

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

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение школы(НОЦ) Электроэнергетики и электротехники
 Профиль «Электропривод и автоматизация электротехнических комплексов и систем»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка системы управления тягового электропривода для шахтного электровоза
УДК: 622.625.28-83

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Волков Анатолий Станиславович		10.02.20

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпушкин Сергей Викторович	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Концепция стартап-проекта»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Соруководитель ШИП	Каз Михаил Семенович	д.э.н., профессор		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Фех Алина Ильдаровна			03.02.20

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»	Ивашутенко А.С.	Доцент к.т.н		

**Результаты обучения
по основной образовательной программе подготовки магистров
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

Код	Результат обучения*	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР
Общие по направлению подготовки		
P1	<i>Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1,6; ОПК-1, 2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранными языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4,5; ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	<i>Использовать на практике навыки и умения в организации</i> научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2,3; ОПК-1; ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	<i>Иметь представление о методологических основах научного познания и творчества</i> , роли научной информации в развитии отрасли, навыки проведения работ с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1,6; ОПК-1, 4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.	Требования ФГОС ВО (УК-5, ОПК-4; ПК- 4-6), Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
По профилю подготовки		
P6	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.	Требования ФГОС ВО (ПК-1, 7,8), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях	Требования ФГОС ВО (ПК-2, 9, 10, 11), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

	жестких экономических и экологических ограничений.	
--	--	--

P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.	Требования ФГОС (ПК-3, 13, 14, 15, 24-26), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 16-21, 24, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные</i> работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.	Требования ФГОС (ПК-22, 23, 25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое <i>оборудование</i> ; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.	Требования ФГОС (ПК-27, 28), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.	Требования ФГОС (ПК-29, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение школы(НОЦ) Электроэнергетики и электротехники
 Профиль «Электропривод и автоматизация электротехнических комплексов и систем»

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
Ивашутенко А.С.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Волкову Анатолию Станиславовичу

Тема работы:

Разработка системы управления тягового электропривода для шахтного электровоза	
Утверждена приказом проректора-директора (директора)	27.02.2020 № 58-29/с
(дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

08.06.2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>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></p>	<p>Разработка системы управления тягового электропривода для шахтного электровоза Материалы производственной практики, техническая литература, техническая документация</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования,</i></p>	<p>Титульный лист Задание Реферат Введение Раздел 1 Общие сведения об электровозе. Назначение и принцип действия. Раздел 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 Разработка и исследование моделей электропривода</p>

<i>проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Раздел 10 Экспериментальная установка Раздел 11 Концепция стартап-проекта Раздел 12 Социальная ответственность Заключение Список литературы
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	- функциональная схема электропривода; - имитационная модель; - графики переходных процессов электропривода
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Основное исследование	Ляпушкин С.В.
Концепция «Стартап-проекта»	Каз М.С.
Социальная ответственность	Фех А.И.
Иностранный язык	Качалов Н.А.
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Раздел 2 Моделирование преобразователей координат Раздел 3 Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.02.2020 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпушкин С.В.	к.т.н		10.02.20

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Волков А.С.		10.02.20

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

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетики и электротехника
 Отделение школы(НОЦ) Электроэнергетики и электротехники
 Период выполнения осенний/ весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.03.2020	Календарное планирование работ по теме	3
12.03.2020	Описание объекта исследования	3
20.03.2020	Подбор и изучение материалов по теме	3
22.03.2020	Составление и утверждение технического задания	3
28.03.2020	Расчет энергетических параметров	3
11.04.2020	Исследование работоспособности системы управления	6
15.04.2020	Анализ полученных данных	3
25.04.2020	Контроль качества выполнения проекта и консультирование студента	3
02.05.2020	Оценка эффективности проделанной работы	3
10.05.2020	Технико-экономические расчеты	3
12.05.2020	Вопросы экологической безопасности	3
15.05.2020	Составление пояснительной записки	4
22.05.2020	Итог	40

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпушкин С.В.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»	Ивашутенко А.С.	Доцент к.т.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»**

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Волкову Анатолию Станиславовичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Направление	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Уровень образования	магистратура		

Перечень вопросов, подлежащих разработке:	
<i>Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР (функциональное назначение, основные потребительские качества)</i>	Разрабатываемый стенд позволит решить две ключевые проблемы: апробация ВКР и диссертаций связанных с синхронным двигателем с постоянными магнитами, обучение студентов в лабораториях .
<i>Способы защиты интеллектуальной собственности</i>	Защита интеллектуальной собственности предполагается, как патент на полезную модель.
<i>Объем и емкость рынка</i>	Для исследования объема рынка была проанализирована количество средних и высших учебных заведений, а так же профессиональных технических училищ Для исследования емкости рынка были изучены торговые площадки с тендерами.
<i>Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт</i>	С каждым годом требования к высококвалифицированным выпускникам как к инженерам только растет, поэтому пополнение лабораторий современными учебными стендами является актуальным и важным
<i>Себестоимость продукта</i>	Была рассчитана себестоимость продукта с учетом всех материальных затрат, трудовых затрат, транспортных и накладных расходов
<i>Конкурентные преимущества создаваемого продукта</i>	Был выявлен ряд преимуществ по сравнению с асинхронными двигателями и двигателями постоянного тока
<i>Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами</i>	Было проведено сравнение разрабатываемого продукта с асинхронными двигателями и двигателями постоянного тока
<i>Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта</i>	Потребителями создаваемого продукта являются ВУЗы, ССУЗы, ВТУЗы
<i>Бизнес-модель проекта</i>	Была составлена бизнес-модель по методу Александра Остервальдера

<i>Производственный план</i>	Был разработан производственный план до 2023 года
<i>План продаж</i>	Был разработан план продаж до 2023 года
Перечень графического материала:	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы(например, бизнес-модель)</i>	1. Уникальное торговое предложение; 2. Бизнес-модель продукта; 3. Производственный план и план продаж;

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	19.04.2020г.
---	--------------

Задание выдал консультант по разделу «Концепция стартап-проекта» (со-руководитель ВКР):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Соруководитель ШИП	Каз Михаил Семенович	Д.э.н, профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Волков Анатолий Станиславович		19.04.20

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Волкову Анатолию Станиславовичу

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

Разработка системы управления тягового электропривода для шахтного электровоза	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	– указать нормативные документы
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– перечислить вредные и опасные факторы
3. Экологическая безопасность:	– указать область воздействия на атмосферу, гидросферу и литосферу.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– перечислить возможные ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – указать наиболее типичную ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	11.02.2020г.
--	--------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст.преподаватель	Фех А.И.	-		11.02.20

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Волков Анатолий Станиславович		11.02.20

Аннотация

Представленная магистерская диссертация содержит 156 страниц, 18 таблиц, 70 рисунков, 21 источник, 2 приложения.

Диссертация посвящена вопросам разработки и исследования системы управления для тягового электропривода шахтного электровоза.

Ключевые слова: система управления, шахтный электровоз, синхронный двигатель с постоянными магнитами, векторное управление, анализ и синтез системы управления, показатели качества регулирования.

В данной диссертации произведен расчет, синтез регуляторов, имитационное моделирование в подвижной и неподвижной системах координат линейной и нелинейной модели, а так же создание модели векторного управления. Работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010; обработка формул велась в программе Math Type 6.9; для построений рисунков, диаграмм, функциональных и принципиальных схем использовались программы: Paint, Microsoft Visio 2010; программная реализация системы управления создана в графической среде MATLAB R2017b, расчеты проведены в MathCAD 14.

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ШАХТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА.....	11
1.1 История развития шахтного электровоза.....	11
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КООРДИНАТ.....	23
2.1 Преобразование Кларка.....	26
2.1.1 Прямое преобразование Кларка.....	26
2.1.2 Обратное преобразование Кларка.....	28
2.2 Преобразование Парка.....	30
2.2.1 Прямое преобразование Парка.....	30
2.2.2 Обратное преобразование Парка.....	32
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	34
3.1 Математическая модель СДПМ в неподвижной системе координат.....	39
3.2 Математическая модель СДПМ в вращающейся системе координат.....	45
3.3 Структурная схема силового канала электропривода.....	51
3.4 Параметры двигателя и используемые константы.....	52
4. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	54
4.1 Оптимизация контура тока по оси d	54
4.2 Оптимизация контура тока по оси q	59
4.3 Оптимизация контура скорости на симметричный оптимум с фильтром на входе.....	68
4.4 Оптимизация контура скорости на симметричный оптимум без фильтра на входе.....	72
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	75
5.1 Общая линейная модель в неподвижной системе координат.....	75
5.2 Общая линейная модель в подвижной системе координат.....	78
6. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	81
7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИМ ИНВЕРТОРА В MATLAB SIMULINK.....	83

8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ СО ЗВЕНОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	91
9. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ СИСТЕМЫ “АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ” СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ВЕКТОРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ.....	93
10. ОПЫТНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.....	98
10.1 Описание лабораторного экспериментального стенда.....	98
10.2 Сервоусилитель.....	100
10.3 Результаты экспериментальных исследований.....	100
11. КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА.....	105
12. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	135
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	137
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	139

ВВЕДЕНИЕ

Введение к диссертации включает в себя следующие основные структурные элементы:

- актуальность темы исследования;
- степень ее разработанности;
- цели и задачи;
- научную новизну;
- теоретическую и практическую значимость работы;
- методологию и методы исследования;
- положения, выносимые на защиту;
- степень достоверности и апробацию результатов.

Актуальность темы исследования.

Разработка систем автоматического управления устройствами самоходного движения в шахтах, штольнях, подземных выработках, связанной с повышенным классом опасности, является сложным и перспективным научным направлением. Шахтные электровозы нашли широкое применение при транспортировке грузов по горным выработкам шахты, а также доставку людей.

Главное преимущество рельсового подземного электротранспорта является высокая эффективность транспортировки полезных ископаемых на большие расстояния, что особенно актуально для рудных и угольных месторождений, добыча в которых невозможна открытым способом из-за большой глубины залегания.

Электрическими приводами оснащены электровозы с питанием от аккумуляторных батарей или подземной контактной сети. В угольных шахтах из-за угрозы взрыва метана используются аккумуляторные электровозы, а рудных шахтах используются электровозы с контактной тягой.

