперекачивающих агрегатов разных типов

Сравним газоперекачивающий ЭГПА-4/8200-56/1,26 с ЭГПА СД-4000.

Таблица 2 – Параметры газоперекачивающих агрегатов ЭГПА-4/8200-56/1,26 и ЭГПА СД-4000

Наименование агрегата	ГПА СД-4000	ЭГПА-4/8200-56/1,26
Тип привода	Синхронный двигатель СД-4000	Высокоскоростной асинхронный двигатель 1ТА2832-6АТ02-Z
Мощность на валу нагнетателя, МВт	4	4
Частота вращения двигателя, об/мин	3000	8200
Напряжение статора, кВ	10	3,3
Частота вращения нагнетателя	7950	8200
Степень сжатия	1,23	1,26
Давление на выходе Из нагнетателя	5,5	5,6
КПД ГПА, %	85	95
Система охлаждения	водяное	воздушное
Управление, защита	релейная	на базе контроллеров

Достоинства ЭГПА-4,0/8200-56/1,26

- Плавное регулирование скорости. Использование ПЧ позволяет регулировать скорость вращения не только плавно, но и в большом диапазоне.

- Магнитный подвес дает возможность продолжительно работать на высоких скоростях, а также снизить потери на трение.
- Экономить электроэнергию, настроив работу электропривода в зависимости от нагрузки.
- Возможно, реализовать плавный пуск электродвигателя и тем самым уменьшить пусковые токи и пусковой момент
- Создание замкнутых систем с возможностью точного поддержания заданных технологических параметров.
- Отсутствие масляной системы в уплотнениях центробежного нагнетателя.
- Высокая надежность оборудования и САУ(резервный контроллер, резервный АРМ и панель управления, бесперебойный источник питания САУ)

#### Недостатки ЭГПА-4,0/8200-56/1,26

- Сложность оборудования, что в свою очередь требует соответствующий уровень персонала.
- Высокая цена САУ.

#### Недостатки системы ГПА СД-4000

- В эксплуатации воздухоохладитель с замкнутой системой охлаждения в зимнее время может отпотевать. При этом возникает опасность брызг воды в электродвигатель.
- Электродвигатель допускает два пуска подряд из холодного состояния, третий пуск рекомендуется проводить через 4 часа после остановки агрегата(Частые пуски приводят к недопустимым нагревам обмотки статора и ротора)
- Большие пусковые токи;
- Малый диапазон регулирования;
- Для систем уплотнения используют маслосистему;

#### Достоинства ГПА СД-4000

- Синхронный двигатель может работать в режиме генератора реактивной мощности. Чем больше ток возбуждения, тем больше реактивной мощности он отдает в сеть.
- Простота системы управления. [4]

### **1.4 Основные способы управления ЭГПА**

При работе электрогазоперекачивающих агрегатов с центробежным нагнетателем газодинамические характеристики нагнетателей и газопровода должны быть согласованы. Однако характеристика газопровода подвергается постоянным изменениям. Она меняется в зависимости от расхода газа потребителями и давления газа на входе в компрессорных станций (КС). При увеличении расхода газа необходимо дополнительно включить в работу ЭГПА, а при сокращении наоборот — исключить из работы агрегаты, то есть в отличие от газотурбинных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на электроприводных КС нет возможности увеличить частоту вращения или, наоборот, ее снизить. Таким образом, регулирование производительности нагнетателя изменением частоты вращения практического применения на отечественных ЭГПА пока не получило из-за сложности технического выполнения регулируемого электропривода.

В принципе на КС с электроприводными центробежными нагнетателями регулирование производительности может осуществляться одним из следующих способов:

- дросселированием газа на входе в нагнетатель;
- регулировкой потока газа путем установки входного поворотного направляющего аппарата перед колесом нагнетателя;
- байпасированием потока газа;
- заменой сменной проточной части (СПЧ) нагнетателя;
- изменением передаточного числа в редукторе путем замены пары колеса и шестерни;

- путем установки гидромуфты;
- изменением частоты вращения электродвигателя;
- изменением количества работающих ГПА.

Регулирование путем дросселирования давления газа на входе в нагнетатель может осуществляться с помощью дросселирующего органа, например, регулятора, который создает дополнительное гидравлическое сопротивление, в результате чего искусственно изменяется характеристика газопровода на входе в нагнетатель. Так, при дросселировании производительность нагнетателя уменьшается, потребляемая при этом мощность электродвигателя также снижается, но не существенно. Краны-регуляторы устанавливаются, как правило, на входе в цех, за краном № 7 по ходу газа или иногда — на трассе газопровода, где необходимо обеспечить плавное снижение (сброс) давления газа из трубопровода, имеющего более высокое давление. Дросселирование газа ведет к резкому увеличению энергозатрат и является самым неэкономичным способом регулирования производительности нагнетателя. Однако этот способ нашел применение на некоторых компрессорных станциях благодаря своей простоте. Кран-регулятор также используется на КС при пуске на высоких входных давлениях газа для снижения нагрузки на электродвигатели. Управление такими кранами-регуляторами, как правило, осуществляется автономно и не связано с системой автоматического управления агрегатной автоматикой ГПА. [5]

Регулирование потока газа путем установки входного поворотного направляющего аппарата (ВПНА) осуществляется изменением входного угла направления потока газа на лопатки рабочего колеса нагнетателя. Применение ВПНА позволяет осуществлять плавное изменение производительности нагнетателя и поддерживать при этом максимально возможный КПД. При этом диапазон регулирования, который может обеспечить ВПНА, может быть равен диапазону регулирования оборотов газотурбинной установки и составлять диапазон изменения регулирования частоты вращения нагнетателя в пределах 0,8–1,0 от номинальной. С помощью ВПНА можно довести

загрузку электроприводного ГПА до номинальной последовательно или параллельно работающих нагнетателей. В результате этого достигается увеличение использования полезной мощности, то есть рост экономической эффективности ГПА. Изменение рабочей характеристики нагнетателя с помощью ВПНА является весьма эффективным способом регулирования. Надежная и достаточно простая конструкция входного поворотного направляющего аппарата (рис. 1) широко была внедрена на агрегатах СТД-4000–2 с одноступенчатым нагнетателем типа 280–11 и неплохо зарекомендовала себя в работе. Попытка внедрить ВПНА на электроприводных ГПА типа СТД-12500–2 с полнонапорными нагнетателями из-за сложности этой конструкции пока не получила распространения.

Регулирование производительности путем перепуска части сжатого газа с выхода нагнетателя на вход, то есть путем байпасирования, приводит к резкому понижению коэффициента полезного действия КС из-за большой потери энергии в результате перепуска. Поэтому такой способ регулирования, как правило, не применяется. Использование этого способа имеет место при технологическом процессе, связанном с пуском или остановкой КС или ГПА, а также в аварийной ситуации — при приближении рабочей точки нагнетателя к зоне помпажа. В этом случае и осуществляется данный способ регулирования, который является кратковременным в режиме работы КС.

На основании анализа в процессе эксплуатации за режимом работы ЭГПА можно подобрать или создать сменную проточную часть, которая в конкретных условиях имела бы рабочие характеристики, необходимые для наиболее экономичной работы ЭГПА. Такой способ часто применяется в эксплуатации. Он очень эффективен при массовой замене сменных проточных частей, а также на станциях подземного хранения газа. [5]

Регулирование характеристик ЭГПА можно производить и путем изменения передаточного числа в редукторе, однако из-за своей дороговизны этот способ применяется крайне редко, в основном при модернизации ЭГПА.

Установка гидромуфт для обеспечения регулирования нагнетателя не нашла применения из-за очень низкого КПД гидромуфты и повышения эксплуатационных расходов, связанных с их обслуживанием и ремонтом.

Наибольшую эффективность из всех существующих способов можно достигнуть путем регулирования частоты вращения вала ЦБН. Такие электродвигатели импортного производства применяются в газовой промышленности.

Как показали исследования, регулирование производительности турбокомпрессоров изменением частоты вращения агрегата увеличивает его производительность:

- по сравнению с дросселированием – на 25 процентов;
- по сравнению с регулированием направляющими аппаратами – на 12 процентов.

Существуют различные методы частотного управления, которые позволяют решить различные задачи при регулировании скорости и изменения момента, среди которых два основных метода:

- Скалярный;
- Векторный.

Каждый из них имеет свои характерные особенности, на которых следует остановиться более подробно.[6]

Первый метод регулирования – скалярный. Особенность скалярного управления заключается в его распространенности, а область применения связана с приводами насосов и вентиляторов. Кроме этого, частотные преобразователи со скалярным методом управления используют там, где важно поддерживать определенный технологический параметр. Им может быть например давление в трубопроводе. Изменение амплитуды, а также частоты питающего напряжения выступает в качестве основного принципа, на котором основывается данный метод. При этом используется закон  $U/f$ . Наибольший диапазон для регулирования скорости составляет 1:10.

Дополнительные особенности скалярного метода заключаются в свойственной ему легкости при реализации. Существует также и недостаток, который заключается в том, что нет возможности точно регулировать скорость вращения вала. Еще одна особенность - на валу двигателя частотный преобразователь со скалярным управлением не дает возможности контролировать момент.

Второй метод, используемый в частотных преобразователях – векторный. Это такой метод управления синхронными и асинхронными двигателями, при котором формируются не только гармонические токи (напряжения) фаз, но и обеспечивается управление магнитным потоком ротора, а именно, моментом на валу электродвигателя. Векторное управление применяется в случае, когда в процессе эксплуатации нагрузка может меняться на одной и той же частоте, т.е. нет четкой зависимости между моментом нагрузки и скоростью вращения, а также в случаях, когда необходимо получить расширенный диапазон регулирования частоты при номинальных моментах.

Системы векторного управления разделяются на два класса – это бездатчиковые и с обратной связью. Область применения позволяет определить применение определенного метода. Применение бездатчиковых систем возможно, когда скорость изменяется не больше чем 1:100, а точность поддержания составляет не больше чем  $\pm 0,5$  процентов. При аналогичных показателях, составляющих 1:1000 и  $\pm 0,01$  процентов соответственно принято использовать системы с обратной связью.[7]

Преимуществами векторного метода управления является быстрота реакции относительно изменения нагрузки, а в области малых частот вращение двигателя характеризуется плавностью, отсутствием рывков. Внимание привлекает обеспечение на валу при условии нулевой скорости номинального момента, если имеется датчик скорости. Регулировка скорости выполняется при достижении высокой точности. Все эти преимущества становятся важными на практике.

При написании данной работы был сделан акцент на векторное управление электроприводом. Было установлено, что использование векторного управления

- КПД увеличится на 0,5 процентов;
- снизить энергопотребление цеха на 27.5 процента;
- экономия порядка 5 процентов капитальных вложений при реконструкции. [8]

### **1.5 Современные требования к ЭГПА**

К электроприводам газоперекачивающих агрегатов применяются следующие требования:

1. ЭГПА должен иметь большой диапазон регулирования скорости;
2. должна обеспечиваться плавность хода;
3. применение безредукторной конструкции исключает применение смазочных веществ;
4. высокий ресурс работы.

САУ должна быть информационно-управляющей системой реального времени состоящей, а также выполнять следующие функции:

1. обеспечение автоматизированного контроля и дистанционного управления оборудования КС;
2. беспомпажное регулирование и защита основного и вспомогательного оборудования ГПА;
3. САУ ЭГПА должна обеспечивать выполнение следующих задач:
  - обеспечение подачи установленного объема газа в магистральный газопровод (бесперебойность и производительность);
  - поддержание требуемых параметров (давление, температура) газа, подаваемого в газопровод;
  - обеспечение высокой эксплуатационной надежности в нормальных и аварийных ситуациях;

– обеспечение сбора и передачи технологической информации на верхний уровень (ЦДП) и дистанционное управление отдельными технологическими системами с верхнего уровня.

На автоматизированном рабочем месте диспетчера должны выполняться следующие функции:

- Отображение информации на АРМ в виде таблиц, мнемосхем, графиков, гистограмм;
- Контроль достоверности параметров;
- Расчет параметров режима работы ГПА и КС в реальном времени;
- Предупредительная и аварийная сигнализация в списке событий на экране монитора;
- Сигнализация изменения состояния технологических объектов, в т.ч. и несанкционированного;
- Накопление и хранение информации, в т.ч. аварийного останова и долгосрочное архивирование;
- Расчет показателей режимов работы КС.

Точность измерительных датчиков

- Температура газа  $\pm 0,25\%$
- Скорости вала ЦБН  $\pm 0,5\%$
- Токов, напряжения  $\pm 0,5\%$
- Датчиков давления  $\pm 0,1\%$
- Датчиков осевого сдвига  $\pm 10\%$

САУ должна обеспечивать функции контроля и защиты:

- автоматический непрерывный контроль исправности цепей управления;
- автоматический непрерывный контроль входных цепей аналоговых и особо ответственных дискретных датчиков, необходимых для реализации функций аварийной защиты;

– контроль состояния оборудования и отклонений технологических параметров от заданных предельных значений(уставок) и сигнализации с указанием устройства, места, времени, даты и вида отказа;

– контроль и сигнализация сбоев в работе программного обеспечения.[1]

## Глава 2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1 Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя ЭГПА

Для создания математической модели АД необходимо знать его параметры замещения, расчет которых представлен ниже.

Ток холостого хода:

$$I_0 = \frac{\sqrt{I_{1чз}^2 - \left( I_{1н} K_{чз} \frac{1-s_H}{1-K_{чз}s_H} \right)^2}}{\sqrt{1 - \left( K_{чз} \frac{1-s_H}{1-K_{чз}s_H} \right)^2}} = \frac{\sqrt{763,05^2 - \left( 2,32 \cdot 0,75 \cdot \frac{1-0,07}{1-0,75 \cdot 0,07} \right)^2}}{\sqrt{1 - \left( 0,75 \cdot \frac{1-0,07}{1-0,75 \cdot 0,07} \right)^2}} = 197,97 \text{ А.} \quad (1)$$

Ток двигателя в номинальном режиме:

$$I_{1н} = \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cos(\varphi_{НОМ}) \eta_{НОМ}} = \frac{4 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1915 \cdot 0,75 \cdot 0,958} = 971,58 \text{ А.} \quad (2)$$

Номинальное скольжение:

$$s_H = \frac{n_{ДВ.0} - n_{НОМ}}{n_{ДВ.0}} = \frac{8200 - 8000}{8200} = 0,025 \text{ о.е.} \quad (3)$$

Ток двигателя при частичной нагрузке:

$$I_{1чз} = \frac{K_{чз} P_H}{\sqrt{3} U_H \cos(\varphi_{чз}) \eta_{чз}} = \frac{0,75 \cdot 4 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1910 \cdot 0,75 \cdot 0,958} = 736,05 \text{ А,} \quad (4)$$

$K_{чз} = 0,75$  – коэффициент частичной загрузки двигателя.

Определяем критическое скольжение:

$$\begin{aligned}
s_{\text{кр}} &= s_{\text{H}} \frac{(K_{\text{П}} + \sqrt{K_{\text{П}}^2 - (1 - 2s_{\text{H}}\beta(K_{\text{П}} - 1))})}{1 - 2s_{\text{H}}\beta(K_{\text{П}} - 1)} = \\
&= 0,025 \cdot \frac{(1,4 + \sqrt{1,4^2 - [1 - 2 \cdot 0,025 \cdot 0,6 \cdot (1,4 - 1)]})}{1 - 2 \cdot 0,025 \cdot 0,6 \cdot (1,4 - 1)} = 0,059 \text{ о.е.},
\end{aligned} \tag{5}$$

где  $\beta=1$  – вспомогательный коэффициент.

Определяем ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2K_{\text{М}}I_{\text{IH}}} = \frac{197,97}{2 \cdot 5,5 \cdot 971,58} = 1,019, \tag{6}$$

где  $K_{\text{М}} = \frac{M_{\text{П}}}{M_{\text{H}}} = 5.5$  – кратность пускового момента,

$$A_1 = 3U_{\text{ФН}}^2 \frac{1 - s_{\text{H}}}{2C_1 K_{\text{П}} P_{\text{H}}} = 3 \cdot 1915^2 \cdot \frac{1 - 0,025}{2 \cdot 1,019 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 10^6} = 0,936. \tag{7}$$

Параметры асинхронной машины:

приведенное активное сопротивление ротора

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_{\text{кр}}}\right) C_1} = \frac{0,936}{\left(0,6 + \frac{1}{0,059}\right) \cdot 1,019} = 0,053 \text{ Ом}, \tag{8}$$

Активное сопротивление статора:

$$R_1 = C_1 R_2' \beta = 1,019 \cdot 0,053 \cdot 0,6 = 0,032 \text{ Ом}. \tag{9}$$

Параметр, который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_{\text{кр}}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,059^2} - 0,6^2} = 16,81 \tag{10}$$

Полное сопротивление цепи двигателя:

$$X_{\text{кн}} = \gamma C_1 R_2' = 16,807 \cdot 1,019 \cdot 0,053 = 0,903 \text{ Ом}, \quad (11)$$

Индуктивное сопротивление статора:

$$X_1 = 0,42 X_{\text{н}} = 0,42 \cdot 0,903 = 0,379 \text{ Ом}, \quad (12)$$

Приведенное индуктивное сопротивление ротора:

$$X_2' = 0,58 \frac{X_{\text{н}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,903}{1,019} = 0,514 \text{ Ом}, \quad (13)$$

По найденным значения  $C_1, R_2', R_1, X_{\text{кн}}$  определим критическое скольжение:

$$s_{\text{к}} = \frac{C_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{1,019}{\sqrt{0,032^2 + 0,903^2}} = 0,059 \text{ о.е.}, \quad (14)$$

Найдем индуктивность статорной обмотки, приведенное к статорной:

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f_0} = \frac{0,379}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 4,42 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}, \quad (15)$$

Найдем индуктивность роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$L_2' = \frac{X_2'}{2\pi f_0} = \frac{0,514}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 5,99 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}, \quad (16)$$

Тогда индуктивность намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2\pi f_0} = \frac{8,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 9,78 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}, \quad (17)$$

Так как критическое скольжение совпало с ранее рассчитанным значением то коэффициент  $\beta$  оставляем таким же.

$$\cos(\varphi_{\text{НОМ}}) = 0,96 \Rightarrow \quad (18)$$

$$\varphi_{\text{НОМ}} = \arccos(\cos(\varphi_{\text{НОМ}})) = \arccos(0,96) = 16,26 \quad \sin \varphi_{\text{НОМ}} = 0,28,$$

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

$$E_1 = \sqrt{(U_{\text{ФН}} \cos(\varphi_{\text{НОМ}}) - R_1 I_{1\text{Н}})^2 + (U_{\text{ФН}} \sin(\varphi_{\text{НОМ}}) - X_1 I_{1\text{Н}})^2} = \\ = \sqrt{(1915 \cdot 0,75 - 0,032 \cdot 971,58)^2 + (1915 \cdot 0,661 - 0,379 \cdot 971,58)^2} = 1,4 \cdot 10^3$$

Индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{1,6 \cdot 10^3}{197,97} = 7,128 \text{ Ом.} \quad (20)$$

Параметры схемы замещения были внесены в таблицу 3. [4]

Таблица 3 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1$ , Ом	$X_{1\sigma}$ , Ом	$L_{1\sigma}$ , Гн	$X_{\mu}$ , Ом	$L_{\mu}$ , Гн	$R'_2$ , Ом	$X'_2$ , Ом	$L'_{2\sigma}$ , Гн	$X_{\text{КН}}$ , Ом
0,032	0,379	$4,42 \cdot 10^{-4}$	7,128	$9,78 \cdot 10^{-4}$	0,053	0,514	$5,99 \cdot 10^{-4}$	0,903

## 2.2 Построение статических механических и электромеханических характеристик

Используя параметры схемы замещения можно произвести расчет механических и электромеханических характеристик.[9]

Расчет механической характеристики производим по следующей формуле

$$M(\omega) = \frac{3U_{\text{ФН}}^2 R_2'}{\omega_0 \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0}\right) \left( X_H^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{1 - \frac{\omega}{\omega_0}} \right)^2 \right)}, \quad (21)$$

Определим характерные точки механической характеристики по паспортным данным:

Режим холостого хода

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{p} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{137}{1} = 860.796 \text{ рад/с}; \quad M = 0 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (22)$$

Номинальный режим

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 860.796 \cdot (1 - 0.025) = 839.3 \text{ рад/с} \quad (23)$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{4 \cdot 10^6}{839.3} = 4765.87 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (24)$$

Критический момент

$$M_{\text{max}} = k_{\text{max}} \cdot M_H = 2.1 \cdot 4765.87 = 10008.3 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (25)$$

Пусковой момент

$$M_{II} = k_{II} \cdot M_H = 1.4 \cdot 4765.87 = 6672.2 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (26)$$

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя представлена на рисунке 4.

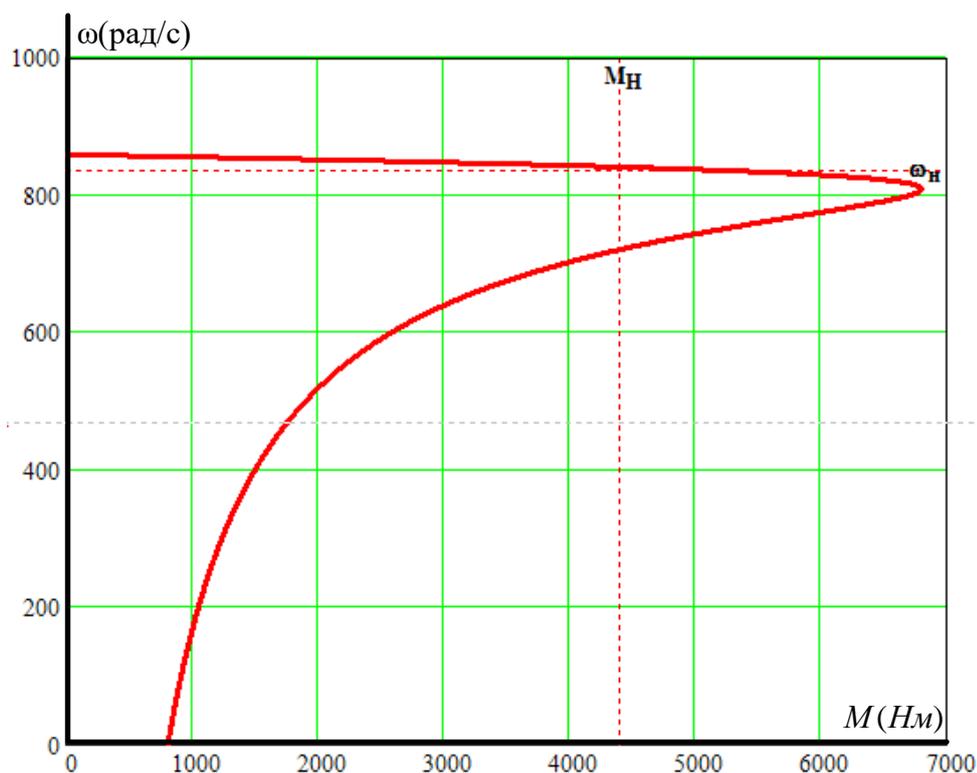


Рисунок 4 – Естественная механическая характеристика

Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя определяется выражением

$$I_2'(\omega) = \frac{U_{\Phi H}^2}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{1 - \frac{\omega}{\omega_0}} \right)^2 + (X_H + X_{2H}')^2}}, \quad (27)$$

Электромеханическая характеристика, которая определяет зависимость тока статора от скольжения, определяется выражением

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2I_0I_2'(\omega)\sin(\varphi_H)} \quad (28)$$

Определим характерные точки электромеханической характеристики по паспортным данным:

Режим идеального холостого хода

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{p} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{137}{1} = 860.796 \text{ рад/с}; I_1 = 0 \text{ А} \quad (29)$$

Номинальный режим работы

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 860.796 \cdot (1 - 0.025) = 839.3 \text{ рад/с} \quad (30)$$

$$I_H = 971.58 \text{ А} \quad (31)$$

Режим короткого замыкания (режим пуска)

$$I_{II} = k_i \cdot I_H = 5.5 \cdot 971.58 = 5343.69 \text{ А} \quad (32)$$

Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя представлена на рисунке 5. [4]

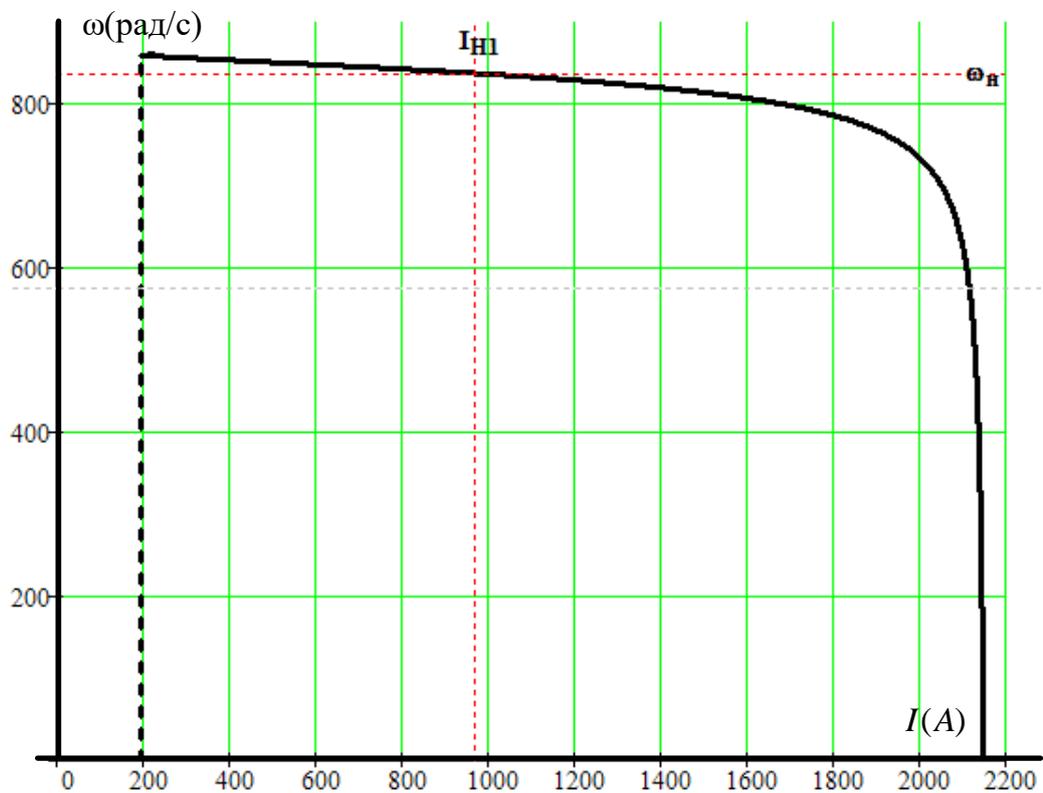


Рисунок 5 – Электромеханическая характеристика

## Глава 3. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭГПА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### 3.1 Моделирование асинхронного двигателя

#### 3.1.1 Математическое описание асинхронного двигателя

Представим асинхронную машину пространственными векторами, но для начала примем основные допущения:

- машины симметричны с идеальными обмотками, обеспечивающие синусоидальное распределение МДС, потока в воздушном зазоре,
- не учитываются насыщение магнитной цепи и потери в стали,
- отсутствуют напряжения и токи нулевой последовательности.