Подвижной состав из локомотива и грузовых тележек подвержен неуправляемому буксованию при разгоне и юзу при торможении из-за случайного характера изменения коэффициента сцепления ведущих колес локомотива с рельсами, что приводит к неэффективному использованию энергии при движении состава, снижает среднюю скорость откатки грузов, значительному износу контактирующих поверхностей обечайки колёс и рельсов. Электроприводом, который обеспечивает управляемый режим разгона и торможения состава, оснащен только электровоз. Вагонетки, в отличие от вагонов наземного рельсового транспорта, не имеют тормозных устройств.

Основной и наиболее актуальной проблемой горно-рудной подотрасли является сдерживание процесса естественного повышения себестоимости полезного ископаемого – железорудного сырья (ЖРС), угольного сырья и др. Среди нереализованных направлений в этом стратегически важном для страны направлении является процесс доставки ЖРС от места добычи на поверхность [1].

Для синтеза автоматических регуляторов и анализа динамических режимов замкнутых САР с синхронными двигателями, синтезированными для векторного управления, используются двухфазные математические модели, которые адекватно отрабатывают процессы, которые протекают в реальной машине. Наиболее общей формой математического описания двухфазных моделей есть система дифференциальных уравнений и уравнений связи, которые оперируют с токами и напряжениями в координатах $\alpha\beta$, получаемыми из фазных координат [2]

Как известно, технологические показатели электровозов во многом определяются соответствующими показателями их тяговых электромеханических систем (ТЭМС) [3]. К сожалению, эксплуатируемые на отечественных шахтных электровозах контактно - резисторные ТЭМС далеки от совершенства по критериям надежности, энергоэффективности и

возможности автоматического управления [4]. Вместе с тем отрадно, что в последние годы созданы и успешно прошли испытания в промышленных условиях новые образцы ТЭМС, в том числе: IGBT – преобразователи – тяговые асинхронные двигатели (ТАД) [5]. Однако, уже первые испытания подтвердили обязательность включения в ТЭМС подсистем мониторинга текущего состояния оборудования, в том числе идентификации электрических параметров тяговых электродвигателей [6].

– степень ее разработанности;

Возрастание требований к высокомогущной преобразовательной технике, требует комплексного подхода к решению возникающих задач с обеспечением комплексной миниатюризации, обеспечение надежности и КПД, и уменьшению тепловых потерь.

Для этого целесообразно выполнение следующих условий:

- применение ЭБ, отвечающей всем требованиям ТЗ.
- разработка точной математической модели системы управления в связке с многомассовой однодвигательной модели шахтного электровоза.
- оптимальный выбор структуры реализации аппаратуры.

При этом любая структура преобразовательной техники не лишена недостатков. Основными из них являются:

- сложные структуры;
- дороговизна;
- возможность возникновения буксования;
- возможность возникновения юза;
- потеря энергии в силовом режиме, как в режимах пуска, так и при торможении в виду невозможности использовать рекуперативное торможение.

Необходимо ответить, что ряд вопросов по решению проблемы внесли известные российские и зарубежные ученые: Власьевский С.В., Волотковский С.А., Волков Д.В., Жеребкин Б.В., Кордаков В.Н., Кутовой

Ю.Н., Оатт Г.П., Пивняк Г.Г., Рапопорт О.Л., Ренгевич А.А., Рысьев А.В., Спиваковский А.О., В.Д. Тулупов, Цукублин А.Б., В.Г. Шорин, П.С. Шахтарь и др.

Решению указанных проблем посвящено много научных работ и результаты опубликованы в соответствующих сборниках и журналах. Но в большинстве своем, научные работы выполнены для транзисторной техники меньшей мощности, чем требуется в данной работе. А те результаты, которые выполнены с необходимым уровнем мощности, как показали исследования, имеют ряд недостатков и не всегда соответствуют современным требованиям по причине быстрого устаревания. Более эффективные решения не публикуются в открытой печати по причинам защиты авторских прав и интеллектуальной собственности.

Успешное решение указанных проблем открывает широкие возможности для проектирования источников вторичного электропитания средней и повышенной мощности с улучшенными массоэнергетическими показателями, улучшенной электромагнитной совместимостью и повышенной надёжностью. При этом необходимо учитывать, что при рассмотрении нелинейных систем, чрезмерное идеальное моделирование не отражает действительность и математическая модель может не отражать важных свойств системы.

– цели и задачи;

Современный уровень развития электронной техники открывает перспективы получения новых качеств существующих объектов: повышение надежности, удешевление себестоимости, автоматизация движения, безопасность эксплуатации.

Таким образом, основными целями диссертационной работы являются:

- выбор системы управления для шахтного электровоза
- выбор алгоритма управления силовым каскадом

- разработка компьютерной модели системы управления в системе Matlab Simulink.

- исследование с помощью ИКМ(имитационного компьютерного моделирования) переходных процессов в шахтном электровозе.

- исследование энергетических и динамических характеристик системы управления.

Исходя из указанных целей работа посвящена решению следующих задач:

1. Сравнительный анализ достоинств и недостатков существующих систем управления и выбор из них наиболее оптимальной.
2. Выбор, обоснование и реализация алгоритма управления для САУ.
3. Компьютерное моделирование различных систем управления без и с добавлением контуров, решающих проблемы перерегулирования электровоза в среде Matlab 17.

– методологию и методы исследования;

Задачи решены с помощью нескольких методов научного исследования:

1. Теоретический метод. Были изучены существующие варианты решений поставленных проблем. Проведено их теоретическое сравнение и обоснован оптимальный выбор.
2. Эмпирический метод. С помощью пакета программ Matlab 17. были проведены эксперименты по изучению и сравнению различных вариантов схемотехнического варианта конструкции аппарата.

1. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ШАХТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

1.1 История развития шахтного электровоза

Доставка грузов, людей и оборудования представляет собой периодический процесс, распространяющийся на многие объекты шахты – как на поверхности, так и под землей.

Шахтный транспорт выполняет три основные технологические задачи[7]:

- погрузку, перегрузку, разгрузку и складирование на поверхности и в шахте различных вспомогательных грузов;
- транспортирование грузов с поверхности до забоев и других объектов в шахте, а также выдачу из шахты материалов и оборудования для ремонта;
- доставку шахтеров от околоствольного двора к рабочим местам и обратно в начале и конце смен, а также ремонтных рабочих по шахте в течение смены.

Успешное внедрение нового оборудования и разработка эффективной технологии транспортных систем создадут основополагающие предпосылки для роста производительности труда на подземных горных выработках, снижению доли ручного труда и уменьшения производительности затрат.

В результате изучения данной темы была составлена таблица об основных этапах развития шахтного транспорта, где отмечены достоинства и недостатки каждого этапа. По данной таблице можно сделать следующие выводы:

Транспортные машины, работающие в горной промышленности, должны иметь высокую производительность, надежность, энерговооруженность и долговечность, обеспечивать бесперебойное перемещение полезного ископаемого на значительное расстояния;

Подземный рельсовый транспорт должен развиваться в направлении создания мощных локомотивов с электроприводом.

Таблица 1. Этапы развития шахтного транспорта

Год выпуска	Назначение	Достоинства	Недостатки
1	2	3	4
В конце 18 века	Первые попытки механизации транспорта по деревянным настилам)	Перемещение большого количества грузов	Износ деревянных настилов
1776г	Первые железные уголки вместо деревянных настилов		Прочность
1788г	Первые рельсы из чугуна		Прочность
1806...1809г (П.К. Фролов)	Первая чугунная дорога		Перемещение большого количества грузов
1802г	Первый в мире паровой транспортный экипаж		Перемещение груза на значительные расстояния

Продолжение таблицы 1. Этапы развития шахтного транспорта

1803г	Первый в мире паровоз (Р. Тревитик)	Паровоз не нес на себе груз, а тянул вагонетки с грузом	
1833...1834г	Первый паровоз в России (Е.А. и М.Е. Черепановы)		
1831г.	Применение системы Вард-Леонарда(генератор-двигатель) на шахтах		Несовершенство системы
1835г	Второй паровоз в России	Мощность паровоза превзошла мощность лучшего английского локомотива	
1861г	Первый ленточный конвейер «песковоз» (А. Лопатин)		
1880г.	Ф.А.Пироцкий применил для привода трамвайного вагона, хотя трамвайная линия не была построена.		

Продолжение таблицы 1. Этапы развития шахтного транспорта

1882г	Первый рудничный электровоз фирмой «Siemens & Halske»	Перемещение большого количества грузов	
Первая половина 19 века	Используется канатная откатка	Возросла производительность труда	Механизация транспорта носит единичный характер
1911г	Механические санки на колесах	Повысился объем добычи угля	
1910г	Испытание импортных конвейеров Первые в России качающиеся конвейеры	Повысился объем добычи угля	Общая техническая отсталость промышленности
1925г	Впервые применена скреперная установка	Повысился объем добычи угля	

Продолжение таблицы 1. Этапы развития шахтного транспорта

1925г	Изготовлен отечественный контактный локомотив, мощностью 14,6кВт	Снизилось число несчастных случаев на транспорте; производительность труда возросла почти в 2 раза; снизилась себестоимость	Недостаточная надежность, малый ресурс локомотивов.
1930г	Создан первый ленточный конвейер	Предназначен для пластов мощностью не менее 0,9 при угле падения до 15° и длине лавы до 200м	Сложность переноски, необходимость сохранения строгой прямолинейности лавы, быстрый износ ленты.
1830..	Развитие идей автоматического управления электроприводами		
1935...1936г	Первые шаги по созданию переносных скребковых конвейеров	Возможность применения в очистных забоях	

Продолжение таблицы 1. Этапы развития шахтного транспорта

1935...1939г	Первые поставки на шахты Донбасса отечественных ленточных конвейеров	Замена малопроизводительного и трудоемкого канатного транспорта по наклонным горным выработкам	
1940..	Появление ртутных выпрямителей		
1939...1940г	Испытание на шахтах Донбасса новых скребковых конвейеров	Высокая производительность, возможность транспортировать груз не только по падению, но и по восстанию	

Продолжение таблицы 1. Этапы развития шахтного транспорта

1939...1940г	Новые контактные и аккумуляторные электровозы типа П-ТР и П-АР	Имели улучшенную конструкцию, систему управления, повышенную емкость. Был ликвидирован разрыв между механической выемкой и доставкой угля	
1945...1947г	Прошли испытание передвижные скребковые конвейеры	Появилась возможность перейти на узкозахватную технологию работ в очистном забое	

Продолжение таблицы 1. Этапы развития шахтного транспорта

1945г.	Разработаны ленточные конвейеры с шириной ленты 700мм, 800-900мм	Сократилось число перегрузов на конвейерных линиях наклонных выработок, повысилась скорость движения ленты.	
50-е годы	Созданы мощные электровозы весом 10 и 14т	Происходит реконструкция подземных рельсовых путей (настилают две рельсовые колеи)	
1961...1962г	Разрабатываются ленточные конвейеры с шириной ленты от 800мм до 1600мм	Облегчился труд шахтеров и повысилась производительность труда	

Продолжение таблицы 1. Этапы развития шахтного транспорта

1970..	<p>Работы в области частотно-регулируемого электропривода под руководством М.Г.Чиликина</p> <p>Работы Ф. Блашке по созданию векторного управления</p> <p>Работы по частотно-токовому управлению</p> <p>И др.</p>	<p>Увеличение точности, улучшение КПД, повышение энергоэффективности,</p> <p>грузоподъемности, удешевление себестоимости продукции</p>	<p>Требование к высококвалифицированным инженерам резко возросло</p>
70-е годы	<p>Начинается разработка контактных и аккумуляторных электровозов с цепным весом от 4 до 28 т</p>	<p>Улучшение тяговых характеристик, повышение скорости, совершенствование сигнализации</p>	
1980...1990г	<p>Разработаны «базовые типы» передвижных скребковых конвейеров СП, СПЦ</p>	<p>Появилась возможность доставлять уголь из очистных забоев с мощностью пластов от 0,6 до 3,5м</p>	

Окончание таблицы 1. Этапы развития шахтного транспорта

В последние годы среди наиболее развивающихся направлений теоретических разработок следует выделить расширение:

- методов и алгоритмов цифрового управления координатами электропривода, обеспечивающих улучшение его динамических и эксплуатационных свойств;
- адаптивного управления, в том числе и с применением нечетких (fuzzy-) регуляторов;
- методов управления с прогнозированием координат;
- самообучающихся систем, в том числе и с использованием искусственных нейронных сетей в качестве обучаемых контроллеров.

Электровозы, применяемые в подземных условиях, можно классифицировать по ряду основных функциональных и конструктивных признаков:

- по виду потребляемой электроэнергии — на электровозы, работающие на постоянном или переменном токе промышленной или повышенной частоты;

- по способу подачи электроэнергии — на локомотивы с автономным источником питания (аккумуляторные батареи), с внешним источником питания (контактный провод или кабель) и комбинированным источником питания (контактно-кабельным или контактно-аккумуляторным);

- по исполнению с точки зрения взрывозащиты — на рудничное нормальное (РН), рудничное повышенной надежности (РП) и рудничное взрывобезопасное (РВ).

На отечественных рудных и угольных шахтах наибольшее распространение получили контактные электровозы в исполнении РН и аккумуляторные электровозы в исполнении РП и РВ, причем на абсолютном большинстве рудных шахт применяют контактные электровозы, а на отечественных угольных шахтах из всего электровозного парка более 70% приходится на долю аккумуляторных электровозов.

Область применения контактных и аккумуляторных электровозов в подземных условиях определяется действующими в горно-добывающей промышленности правилами безопасности (ПБ), а также конструкцией и исполнением электровоза.

На шахтах, не опасных по газу и пыли, целесообразно использовать только контактные электровозы, которые по сравнению с аккумуляторными проще по конструкции, дешевле и удобнее в эксплуатации, имеют большие мощность и скорость движения, меньший расход энергии.

Основной недостаток контактных электровозов — искрообразование между контактным проводом и токоприемником, что не позволяет использовать их в шахтах, опасных по газу или пыли (большинство угольных шахт, шахты по добыче калийных руд). Неизолированный контактный провод является также источником электротравматизма и пожаров.

В шахтах I и II категорий по газу или опасных по пыли допускается применение контактных электровозов с двумя токоприемниками для уменьшения искрообразования в выработках, проветриваемых свежей струей воздуха. Во всех остальных случаях в шахтах, опасных по газу или пыли, применяют аккумуляторные электровозы в исполнении РВ. Допускается откатка аккумуляторными электровозами в исполнении РП во всех откаточных выработках шахт I и II категорий по газу или опасных по пыли, а также в откаточных выработках со свежей струей воздуха шахт III категории и сверхкатегорных по газу.

В рудных шахтах, не опасных по газу и пыли, при небольшой годовой производительности горизонтов (до 100 тыс. т) и разработке жильных месторождений в технически обоснованных случаях допускается применение аккумуляторных электровозов. Однако аккумуляторным электровозам присущи такие существенные недостатки, как сложное и дорогостоящее хозяйство для зарядки и замены батарей, худшие технические показатели по

сравнению с контактными электровозами. Их преимущества — взрывобезопасность, автономность питания и низкий электротравматизм.

Отечественной промышленностью серийно выпускаются контактные, электровозы, такие как: 4КР, 7КРМ1, К10, К14М, КТ14, КТ28 и аккумуляторные электровозы: АК2У, АРВ7, АРП7, АМ8Д, 2АМ8Д, АРП10 и АРП14. В обозначениях марок электровозов цифры, стоящие перед или после букв, указывают массу электровоза в тоннах, буквы КР — контактный рудничный, К — контактный (по типажному ряду), Т — с тиристорным управлением тяговыми двигателями, АРВ — аккумуляторный рудничный взрывобезопасный, АРП — аккумуляторный рудничный повышенной надежности, М — модернизированный.

Поскольку шахтный электровоз является сложной электромеханической самодвижущейся системой, включающей в себя механическую часть, представленную: колесной парой, рессорной подвеской, рамой; и электрической, включающую в себя: тяговый двигатель, который в данной работе является синхронным двигателем с постоянными магнитами, системой управления в виде сервоусилителя, частотным преобразователем.

Так как данная диссертация посвящена разработке системы управления, то механическая часть останется без изменения. Для электрической части разработку представим в несколько этапов. Первоначальным, вспомогательным, этапом будет математическое описание и последующее моделирование преобразователей координат, на который мы в дальнейшем будем полностью опираться. Следующим этапом будет математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами и представление его в различных системах координат, с применением преобразователей координат. Дальнейшим этапом будет синтез и оптимизация трех регуляторов: токов и скорости. После настройки регуляторов приступаем к этапу имитационного моделирования полной линейной модели синхронного двигателя. Этап перехода от линейной модели

к нелинейной будет включать в себя ограничение выходных величин по напряжению, току и скорости и представление готовой нелинейной модели. Поскольку современные электроприводы переменного тока все чаще применяют векторное управление, а для шахтного электровоза это является необходимым, поскольку энергоэффективность и повышение КПД всей системы есть задача приоритетная и актуальная, то последующие этапы будут посвящены моделированию, последовательно, сначала широтно-импульсной модуляции, моделированию преобразователя частоты с учетом особенностей производственного процесса и созданию замкнутой векторной системы управления. Заключительным этапом будет перенос результатов моделирования в среде Matlab на экспериментальный учебный лабораторный стенд, где будут проведены испытания, для проверки адекватности разработанной системы управления для электровоза.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КООРДИНАТ

Важным аспектом, что в синтезе регуляторов для системы управления, что в описании любом электрической машины, является математический теоретический аппарат под названием преобразование координат. Поскольку в электрической машине, при всей ее кажущей простоте, происходят сложнейшие процессы, опирающиеся на уравнения Максвелла, то при учете всех параметров получаются трудновычисляемые системы линейные алгебраических уравнений. На помощь в данной ситуации приходит преобразование координат. Данные координатные преобразования позволяют упростить вычисление получаемых уравнений, сохраняя при этом баланс мощностей. Так же синтез регуляторов не возможен для трехфазной, непрерывной во времени системе координат, а возможен либо в подвижных, либо в неподвижных координатах, о которых описание будет дано ниже.

Токи, потоки, напряжения двигателя переменного тока могут быть представлены как векторы в некоторой системе координат. В зависимости от используемой системы координат соотношения, описывающие процессы, происходящие в двигателе, будут иметь различный вид.

При моделировании могут быть использованы различные системы координат. Фазные координаты a , b , c удобны для ввода исходных данных и анализа результатов расчета статики и динамики в трехфазных сетях. Однако системы уравнений, описывающие элементы электрических схем, т. е. математические модели элементов, в этой системе координат получаются весьма громоздкими, сложными. Поэтому при моделировании многомашинных схем вместо фазных используют другие системы координат [8], которые позволяют упростить запись уравнений вращающихся машин.

Большинство применяемых в промышленности электродвигателей являются 3-х фазными. Поэтому появляется необходимость преобразования переменных 3-х фазной машины к переменным 2-х фазной и наоборот. Основой для такого преобразования может служить физический смысл

координатных преобразований. Ведь вращающееся магнитное поле может быть создано как сдвинутым на 120° токами 3-х фазной обмотки, оси каждой из фаз которой смещены в пространстве на 120° , так и сдвинутыми на 90° токами 2-х фазной обмотки, оси каждой из которых смещены также на 90° .

Синтез системы управления удобнее всего производить для двухфазной машины, поэтому необходимо воспользоваться фазными преобразованиями, полученными из условия сохранения амплитуды токов и напряжения двухфазной и трехфазной модели.

Координатные преобразования позволяют упростить уравнения электромагнитных процессов машины за счет устранения гармонических коэффициентов в параметрах, коэффициентов, связанных с неортогональностью магнитных осей фазных обмоток; за счет разделения процессов на симметричные составляющие ненулевой и нулевой последовательности фаз. В частном случае симметричных процессов (нейтральная составляющая отсутствует) уменьшается общее количество уравнений. Широкое распространение при анализе и синтезе процессов в электроприводе переменного тока получила ортогональная система координат (x, y, z) , вращающаяся с произвольной частотой ω_k . Плоскость xOy совпадает с поперечным сечением машины, ось z направлена вдоль вала. Важными частными случаями данной системы координат являются:

– неподвижная относительно статора система координат (α, β, γ) , получаемая из (x, y, z) при $\omega_k=0$ и ориентации оси α вдоль магнитной оси фазы А статора; – ортогональные системы координат $(d, q, 0)$, ориентированные по одному из векторов машины. В качестве ориентирующих могут применяться намагничивающие составляющие изображающих векторов электромагнитных переменных (напряжений, токов, потокосцеплений, ЭДС) либо одна из магнитных осей ротора. Например, при ориентации по вектору потокосцепления ротора: $\omega_k = \omega_\psi$,

ось d ориентирована по вектору ψ_r . Ниже рассмотрим эти системы координат.

2.1 Преобразование Кларка

Одним из видов координатных преобразований является $\alpha\beta$ преобразование или преобразование Кларка[9]. Оно было предложено американским женщиной-инженером Эдит Кларк в 1920г.