Уравнения Кирхгофа для фазных напряжений имеют вид для ротора и статора:

$$\begin{cases} U_{SA} = R_{SA} I_{SA} + \frac{d\psi_{SA}}{dt} \\ U_{SB} = R_{SB} I_{SB} + \frac{d\psi_{SB}}{dt} \\ U_{SC} = R_{SC} I_{SC} + \frac{d\psi_{SC}}{dt} \end{cases}, \quad (33)$$

$$\begin{cases} U_{RA} = R_{RA} I_{RA} + \frac{d\psi_{RA}}{dt} \\ U_{RB} = R_{RB} I_{RB} + \frac{d\psi_{RB}}{dt} \\ U_{RC} = R_{RC} I_{RC} + \frac{d\psi_{RC}}{dt} \end{cases}, \quad (34)$$

Для обобщенной двухфазной машины системы уравнений примут вид

$$\begin{cases} U_{SA} = R_{SA} I_{SA} + \frac{d\psi_{SA}}{dt} \\ U_{SB} = R_{SB} I_{SB} + \frac{d\psi_{SB}}{dt} \\ U_{SC} = R_{SC} I_{SC} + \frac{d\psi_{SC}}{dt} \end{cases}, \quad (35)$$

$$\begin{cases} U_{RA} = R_{RA} I_{RA} + \frac{d\psi_{RA}}{dt} \\ U_{RB} = R_{RB} I_{RB} + \frac{d\psi_{RB}}{dt} \\ U_{RC} = R_{RC} I_{RC} + \frac{d\psi_{RC}}{dt} \end{cases}, \quad (36)$$

Для перевода в неподвижную систему координат а–в координат необходимо умножить обе части уравнений в системе на оператор поворота, текущий угол поворота системы координат  $J = e^{j\theta}$ . После преобразований,

опуская индексы координатной системы, получим уравнение ротора в векторной форме в системе координат статора [10]

$$e^{j\theta}U_R = e^{j\theta}R_R I_R + e^{j\theta} \frac{d(e^{-j\theta}\psi_R)}{dt}, \quad (37)$$

$$U_R = R_R I_R + \frac{d\psi_R}{dt} - j \frac{d\theta}{dt} \psi = R_R I_R + \frac{d\psi_R}{dt} - j\omega \psi_R. \quad (38)$$

где  $\omega = dJ / dt$  текущая скорость вращения ротора.

Для вращающейся системы координат уравнение примет вид

$$U_R = R_R I_R + \frac{d\psi_R}{dt} - j \frac{d\theta}{dt} \psi = R_R I_R + \frac{d\psi_R}{dt} - j(\omega - \omega_r) \psi_R. \quad (39)$$

Потокосцепления статора и ротора с учетом всех токов АД и независимо от выбранной системы координат можно представить в виде:

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases}. \quad (40)$$

Данные уравнения реализуют связь между потокосцеплением статора и ротора через токи

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_k \psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \psi_r \\ \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_r I_r + L_m I_s \\ M = \frac{3}{2} z_p (\psi_{sx} I_{sy} - \psi_{sy} I_{sx}) \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_{\text{НАГР}} \end{cases}. \quad (41)$$

Ведem новые переменные:

$$K_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad (42)$$

$$L_{\ominus} = L_S - \frac{L_m^2}{L_r}. \quad (43)$$

$$R_{\ominus} = R_S + R_r K_r^2 \quad (44)$$

$$A_r = \frac{R_r}{L_r} \quad (45)$$

Преобразуем систему на основе новых переменных и приводим ее к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} U_S = \left( R_S + R_r \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right) I_S + j\omega_k \left( L_S - \frac{L_m^2}{L_r} \right) I_S + \\ + \frac{L_m}{L_r} \left( j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \Psi_r + \left( L_S - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_S}{dt} \\ 0 = \frac{d\Psi_r}{dt} + \left( j(\omega_k - \omega_r z_p) + \frac{R_r}{L_r} \right) \Psi_r - R_r \frac{L_m}{L_r} I_r \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\Psi_{rx} I_{sy} - \Psi_{ry} I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_{\text{НАГР}}) \end{array} \right. \quad (46)$$

Подставляем данные переменные в систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_S}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_S - R_e I_S + K_r A_r \psi_r - K_r \omega_r z_p j \psi_r) - \omega_k j I_S \\ \frac{d\psi_r}{dt} = R_r K_r I_S - A_r \psi_r - \omega_k j \psi_r + \omega_r z_p j \psi_r \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_{rx} I_{sy} - \psi_{ry} I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_{\text{НАГР}}) \end{array} \right. \quad (47)$$

В итоге получаем математическую модель АД во вращающейся системе координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{Sx}}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_{Sx} - R_e I_{Sx} + K_r A_r \psi_{rx} - K_r \omega_r z_p j \psi_{ry}) + \omega_k I_{Sy} \\ \frac{dI_{Sy}}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_{Sy} - R_e I_{Sy} + K_r A_r \psi_{ry} - K_r \omega_r z_p j \psi_{rx}) - \omega_k I_{Sx} \\ \frac{d\psi_{rx}}{dt} = R_r K_r I_{Sx} - A_r \psi_{rx} + \omega_k j \psi_{ry} - \omega_r z_p \psi_{ry} \\ \frac{d\psi_{ry}}{dt} = R_r K_r I_{Sy} - A_r \psi_{ry} - \omega_k j \psi_{rx} + \omega_r z_p \psi_{rx} \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_{rx} I_{sy} - \psi_{ry} I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_{\text{НАГР}}) \end{array} \right. \quad (48)$$

Если  $\omega_k = 0$  то получим систему в неподвижной системе координат:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dI_{Sx}}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_{Sx} - R_e I_{Sx} + K_r A_r \psi_{rx} - K_r \omega_r z_p j \psi_{ry}) \\
\frac{dI_{Sy}}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_{Sy} - R_e I_{Sy} + K_r A_r \psi_{ry} - K_r \omega_r z_p j \psi_{rx}) \\
\frac{d\psi_{rx}}{dt} = R_r K_r I_{Sx} - A_r \psi_{rx} - \omega_r z_p \psi_{ry} \\
\frac{d\psi_{ry}}{dt} = R_r K_r I_{Sy} - A_r \psi_{ry} + \omega_r z_p \psi_{rx} \\
M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_{rx} I_{sy} - \psi_{ry} I_{sx}) \\
\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_{\text{НАГР}})
\end{array} \right. \quad (49)$$

### 3.1.2 Модель АД в неподвижной системе координат

Исследования модели АД в неподвижной системе координат проводились по структурной схеме, представленной на рисунке 6.

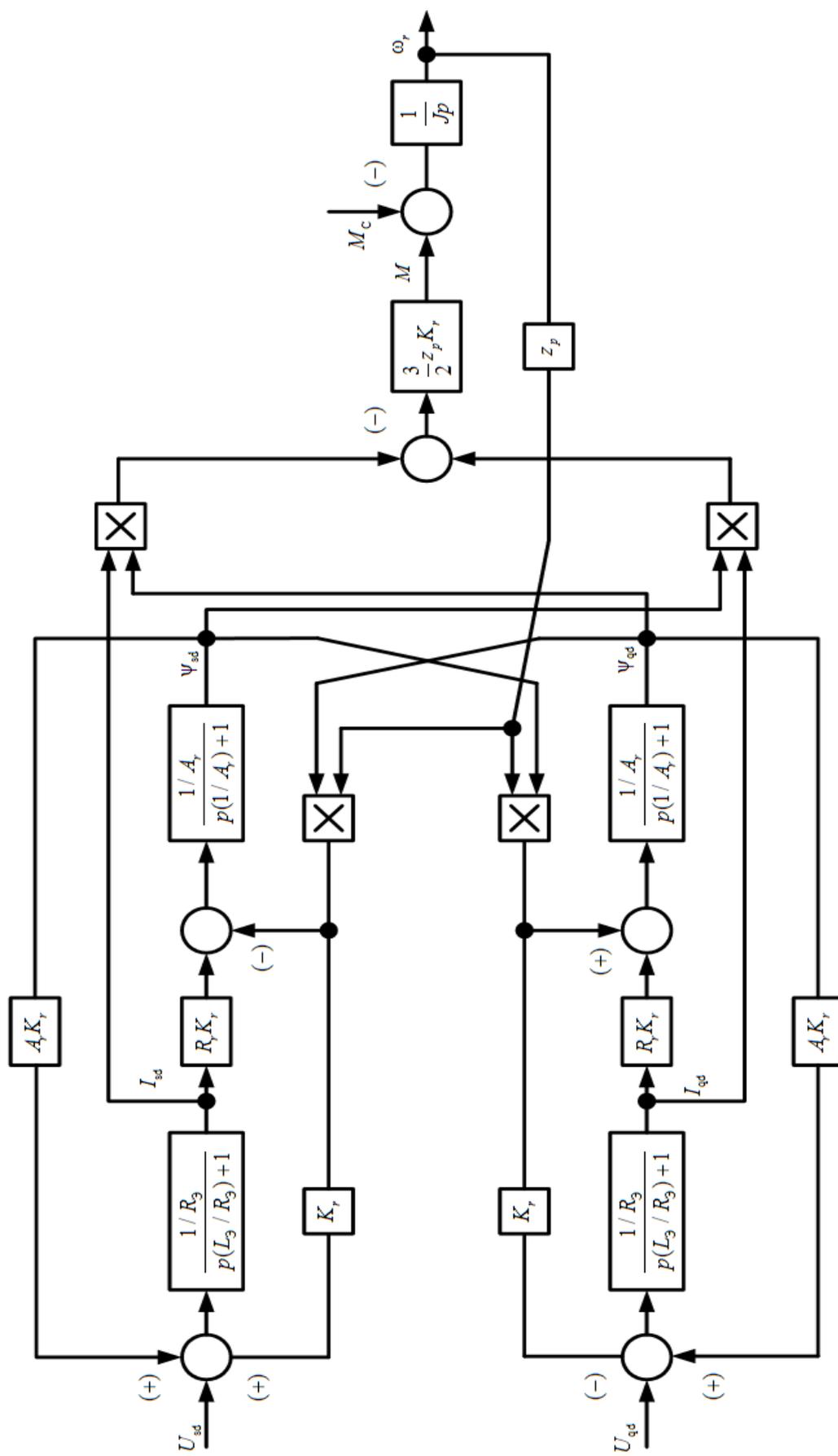


Рисунок 6 – Структурная схема АД в стационарной системе координат

Имитационная модель АД в стационарной системе координат представлена в Приложении А рисунок А.1.

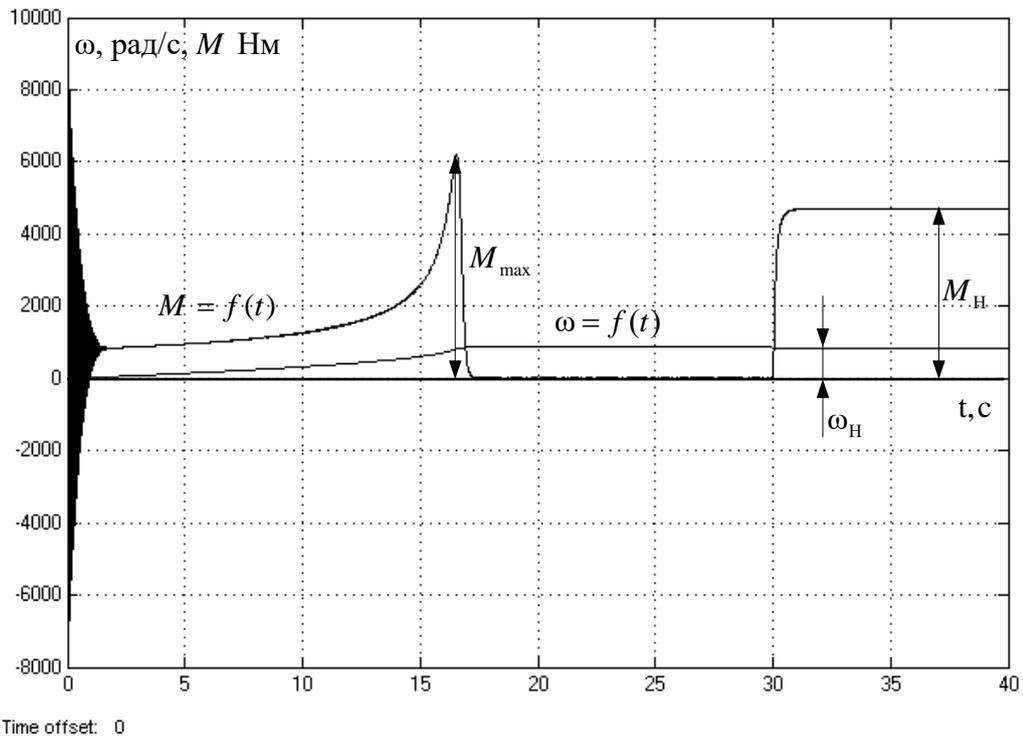


Рисунок 7 – Переходные процессы скорости и момента в стационарной системе координат

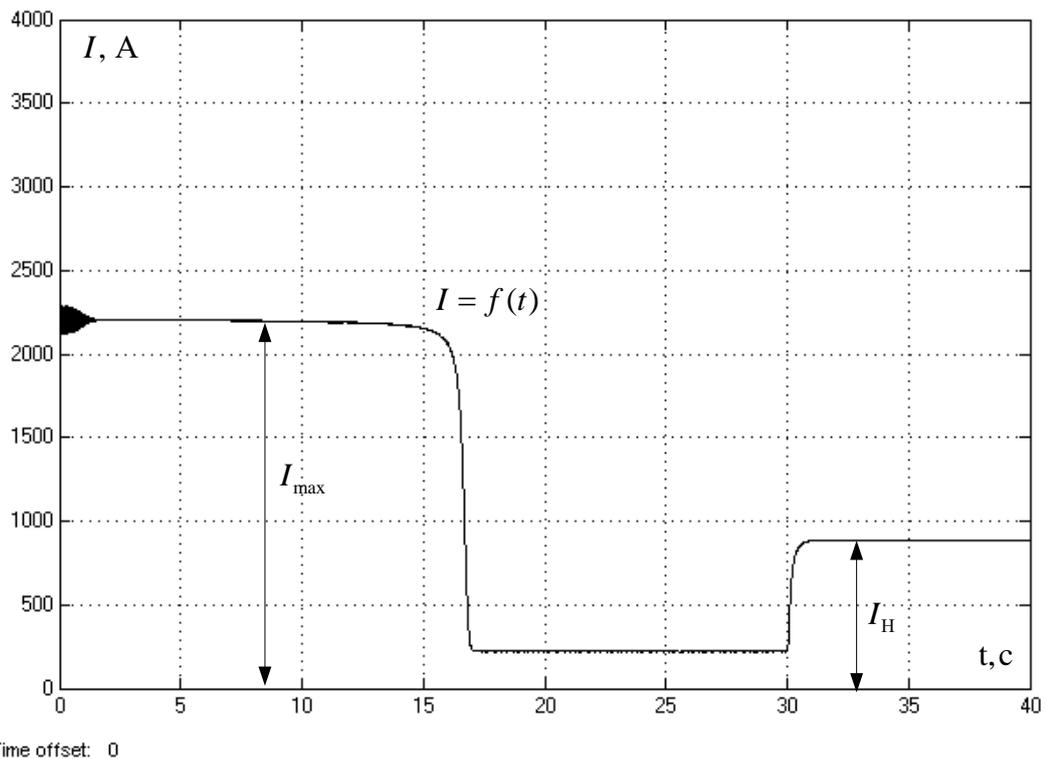


Рисунок 8 – Переходный процесс тока в стационарной системе координат

(для наглядности вектор тока был представлен в виде

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_b^2} / \sqrt{2}$$

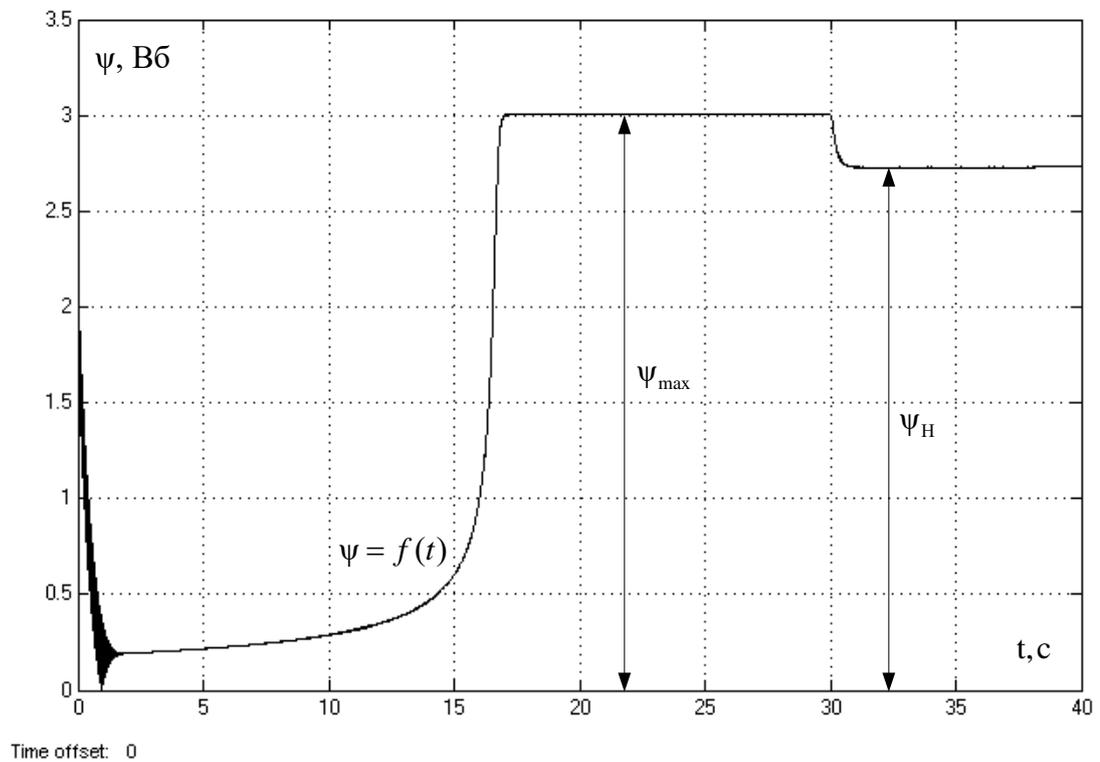


Рисунок 9 – Переходные процессы потокосцепления в стационарной системе координат

(для наглядности вектор потокосцепления был представлен в виде

$$\Psi = \sqrt{\Psi_a^2 + \Psi_b^2} / \sqrt{2}$$

### 3.1.3 Модель АД во вращающейся системе координат

Исследование модели АД во вращающейся системе координат производилось по структурной схеме, которая представлена на рисунке 11.

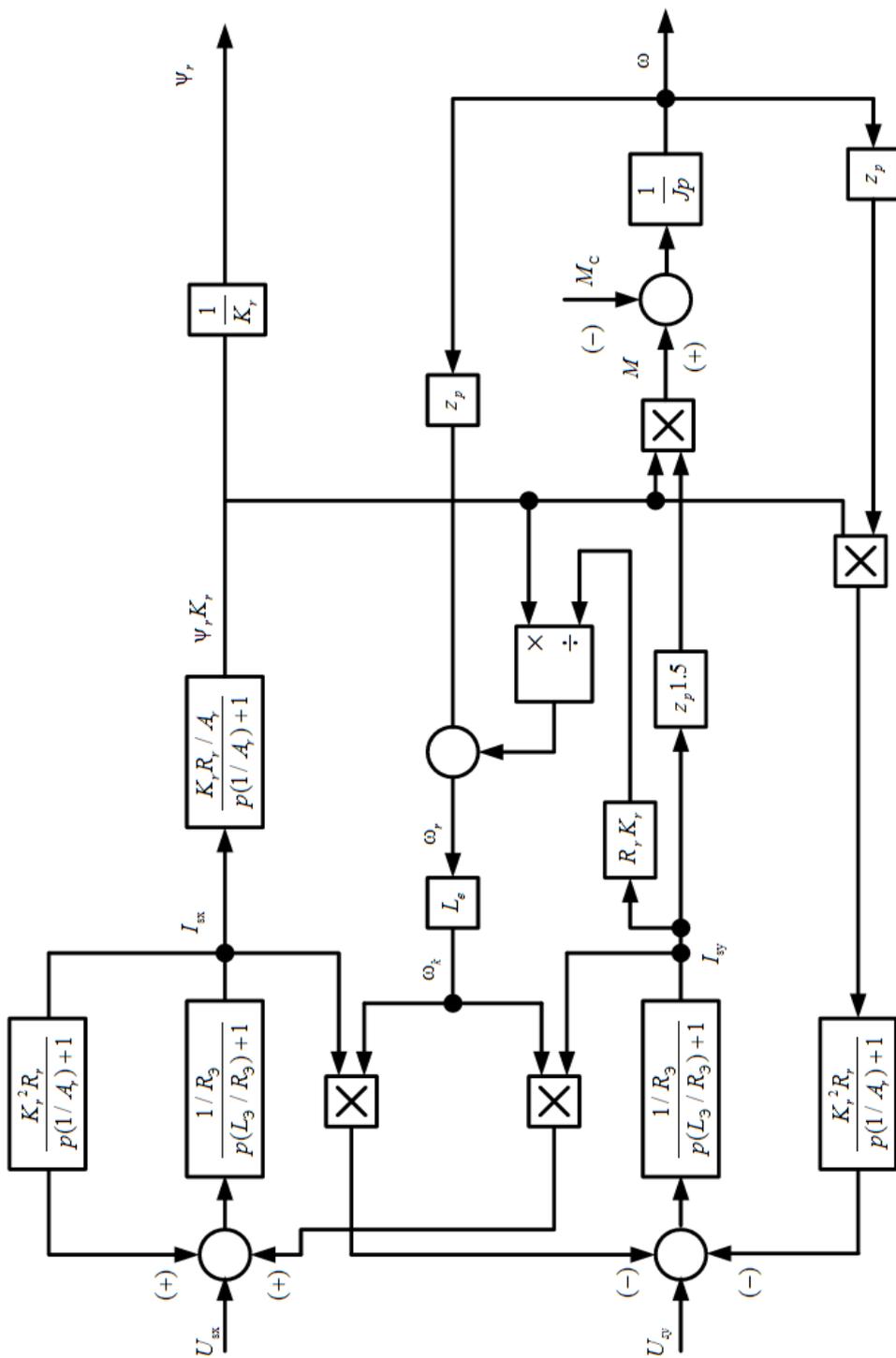


Рисунок 10 – Структурная схема АД во вращающейся системе координат

Имитационная модель АД во вращающейся системе координат представлена в Приложении А рисунок А.2.

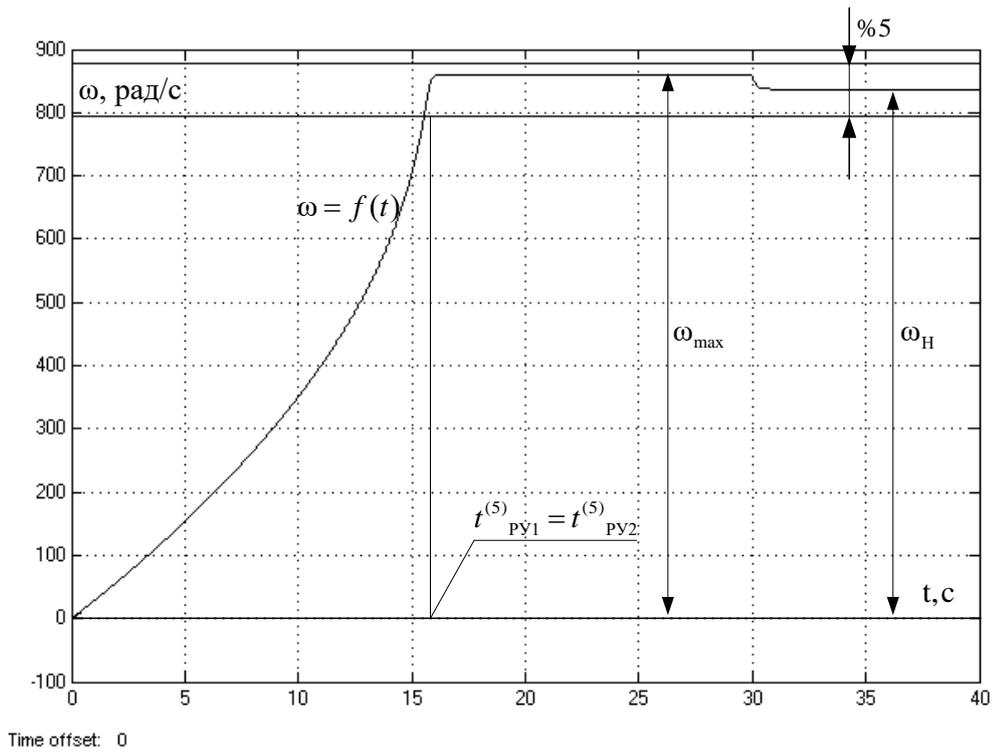


Рисунок 11 – Переходный процесс скорости во вращающейся системе координат

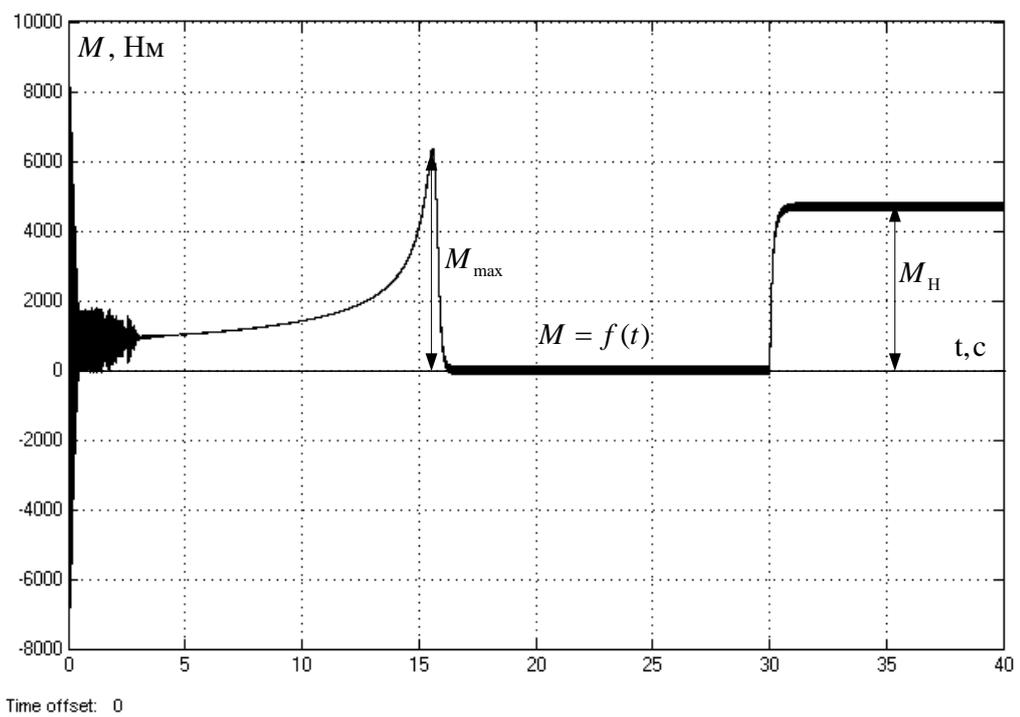


Рисунок 12 – Переходный процесс момента во вращающейся системе координат

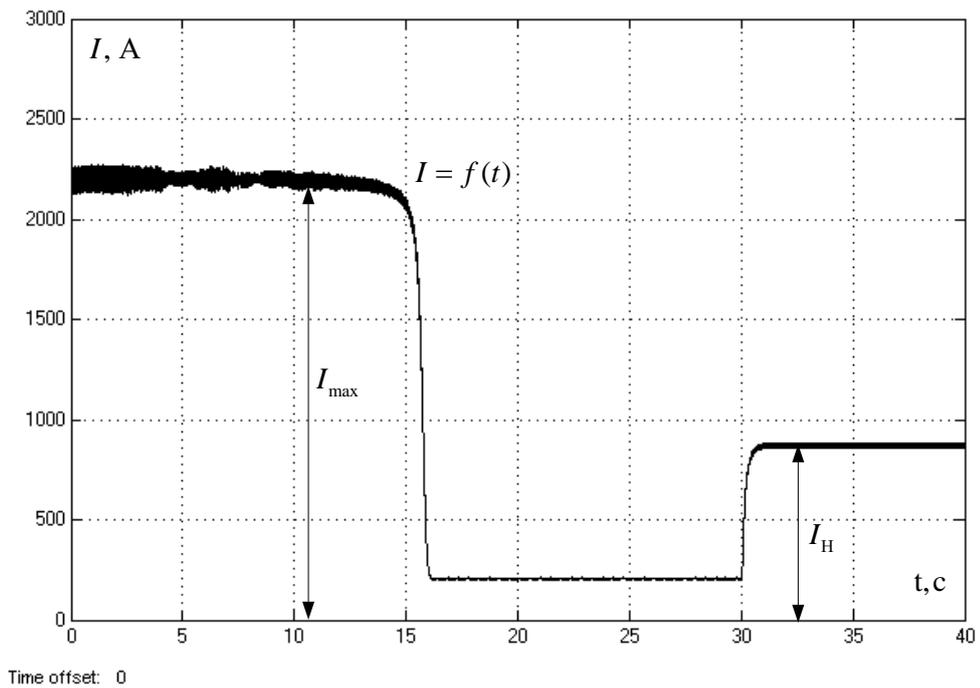


Рисунок 13 – Переходные процесс тока во вращающейся системе координат  
 (Для наглядности вектор тока был представлен в виде  $I = \sqrt{I_X^2 + I_Y^2} / \sqrt{2}$ )