Трехфазные машины переменного тока обычно моделируются с использованием обозначения переменной фазы. Однако для трехфазной электрической машины, у которой может быть соединение как в звезду, так и в треугольник значение фазы таким образом будет величиной зависимой. Следовательно при записи всех уравнений для тока, напряжения, потокосцепления фаз статора и ротора получается избыточность. Идея Э. Кларка заключается в переводе переменных электрической машины с трехфазной системы отсчета ABC на две оси ортогональной системы отсчета. Оси обозначаются α и β соответственно и перпендикулярны друг другу. Преобразование Кларка бывает прямым и обратным. Рассмотрим ниже оба варианта.

2.1.1 Прямое преобразование Кларка

Прямое преобразование Кларка описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} X_\alpha &= X_A \\ X_\beta &= \frac{X_A + 2X_B}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (1)$$

Или в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} Z_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_\alpha \\ Z_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} T_{32} Z_{ABC} \quad (2)$$

Где Z_{ABC} – векторы токов, напряжения и потокосцеплений

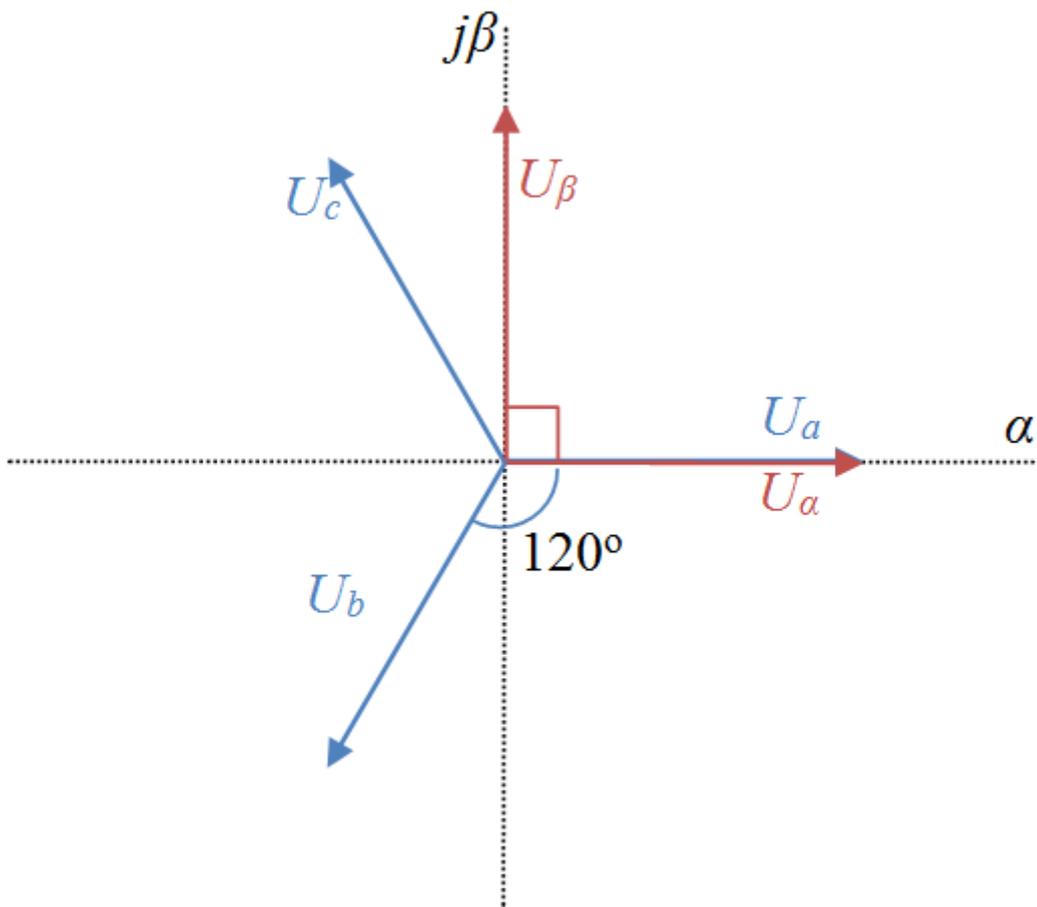


Рисунок 1 – Графическая иллюстрация прямого преобразования Кларка

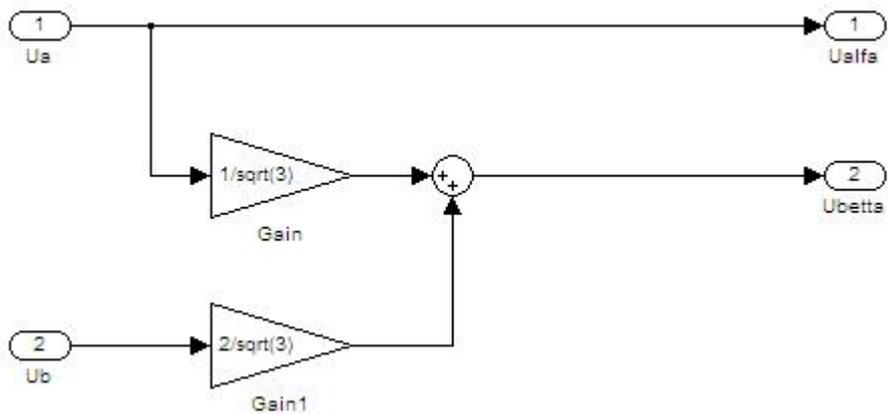


Рисунок 2 – Имитационная модель прямого преобразования Кларка в программной среде MATLAB Simulink

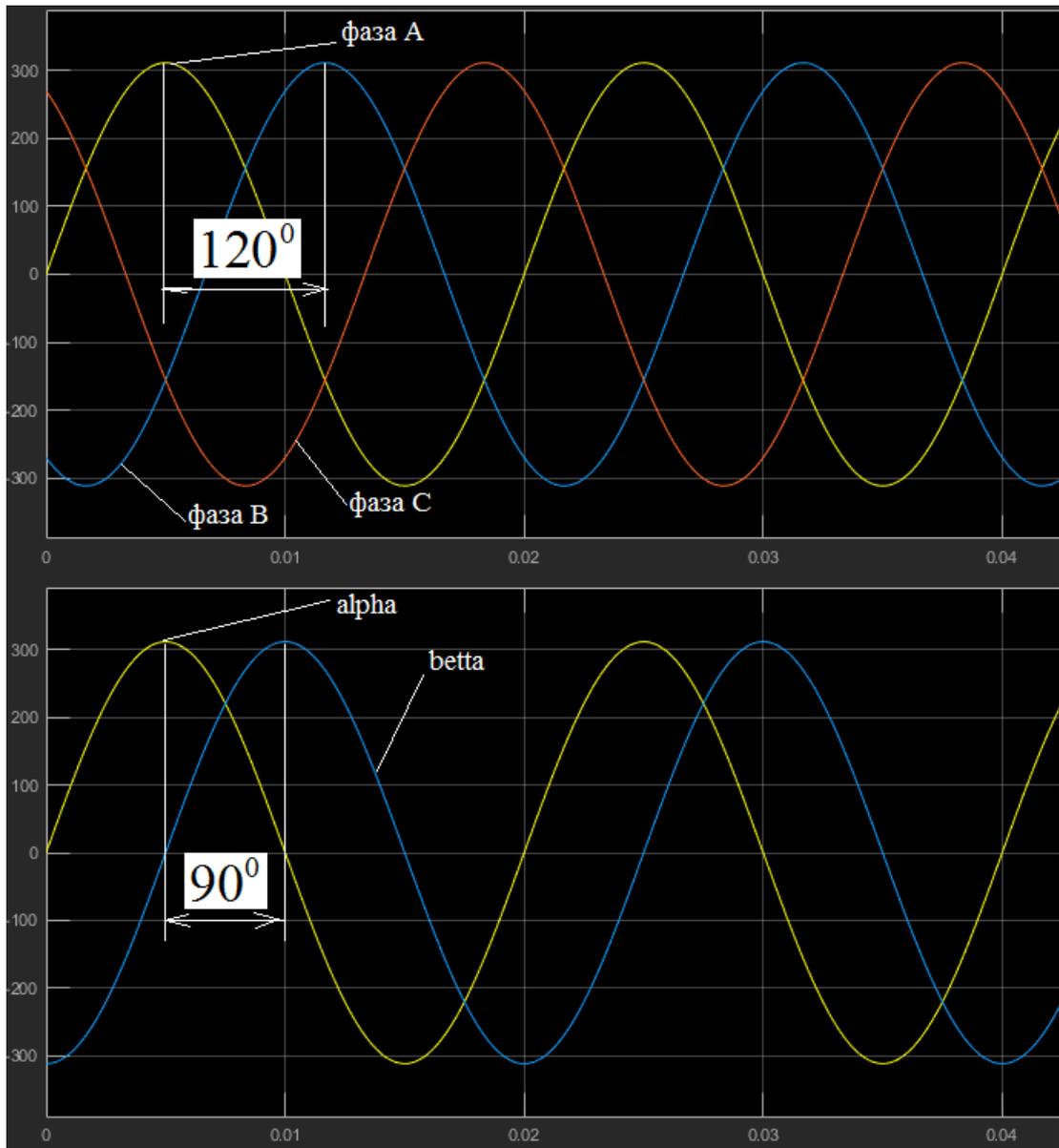


Рисунок 3 – Графики, иллюстрирующие прямое преобразование Кларка в программной среде MATLAB Simulink

2.1.2 Обратное преобразование Кларка

Обратное преобразование Кларка описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 X_a &= X_\alpha, \\
 X_b &= \frac{-X_\alpha + \sqrt{3} \cdot X_\beta}{2}, \\
 X_c &= \frac{-X_\alpha - \sqrt{3} \cdot X_\beta}{2}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Или в матричном виде:

$$[Z_{ABC}] = \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_\alpha \\ Z_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} T^T_{32} Z_{\alpha\beta} \quad (4)$$

Используя Matlab Simulink на основе уравнений соберем модель.

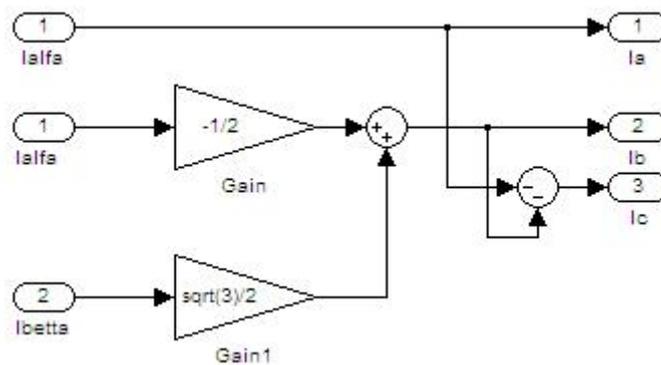


Рисунок 4 – Имитационная модель обратного преобразования Кларка в программной среде MATLAB Simulink

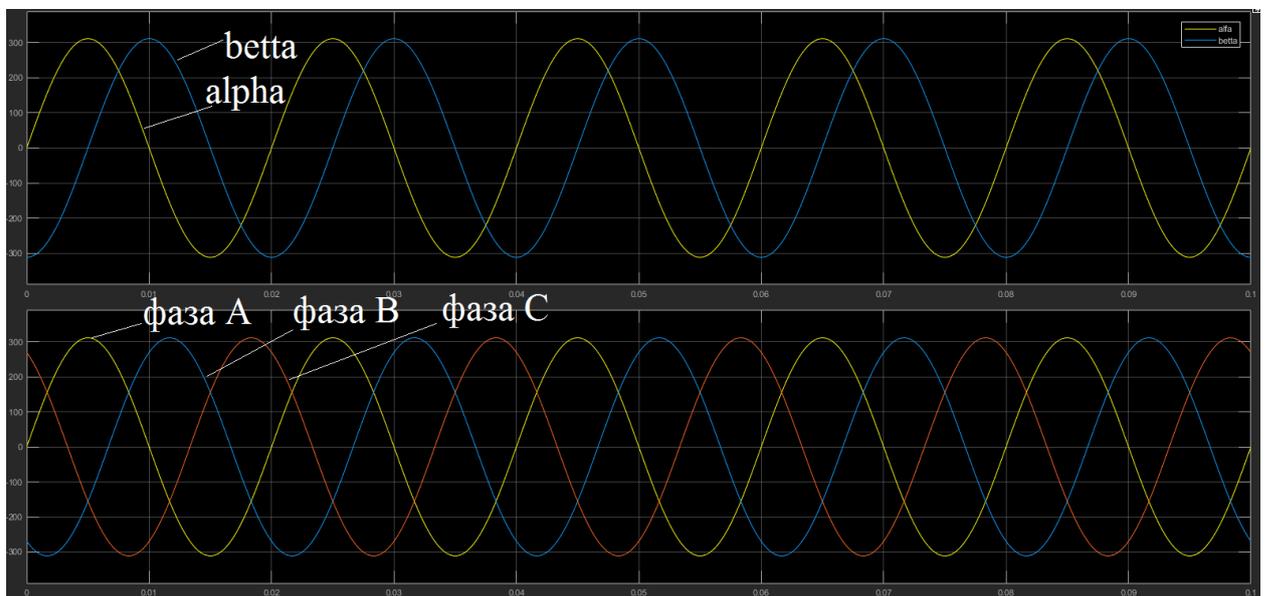


Рисунок 5 – Графики, иллюстрирующие обратное преобразование Кларка в программной среде MATLAB Simulink

2.2 Преобразование Парка

Одним из видов координатных преобразований является так называемая direct-quadrature-zero преобразование или dq0-преобразование. Оно впервые было предложено американским инженером Робертом Х. Парком [10] в 1929г. Часто оно так и называется-преобразование Парка. Он связал все изменяющиеся во времени переменные статора и ротора в систему отсчёта, связанную с ротором. Таким образом все переменные становятся постоянными значениями и не зависят от времени. Dq0 преобразование уменьшает количество координат с 3 переменного тока до 2 постоянного тока. Это позволяет проводить упрощенные расчеты с последующим обратным преобразованием для восстановления фактических трехфазных координат переменного тока.

Преобразование Парка опирается на три допущения:

1. Трехфазная система отсчета, в которой X_a , X_b и X_c являются копланарными трехфазными величинами под углом 120 градусов друг к другу.
2. Ортогональная стационарная система отсчета, в которой I_α (вдоль оси α) и I_β (вдоль оси β) перпендикулярны друг другу, но лежат в той же плоскости, что и трехфазная система отсчета.
3. Ортогональная вращающаяся система отсчета, в которой I_d находится под углом θ (угол поворота) к оси α , а I_q - перпендикулярно I_d вдоль оси q .

Преобразование Парка бывает прямое и обратное.

2.2.1 Прямое преобразование Парка

Прямое преобразование Парка из ABC в dq можно математически представить в два этапа. Первый – это преобразование ABC-координат в $\alpha\beta 0$ координаты (преобразование Кларка). Его мы уже рассмотрели в уравнениях (1) и (2).

Второй этап – это преобразование из неподвижной системы координат $\alpha\beta 0$ в подвижную dq:

$$\begin{aligned} X_d &= X_\alpha \cos \theta + X_\beta \sin \theta \\ X_q &= -X_\alpha \sin \theta + X_\beta \cos \theta \end{aligned} \quad (5)$$

где θ – угол положения вектора потокосцепления, он же угол между координатными осями неподвижной и вращающейся систем.

Или в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} Z_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d \\ Z_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_\alpha \\ Z_\beta \end{bmatrix} = T_\theta Z_{\alpha\beta} \quad (6)$$

Графически это можно представить:

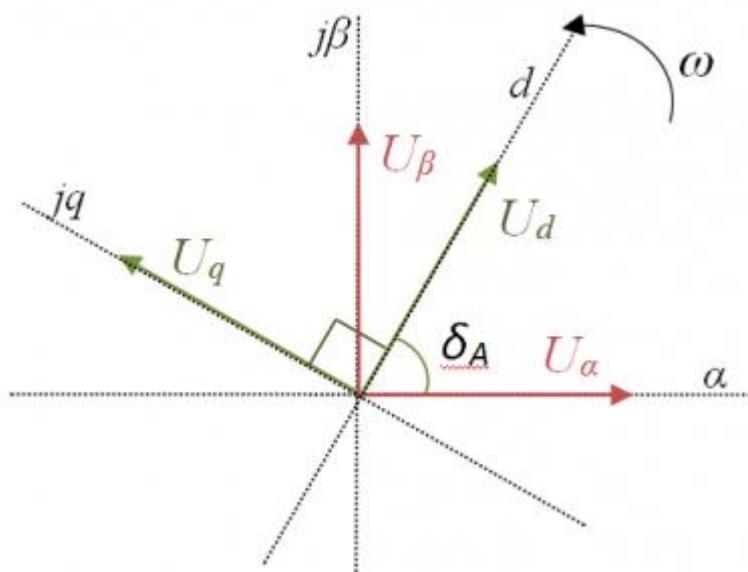


Рисунок 6 – Графическая иллюстрация преобразования Парка

Объединив (1) и (5) координатные преобразования из ABC в dq можно провести в один этап. Матрица преобразований получила название матрица Блонделя-Парка[11]:

$$Z_{dq0} = \begin{bmatrix} Z_d \\ Z_q \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} T_{dq} Z_{ABC} \quad (7)$$

Используя Matlab Simulink на основе уравнений соберем модель.

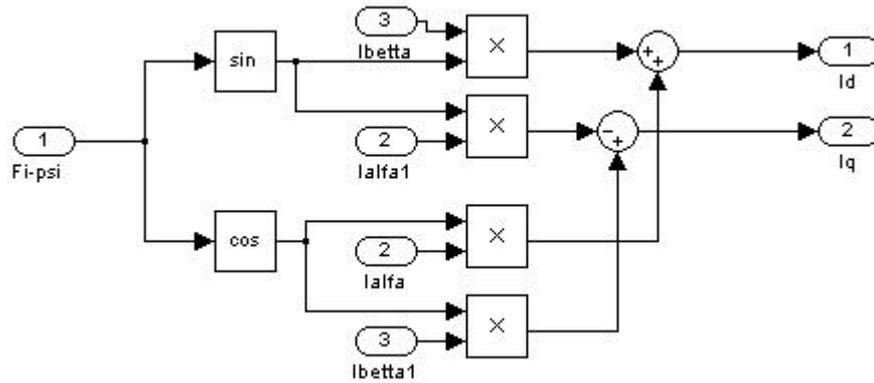


Рисунок 7 – Имитационная модель прямого преобразования Парка в программной среде MATLAB Simulink

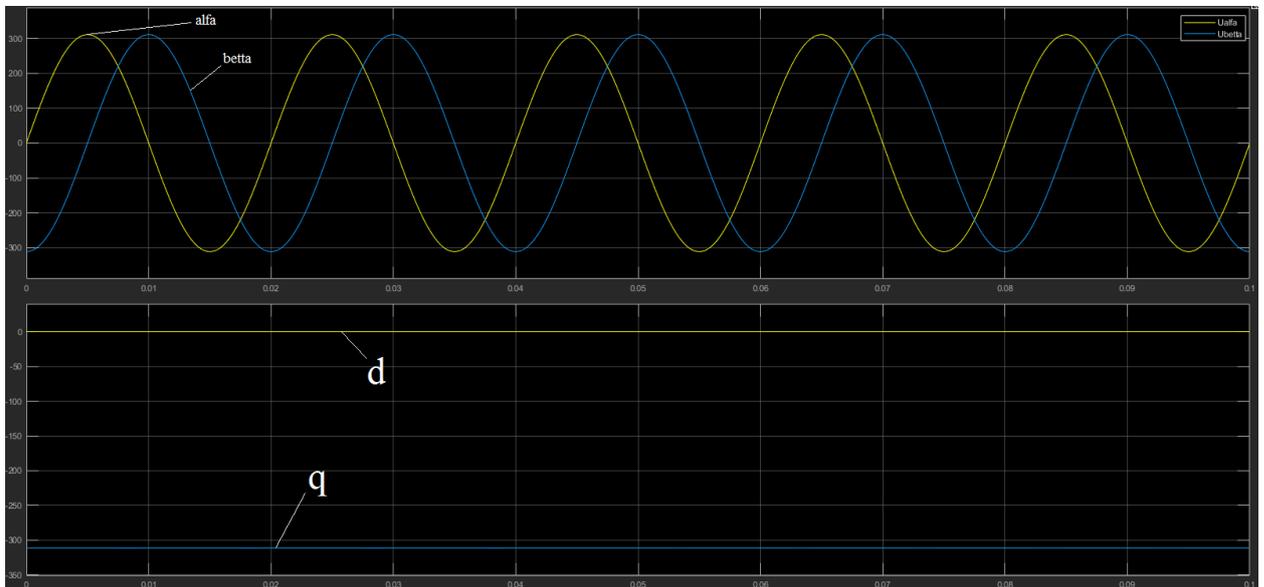


Рисунок 8 – Графики, иллюстрирующие прямое преобразование Парка в программной среде MATLAB Simulink

2.2.2 Обратное преобразование Парка

Обратное преобразование Парка выполняется так же в два этапа. Первый этап – это преобразование из подвижной системы координат dq в неподвижную $\alpha\beta$. Соответствующие уравнения:

$$\begin{aligned} X_{\alpha} &= X_d \cdot \cos \theta - X_q \cdot \sin \theta, \\ X_{\beta} &= X_d \cdot \sin \theta + X_q \cdot \cos \theta. \end{aligned} \tag{8}$$

Или в матричном представлении:

$$\begin{bmatrix} Z_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\alpha} \\ Z_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_d \\ Z_q \end{bmatrix} = T_{\theta}^T Z_{dq} \quad (9)$$

Используя Matlab Simulink на основе уравнений соберем модель.