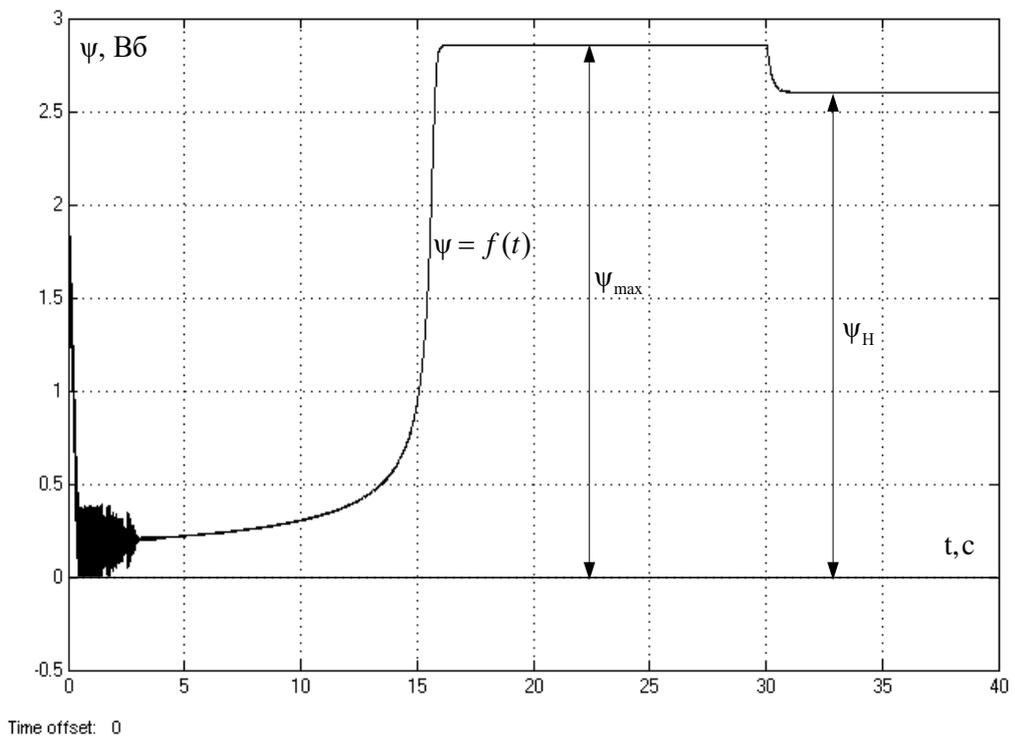


Рисунок 14 – Переходный процесс потокосцепления во вращающейся системе координат

При набросе нагрузки на вал двигателя равной номинальному моменту двигатель должен выйти на номинальную скорость и номинальный ток

### 3.1.4 Проверка адекватности разработанных имитационных моделей

В таблице 4 представлено сравнение данных двигателя

Таблица 4 – Данные разработанных моделей

Паспортные параметры	Данные полученные в результате моделирования	Погрешность
$\omega_H = 838$ рад/с	$\omega_H = 837$ рад/с	0,1%
$I_H = 970$ А	$I_H = 890$ А	8,2%

Из таблицы 4 видно, что модель двигателя адекватна. Погрешность у тока объясняется тем, что параметры замещения двигателя были рассчитаны по методике, которая имеет ряд допущений и двигатель имеет специфическую конструкцию.

Значительное время переходных процессов объясняется большим моментом инерции двигателя, которое составляет  $44 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , для его уменьшения момент инерции двигателя был принят  $30 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

## 3.2 Разработка линеаризованной системы векторного управления

### 3.2.1 Оптимизация контуров регулирования

Проведем расчет и оптимизацию контура тока, структурная схема которого представлена на рисунке 17.

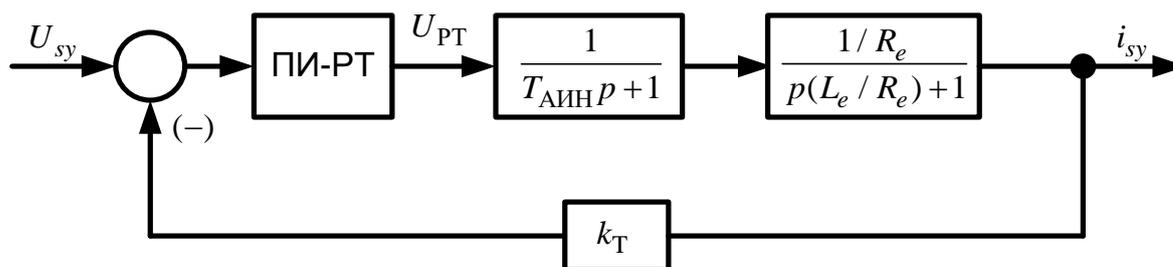


Рисунок 15 – Структурная схема контура тока

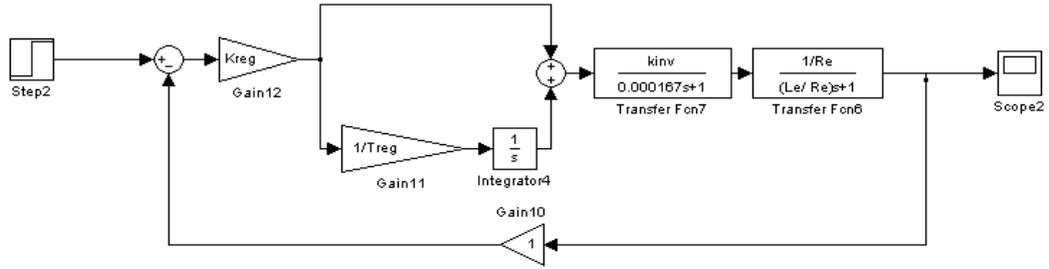


Рисунок 16 – Имитационная модель контура тока

Оптимизация контура тока на МО:

$$W(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} = W_{\text{ПЕР}}(p)W_{\text{ОУ}}(p) \quad (50)$$

$$W(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} = W_{\text{ПЕР}}(p) \frac{1}{T_{\Theta}p + 1} \frac{1/R_e}{T_{\Theta}p + 1} \quad (51)$$

Электромагнитная постоянная:

$$T_{\Theta} = L_e / R_e = 1 / A_r = 0,001 / 0,0791 = 0,127 \text{ с} \quad (52)$$

Малая постоянная времени контура тока:

$$T_{\mu} = T_{\text{АИН}} = \frac{0,5}{f_{\text{ШИМ}}} = 0,000167 \text{ с} \quad (53)$$

где  $f_{\text{ШИМ}} = 3 \text{ кГц}$ .

Эквивалентные индуктивности обмоток для статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{\mu} = 0,0004415 + 0,0009778 = 0,0102 \text{ Гн} \quad (54)$$

для ротора

$$L_2 = L_{2\sigma}' + L_{\mu} = 0,0005987 + 0,0009778 = 0,0104 \text{ Гн} \quad (55)$$

Эквивалентная индуктивность

$$L_e = L_1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_2} = 0,104 - \frac{0,0009778^2}{0,0104} = 0,001 \text{ Гн} \quad (56)$$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_e = R_1 + R_2' K_r^2 = 0,032 + 0,05 \cdot 0,9423 = 0,0791 \text{ Ом} \quad (57)$$

Коэффициенты:

$$K_r = \frac{L_\mu}{L_2} = \frac{0,0009778}{0,0104} = 0,9423 \quad (58)$$

$$A_r = R_e / L_e = 5,1 \quad (59)$$

Вывод передаточной функции регулятора:

$$W_{\text{РЕГ}}(p) = \frac{T_{\text{АИИ}}p + 1}{1} \frac{T_\Theta p + 1}{1/R_e} \frac{1}{2p(T_\mu p + 1)} = \frac{(T_\mu p + 1)(T_\Theta p + 1)R_e}{2T_\mu p(T_\mu p + 1)} \quad (60)$$

$$W_{\text{РЕГ}}(p) = \frac{(T_\Theta p + 1)R_e}{2T_\mu p} = \frac{T_\Theta R_e}{2T_\mu} \frac{(T_\Theta p + 1)}{pT_\Theta}$$

Коэффициент ПИ регулятора в контуре тока:

$$k_{\text{РЕГ}} = \frac{T_\Theta R_e}{2T_\mu} = \frac{0,127 \cdot 0,0791}{2 \cdot 0,000167} = 3 \quad (61)$$

Постоянная времени ПИ регулятора тока:

$$T_{\text{РЕГ}} = T_\Theta = 0,127 \text{ с} \quad (62)$$

Передаточная функция разомкнутого контура тока:

$$W(p)_{\text{РАЗ}} = \frac{1}{2T_\mu p(T_\mu p + 1)} \quad (63)$$

Передаточная функция замкнутого контура тока:

$$W(p)_{\text{ЗАМ}} = \frac{1}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1} \quad (64)$$

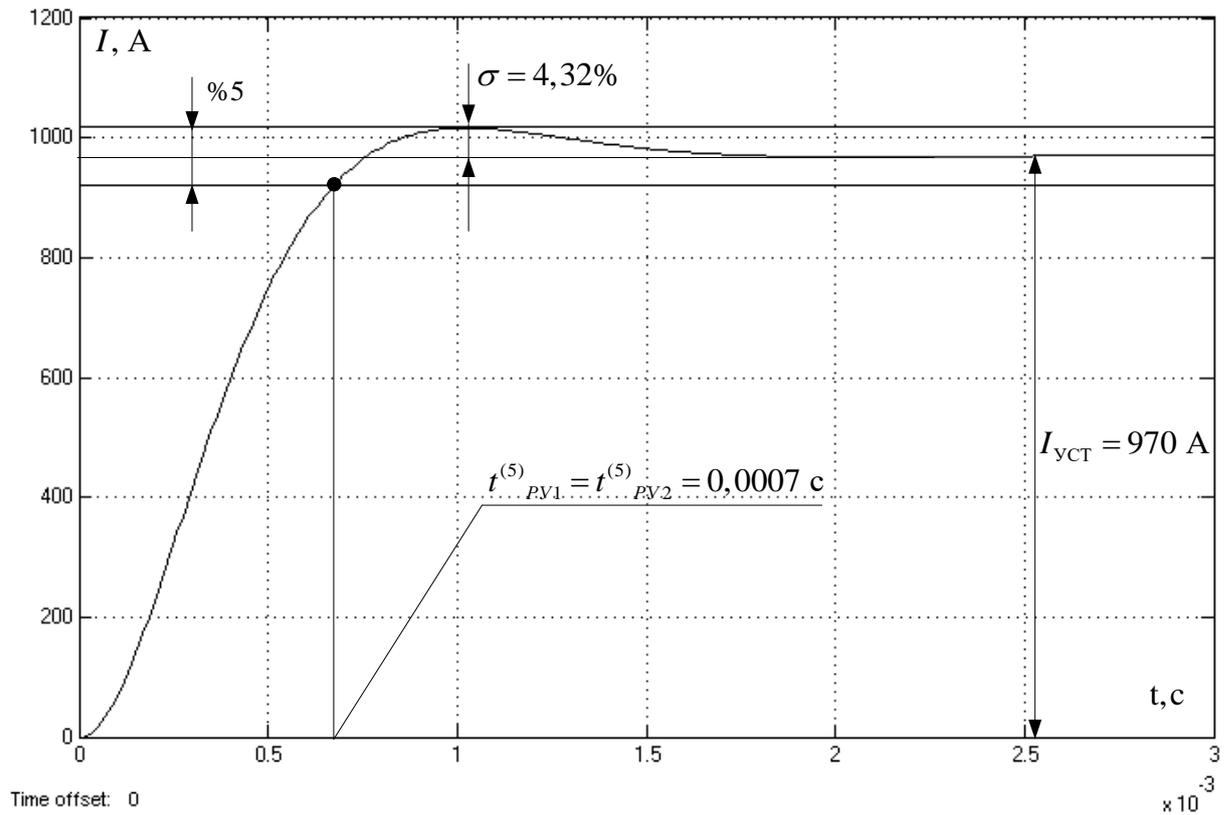


Рисунок 17 – Переходный процесс оптимизированного контура тока

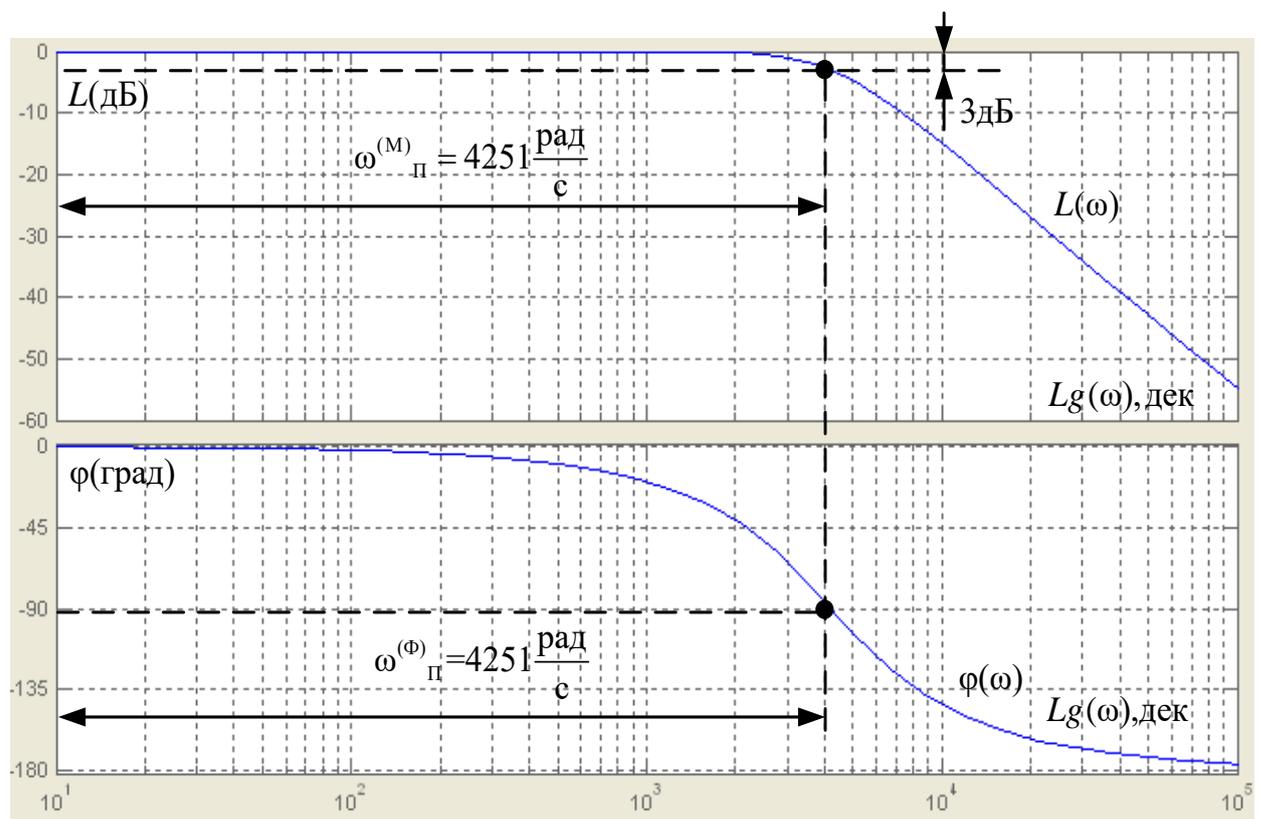


Рисунок 18 – Частотные характеристики контура тока

После настройки контура тока переходим к оптимизации контура потокосцепления, структурная схема, которого представлена на рисунке 21.

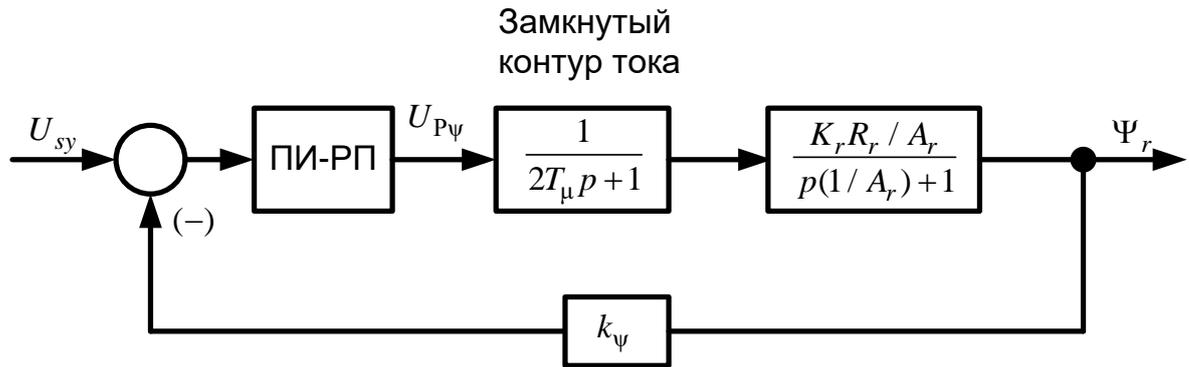


Рисунок 19 – Структурная схема контура тока

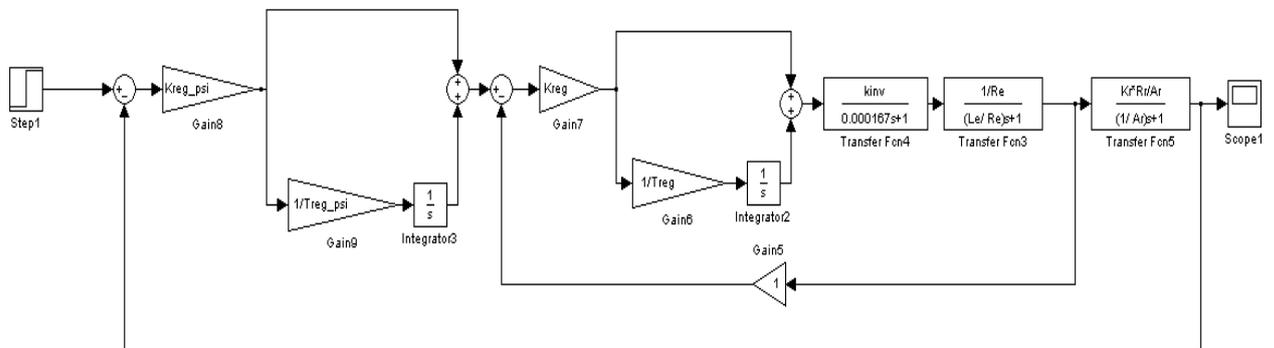


Рисунок 20 – Имитационная модель контура потокосцепления

Оптимизация контура потокосцепления на МО:

$$W(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} = W_{\text{ПЕР}}(p)W_{\text{ОУ}}(p),$$

$$W(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} = W_{\text{ПЕР}}(p) \frac{1}{2T_{\mu}^2p + 2T_{\mu}p + 1} \frac{K_r R_r / A_r}{p(1/A_r) + 1}, \quad (65)$$

$$W(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} = W_{\text{ПЕР}}(p) \frac{1}{2T_{\mu}p + 1} \frac{K_r R_r / A_r}{p(1/A_r) + 1}.$$

Малая постоянная времени контура потокосцепления:

$$T_{\mu\psi} = 2T_{\mu} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Выводим передаточную функцию регулятора:

$$W_{\text{ПЕР}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu\psi}p(T_{\mu\psi}p + 1)} \frac{2T_{\mu}p + 1}{1} \frac{T_{\psi}p + 1}{K_r R_r T_{\psi}} = \frac{(2T_{\mu}p + 1)(T_{\psi}p + 1)}{4T_{\mu}p(2T_{\mu}p + 1)K_r R_r T_{\psi}}, \quad (66)$$

$$W_{\text{РЕГ}}(p) = \frac{(T_{\psi}p + 1)}{4T_{\mu}pK_rR_rT_{\psi}} = \frac{1}{4T_{\mu}K_rR_r} \frac{(T_{\psi}p + 1)}{T_{\psi}p}$$

Постоянная времени ПИ регулятора потокосцепления:

$$T_{\psi} = 1 / A_r = 1 / 5,1 = 0,127 \text{ с} \quad (67)$$

Коэффициент ПИ регулятора в контуре потокосцепления:

$$K_{\psi} = \frac{1}{4T_{\mu}K_rR_r} = \frac{1}{4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot 0,94 \cdot 0,053} = 3,8 \cdot 10^4 \quad (68)$$

Передаточная функция разомкнутого контура тока:

$$W(p)_{\text{РАЗ}} = \frac{1}{2T_{\mu\psi}p(T_{\mu\psi}p + 1)} \quad (69)$$

Передаточная функция замкнутого контура тока:

$$W(p)_{\text{ЗАМ}} = \frac{1}{2T_{\mu\psi}^2 p^2 + 2T_{\mu\psi}p + 1} \quad (70)$$

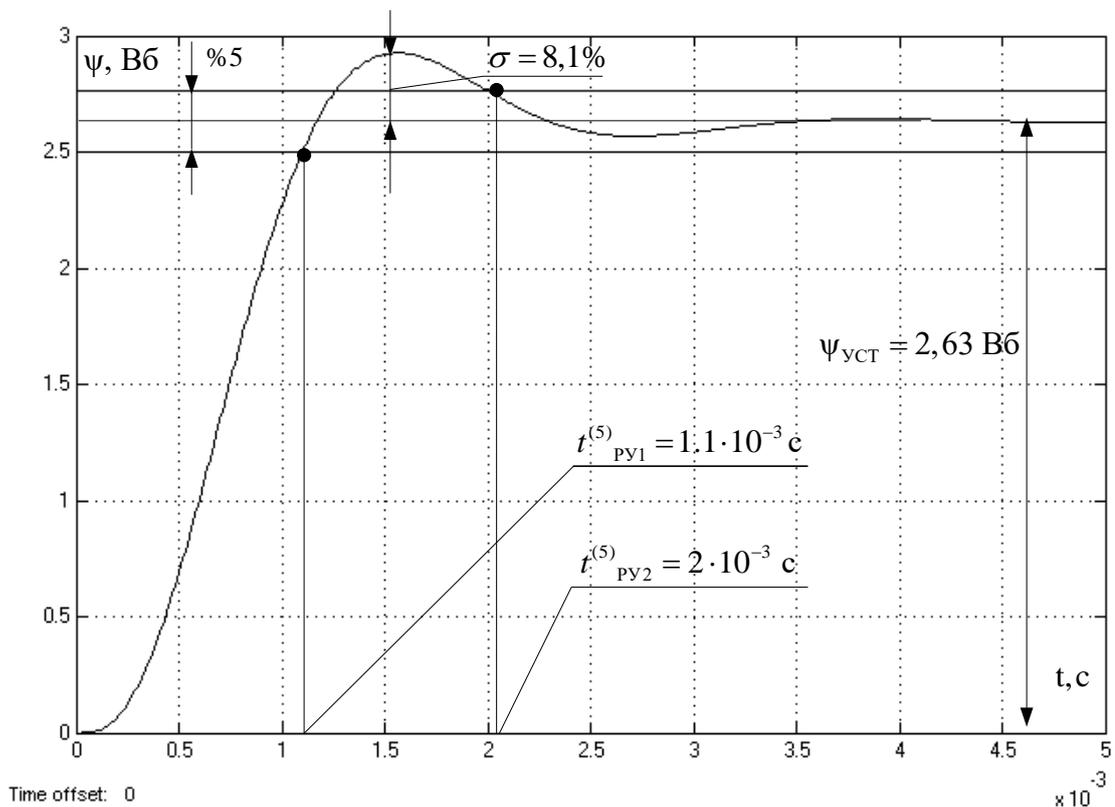


Рисунок 21 – Переходный процесс оптимизированного контура потокосцепления

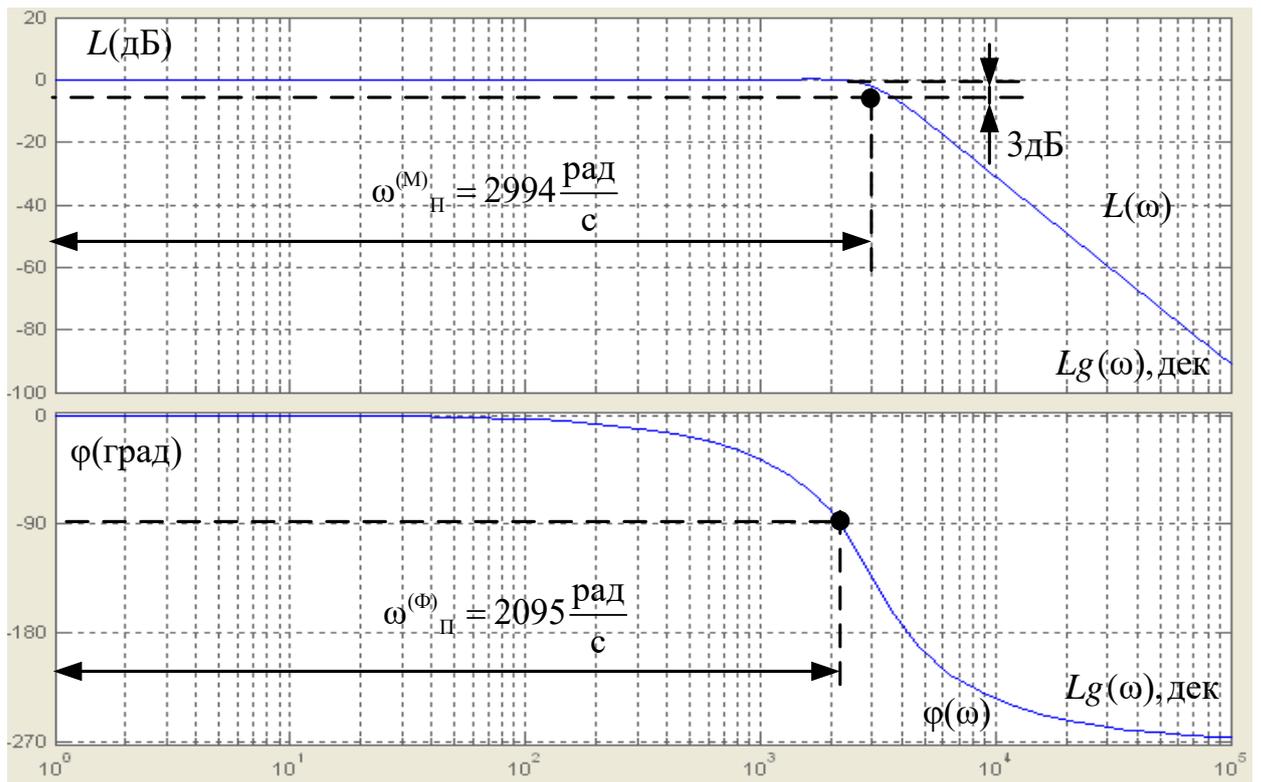


Рисунок 22 – Частотные характеристики контура потокосцепления

### Оптимизация контура скорости на СО

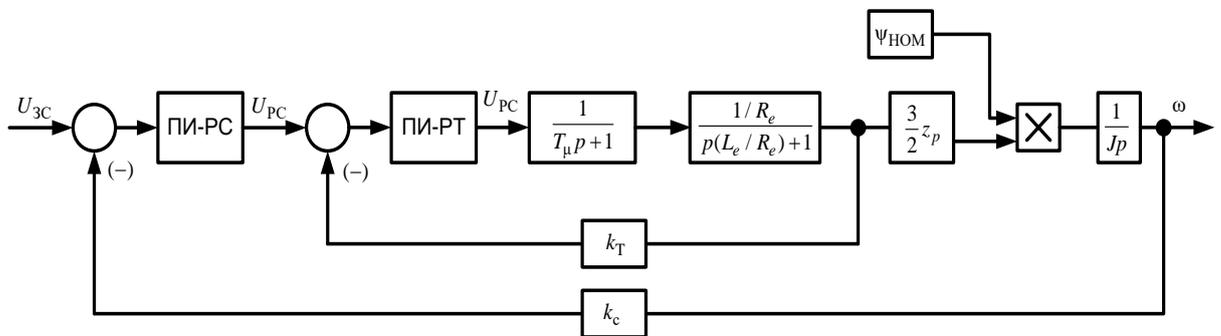


Рисунок 23 – Структурная схема контура скорости

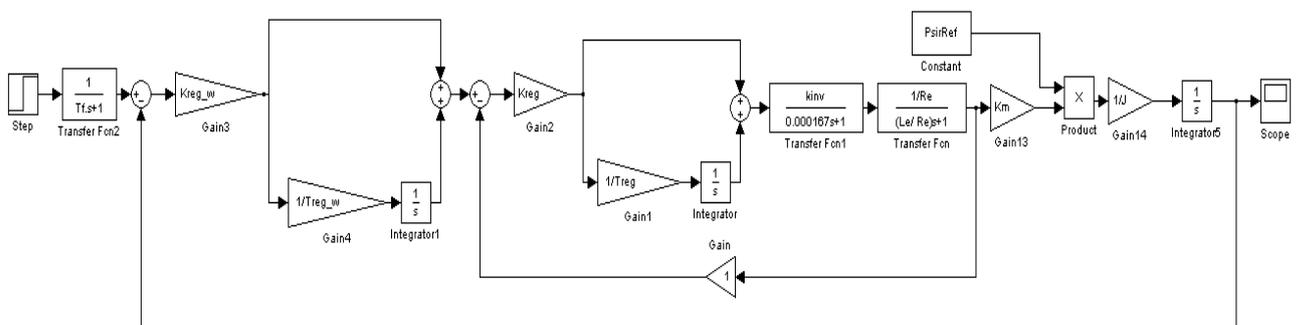


Рисунок 24 – Имитационная модель контура скорости

Желаемая передаточная функция:

$$W(p) = \frac{4T_{\mu C}p + 1}{8T_{\mu C}^2 p^2 (T_{\mu C}p + 1)} = W_{\text{РЕГ}}(p)W_{\text{ОУ}}(p) \quad (71)$$