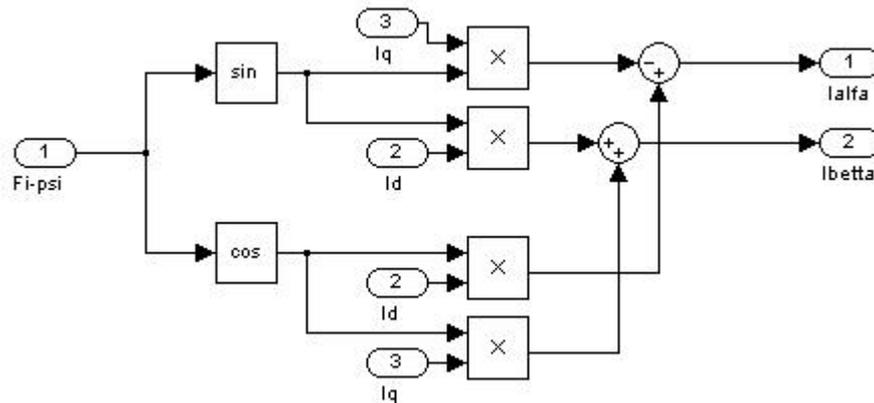


Рисунок 9 – Имитационная модель прямого преобразования Парка в программной среде MATLAB Simulink

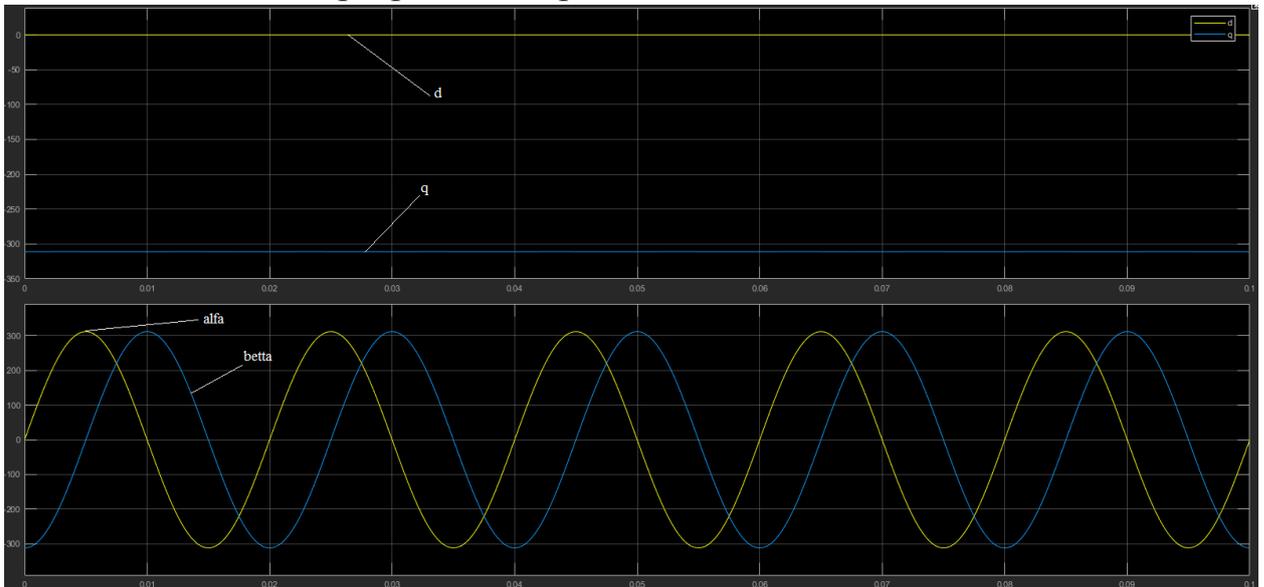


Рисунок 10 – Графики, иллюстрирующие прямое преобразование Парка в программной среде MATLAB Simulink

Второй этап - преобразование $\alpha\beta 0$ координаты в АВС-координаты (обратное преобразование Кларка). Его мы рассмотрели в уравнениях (3)

В следующих главах все координатные преобразования для СДПМ будем выполнять опираясь на вышеописанные уравнения. А имитационное моделирование САР проводить с использованием полученных моделей.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Ротор СДПМ представляет собой постоянный магнит. Ток обмотки статора создает вращающееся магнитное поле статора ($\vec{\psi}_s$), магнитные полюса которого притягивают противоположные магнитные полюса ротора. Вследствие этого возникает момент, вращающий ротор вслед за полем статора (рисунок 11)[12].

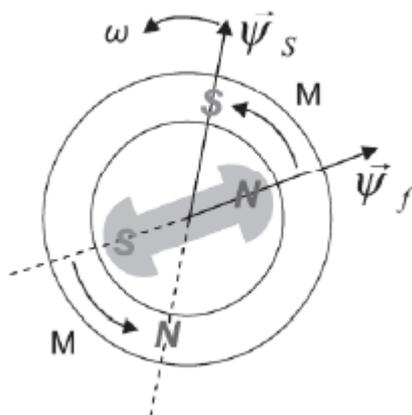


Рисунок 11 – Принцип, иллюстрирующий работу СДПМ

Физическая модель синхронного двигателя с постоянными магнитами приведена на рисунке 12.

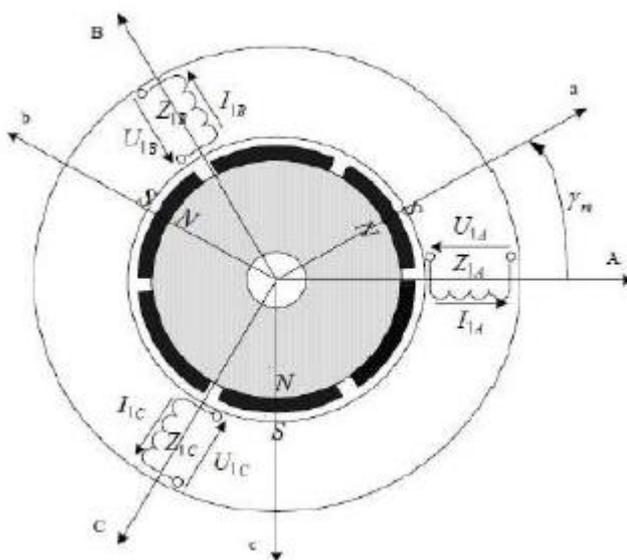


Рисунок 12 – Физическая модель СДПМ

При построении математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами примем следующие допущения[13]:

- отсутствуют насыщение магнитной цепи, потери в стали и эффект вытеснения тока;
- обмотки статора симметричны;
- индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве;
- отсутствует вязкое трение в подшипниках ротора.

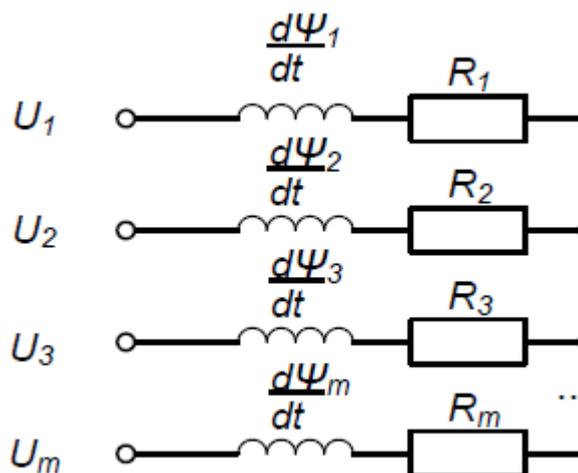


Рисунок 13 – Электрическая схема m-фазного СДПМ

Тогда, на основании 2 закона Кирхгофа и имея схему замещения, уравнение ЭДС на обмотках статора запишется в виде:

$$u + e = iR \quad (10)$$

Выражая напряжение:

$$u = iR - e \quad (11)$$

Где $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ – ЭДС взаимоиндукции

Уравнения баланса напряжений обмоток статора СДПМ выглядят следующим образом:

$$u = iR + \frac{d\Psi}{dt} \quad (12)$$

С учетом допущений и уравнения 4 равновесия ЭДС на обмотках статора в неподвижной системе координат трехфазный двигатель с постоянными магнитами(ротор не имеет обмоток) запишется в виде:

$$\begin{cases} U_A = R_A \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}, \\ U_B = R_B \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, \\ U_C = R_C \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}. \end{cases} \quad (13)$$

Где для машины с возбуждением от постоянных магнитов справедливы уравнения потокосцеплений:

$$\begin{cases} \Psi_A = L_A \cdot i_A + \Phi_0 \cdot \cos \omega \cdot t, \\ \Psi_B = L_B \cdot i_B + \Phi_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}), \\ \Psi_C = L_C \cdot i_C + \Phi_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}). \end{cases} \quad (14)$$

$\Phi_0 = const$ – магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами статора.

С учетом симметричности обмоток примем:

$$\begin{aligned} R_A &= R_B = R_C = R_s, \\ L_A &= L_B = L_C = L_s. \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда уравнения 13 трансформируются в следующий вид:

$$\begin{cases} U_A = R_s \cdot i_A + L_s \frac{di_A}{dt} - \Phi_0 \cdot \sin \omega \cdot t, \\ U_B = R_s \cdot i_B + L_s \frac{di_B}{dt} - \Phi_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}), \\ U_C = R_s \cdot i_C + L_s \frac{di_C}{dt} - \Phi_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}). \end{cases} \quad (16)$$

Следует заметить, что допущение о синусоидальной форме фазных ЭДС является общепринятым[14].