Принимаем за малую постоянную времени контура скорости:

$$T_{\mu C} = 32T_{\mu} = 32 \cdot 0,000167 = 0,005344 \text{ с} \quad (72)$$

Оптимизации контура скорости:

$$\begin{aligned} W_{\text{РЕГ}}(p) &= \frac{4T_{\mu C}p + 1}{8T_{\mu C}^2 p^2 (T_{\mu C}p + 1)} \cdot \frac{(2T_{\mu}p + 1)J_{\Delta}p}{\Psi_r K_M} = \\ &= \frac{(128T_{\mu}p + 1)}{8p^2 (32T_{\mu})^2 (32pT_{\mu} + 1)} \cdot \frac{(2T_{\mu}p + 1)J_{\Delta}p}{\Psi_r K_M} \end{aligned} \quad (73)$$

Перемножим и раскроем скобки, затем один член многочлена отбросим в виду его малости:

$$(p128T_{\mu} + 1)(2T_{\mu} + 1) = 256p^2T_{\mu} + 130T_{\mu}p + 1 \approx 130T_{\mu}p + 1 \quad (74)$$

Передаточная функция регулятора:

$$W_{\text{РЕГ}}(p) = \frac{(130T_{\mu}p + 1)J_{\Delta}}{8 \cdot 192T_{\mu}p^2 (32T_{\mu}p + 1)\Psi_r K_M} = \frac{(98T_{\mu}p + 1)(32T_{\mu}p + 1)J_{\Delta}}{8 \cdot 192T_{\mu}p(32T_{\mu}p + 1)\Psi_r K_M} \quad (75)$$

Разложим многочлен на две скобки:

$$(130T_{\mu}p + 1) \approx (98T_{\mu}p + 1)(32T_{\mu}p + 1) \quad (76)$$

Коэффициент ПИ регулятора в контуре скорости :

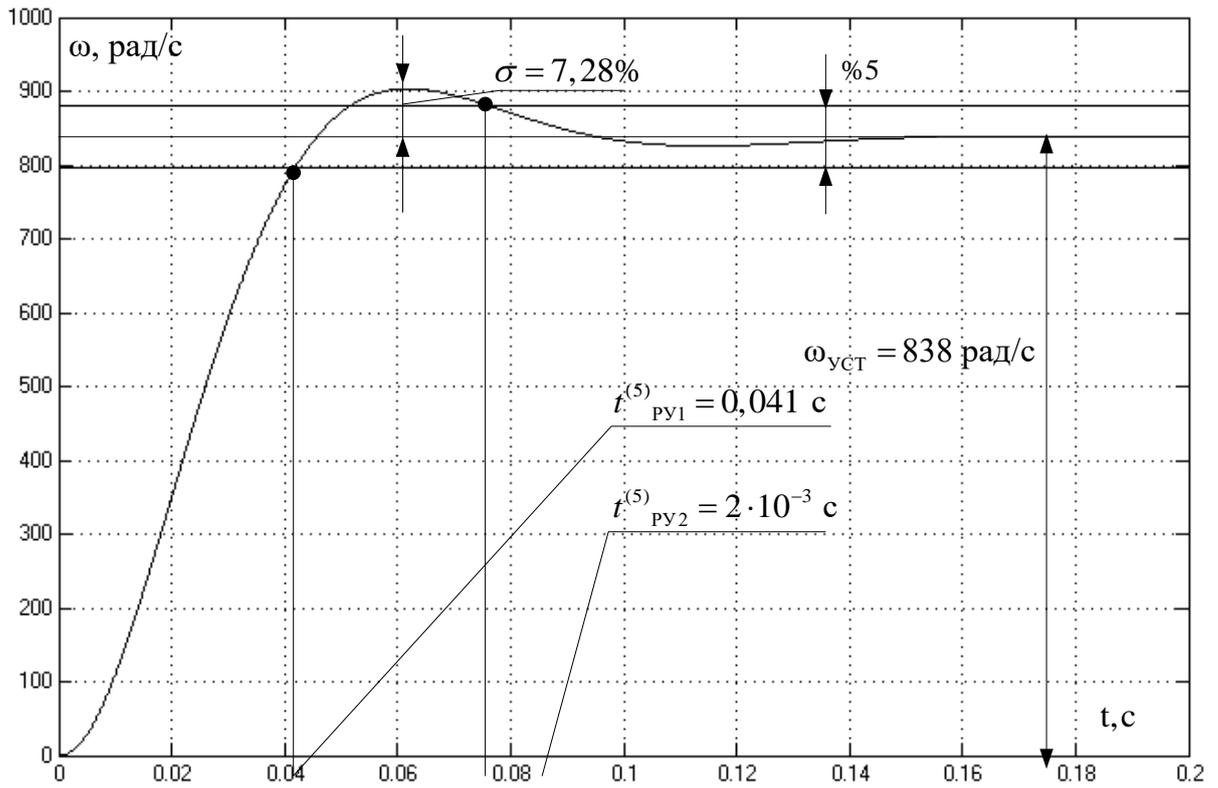
$$K_{\text{РЕГ}} = \frac{98T_M}{8 \cdot 1024 \cdot T_{\mu} \cdot K_M \Psi_H} = \frac{98 \cdot 25}{8 \cdot 1024 \cdot 0,000167 \cdot 1,5 \cdot 2,63} = 618 \quad (77)$$

Постоянная времени ПИ регулятора в контуре скорости:

$$T_{\text{РЕГ}} = 98T_{\mu} = 98 \cdot 0,000167 = 0,0164 \text{ с} \quad (78)$$

Передаточная функция фильтра:

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{pT_{\text{РЕГ}} + 1} = \frac{1}{98T_{\mu} + 1} \quad (79)$$



Time offset: 0

Рисунок 25 – Переходный процесс контура скорости

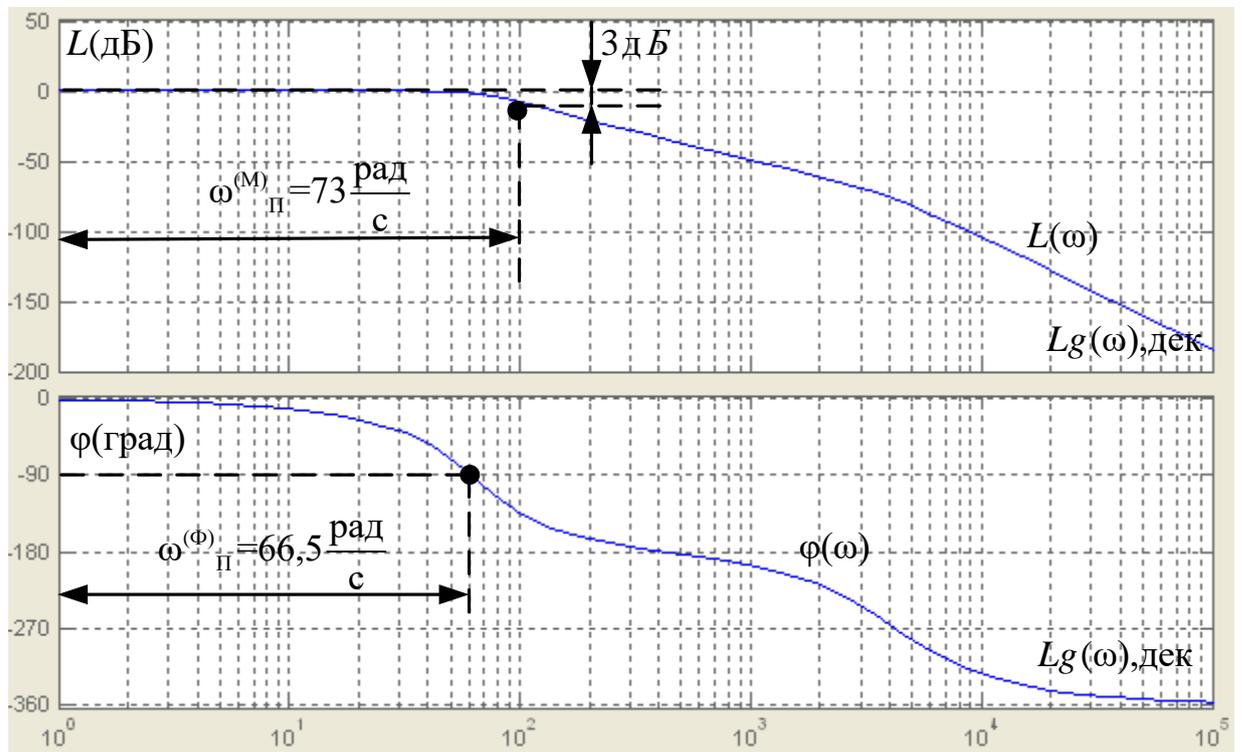


Рисунок 26 – Частотные характеристики контура скорости

### 3.2.2 Расчёт ожидаемых показателей качества системы

Проведем расчет ожидаемых показателей качества и сравним их с полученными в результате моделирования в таблицах 5, 6 и 7.

Таблица 5 – Показатели качества контура тока

$t_{\text{PY1}}^{(5)}, \text{с}$	$t_{\text{PY2}}^{(5)}, \text{с}$	$\sigma, \%$	$\Delta I_{\text{УСТ}}, \text{А}$	$\omega_{\Phi}^{(M)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\Pi}^{(\Phi)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$I_{\text{УСТ}}, \text{А}$
Ожидаемые показатели						
$6,8 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	4,32	0	4251	4251	970
Результаты моделирования						
$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	4,32	0	4251	4251	970

Первое и второе вхождение в %5 зону:

$$t_{\text{PY2}}^{(5)} = t_{\text{PY1}}^{(5)} \approx 4,1T_{\mu\text{ПП}} \approx 4,1 \cdot 0,000167 = 0,00068 \text{ с} \quad (80)$$

Полоса пропускания по модулю изменяется:

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{0,71}{T_{\mu}} = \frac{0,71}{0,000167} = 4251 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (81)$$

Полоса пропускания по фазе изменяется:

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{0,71}{T_{\mu}} = \frac{0,71}{0,000167} = 4251 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (82)$$

Рассчитаем ожидаемые показатели для контура потокосцепления.

Таблица 6 – Показатели качества контура потокосцепления

$t_{\text{PY1}}^{(5)}, \text{с}$	$t_{\text{PY2}}^{(5)}, \text{с}$	$\sigma, \%$	$\Delta \psi_{\text{УСТ}}, \text{А}$	$\omega_{\Phi}^{(M)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\Pi}^{(\Phi)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\psi_{\text{УСТ}}, \text{Вб}$
Ожидаемые показатели						
$1,12 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	8,1	0	2095,8	2994	2,63
Результаты моделирования						
$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	8,1	0	2095,8	2994	2,63

Первое вхождение в %5 зону:

$$t_{\text{PY1}}^{(5)} \approx 7T_{\mu\text{ПП}} \approx 7 \cdot 0,000167 = 0,001169 \text{ с} \quad (83)$$

Втрое входение в 5% зону:

$$t_{\text{PY2}}^{(5)} \approx 12T_{\mu\text{ПП}} \approx 12 \cdot 0,000167 = 0,002 \text{ с} \quad (84)$$

Полоса пропускания по модулю изменяется:

$$\omega_{\text{П}}^{(M)} = \frac{0,5}{T_{\mu}} = \frac{0,5}{0,000167} = 2994 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (85)$$

Полоса пропускания по фазе изменяется

$$\omega_{\text{П}}^{(\Phi)} = \frac{0,35}{T_{\mu}} = \frac{0,35}{0,000167} = 2095,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (86)$$

Таблица 7 – Показатели качества контура скорости

$t_{\text{PY1}}^{(5)}, \text{с}$	$t_{\text{PY2}}^{(5)}, \text{с}$	$\sigma, \%$	$\Delta\omega_{\text{УСТ}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\Phi}^{(M)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\text{П}}^{(\Phi)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\text{УСТ}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
Ожидаемые показатели						
0,037	0,064	7,3%	0	66,5	83	2,63
Результаты моделирования						
0,041	0,074	7,3%	0	61	73	2,63

Первое входение в %5 зону:

$$t_{\text{PY1}}^{(5)} \approx 7T_{\mu\text{ПП}} \approx 7 \cdot 32 \cdot 0,000167 = 0,037 \text{ с} \quad (87)$$

Втрое входение в 5% зону:

$$t_{\text{PY2}}^{(5)} \approx 12 \cdot T_{\mu\text{ПП}} \approx 12 \cdot 32 \cdot 0,000167 = 0,064 \text{ с} \quad (88)$$

Полоса пропускания по модулю изменяется:

$$\omega_{\text{П}}^{(M)} = \frac{0,44}{32T_{\mu}} = \frac{0,01389}{0,000167} = 83 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (89)$$

Полоса пропускания по фазе изменяется:

$$\omega_{\text{П}}^{(\Phi)} = \frac{0,36}{32T_{\mu}} = \frac{0,0111}{0,000167} = 66,5 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (90)$$

### 3.2.3 Исследование переходных процессов в линеаризованной системе

Исследование переходных процессов проходило с помощью имитационной модели, представленной на рисунке 29. [13]

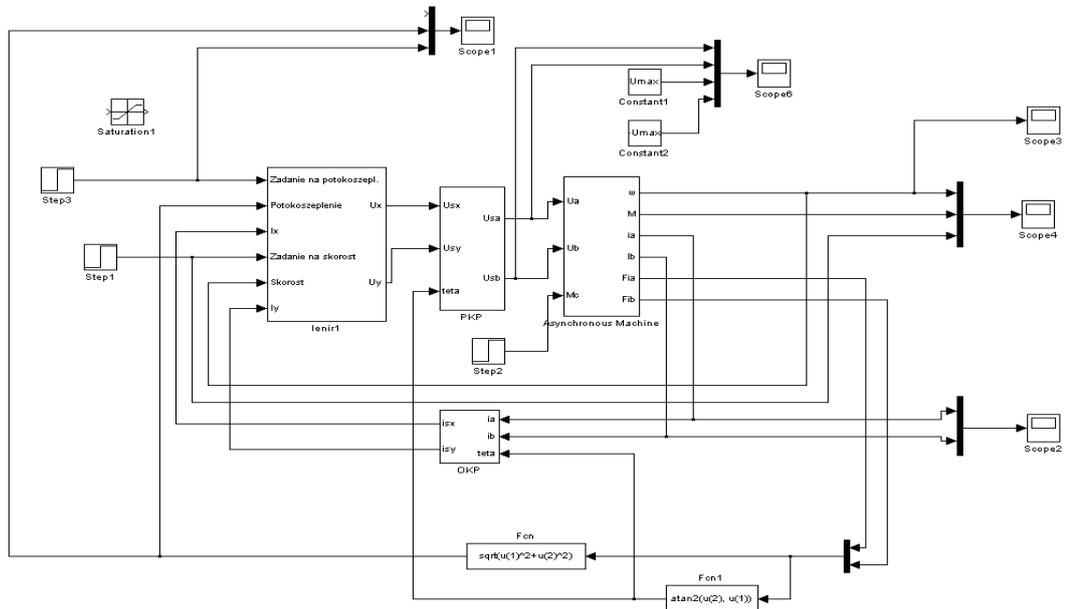


Рисунок 27 – Имитационная модель линеаризованной системы

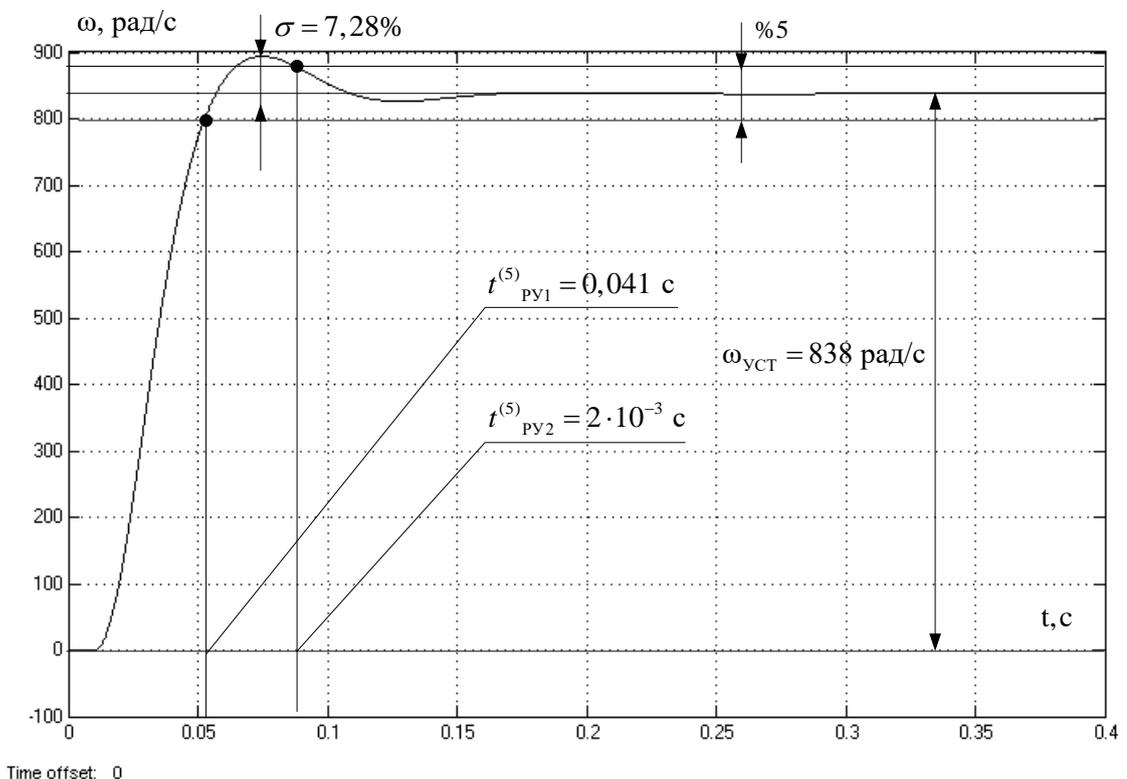


Рисунок 28 – Переходный процесс скорости в линеаризованной системе с набросом нагрузки в  $t = 0,25\text{с}$

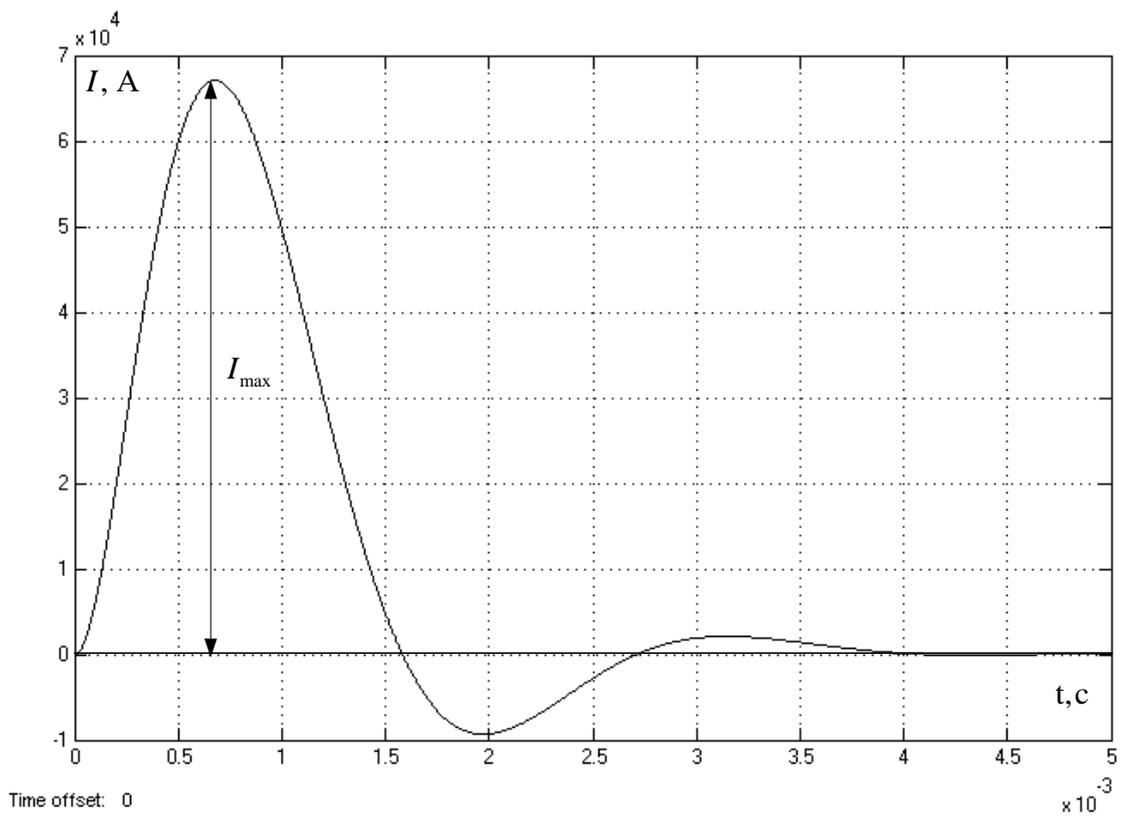


Рисунок 29 – Переходный процесс тока в линеаризованной системе

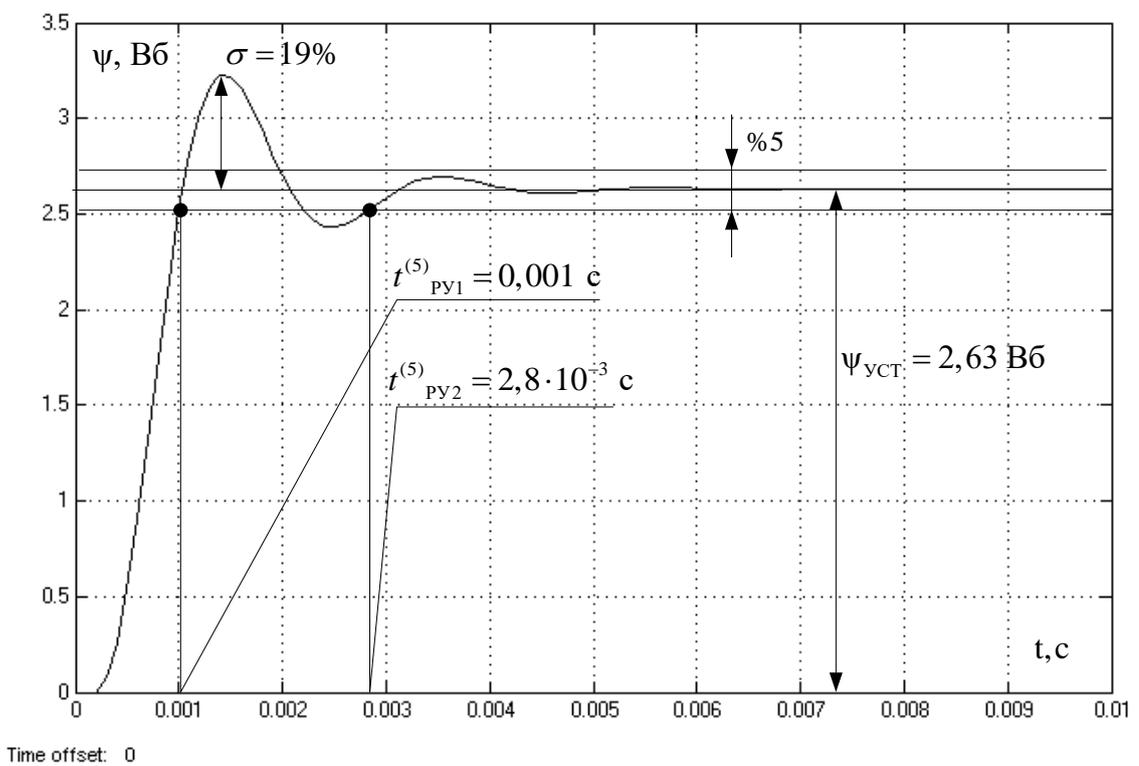


Рисунок 30 – Переходный процесс потокосцепления в линеаризованной системе

### 3.3 Разработка нелинейной системы асинхронного электропривода с векторным управлением

#### 3.3.1 Ограничения в системе управления в электроприводе с векторным управлением

В таблице 8 представлены рекомендуемые и используемые в данной работе ограничения. При исследовании было установлено, что рекомендуемые значения не подходят в данной системе, так как при работе привода на номинальной скорости и набросе нагрузки равной номинальному моменту происходит сильная просадка по скорости. Было установлено, что необходимо менять ограничения  $U_x, U_y$  так как один из регуляторов находился постоянно в насыщении, а это в свою очередь мешало приводу держать нагрузку. Изменение ограничений  $U_x, U_y$  происходило согласно балансу мощности  $U_{MAX} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \Rightarrow \sqrt{0,312^2 + 0,95^2} = 1$ , так чтобы конец вектора  $U_{MAX}$  описывал окружность. [14]

Таблица 8 – Ограничения по напряжению

Напряжения	Рекомендуемые	Используемые в модели
$U_x$	$0,312U_{MAX}$	$0,4U_{MAX}$
$U_y$	$0,95U_{MAX}$	$0,92U_{MAX}$

Максимальное выходное напряжение не должно превышать:

$$U_{ВЫХ} = \sqrt{2}U_H = \sqrt{2} \cdot 1915 = 2708 \text{ В} \quad (91)$$

Если подставим данные коэффициенты  $U_x = 0,4$  и  $U_y = 0,92$ , то получим:

$$U_{MAX} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \Rightarrow \sqrt{(0,312 \cdot 2708)^2 + (0,95 \cdot 2708)^2} = 2708 \quad (92)$$

На рисунке 33 показано как формируется результирующий вектор напряжения и видно как конец вектора описывает окружность. Если вектор будет описывать не окружность, а эллипс то будет недоиспользование всей мощности привода.