В нормальной форме Коши уравнение (14) принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_A}{dt} = U_A - R_s \cdot i_A, \\ \frac{d\Psi_B}{dt} = U_B - R_s \cdot i_B, \\ \frac{d\Psi_C}{dt} = U_C - R_s \cdot i_C. \end{cases} \quad (17)$$

Матричное уравнение равновесий напряжений в фазах трехфазного СДПМ в нормальной форме Коши запишется(13):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (18)$$

Или в общем виде:

$$\frac{d[\Psi]}{dt} = [U] - [R][i] \quad (19)$$

Где $[U] = [U_A \ U_B \ U_C]^T$ - матрица-столбец мгновенных напряжений, приложенных к фазам обмотки статора;

$[\Psi] = [\Psi_A \ \Psi_B \ \Psi_C]^T$ - матрица-столбец мгновенных потокосцеплений фаз обмотки статора;

$[R] = \text{diag}[R_A \ R_B \ R_C]$ - диагональная матрица активных сопротивлений фазных обмоток;

$[i] = [i_A \ i_B \ i_C]^T$ - матрица-столбец мгновенных фазных токов.

В операторном виде:

$$p \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (20)$$

Или в общем виде:

$$p[\Psi] = [U] - [R][i] \quad (21)$$

Потокосцепление фаз обмотки статора можно выразить через сумму потокосцепления постоянных магнитов ротора и фазных токов статора:

$$[\Psi] = L_s [i] + [\Phi_M] \quad (22)$$

Где $[\Phi_M] = [\Psi_{MA} \Psi_{MB} \Psi_{MC}]^T$

К уравнению баланса напряжений обмотки статора СДПМ (13) добавляются два уравнения динамики:

$$J \frac{d\omega}{dt} = p(M_\varepsilon - M_C) \quad (23)$$

Где – J приведенный момент инерции ротора;

M_ε и M_C – соответственно, электромагнитный момент и момент сопротивления, приложенный к валу ротора;

p – число пар полюсов СДПМ.

Электромагнитный момент развиваемый на валу двигателя можно представить [6]:

$$\vec{M}_\varepsilon = L_1 (\vec{\Psi}_1 \Psi_2^*) \quad (24)$$

Либо применяя закон сохранения энергии:

$$M_\varepsilon = \frac{\partial W'}{\partial \varphi} \quad (25)$$

Где $W' = [i]^T [\Psi_0] + \frac{1}{2} [i]^T [L][i]$

И второе:

$$\frac{d\omega}{dt} = \varphi \quad (26)$$

На пути упрощения математического описания синхронной машины и вообще машин переменного тока, удачным и изящным методом оказался метод пространственного вектора. Суть метода состоит в том, что мгновенные значения симметричных трехфазных переменных состояния (напряжения, токи, потокосцепления) можно математически преобразовать так, чтобы они были представлены одним пространственным вектором. Это математическое преобразование имеет вид (на примере тока статора):

$$\bar{i}_s = \frac{2}{3} \left(i_A + \bar{a} \cdot i_B + \bar{a}^2 \cdot i_C \right) \quad (27)$$

где $\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, $\bar{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – вектора,

учитывающие пространственное смещение обмоток [15].

Для преобразования уравнений в мгновенных значениях к уравнениям в пространственных векторах умножим первое уравнение на $\frac{2}{3}$, второе – на

$\frac{2}{3}\bar{a}$, третье – на $\frac{2}{3}\bar{a}^2$, и сложим, тогда получим для базиса (ABC):

$$\begin{cases} \bar{U}_s = R_s \cdot \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt}, \\ \bar{\Psi}_s = L_s \cdot \bar{i}_s + \Phi_0 \cdot e^{j\omega t} = L_s \cdot \bar{i}_s + \bar{\Phi}_0, \end{cases} \quad (28)$$

где L_s – индуктивность статора,

$\bar{\Psi}_s$ – вектор потокосцепления статора,

$\bar{\Phi}_0$ – вектор магнитного потока от постоянных магнитов ротора.

Электромагнитный момент, развиваемый на валу двигателя равен

$$M = \frac{3}{2} z_p \cdot |\bar{\Psi}_s \cdot \bar{i}_s| \quad (29)$$

Уравнения равновесия моментов на валу двигателя (основное уравнение электромеханики):

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \quad (30)$$

где $\omega_m = \frac{\omega_e}{z_p}$ – скорость вращения ротора,

z_p – число пар полюсов.

3.1 Математическая модель СДПМ в неподвижной системе координат

Опираясь на уравнения (28) в базисе и координатные преобразования Кларка(1,3) запишем уравнение баланса напряжений для СПДМ в базисе в следующем виде:

$$\bar{U}_s = R_s \cdot \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j \cdot \omega_m \cdot z_p \cdot \bar{\Psi}_s \quad (31)$$

Учитывая, что:

$$\bar{\Psi}_s = L_s \bar{i}_s + \Phi_0 e^{j\omega t} = L_s \bar{i}_s + \bar{\Phi}_0 \quad (32)$$

Для машины с постоянными магнитами $\frac{d\Phi_0}{dt} = 0$; $\Phi_0 = const$.

Система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \bar{U}_s = R_s \cdot \bar{i}_s + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j \cdot \omega_1 \cdot z_p \cdot \bar{\Psi}_s, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot |\bar{\Psi}_s \cdot \bar{i}_s|, \\ J \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (33)$$

При переходе в двух координатный базис $(\alpha \beta)$ в уравнении 33 появилась новое слагаемое. Разложим уравнения по осям неподвижной системы координат α, β .

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = R_s \cdot i_{s\alpha} + L_s \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_\beta, \\ U_{s\beta} = R_s \cdot i_{s\beta} + L_s \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt} + \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_\alpha, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (\Psi_\alpha \cdot i_{s\beta} - \Psi_\beta \cdot i_{s\alpha}), \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (34)$$

В нормальном форме Коши система уравнений(34) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{U_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha} + \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_\beta}{L_s}, \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{U_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta} - \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_\alpha}{L_s}, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (\Psi_\alpha \cdot i_{s\beta} - \Psi_\beta \cdot i_{s\alpha}), \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{M - M_c}{J}. \end{cases} \quad (35)$$

Проекции пространственного вектора потокосцепления $\bar{\Psi}_s$ на оси α, β , с учетом (35) (второе уравнение системы (34)), запишем в виде

$$\begin{cases} \Psi_\alpha = \Psi_s \cdot \cos \omega \cdot t = L_\alpha \cdot i_{s\alpha} + \Phi_0 \cdot \cos \omega \cdot t, \\ \Psi_\beta = \Psi_s \cdot \sin \omega \cdot t = L_\beta \cdot i_{s\beta} + \Phi_0 \cdot \sin \omega \cdot t, \end{cases} \quad (36)$$

где L_α, L_β – индуктивности обмоток статора по продольной и поперечной осям ротора, соответственно.

Для частного случая неявнополюсной машины $L_\alpha = L_\beta = L_s$.

С учетом условия (36) перепишем систему (35) в следующем виде:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = R_s \cdot i_{s\alpha} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{s\alpha}}{dt} - \omega_m \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{s\beta} - \omega_m \cdot z_p \cdot \Phi_0 \cdot \sin \Theta, \\ U_{s\beta} = R_s \cdot i_{s\beta} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{s\beta}}{dt} + \omega_m \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{s\alpha} + \omega_m \cdot z_p \cdot \Phi_0 \cdot \cos \Theta, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{s\beta} (L_s \cdot i_{s\alpha} + \Phi_0 \cdot \cos \Theta) - i_{s\alpha} (L_s \cdot i_{s\beta} + \Phi_0 \cdot \sin \Theta)), \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (37)$$

Или в нормальной форме Коши:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{U_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha} + \omega_m \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{s\beta} + \omega_m \cdot z_p \cdot \Phi_0 \cdot \sin \Theta}{L_s} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{U_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta} + \omega_m \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{s\alpha} + \omega_m \cdot z_p \cdot \Phi_0 \cdot \sin \Theta}{L_s} \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{s\beta} \cdot (L_s \cdot i_{s\alpha} + \Phi_0 \cos \Theta) - i_{s\alpha} \cdot (L_s \cdot i_{s\beta} + \Phi_0 \sin \Theta)) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \end{array} \right. \quad (38)$$

Структурная схема, соответствующая системе уравнений (8) приведена на рисунке **Ошибка! Источник ссылки не найден.** На структурной схеме

$T_3 = \frac{L_s}{R_s}$, с — электромагнитная постоянная времени.