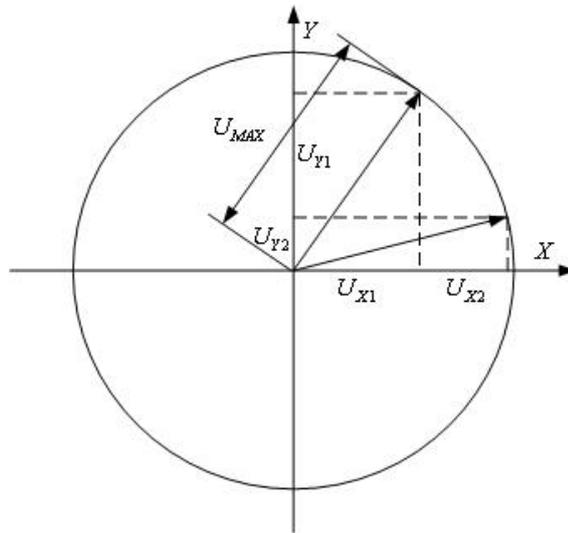


Рисунок 31 – Диаграмма напряжений

В таблице 9 представлены ограничения по току. В процессе исследования было установлено, что они не так сильно влияют на работу привода как ограничения по напряжению и были приняты согласно с требованием к приводу.

Таблица 9 – Ограничения по току

Напряжения	Рекомендуемые	Используемые в модели
$I_X$	$1,5...2I_{MAX}$	$1,1I_{MAX}$
$I_Y$	$2...3I_{MAX}$	$1,1I_{MAX}$

$$I_{MAX} = \sqrt{2}U_H = \sqrt{2} \cdot 970 = 1371,8 \text{ A} \quad (93)$$

Для ограничения интегрирующей составляющей в системе используется следующая схема регулятора

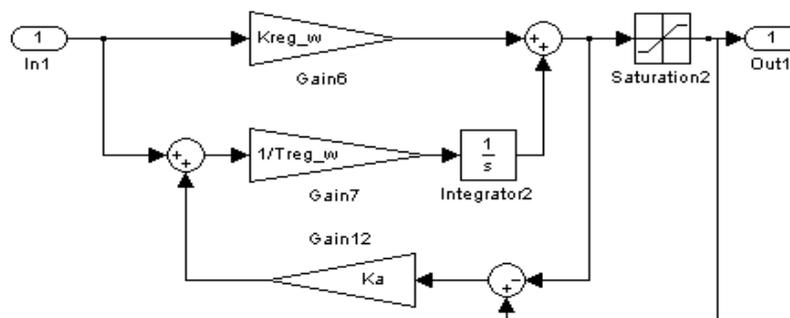


Рисунок 32– Имитационная схема регулятора с ограничением интегрирующей составляющей

### **3.3.2 Адаптация системы управления к нелинейностям**

Для адаптации системы к нелинейностям потребуется:

- Ввести линейный задатчик интенсивности для формирования задания по скорости;
- Задержка для формирования задания по скорости на время, за которое переходные процессы потокосцепления пройдут;
- Убрать фильтр на входе регулятора скорости

### **3.3.3 Исследование переходных процессов в системе электропривода**

На рисунке 33 представлена линейная имитационная модель системы управления с асинхронным двигателем. В качестве модели АД была выбрана модель в неподвижной системе координат, так как она приближена к реальности. Для согласования работы АД и системы управления используется прямое и обратное преобразование Парка-Горева.

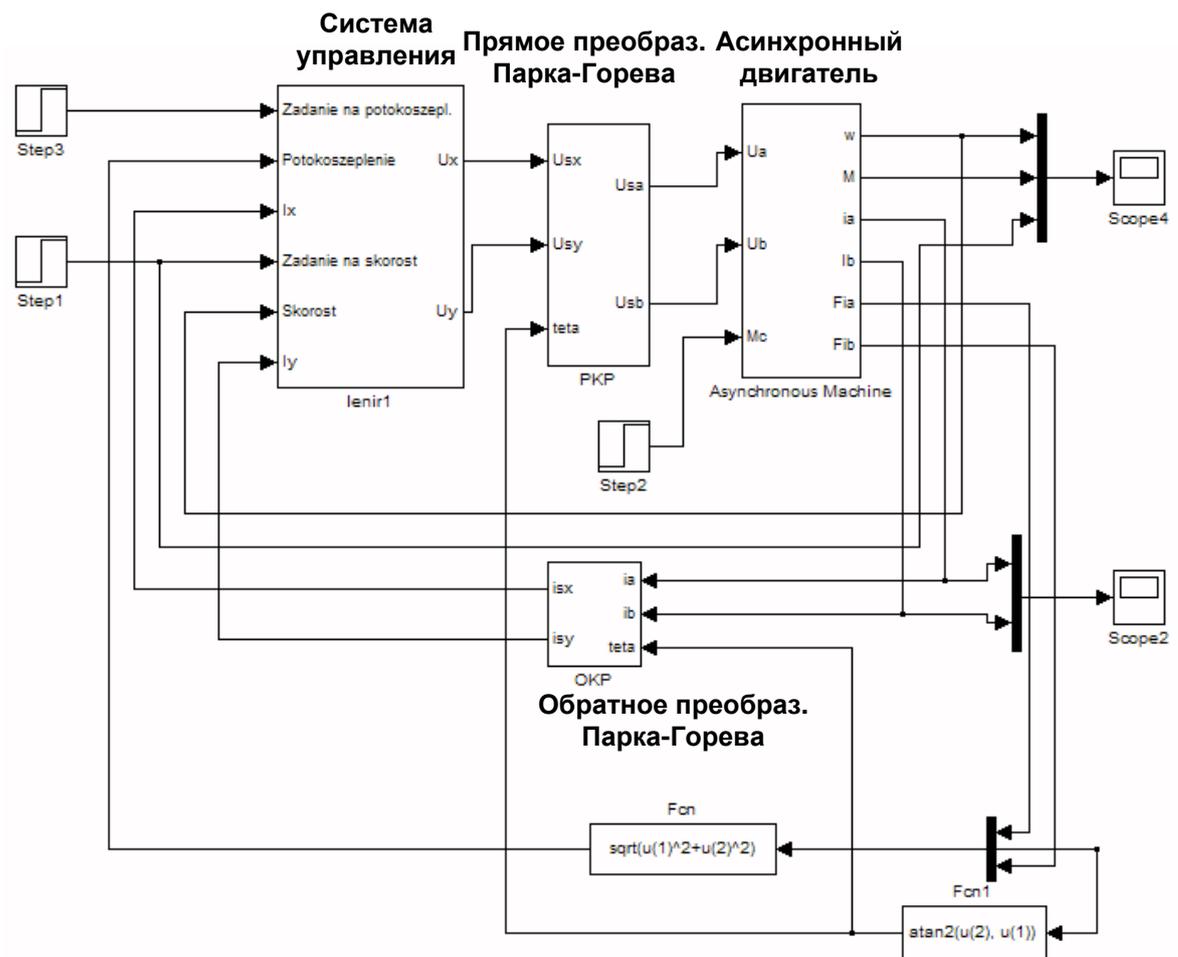
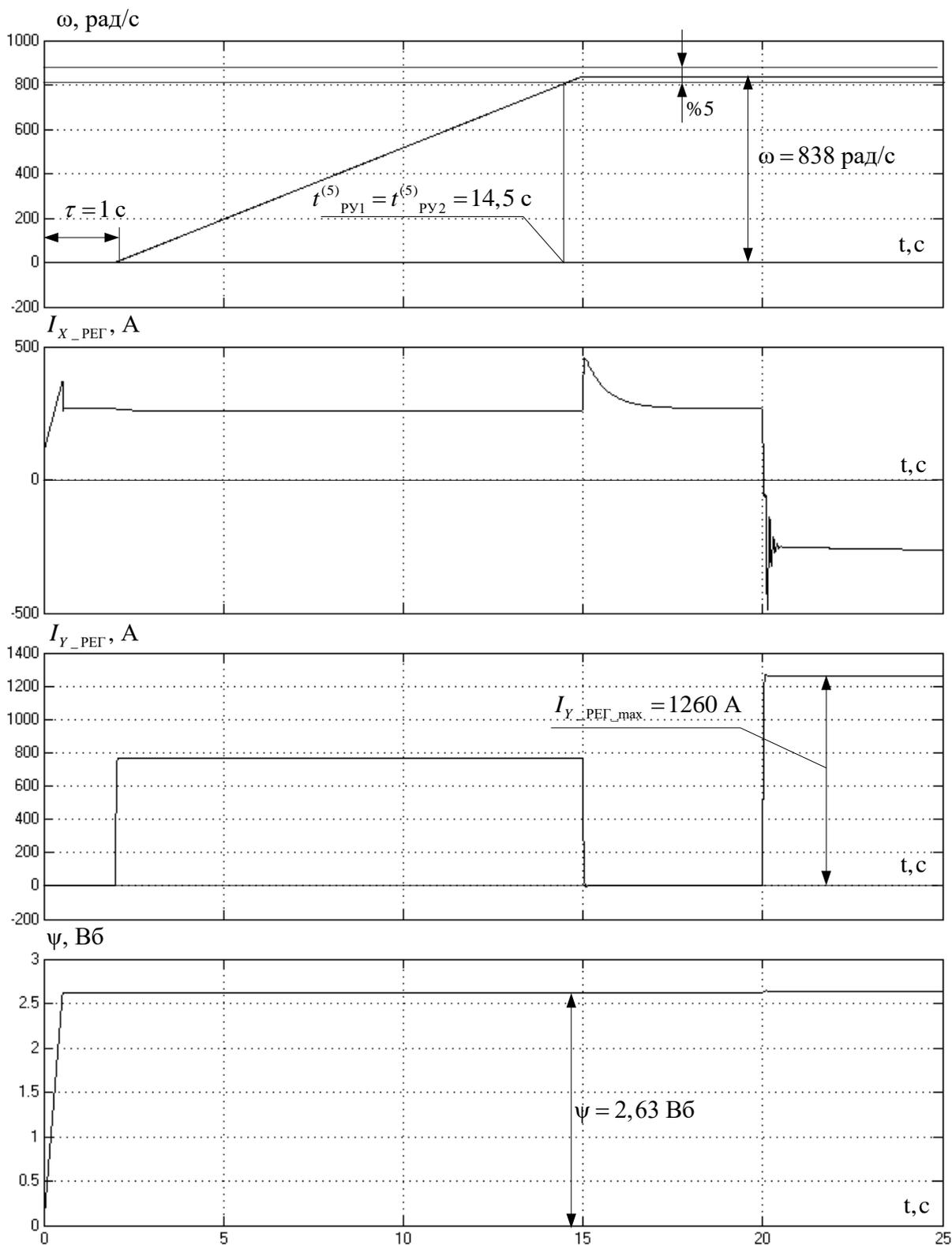


Рисунок 33 – Имитационная модель нелинейной системы

На рисунке 34 представлены переходные процессы скорости, токов на выходе регуляторов и потокосцепления с набросом нагрузки в нелинейной системе.



Time offset: 0

Рисунок 34 – Переходные процессы скорости, токов на выходе регуляторов и потокосцепления с набросом нагрузки в нелинейной системе

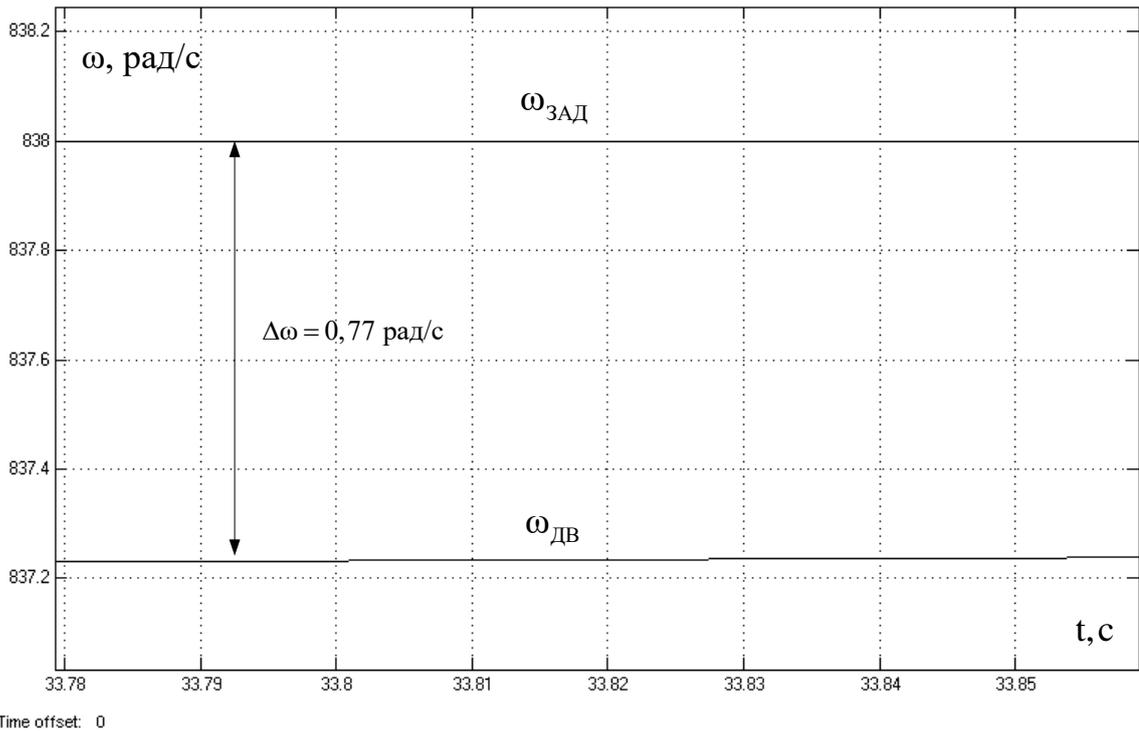


Рисунок 35 – ошибка скорости при набросе нагрузки в нелинейной системе

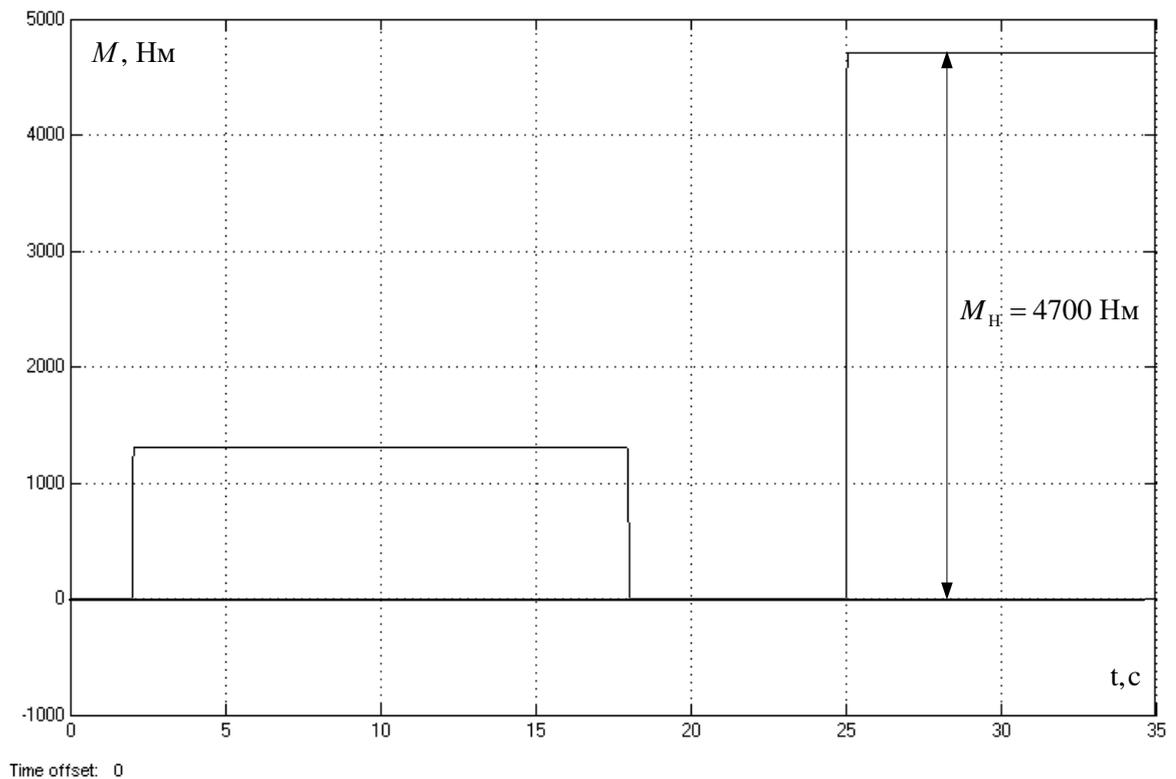


Рисунок 36 – Переходный процесс момента в нелинейной системе

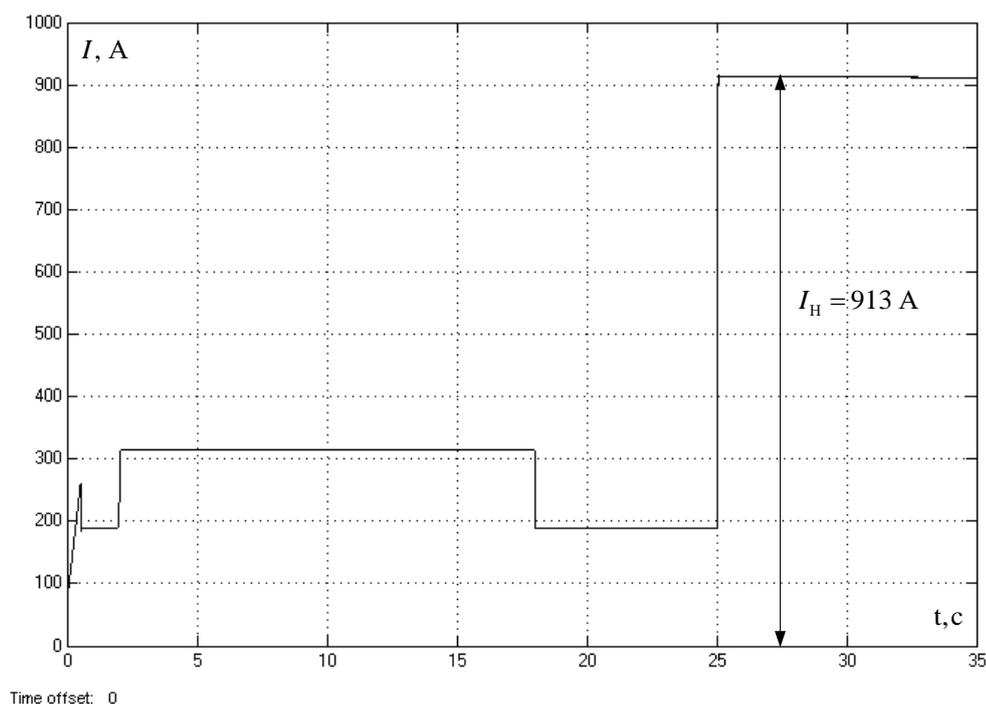


Рисунок 37 – Переходный процесс тока в нелинейной системе

Требуемая точность регулирования скорости по технологическому процессу составляет 1%. Отсюда можно сделать вывод, что данная система удовлетворяет заданным требованиям.

### 3.4 Модуль идентификации составляющих вектора потокосцепления

#### 3.4.1 Разработка системы идентификации

Анализ различных способов восстановления переменных и координат АД, недоступных для прямого измерения показал, что для общепромышленного асинхронного ЭП с векторным управлением наилучшим вариантом является применение системы на основе имитационной модели АД с автоматической ориентацией системы координат

Будем использовать метод расчёта составляющих пространственного вектора потокосцепления статора на основе уравнений электромагнитной связи с ротором (86) и взаимодействия с параметрами статорной обмотки АД (87) и (88) [14]

$$p\Psi_r = k_r r_r i_{sx} - a_r \Psi_r \Rightarrow \Psi_r = \frac{k_r r_r i_{sx}}{p + a_r} \Rightarrow \Psi_r = \frac{\frac{k_r r_r i_{sx}}{a_r}}{\frac{p}{a_r} + 1}, \quad (94)$$

$$\Psi_{sa}^\Psi = l_e i_{sa} + k_r \Psi_{ra}, \quad (95)$$

$$\Psi_{s\beta}^\Psi = l_e i_{s\beta} + k_r \Psi_{r\beta}, \quad (96)$$

Потокосцепления статора и ротора с учетом всех токов АД и независимо от выбранной системы координат можно представить в виде.

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases}, \quad (97)$$

$$I_r = \frac{\Psi_r}{L_r} - \frac{L_m I_s}{L_r}, \quad (98)$$

$$\Psi_s = L_s I_s + \frac{L_m \Psi_r}{L_r} - \frac{L_m I_s L_m}{L_r}, \quad (99)$$

$$\Psi_s = I_s \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) + \frac{L_m}{L_r} \Psi_r. \quad (100)$$

Если учесть, что  $k_r = \frac{L_m}{L_r}$ ,  $l_e = L_s - \frac{L_m}{L_r}$ ,  $\Psi_s = \begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{s\beta} \end{bmatrix}$ ,  $\Psi_r = \begin{bmatrix} \Psi_{ra} \\ \Psi_{r\beta} \end{bmatrix}$  то получим уравнения 2,3.

С другой стороны составляющие пространственного вектора потокосцепления статора могут быть определены через составляющие векторов тока и напряжения статора, уравнения (76) и (77)

$$p\Psi_{sa}^u = u_{sa} - r_s i_{sa}, \quad (101)$$

$$p\Psi_{s\beta}^u = u_{s\beta} - r_s i_{s\beta}. \quad (102)$$

Уравнение Кирхгофа для фазных напряжений:

$$U_s = r_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt}, \quad (103)$$

$$U_{sa} = r_s i_{sa} + p\psi_{sa}^u. \quad (104)$$

При сравнении составляющих вектора потокосцепления статора определённых различными путями, ввиду отклонений между параметрами схемы замещения и реальным АД определяется ошибка. С помощью ПИ-регуляторов в уравнения (101) и (102) вводятся дополнительные параметры:

$$p\psi_{sa}^u = u_{sa} - r_{sa} i_{sa} - u_{ca}, \quad (105)$$

$$p\psi_{s\beta}^u = u_{s\beta} - r_s i_{s\beta} - u_{c\beta}, \quad (106)$$

$$u_{ca} = (\psi_{sa}^u - \psi_{sa}^w) W_{\text{per}}(p), \quad (107)$$

$$u_{c\beta} = (\psi_{s\beta}^u - \psi_{s\beta}^w) W_{\text{per}}(p), \quad (108)$$

$$W_{\text{per}}(p) = k_{\text{per}} \frac{(pt_{\text{per}} + 1)}{pt}. \quad (109)$$

Таким образом, далее на основе уточнённых данных о составляющих вектора потокосцепления статора определяем составляющие пространственного вектора потокосцепления ротора в стационарной системе координат:

$$\psi_{ra}^* = \frac{1}{k_r} \psi_{sa}^u - \frac{l_e}{k_r} i_{s\beta}, \quad (110)$$

$$\psi_{r\beta}^* = \frac{1}{k_r} \psi_{s\beta}^u - \frac{l_e}{k_r} i_{s\beta}. \quad (111)$$

$$\mathcal{G}_{\psi_r}^* = \arctan \left( \frac{\psi_{r\beta}^*}{\psi_{ra}^*} \right) \quad (112)$$

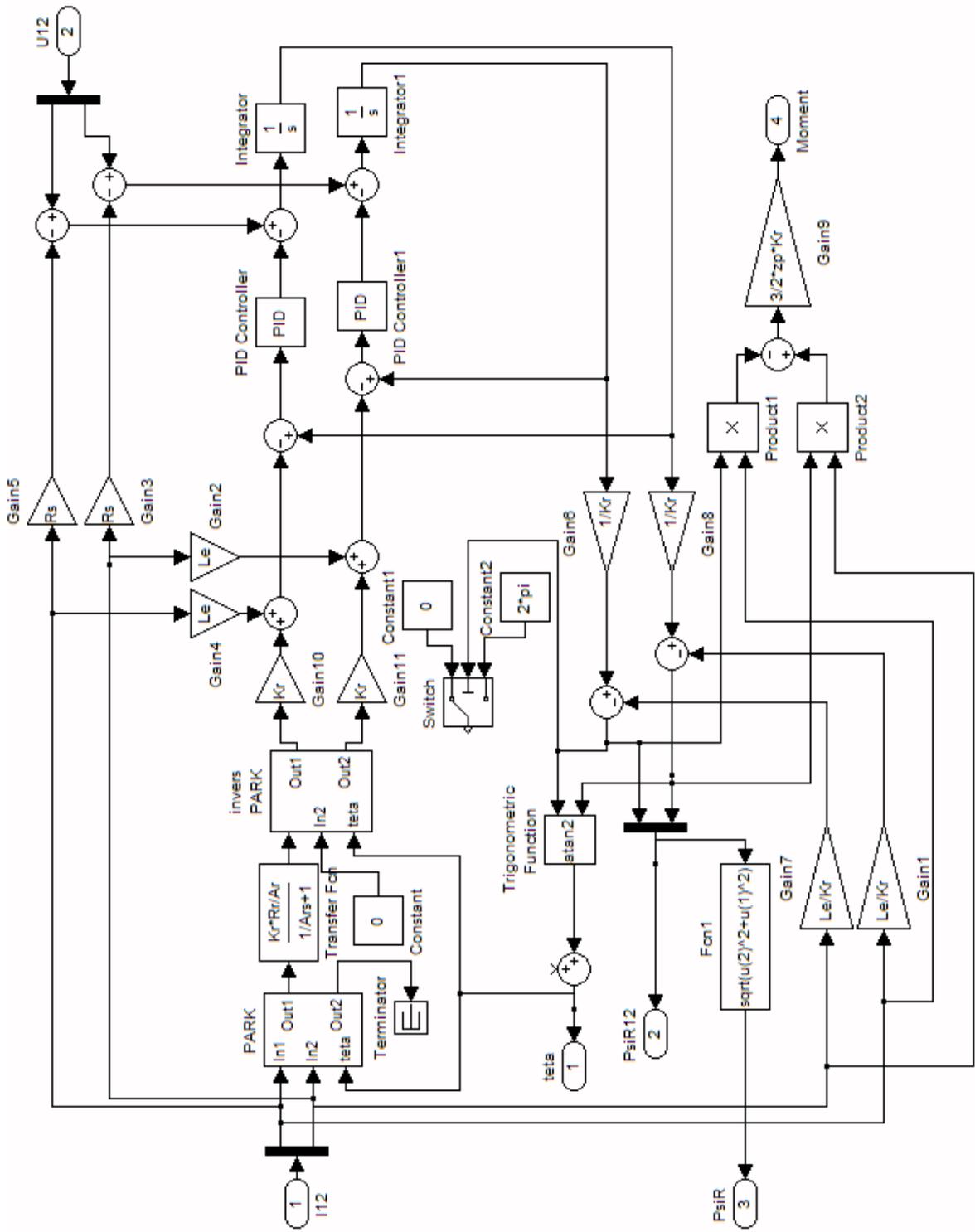


Рисунок 40 – Имитационная модель схема наблюдателя потокосцепления

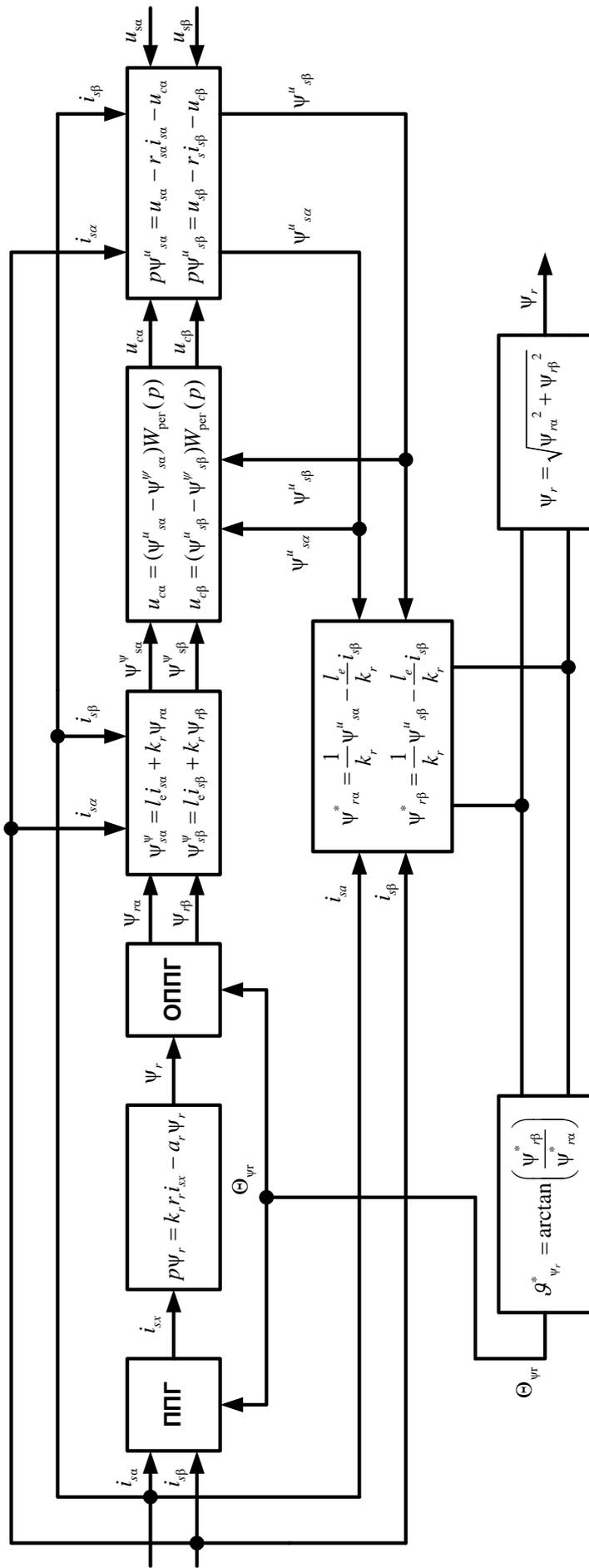


Рисунок 41 – Структурная схема наблюдателя потоковосцепления

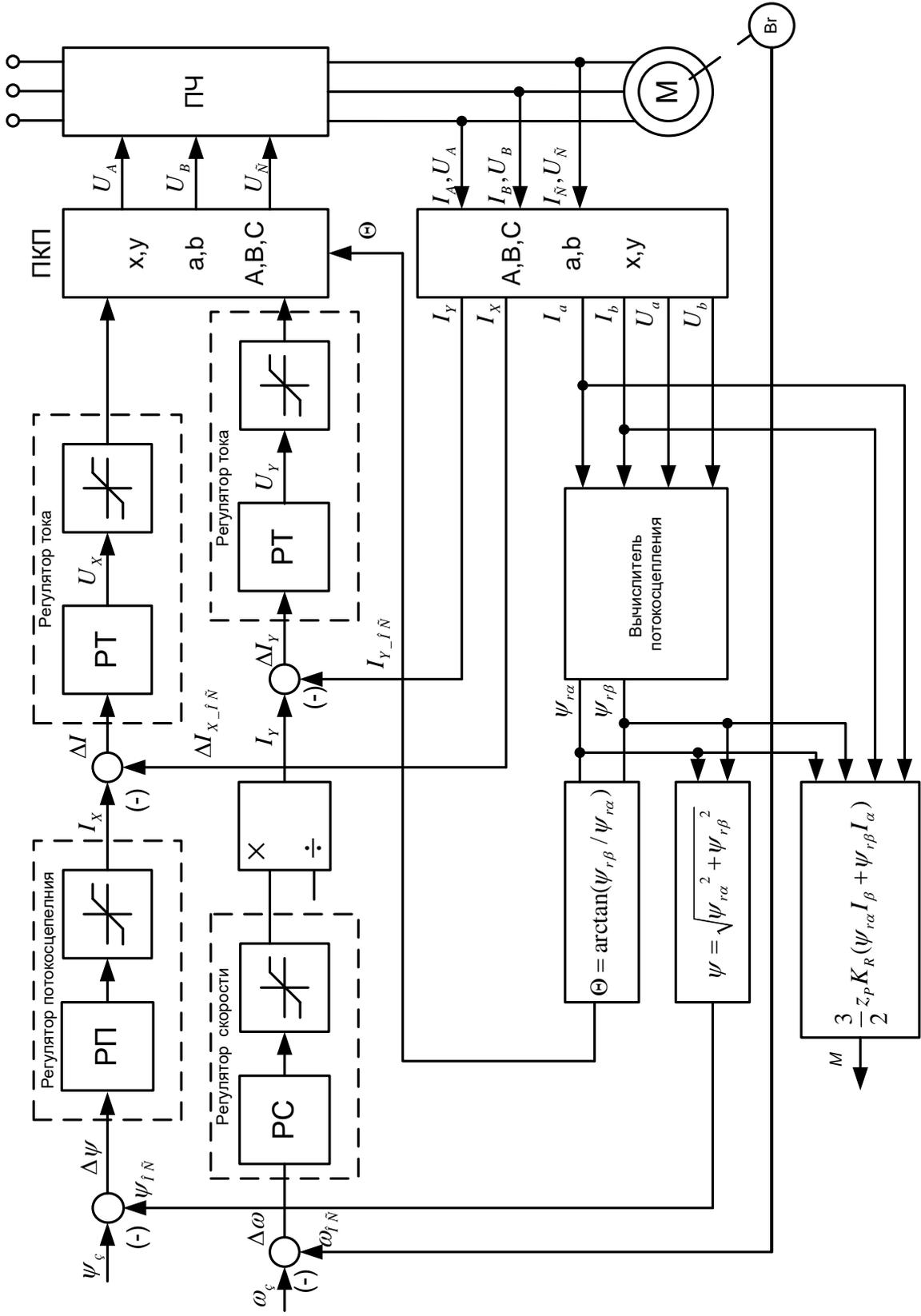


Рисунок 42 – Структурная схема с наблюдателем потокосцепления

Для оптимальной работы системы необходимо выбрать параметры ПИ регулятора следующими  $k=1$   $T_i=0,1$ .

### 3.4.2 Исследование переходных процессов в системе электропривода с векторным управлением на базе модуля идентификации.

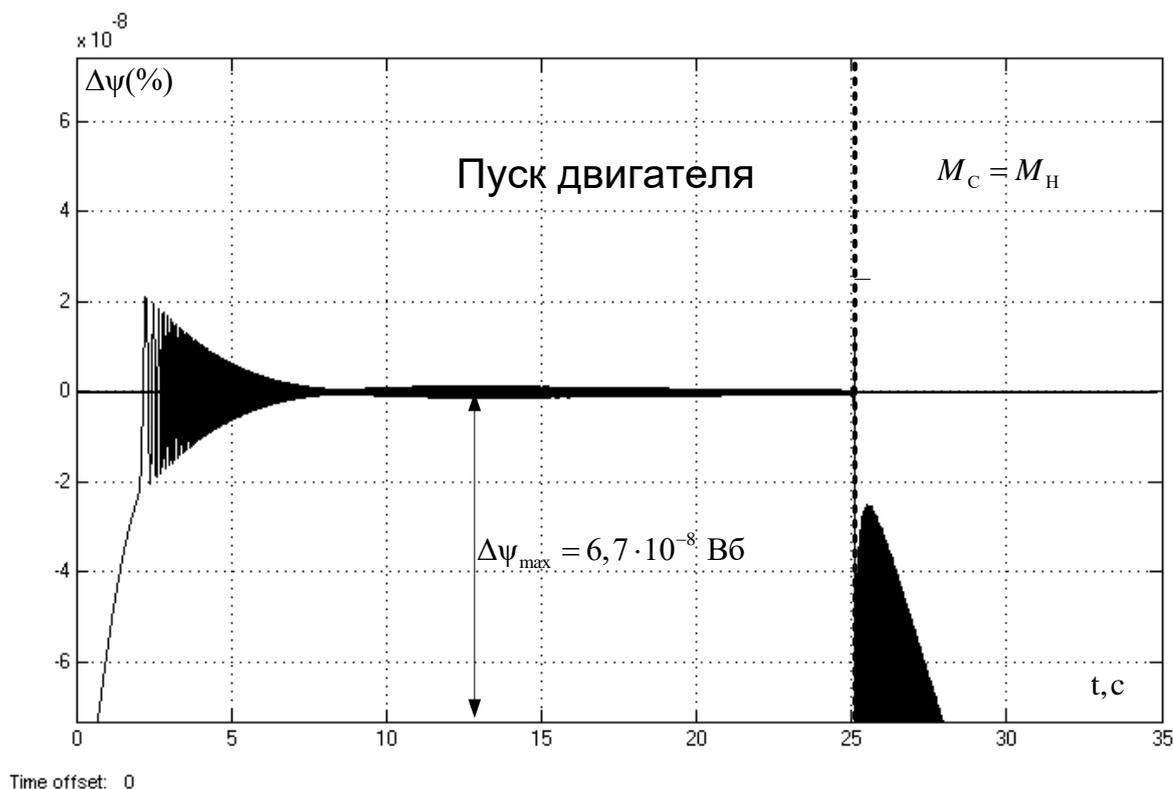


Рисунок 43 – График ошибки потокосцепления полученного с наблюдателя

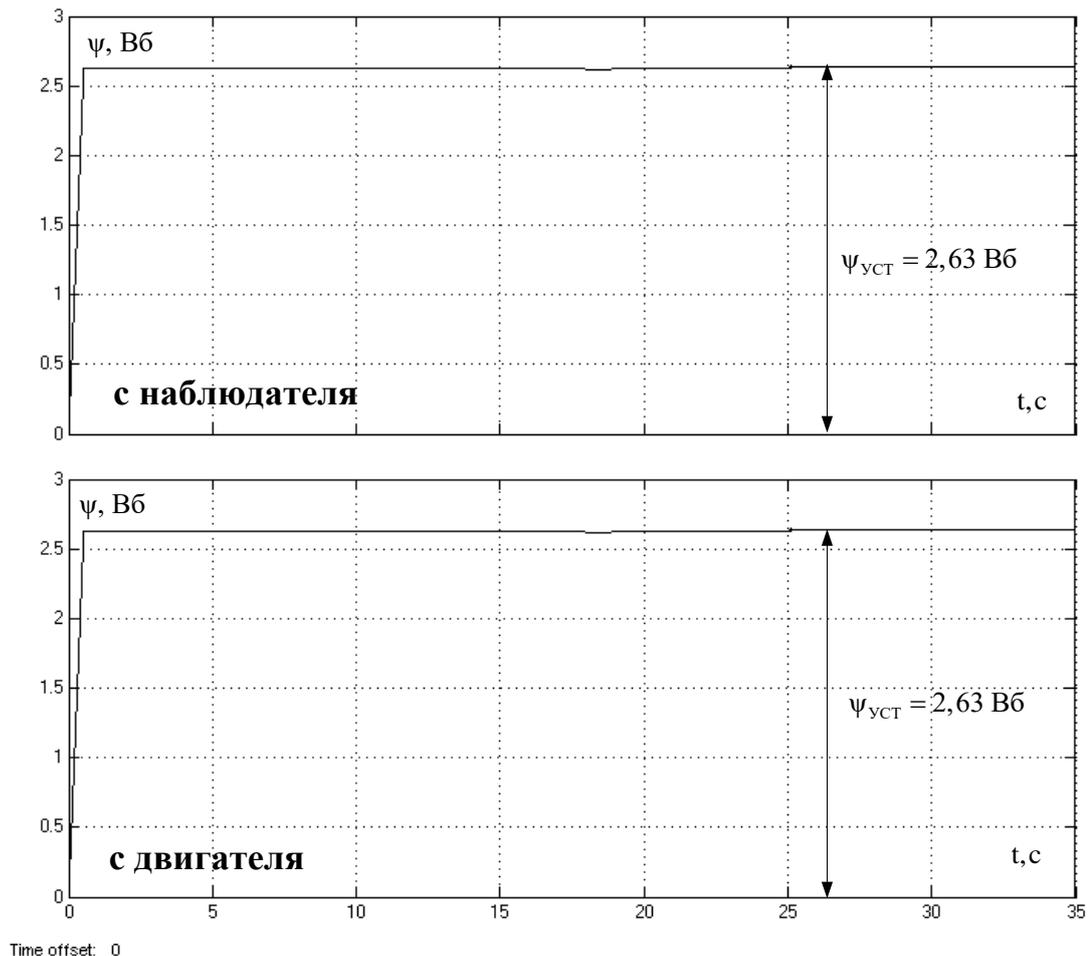


Рисунок 44 – Переходные процессы потокосцепления полученные с наблюдателя непосредственно с двигателя

Предлагаемый вычислитель потокосцепления позволяет на базе токов и напряжений определить его текущее значение. В основу вычислителя положены электромагнитные связи пространственного вектора потокосцепления статора с ротором, а также токов и напряжений статора.

Хорошая точность идентификатора потокосцепления объясняется, тем что он строится на математическом описании асинхронного двигателя, в реальности значение ошибки будет больше.

Из графика ошибки видно, что она имеет максимально значение при пуске и набросе нагрузки. В статике значение ошибки значительно уменьшается. Данный вычислитель хорошо подходит под заданные задачи электропривода, так как здесь нет частых пусков и большую часть времени он работает в статике.

### 3.5 Разработка математического описания технологического процесса ЭГПА

Основными параметрами, контролируемыми на компрессорных станциях, являются:

- количество транспортируемого газа;
- давление;
- температура на входе и выходе.

Уравнение работы компрессорных станций:

$$l = - \int_1^2 p dv + p_2 v_2 - p_1 v_1 \quad (113)$$

где  $p_1$  – входное давление, МПа;

$p_2$  – выходное давление, МПа;

$l$  – работа, Дж.

Из уравнения политропного сжатия  $p v^n = p_1 v_1^n$  имеем  $p = p_1 v_1^n / v^n$  и, следовательно,

$$l = - p_1 v_1^n \int_1^2 \frac{dv}{v^n} + p_2 v_2 - p_1 v_1 \quad (114)$$

где  $v_1$  – скорость движения газа на входе, м/с;

$v_2$  – скорость движения газа на выходе, м/с;

После интегрирования и алгебраических преобразований получается:

$$l = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (115)$$

где  $k / k - 1$  – показатель изоэнтропы.

Связь между давлением и температурами в политропных процессах определяется соотношением:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (116)$$

поэтому

$$l = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ \frac{T_2}{T_1} - 1 \right], \quad (117)$$

где  $T_1$  – входная температура, К;

$T_2$  – выходная температура, К;

На основе выше полученных выводов получаем выражения для расчета выходной температуры и давления:

Температура на выходе:

$$T_{\text{ВЫХ}} = \left[ 1 + \left( \frac{n}{n_0} \right)^2 \frac{(ZRT)_0}{(ZRT)_{\text{ВХОД}}} (\varepsilon_0^a - 1) \right] T_{\text{ВХОД}}. \quad (118)$$

Давление на выходе:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \left[ 1 + \left( \frac{n}{n_0} \right)^2 \frac{(ZRT)_0}{(ZRT)_{\text{ВХОД}}} (\varepsilon_0^a - 1) \right] P_{\text{ВХОД}}. \quad (119)$$

где  $n$  – частота вращения нагнетателя ГПА, об/мин;

$n_0 = 8200$  – номинальная частота вращения нагнетателя ГПА, об/мин;

$\varepsilon_0 = 1,26$  – приведенная степень сжатия, о.е;

$a = 0,85$  – политропный КПД, о.е;

$R = 838$  – газовая постоянная, Дж/кгК;

$Z$  – сжимаемость газа;

$T_{\text{ВЫХ}}$  – температура газа на выходе из нагнетателя, К;

$T_{\text{ВХ}} = 288$  – температура газа на входе в нагнетатель, К;

Момент нагрузки на валу двигателя определяется по следующему выражению:

$$M = \left( \frac{M_i}{\rho} \right) \frac{P_{\text{ВХ}}}{Z_1 T_{\text{ВХ}}} R \left( \frac{n}{n_H} \right)^3 + M_{\text{МЕХ}} \quad (120)$$

где  $\left( \frac{M_i}{\rho} \right)$  – коэффициент определяется на основе экспериментальных характеристик.

$M_{\text{МЕХ}}$  – момент механического сопротивления нагнетателя, Нм;

Количество транспортируемого газа:

$$Q = 105,087 D^{2.5} \sqrt{\frac{P_H - P_K}{\Delta \lambda_{\text{CP}} T_{\text{CP}} L}} \quad (121)$$

где  $D=1$  – внутренний диаметр газопровода, м;

$p_H$  и  $p_K$  – давление газа соответственно в начале и конце участка газопровода, МПа;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;

$\Delta$  – относительная плотность газа по воздуху;

$T_{\text{CP}}$  – средняя температура по длине газопровода, К;

$Z_{\text{CP}}$  – средний по длине газопровода коэффициент сжимаемости газа, К;

$L$  – длина участка газопровода, км.

На основе данного математического описания была составлена имитационная модель нагнетателя, которая представлена на рисунке 49. Она является упрощенной, так как в математическом описании реализован принцип подобия. С помощью данной модели можно увидеть, как меняется с изменением скорости вращения вала двигателя расход газа и давление рисунок 51-55. Основная задача электропривода это регулирование расхода газа на выходе нагнетателя, при этом давление в системе должно оставаться практически неизменным. Это реализуется с помощью антипомпажного крана, который регулирует расход газа и предотвращает срыв привода в помпаж. Данный кран пускает часть газа с выхода на вход и тем самым поддерживает давление в системе при разных оборотах асинхронного двигателя. Степень

открытия антипомпажного крана определяет сколько газа снова пойдет на  
ВХОД.

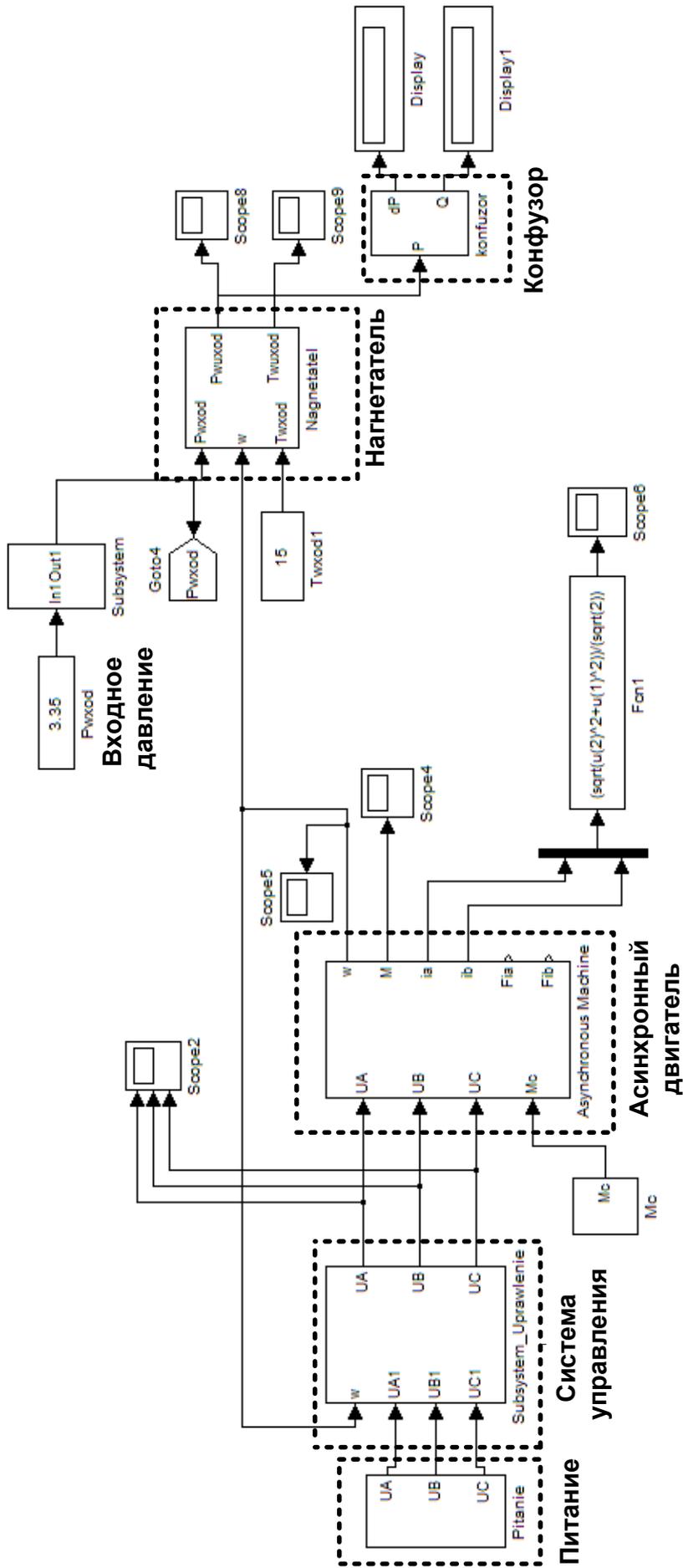


Рисунок 47 – Модель газоперекачивающего агрегата

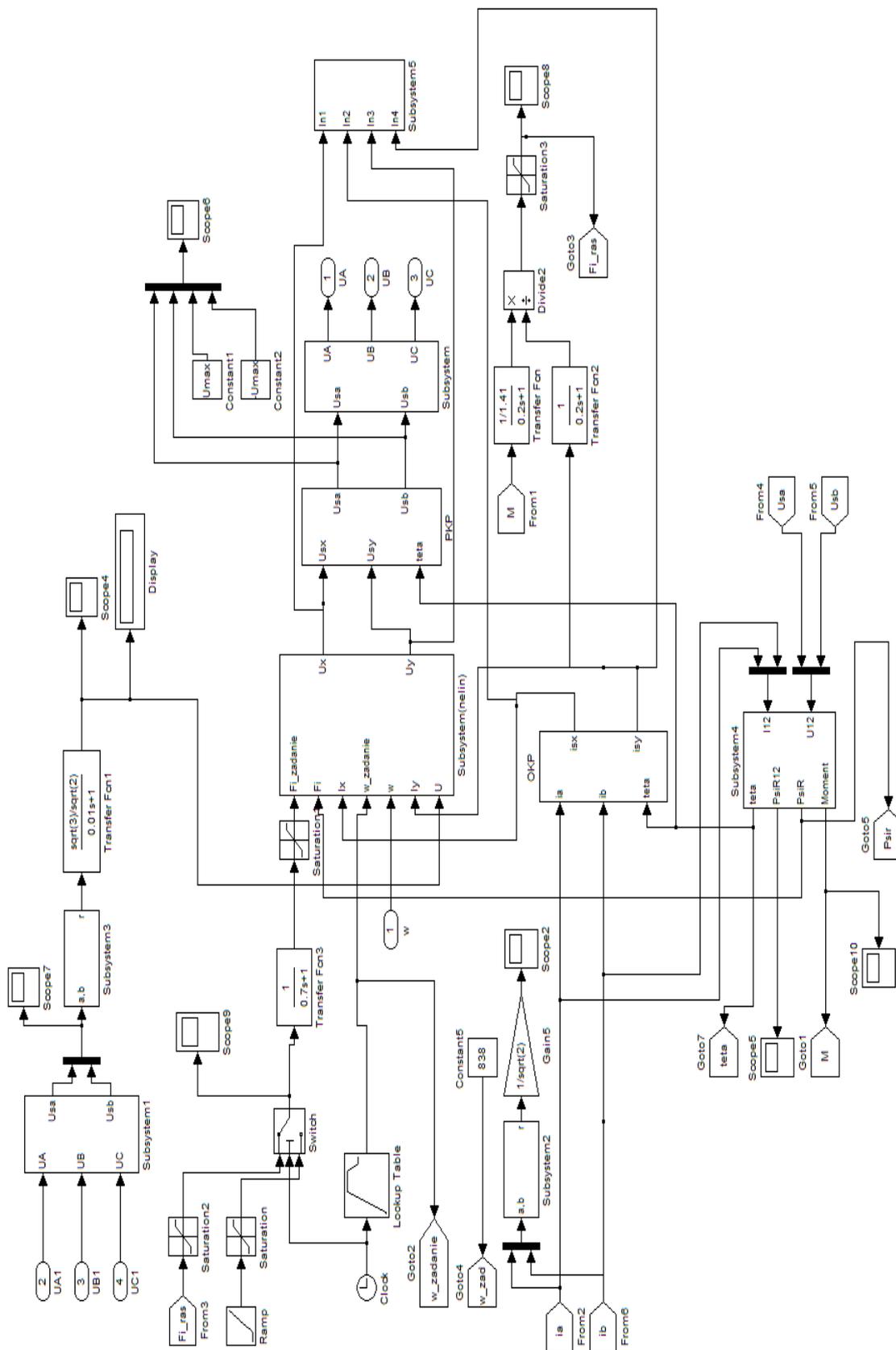


Рисунок 48 – Система управления

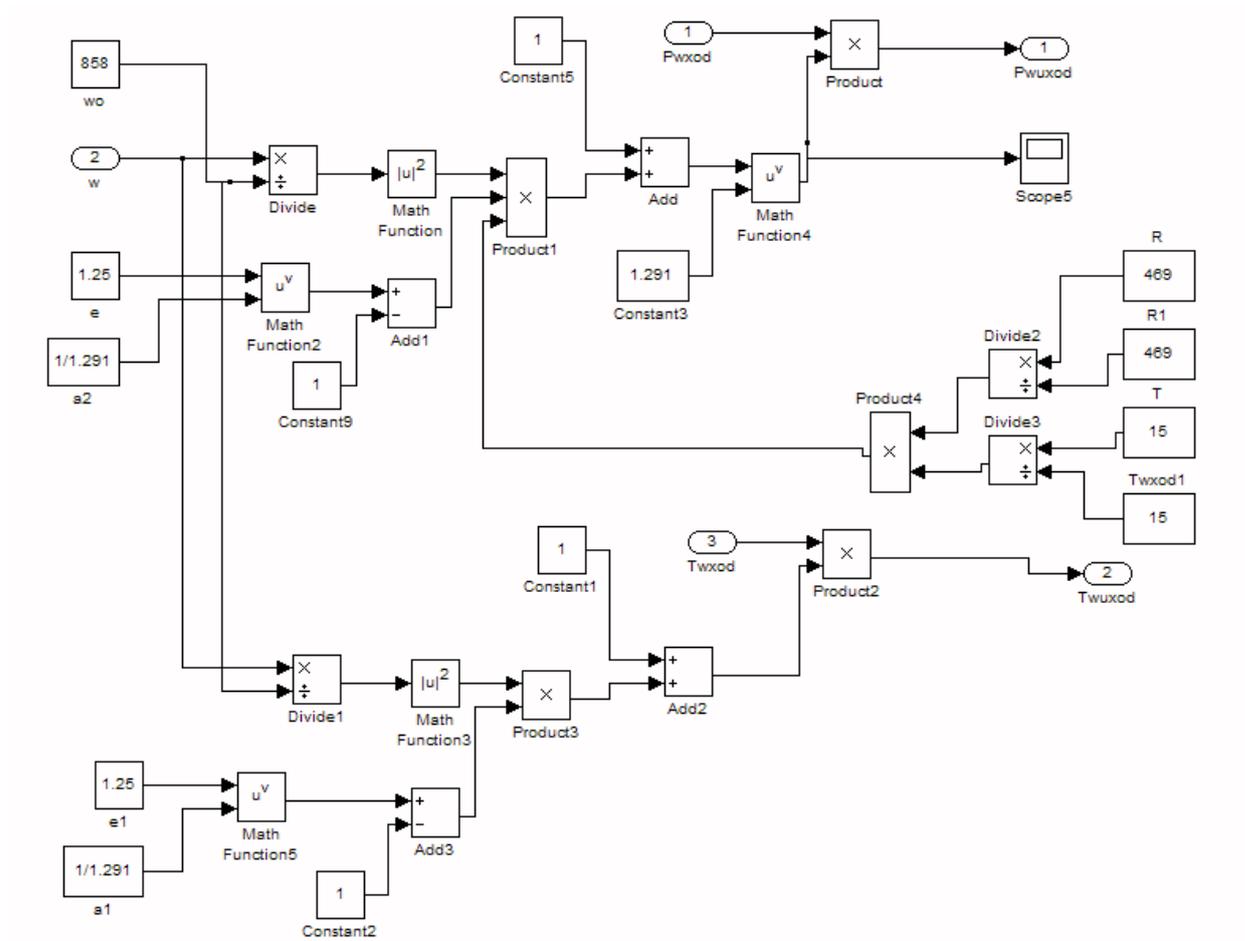


Рисунок 49 – Имитационная модель нагнетателя

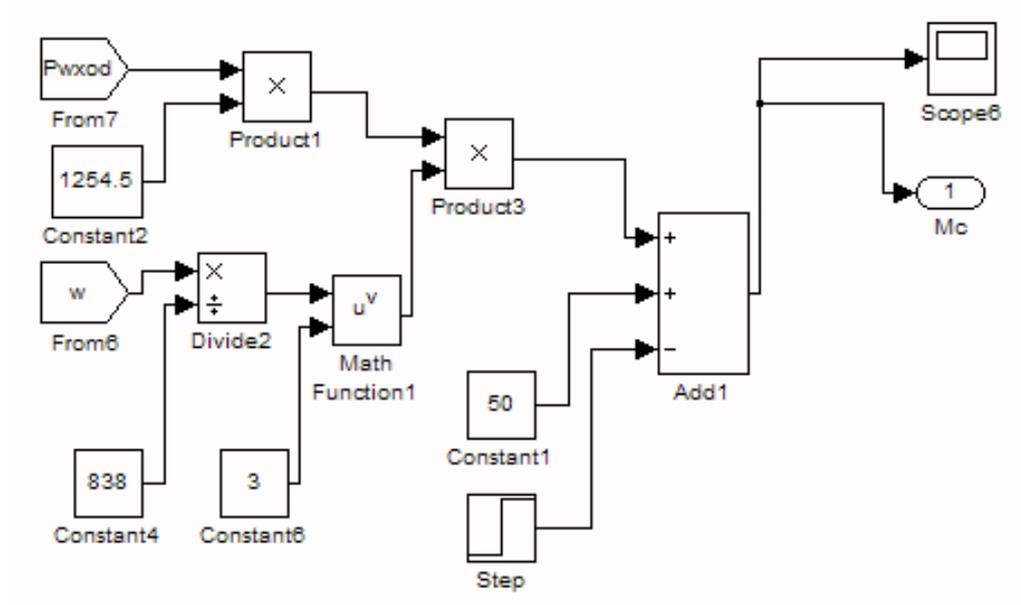
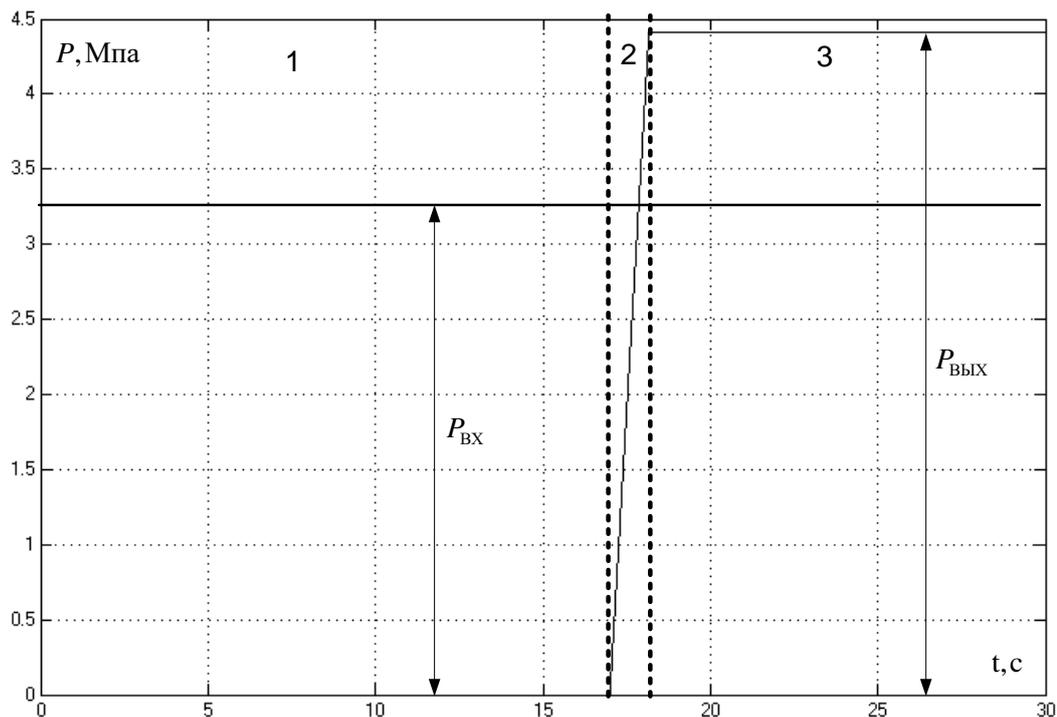
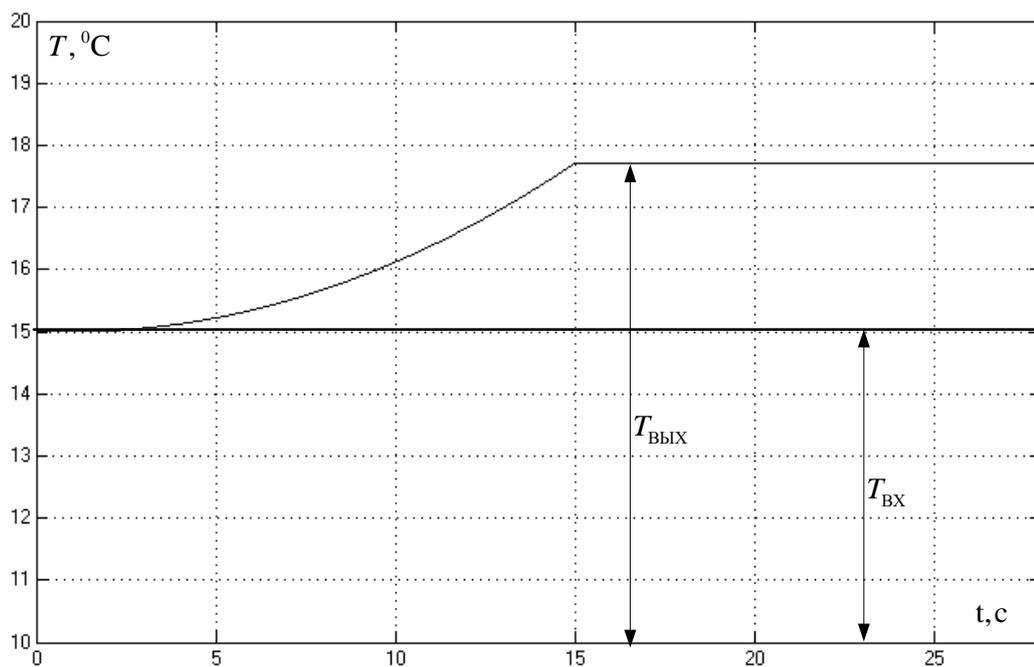


Рисунок 50– Имитационная модель нагрузки



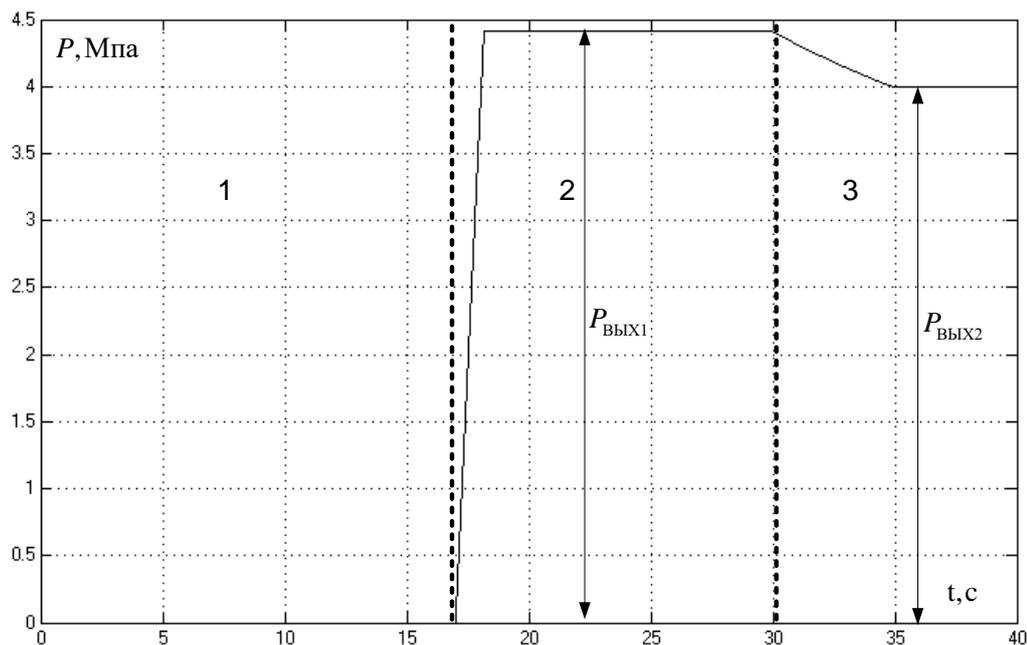
Time offset: 0

Рисунок 51 – График давления на выходе нагнетателя  
 1 – пуск двигателя, 2 – открытие крана (наброс нагрузки),  
 3 – установившейся режим работы нагнетателя



Time offset: 0

Рисунок 52 – График температуры газа

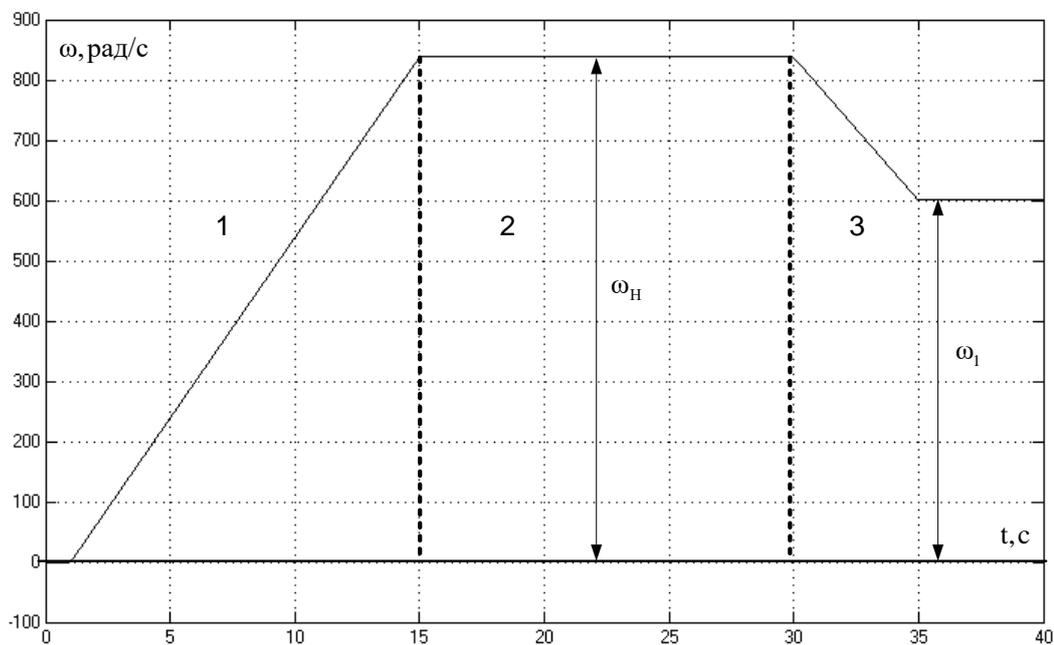


Time offset: 0

Рисунок 53– График давления на выходе нагнетателя при  $\omega = \text{var}$

1 – пуск двигателя, 2 – работа нагнетателя на давлении  $P_{\text{ВЫХ1}}$

3 – выход на давление  $P_{\text{ВЫХ2}}$



Time offset: 0

Рисунок 54– График давления на выходе нагнетателя

1 – пуск двигателя, 2 – выход на номинальную скорость  $\omega_{\text{н}}$

3 – выход на скорость  $\omega_1$

## Регулирование расхода газа

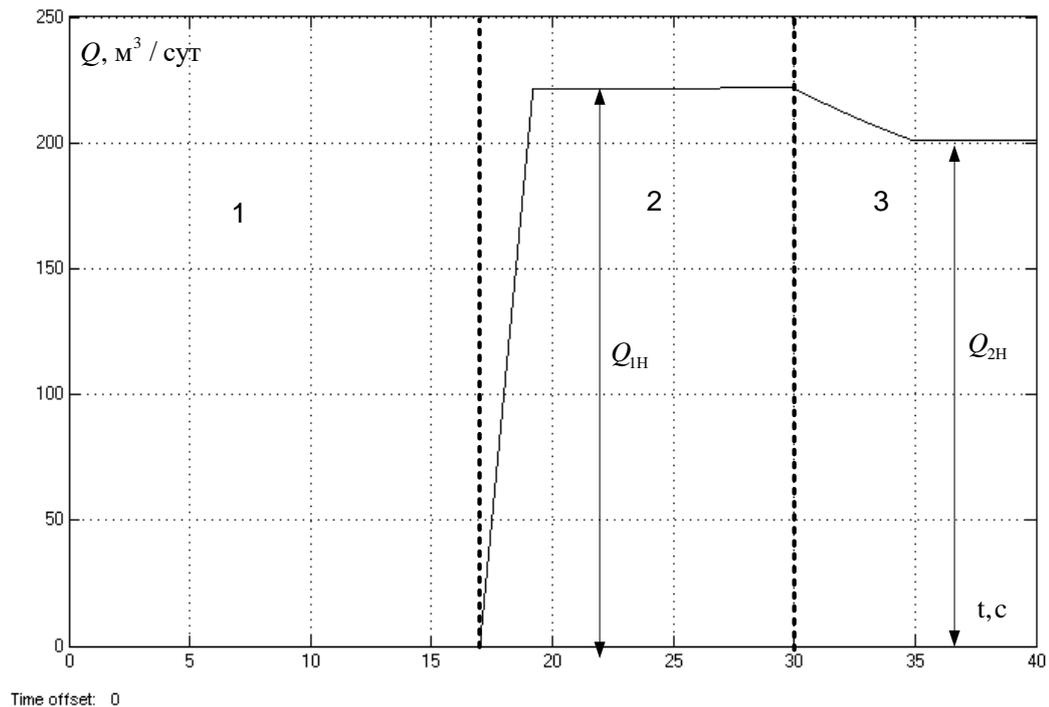


Рисунок 55 график изменения расхода газа

1 – пуск двигателя, 2 – выход на  $Q_{1H}$  3 – выход на  $Q_{2H}$

Так как в технологической цепочке участвует не один ЭГПА, а сразу несколько и необходимо обеспечить требуемый расход газа на выходе и оптимальную загрузку каждого агрегата. На данный момент оператор сам управляет расходом газа, путем задания скорости вращения для каждого агрегата. Такой способ управления является менее удобным, но более надежным, так как человек сам принимает то или иное решение исходя из данной ситуации. Система управления всегда действует по некому заданному алгоритму и учесть всех различных аварийных и нестандартных ситуаций не может, поэтому важным звеном в данной цепи управления остается оператор, который принимает окончательное решение.

Данная математическая модель позволяет проводить исследования и смотреть, как ведет себя электропривод в тех или иных ситуациях. Для более точного исследования необходимо улучшать математическое описание технологического процесса.

## **Глава 4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ВКР**

### **4.1 Технико-экономическое обоснование применения регулируемого электропривода**

Возможность повышения эффективности использования электроэнергии всегда рассматривалась не только как задача рационального использования ресурсов. Во всём мире задачи энергосбережения являются основой в программах сохранения экологии. В Российской Федерации данный вопрос имеет свою специфику, связанную не столько с экологией, сколько с относительной бедностью большинства промышленных предприятий.

Электроприводы насосов, вентиляторов, компрессоров потребляют 20 - 25 процентов всей вырабатываемой электроэнергии. В основном большинстве случаев электроприводы указанных механизмов являются нерегулируемыми, что не позволяет обеспечить режим рационального энергопотребления и расхода воды, пара, воздуха и т.д. при изменении технологических потребностей в широких пределах.[19]

Примером таких механизмов являются газокompрессорные станции. Существующие системы с нерегулируемым электроприводом не обеспечивают заметного снижения потребляемой мощности, увеличивают эксплуатационные затраты во время профилактических работ, уменьшают срок службы оборудования магистральных газопроводов. Возможность изменения скорости компрессора связана сезонным потреблением газа.

Реальная экономия электроэнергии, обусловленная применением регулируемого электропривода в системах автоматизированного управления компрессорными установками, составляет 5-15 процентов, в отдельных случаях 20-30 процентов. Во многих случаях основная часть величины сэкономленной энергии обеспечивается приведением в соответствие характеристик компрессора и магистрали. При этом реально следует иметь ввиду весь комплекс снижения затрат – от снижения расхода газа за счёт оптимизации давления на выходе нагнетателя, до увеличения ресурса газоперекачивающего агрегата и газопровода за счёт снижения механических

нагрузок, как во время пуска и останова, так и во время стабильной работы. Также использование преобразователя частоты позволяет понизить пусковые токи, что в свою очередь благотворно влияет на эксплуатируемое оборудование, продляя срок его эксплуатации.

Квадратичная зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от питающего напряжения определяет возможный останов двигателя уже при небольшом снижении напряжения, что приводит к полной остановке технологического процесса. Для повторного запуска агрегата необходимо выполнить ряд процедур запуска, продолжительных по времени. Эти мероприятия увеличивают затраты на эксплуатацию.

Целью данного раздела ВКР является анализ проведения бригадой пусконаладочных работ регулируемого электропривода газоперекачивающего агрегата.

Пусконаладочные работы при монтаже электроприводов и их установке являются завершающей стадией процесса строительства – монтажных работ. Большой уровень механизации и автоматизации производства, повышенные требования к электроприводу и к продукции увеличивают объем наладочных работ и выделяют их в самостоятельный вид деятельности. От качества проведения пусконаладочных работ зависит бесперебойность работы, безопасность и экономичность обслуживания электрооборудования газоперекачивающего агрегата.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- Составить план пусконаладочных работ
- Определить исполнителей
- Составить смету затрат

## **4.2 Структура пусконаладочных работ**

Структуру пусконаладочных работ определяем исходя из сложности серийно-выпускаемых, освоенных промышленностью электротехнических

устройств в соответствии с требованиями СНиП «Организация, производство и приемка работ», с требованиями «ПУЭ», а также исходя из технических условий на изготовление и поставку электротехнических устройств.

Полный комплекс пусконаладочных работ включает в себя:

1. Подготовительные работы;
  - 1.1. Организационная и инженерная подготовка работ;
  - 1.2. Изучение электрической части проекта и ознакомление с технической документацией предприятия-изготовителя оборудования;
  - 1.3. Подготовка парка приборов и приспособлений, а также программ наладки и комплекса форм протоколов;
2. Пуско-наладочные работы, проводимые до индивидуальных испытаний агрегата;
  - 2.1. Внешний осмотр электрооборудования на предмет соответствия проекту;
  - 2.2. Проверка электрооборудования, Проверка силовых цепей электропривода;
  - 2.3. Проверка схемы сигнализации;
3. Наладка электрооборудования под напряжением;
  - 3.1. Снятие и настройка необходимых характеристик и сопоставление их с расчетными данными проекта;
  - 3.2. Испытание и наладка системы РЭП газоперекачивающего агрегата вхолостую и под нагрузкой;
4. Обеспечение на электроустановке электрических параметров и режимов, предусмотренных проектом, а также обеспечение устойчивой работы в эксплуатационных режимах;
  - 4.1. Оформление отчетной и приемно-сдаточной документации;
  - 4.2. Оформление в одном экземпляре протоколов пусконаладочных работ и испытаний электропривода;
  - 4.3. Внесение в один экземпляр принципиальных схем проекта, данных измерений, выполненных в процессе пусконаладочных работ.

На выполнение всех пусконаладочных работ отведено 52 рабочих дня; в том случае, если бригада не укладывается в отведенные на пусконаладочные работы часы, то работы проводятся во внеурочное время с оплатой труда такой же, как и в рабочее время. За выполнением сроков проведения пусконаладочных работ следят инженеры-технологи. Техника безопасности запрещает производить работы на высоковольтном оборудовании менее чем 2-м рабочим. [20]

### 4.3 Исполнители работ

Состав и численность бригады определяется исходя из квалификации работников, а также выполнения пусконаладочных работ и техники безопасности.

В данном случае вышестоящее руководство назначает инженера по наладке и испытаниям первой категории руководителем бригады наладчиков, состоящей из 5-и человек, в состав которой входят:

Руководитель – инженер по наладке и испытаниям первой категории – 1 человек

Инженер по наладке и испытаниям первой категории – 1 человек

Инженер по наладке и испытаниям второй категории – 1 человек

Инженер по наладке и испытаниям третьей категории – 1 человек

Электромонтер по ремонту и наладке электрооборудования – 1 человек

Комплекс работ разобьем на этапы и определим в процентном соотношении объем выполнения работ по каждому этапу при наладке электропривода газоперекачивающего агрегата. Результаты сведены в таблицу 10.

$$t_{\text{ожидаемое}} = \frac{3t_{\text{min}} + 2t_{\text{max}}}{5}, \quad (122)$$

Таблица 10 – Содержание этапов пусконаладочных работ

№	Содержание этапов работы	Объем работы, %	Продолжительность этапа, часов	Исполнители
<b>1.</b>	<b>Подготовительные работы</b>	<b>6</b>	<b>24</b>	
1.1	Изучение проектной документации, составление замечаний и разработка рекомендаций по их устранению	1.6	6,4	1
1.2	Составление рабочего графика проведения ПНР и согласования его с предприятием	0,9	4	2
1.3	Подготовка рабочих мест, аппаратуры, инструмента	0.7	2,4	2
1.4	Внешний осмотр электрооборудования и проверки соответствия проекту	0.4	1,6	2,3
1.5	Оказание технической помощи по приемке установки из монтажа, составление ведомости дефектов; контроль за устранением	0.6	2,4	1
1.6	Ревизия силовой установки, прозвонка цепей	1,7	7,2	3
<b>2.</b>	<b>Проверочные работы</b>	<b>19.5</b>	<b>80</b>	
2.1	Проверка количества ПНР и их соответствие рабочим чертежам	2,1	8,8	1,2,3
2.2	Проверка установленной аппаратуры и снятие в необходимых случаях характеристик, градуировка	5,3	21,6	1,2,3
2.3	Изменение аппаратных параметров оборудования и электрических схем	4,3	17,6	1,3
2.4	Проверка и настройка работы электрических систем дистанционного управления, блокировок и автоматики	7.8	32	1,2
<b>3.</b>	<b>Наладочные работы</b>			
<b>3.1</b>	<b>Преобразовательный трансформатор</b>	<b>2.4</b>	<b>16</b>	
3.1.1	проверка и снятие характеристик обмоток трансформатора	0.4	2,4	2,4
3.1.2	измерения характеристик изоляции	0.3	2,4	2,4
3.1.3	проверка устройств вторичной коммутации трансформатора до первого промежуточного клеммного ряда зажимов вне трансформатора	1	4,8	4
3.1.4	испытание вводов	0.3	2,4	3,4
3.1.5	проверка устройств переключения напряжения трансформатора под нагрузкой	0.2	1,6	2,4
3.1.6	проверка газовой защиты силовых трансформаторов замыканием выходных зажимов контактов реле	0.1	1,2	3,4
3.1.7	фазировка обмоток трансформатора	0.1	1,2	2
<b>3.2</b>	<b>Преобразователь частоты ПЧТ 10.6000.3.Ж.01</b>	<b>41,7</b>	<b>144</b>	
3.2.1	проверка схем управления преобразователем на функционирование в соответствии с техническими условиями и их настройка	7.8	33,6	1,2,3
3.2.2	настройка и проверка защит преобразователя	13	40	2,3,4
3.2.3	фазировка силовой схемы с системой управления преобразователем, а также с сетью	2	8	1,4

Продолжение таблицы 10

3.2.4	проверка устройств сигнализации и контроля работы плеч преобразователя	9	31,2	1,2,3
3.2.5	снятие электрических характеристик преобразователя	10	27,2	1,3
3.2.6	опробование на холостом ходу и под нагрузкой во всем диапазоне регулирования	1	4	1,2,3,4
<b>3.3</b>	<b>Асинхронный двигатель</b>	<b>0.4</b>	<b>16</b>	
3.3.1	определение возможности включения электрических машин без сушки с измерением коэффициента абсорбции	0.1	4	3,5
3.3.2	снятие электрических характеристик	0.2	8	3,5
3.3.3	опробование электрических машин на холостом ходу и под нагрузкой	0.1	4	3,5
<b>3.4</b>	<b>Станция автоматического управления</b>	<b>18,5</b>	<b>80</b>	
3.4.1	наладка коммутационных устройств низкого напряжения	5	21,6	1,2,3
3.4.2	проверка элементов систем автоматического управления и регулирования на функционирование	7	30,4	1,2,3,4
3.4.3	согласование характеристик элементов и функциональных групп систем автоматического управления и регулирования	4	17,6	1,3,4
3.4.4	настройку выходных параметров функциональных групп с помощью органов настройки	2	8	2,4
3.4.5	проверку кабельных связей системы управления и регулирования между отдельными устройствами и функциональными группами	0.5	2,4	1,3
<b>3.5</b>	<b>Общие</b>			
3.5.1	Измерение сопротивления изоляции и испытания повышенным напряжением	0.5	2,4	1,2,3
<b>4.</b>	<b>Комплексное опробование</b>	<b>3</b>	<b>16</b>	
4.1	Испытание преобразователя на холостом ходу	1	5,2	1,2,3
4.2	Опробование и корректировка работы при рабочей нагрузке	1	5,4	1,2,3,4
4.3	Проверка режимов работы при управлении с поста управления	1	5,4	1,2
<b>5</b>	<b>Оформление отчетной и приемно-сдаточной документации</b>	<b>8</b>	<b>32</b>	
5.1	Обработка материалов испытания	2	8	1
5.2	Составление инструкции по эксплуатации	2	8	1,2,3
5.3	Внесение в один экземпляр принципиальных схем проекта изменений, во время проведения ПНР	1	4	1
5.4	Оформление и выпуск технического отчета	3	12	1,2
<b>ИТОГО:</b>			<b>410,4</b>	

Составим линейный график проведения пусконаладочных работ.

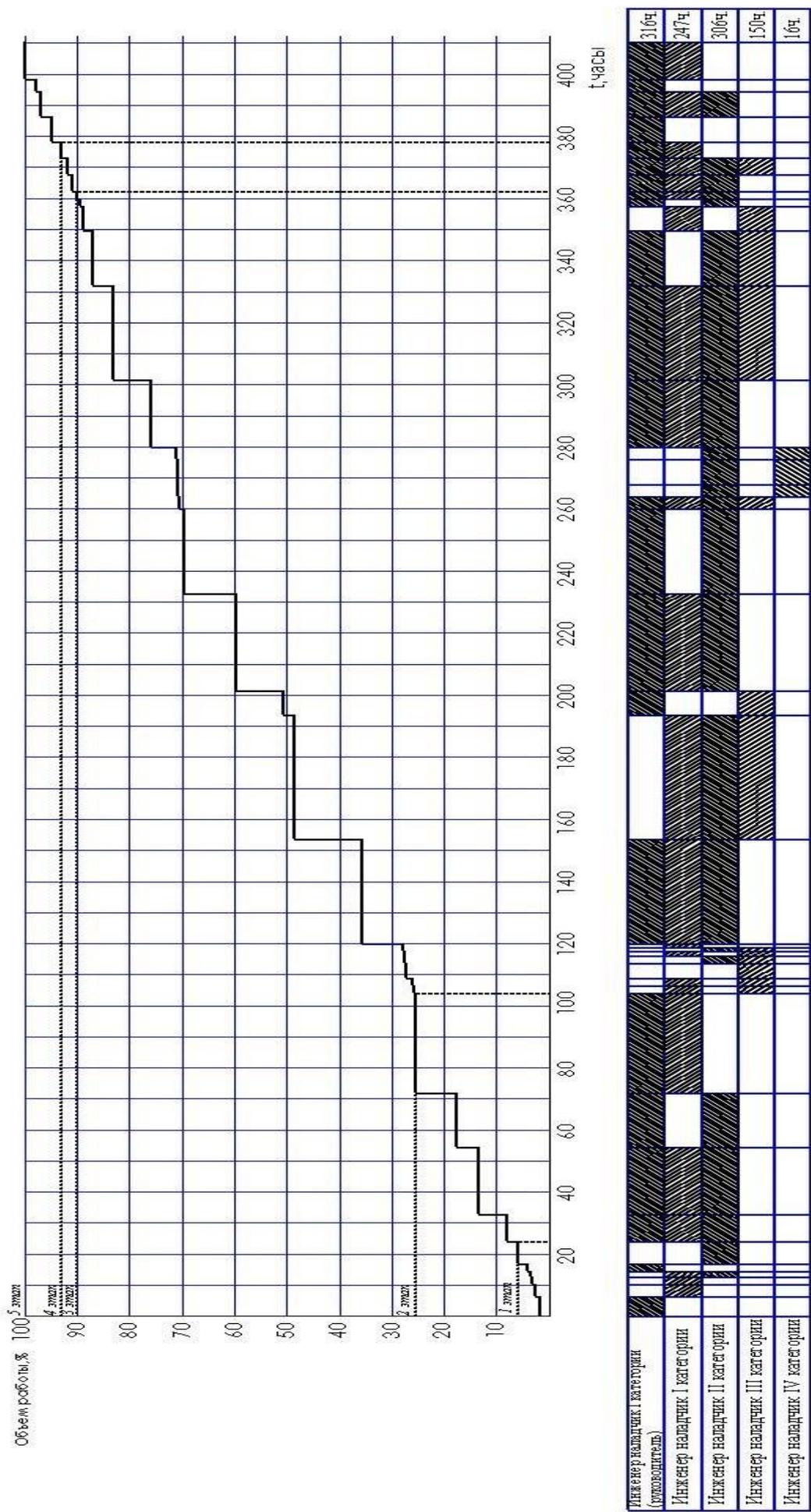


Рисунок 56 – Линейный график выполнения ПНР

#### 4.4 Определение сметной стоимости пусконаладочных работ

Стоимость пусконаладочных работ для газоперекачивающего агрегата исчисляется суммированием затрат на работу со следующим электрооборудованием:

- преобразователь частоты;
- электродвигатель;
- система автоматического управления ЭГПА;
- система электроснабжения оборудования ЭГПА;
- система управления магнитными подвесами.

Стоимость пусконаладочных работ для электропривода машины включает в себя:

- Стоимость материалов;
- Основную заработную плату;
- Дополнительную заработную плату;
- Отчисления на социальные нужды;
- Накладные расходы;
- Прочие затраты.

Стоимость материалов, необходимых для проведения пусконаладочных работ, рассчитываем в таблицу 11

Таблица 11 – Стоимость материалов

№	Наименование	Единицы измерения	Норма расхода	Стоимость, руб.	
				За единицу	всего
1	Лента поливинилхлоридная электроизоляционная	кг	0.3	150	45
2	Трубка электромонтажная ХВТ-5УХЛ-2.5	кг	0.2	35	7
3	Трубка электромонтажная ХВТ-16УХЛ-2.5	кг	0.2	36	1.8
4	Металлорукав	м	10	20	200
5	Провод ВВГ 3х2.5	м	20	12	240
6	Провод ВВГ 3х1.5	м	20	8	160
7	Бензин А-92	л	3	32	96
8	Маркер для надписей на ПВХ	шт.	2	190	280
9	Бумага для печати	шт.	1	200	200
10	Спирт технический	л	0.5	100	50
11	Канифоль или флюс КСп	л	0.2	35	7
12	Ветошь	кг	10	10	100
13	Перчатки ХБ	пар	15	12	180
<b>Итого</b>					<b>1566.8</b>

Сметная стоимость пусконаладочных работ включает в себя основную и дополнительную заработную плату пусконаладочного персонала, рассчитанную на основе тарифных сеток и среднемесячных должностных окладов, без премирования. [20]

По классификационным признакам бригада наладчиков характеризуется профессиональным составом и сменностью работы как специализированная из рабочих одной профессии, выполняющих технологически однородные работы; работа сменная (работа в первую смену); техника безопасности запрещает производить работы на высоковольтном электрооборудовании менее 2-х рабочих.

При наладке оборудования применяется почасовая оплата труда. Бригада наладчиков работает по восемь часов в день. При такой системе, заработная плата рабочего определяется за реально отработанное время. При выполнении работ, в условиях отличных от нормальных, к заработной плате применяются поправочные коэффициенты:

1,3 - коэффициент проведение работ вблизи действующих электроустановок, находящихся под напряжением;

1,3 - районный коэффициент.

Основная заработная плата членов бригады определяется:

$$ОЗП = C_{\text{тр.ст}} \cdot n \cdot K_p \cdot K_{\text{п}} = 188 \cdot 316 \cdot 1.3 \cdot 1.3 = 100,4 \text{ тыс. руб.}$$

где  $C_{\text{тр.ст}}$  – тарифная ставка, рублей;

$n$  - количество отработанного времени в смене, час;

$K_p$  - районный коэффициент;

$K_{\text{п}}$  - поправочный коэффициент.

Продолжительность проведения пусконаладочных работ определяется исходя из профессионального опыта бригады и проведения аналогичных видов работ, и составляет 52 рабочих дня.

Затраты на основную заработную плату представлены в таблицу 12.

Таблица 12 – Затраты на основную заработную плату

№	Состав бригады	Разрядили квалификация	Тарифная ставка руб./час	Количество рабочих часов	Заработная плата, тыс. руб.
1	Инженер по наладке и испытаниям (руководитель)	I категория	188	316	100,4
2	Инженер по наладке и испытаниям	I категория	166	247	69,3
3	Инженер по наладке и испытаниям	II категория	158	306	81,8
4	Инженер по наладке и испытаниям	III категория	146	150	37,1
5	Электромонтер по ремонту и наладке электрооборудования	6 <sup>ой</sup> разряд	138	16	3,8
	<b>Итого</b>			<b>292,4</b>	

Дополнительная заработная плата производится на оплату отпусков за не проработанное время и составляет 15 процентов от основной заработной платы.

$$ДЗП = 0.15 \times ОЗП$$

где *ОЗП* - основная заработная плата, руб.;

*ДЗП* - дополнительная заработная плата, руб.

$$ДЗП = 0.15 \times 292400 = 43860 \text{руб.}$$

Отчисления во внебюджетные страховые фонды 30 процентов:

$$С_{ЕСН} = (ОЗП + ДЗП) \times 0.3$$

$$С_{ЕСН} = (292,4 + 43860) \times 0.3 = 100 \text{ тыс.руб.}$$

Величина накладных расходов определяется как 80 процентов от основной заработной платы.

$$НР=0.8 \cdot ОЗП=0.8 \cdot 292400=234\ 000 \text{ рублей.}$$

Сметная стоимость на проведение пусконаладочных работ газоперекачивающего агрегата представлена в таблице 13.

Таблица 13 – Сметная стоимость пусконаладочных работ

№	Наименование статей	Сумма, тыс. руб.	Структура %	
			Себестоимость	Цены
1	Материальные расходы	1,5	0,2%	-
3	Полная заработная плата	336,3	50,0%	-
4	Отчисления в страховые фонды	100,9	15,0%	-
7	Накладные расходы	233,9	34,8%	-
8	Себестоимость	672,6	100,0%	0,6
9	Прибыль	134,5	-	4,1
10	Цена предприятия	807,1	-	4,7%
11	НДС	145,3	-	5,3%
12	<b>Договорная цена</b>	<b>952,4</b>		<b>100%</b>

Пусконаладочные работы будут выполнены в рамках договорной цены, которая составляет 952,4 тысяч рублей заказчик предоставит все монтируемое оборудование. [20]

В данном разделе были рассмотрены мероприятия (пусконаладочных работ), не обходимые для введения в эксплуатацию электропривода газоперекачивающего агрегата. Весь комплекс работ разбит на отдельные этапы. В разделе определено время выполнения каждого этапа пусконаладочных работ. Согласно полученным данным был построен линейный график проведения пусконаладочных работ, а также определена сметная стоимость работ.

- Продолжительность работ составляет 52 рабочих дня.
- Численность бригады 5 человек:
  - 1) руководитель – инженер первой категории;
  - 2) инженер первой категории;
  - 3) инженер второй категории;
  - 4) инженер третьей категории;
  - 5) электромонтер шестого разряда
- Сметная стоимость пусконаладочных работ составляет **952368** рубля.

## **Глава 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Целью разработки настоящего раздела является принятие проектных решений, исключающих несчастные случаи и профессиональные заболевания в производстве, обеспечивающих снижение вредных воздействий на окружающую среду, безопасность в чрезвычайных ситуациях, экономное расходование ресурсов.

Рассмотрение данных вопросов отвечает требованиям международного стандарта ICCSR-26000:2011 к деятельности организаций в области социальной ответственности по тем разделам его модулей, по которым должны быть приняты указанные проектные решения.

Объектом проектирования является электропривод газоперекачивающего агрегата.

### **5.1 Анализ вредных факторов**

Часть технологического процесса исследования и проверки электропривода нагнетательной установки основана на работе с двигателем, который в свою очередь является источником повышенного уровня шума, что является вредным фактором производственной среды [8]. Чтобы уменьшить влияние шума, можно применять различные меры такие как: замена подшипников качения на подшипники-скольжения, проверка и своевременная замена смазочных материалов у подшипников. Но такие меры слишком затратные и трудоемкие. Поэтому также возможно использовать различные ограждения из звукопоглощающих материалов и отдельных частей установки для снижения уровня шума.

Опасность может представлять повышенный уровень вибрации, который возникает во время работы исследуемого двигателя при нагрузках выше номинальной. Для избегания влияния вибраций на человека необходимо провести мероприятия на основании [14], а именно, жесткая

фиксация рабочих механизмов на своих местах с использованием виброгасящих материалов.

Следующий вредный фактор – недостаток естественного света при работе в условиях недостаточной освещённости, связанным с временем суток и погодными условиями. Пониженная контрастность в взаимодействии с плохой освещённостью является наиболее опасным для зрительных органов работника и может привести к травмам, при работе с движущимися частями установки. Простым решением для снижения риска является покраска отдельных частей установки в различные отчетливо видимые цвета. [21]

### **5.1.1 Шум**

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

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

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Предельно допустимые уровни шума

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

Средства индивидуальной защиты (СИЗ) применяются в том случае, если другими способами обеспечить допустимый уровень шума на рабочем месте не удастся. Принцип действия СИЗ – защитить наиболее чувствительный канал воздействия шума на организм человека – ухо. Применение СИЗ позволяет предупредить расстройство не только органов слуха, но и нервной системы от действия чрезмерного раздражителя. Наиболее эффективны СИЗ, как правило, в области высоких частот. СИЗ включают в себя противошумные вкладыши (беруши), наушники, шлемы и каски, специальные костюмы. [22]

### 5.1.2 Вибрация

Одним из наиболее опасных для человеческого организма производственных факторов является вибрация. Под вибрацией понимается колебание твёрдых тел.

Большое негативное воздействие этот фактор оказывает на отделы центральной нервной системы, желудочно-кишечного тракта и вестибулярного аппарата человека. Длительное воздействие вибрации на организм приводит к развитию профессиональных заболеваний, основным из которых является – виброблезнь, сопровождающаяся головокружением, онемением нижних конечностей и потерей ориентации в пространстве.

Большую опасность для организма представляют вибрации частотой 6-9 Гц, так как эти частоты наиболее близки к собственным частотам внутренних органов человека. Совпадение частоты вибрации и внутреннего

органа приведёт к резонансному явлению, в результате чего начнётся процесс разрушения.

Сангигиенические нормы вибрации представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Нормы вибрации

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

Для виброзащиты применяются средства индивидуальной защиты для рук, ног и тела оператора. В качестве средства защиты для рук применяются рукавицы и перчатки, вкладыши и прокладки по ГОСТ 12.4.002 "Система стандартов безопасности труда. Средства защиты рук от вибрации. Технические требования и методы испытаний".

Виброзащитная обувь изготавливается в виде сапог, полусапог, в конструкции низа которых используется упруго-демпфирующий материал (ГОСТ 12.4.024 "Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная виброзащитная. Общие технические требования").[23]

### 5.1.3 Недостаток естественного света

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:

- 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 устанавливают 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 (КЕО), 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.

В зависимости от напряжения зрительного аппарата при выполнении работы освещенность на предприятиях делят на восемь разрядов - от наивысшей точности до общего наблюдения за ходом производственного процесса.

В таблице 16 приведены нормируемые значения коэффициента естественной освещенности.

Таблица 16 – Нормируемые значения КЕО

Характеристика выполняемой зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Значение КЕО в при естественном освещении, %	
			Верхнем и комбинированном	боковом
Наивысшей точности	Менее 0,15	I	10	3,5
Очень высокой точности	0,15 ... 0,30	II	7	2,5
Высокой точности	0,3 ... 0,5	III	5	2,0
Средней точности	от 0,5 до 1,0	IV	4	1,5
Малой точности	от 1 до 5	V	3	1,0
«Грубая работа»	Более 5	VI	2	0,5
Работа с самосветящимися материалами и изделиями в горячих цехах		VII		
Общие наблюдения за ходом производственного процесса:		VIII		
постоянное наблюдение	-	VIIIa	1	0,3
периодическое при постоянном пребывании людей в помещении		VIIIб	0,7	0,2
периодическое при периодическом пребывании людей в помещении		VIIIв	0,5	0,1

К числу источников света массового применения относятся лампы накаливания, лампы ДРЛ, люминесцентные лампы.

Лампы накаливания применяются там, где проводятся грубые работы, или осуществляется общий надзор за эксплуатацией оборудования. Кроме того, предпочтение лампам накаливания отдается во взрыво- и

пожароопасных помещениях, в сырых помещениях, в помещениях с химически активной средой.

Характеристика выполняемой зрительной работы для проекта относится к классу средней точности, где наименьший объект различия от (0,5 до 1,0 мм) в связи с этим значение КЕО при естественном освещении 1,5 процентов. [24]

#### 5.1.4 Микроклимат

Помещение цеха характеризуется:

- наличием большого количества металлического оборудования;
- повышенной температурой.

Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений представлены в таблице 17.

Таблица 17 - Оптимальные и допустимые нормы микроклимата

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

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

- вентиляция приточно-вытяжная по СНиП 2.04.05 – 91\* (28.11.91) установка центробежных вентиляторов. Кратность воздухообмена 1;
- установка систем воздушного отопления, совмещённых с вентиляцией;

Предусмотренные мероприятия обеспечивают параметры микроклимата в соответствии с нормами, представленными в таблице 19.

В соответствии с Сан ПиН 2.2.4.548 – 96(1) значения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха устанавливаются, для рабочей зоны производственных помещений, в зависимости от категории тяжести выполняемой работы, величины явного избытка тепла выделяемого в помещении и периода года. [24]

## **5.2 Анализ опасных факторов**

Проведем анализ опасных производственных факторов в вышеописанном технологическом процессе исследования и проверки двухзонного электропривода постоянного тока. 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. Данные операции должны производиться на основании [21 - 24].

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. [25]

### **5.2.1 Электропоражение**

Электропоражение персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках. При разработке коллективных и

индивидуальных средств защиты от электропоражения необходимо, согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), рассмотреть следующие вопросы:

- обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;
- 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.[26]

Рассматриваемая лаборатория не имеет характеристик, свойственных особо опасным помещениям в части поражения электрическим током. Необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты: изоляция проводов и её непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; защитное заземление и защитное отключение.

Также, используются индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000 В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками. [27]

### **5.2.2 Возгорание**

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

Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного производственного помещения. Согласно классификации производств по

пожарной опасности (ППБ-03) рассматриваемая лаборатория относится к классу В (обработка или применение твердых сгораемых веществ и материалов, а также жидкостей с температурой выше 120 градусов): электроизоляция, бумага, мебель. Т.е. технологический процесс в лаборатории исключает взрывоопасную зону, имеющиеся вещества могут только гореть. Лаборатория имеет пожароопасную зону класса П-2а. Минимальная допустимая степень защиты оболочек электрических машин для данной пожароопасной зоны обозначается IP44. Использование данной степени защиты – одно из направлений профилактики, оно должно быть установлено на объектах, где воздействие опасных факторов пожара может привести к травматизму или гибели людей, этого требует «технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Лаборатория оснащена такой системой с дымовыми извещателями. Сигналы извещателей включают систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей. Это другое направление профилактики загораний.

Выбор типа и расчет необходимого числа огнетушителей производится в зависимости от их огнетушащей способности. Из пяти таких классов, лаборатории подходит класс А (пожар твердых веществ) и класс Е (горение электроустановок). Согласно на 800 м<sup>2</sup> защищаемой площади рекомендуется использовать восемь двухкилограммовых порошковых огнетушителей. Для лаборатории достаточно одного двухкилограммового огнетушителя ОП. [28]

### **5.3 Защита окружающей среды**

Работа в лаборатории сопряжена с образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов.

Газообразные отходы, загрязняющие воздух помещения: естественные выделения - углекислый газ, пары воды, летучие органические соединения - ЛОС (альдегиды, кетоны), азотистые соединения; бытовая пыль; ЛОС, выделяющиеся в процессе эксплуатации отделочных материалов, лакокрасочных покрытий мебели и др. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения. Жидкие отходы - бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки помещений, при пользовании водопроводом, туалетом и т.п., сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014) [15]: бытовой мусор после предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах. Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность

целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцевокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из неадсорбирующего ртуть материала (винипласта).

К сфере защиты ОС и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Реальным вкладом здесь может стать экономия электрической и тепловой энергии на территории предприятия. Во-первых, это улучшает экономические показатели деятельности предприятия (уменьшение расходов на электротепловую энергию). Во-вторых, экономия энергии означает уменьшение газа, мазута, угля, сжигаемого в топках котлов ТЭС и электроустановок (котельных) промпредприятий города Томска и области и одновременное уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Несмотря на кажущуюся малость такого вклада в энергосбережение и в защиту атмосферного воздуха от загрязнения массовое движение в этом направлении, в том числе, в быту, принесет значимый эффект. [30]

#### **5.4 Предотвращение ЧС и устранение их последствий**

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации на рассматриваемом рабочем месте в механическом цехе: возникновение пожара и электропоражение.

### **5.4.1 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 [5], 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: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности; разработка схемы действий администрации и работающих в случае пожара и организация эвакуации людей; организация внештатной пожарной дружины.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефону 01 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь. [25]

### **5.4.2 Электропоражение как источник ЧС**

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

- при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования;
- при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением понимается прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в нормальном режиме (исправном состоянии) электроустановки отсутствует электрический потенциал, но при каких-либо неисправностях, вызвавших нарушение изоляции или ее пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям, согласно [17] п.412. служат изоляция токоведущих частей, применение ограждений и оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются: защитное заземление и защитное зануление [28] п.413.

Даже если при электропоражении работающий внешне сохранил формат нормального самочувствия, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья. Предварительно пострадавший должен быть освобожден от действия электрического тока. Если при этом отключить напряжение быстро невозможно, освобождение от электричества пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

Для предотвращения от поражения электрическим током при прикосновении к корпусам электроустановок, находящихся под напряжением

при пробое изоляции или в других случаях, необходимо рассчитать и установить защитное заземление.

## **Заключение**

В процессе работы для регулирования скорости вращения центробежного нагнетателя был спроектирован современный асинхронный частотно-регулируемый электропривод с векторным управлением.

Рассчитаны электромеханические и механические характеристики выбранного асинхронного двигателя, построенные по расчетным и каталожным значениям. Также совершено моделирование асинхронного двигателя в неподвижной и во вращающейся системе координат и были построены переходные процессы в программной среде MatLab Simulink.

Была проведена оптимизация контуров регулирования и исследованы переходные процессы в линеаризованной системе. В процессе исследования было установлено, что рекомендуемые значения не подходят в данной системе, так как при работе привода на номинальной скорости и набросе нагрузки равной номинальному моменту происходит сильная просадка по скорости. Потребовалось подкорректировать данные ограничений по напряжению и по токам.

Был разработан вычислитель потокосцепления на базе токов и напряжений. В основу вычислителя положены электромагнитные связи пространственного вектора потокосцепления статора с ротором, а также токов и напряжений статора. Хорошая точность идентификатора потокосцепления объясняется, тем что он строится на математическом описании асинхронного двигателя. Данный вычислитель хорошо подходит под заданные задачи электропривода, так как здесь нет частых пусков и большую часть времени он работает в статике.

В завершении работы была построена общая модель электропривода газоперекачивающего агрегата и построены выходные характеристики давления, температуры и расхода газа. Данная математическая модель позволяет проводить исследования и смотреть, как ведет себя электропривод

в тех или иных ситуациях. Для более точного исследования необходимо улучшать математическое описание технологического процесса.

Так же было установлено, что использование Электрогазоперекачивающего агрегата вместо газотурбинных благополучно скажется на производительности и экономическом состоянии фирмы. Точнее, использование ЭГПА с векторным управлением даст от 0.5 процентов прирост КПД, 27.5 процентов экономии электропотребления цеха и снизить порядка 5 процентов капитальных вложений при реконструкции.

## Список использованных источников

1. Комплектный электроприводной газоперекачивающий агрегат ЭГПА-4/8200-56/1.126-Р: Типовой проект ИЯТЛ.064415. – Санкт-Петербург, 2008. – 50 л.
2. Двигатель высокоскоростной асинхронный 1ТА2832-4АТ01-Z.: Типовой проект СЭ01.00.00.00.000 – Санкт-Петербург, 2006. – 50 л.
3. Система автоматического управления электроприводного газоперекачивающего агрегата САУ ЭГПА: Типовой проект ИЯТЛ.421453.015 ВЭ. – Санкт-Петербург, 2008. – 142 л.
4. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М., «Энергия», 1972. – 240 с.
5. Суринович В.К., Борщенко Л.И., Машинист технологических компрессоров. – М: Изд-во Недра, 1972. – 279 с.
6. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 224 с.
7. Адрющенко В.А. Автоматизированный электропривод систем управления : учебное пособие . – Л.: СЗПИ, 1975. – 296 с.
8. Садиков Д.Г., Исследование электроприводного газоперекачивающего агрегата на базе каскадного многоуровневого преобразователя частоты [текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (16.12.16)/ Садиков Дмитрий Геннадьевич. – Н. Новгород, 2016. – 19 с.
9. Ключев, В. И. Теория электропривода: учебник для вузов – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
10. Москаленко В.В. Электрический привод: учебное пособие – М.: Высшая школа, 1991. – 430 с.
11. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2004. –576 с.

12. Удут Л. С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование электроприводов. Часть 1. – Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. – Оптимизация контура регулирования: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 144 с.

13. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы / Под ред. В.Е. Селезнева. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с.

14. А.Г. Гарганеев, А.Т. Яровой, Л.Ю. Бабушкина, А.С. Каракулов, С.В. Ланграф, А.А. Расстригин Энергосберегающая модификация векторного управления асинхронного двигателя// Известия Томского политехнического университета. – 2005. – №7. с 130-134.

15. Махотило К.В. Разработка методик эволюционного синтеза нейросетевых компонентов систем управления: Дис... канд. техн. наук. – Харьков., 1998. – 169с.

16. Мкртчян С. О. Нейроны и нейронные сети; Введение в теорию формальных нейронов и нейронных сетей – М. : Энергия, 1971. – 232 с.

17. Искусственные нейронные сети // Сивохин А. В., Лушников А. А., Шибанов С. В., – Пенза: Изд-во Пенз, 2004. – 136 с.

18. Терёхин В.В. – Моделирование в системе MATLAB – Новокузнецк.: Кузбасвузиздат, 2004. – 376 с.

19. Криницына З.В., И.Г. Видяев Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: Учебно-методическое пособие – Томск, изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

20. Криницына З.В. Ресурсоэффективность отрасли: Учебное пособие /З.В.Криницына. – Томск, изд-во ТПУ, 2013. – 182 с.

21. ГОСТ 12.0.003-74 «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

22. ГОСТ 12.1.003-83 « Шум. Общие требования безопасности».

23. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. « Вибрационная безопасность. Общие требования».

24. ГОСТ 12.1.006–84.ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
25. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.:Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
26. ГОСТ 12.1.019 -79 (с изм. №1) ССБТ. « Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
27. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. « Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов».
28. ГОСТ Р 50571.3-94 «Электроустановки зданий. Часть 4. Защита от поражения электрическим током».
29. ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т « Пожарная безопасность. Общие требования».
30. Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12. 2014) «Об организации сбора, вывоза, утилизации, и переработки бытовых и промышленных».



Рисунок А.2 – Имитационная модель АД во вращающейся системе координат