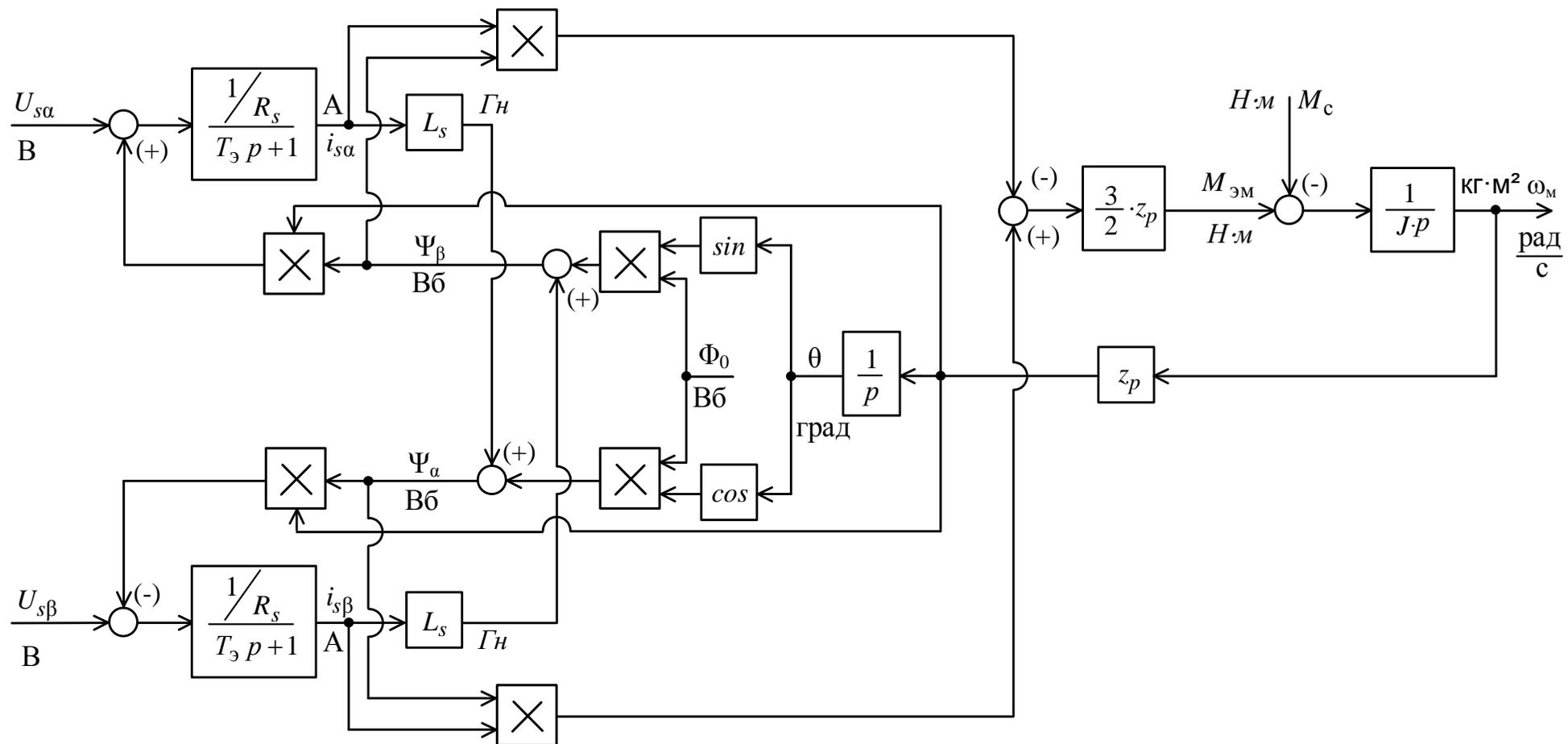


Рисунок 14 – Структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами в неподвижной системе координат

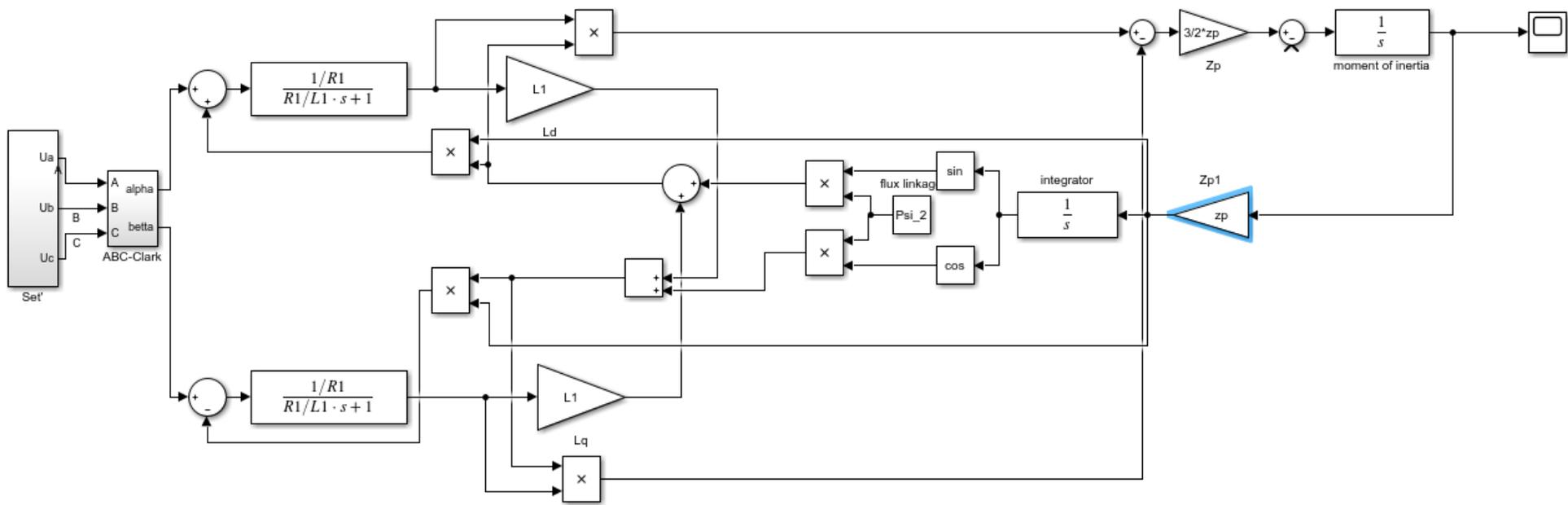


Рисунок 15 – Имитационная модель синхронного двигателя в среде Matlab Simulink в неподвижной системе координат

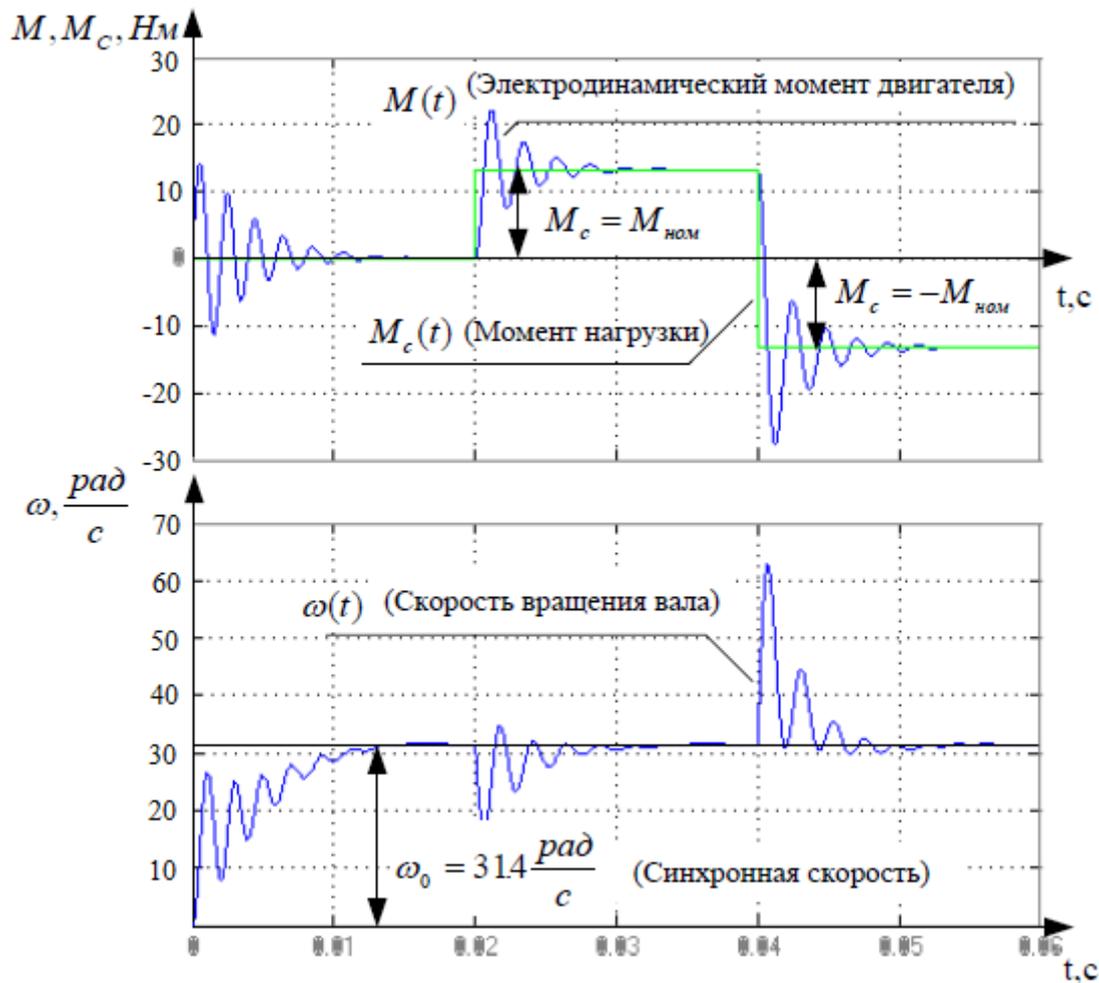


Рисунок 16 – Графики переходных процессов по моменту и по скорости припуске и набросе нагрузки на вал синхронной машины в программной среде MATLAB Simulink

Как видно, имитационная модель, в неподвижной системе координат, выходит на заданную скорость, но во время переходного процесса, при пуске и при набросе нагрузки, возникают колебания по скорости и по моменту.

3.2 Математическая модель СДПМ в вращающейся системе координат

Как уже было сказано ранее, вся систему управления, включая регуляторы, проектируется во вращающейся системе координат dq .

Введем в рассмотрение систему координат d, q связанную с ротором и вращающуюся вместе с ним. Ее скорость вращения всегда равна синхронной скорости. Вектор потока создаваемого постоянными магнитами ротора

синхронной машины может быть представлен пространственным вектором, неподвижным относительно ротора и вращающегося вместе с ним, а следовательно вместе с системой координат d, q . Поэтому направив ось d по вектору потока ротора, можно избавиться от проекции вектора на ось q . Таким образом имеем:

$$\begin{cases} \bar{\Phi}_0 = \bar{\Phi}_d, \\ 0 = \bar{\Phi}_q. \end{cases} \quad (39)$$

Разложим систему (33), опираясь на уравнения(4,5) в осях вращающейся системе координат d, q на проекции:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{sd}}{dt} - \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_q, \\ U_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{sq}}{dt} + \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_d, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{sd} \cdot \Psi_q - i_{sq} \cdot \Psi_d), \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (40)$$

В нормальном форме Коши система уравнений(40) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{U_{sd} - R_s \cdot i_{sd} + \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_q}{L_s}, \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{U_{sq} - R_s \cdot i_{sq} - \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_d}{L_s}, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (\Psi_d \cdot i_{sq} - \Psi_q \cdot i_{sd}), \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{M - M_c}{J}. \end{cases} \quad (41)$$

Проекция пространственного вектора потокосцепления $\bar{\Psi}_s$ на оси d, q , с учетом $\bar{\Psi}_s = L_s \cdot \bar{i}_s + \Phi_0 \cdot e^{j\omega t} = L_s \cdot \bar{i}_s + \bar{\Phi}_0$ (второе уравнение системы (33)), запишем в виде:

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d \cdot i_{sd} + \Phi_0, \\ \Psi_q = L_q \cdot i_{sq}. \end{cases} \quad (42)$$

Для частного случая неявнополюсной машины $L_d = L_q = L_s$.

С учетом (42) система (41) запишется в виде:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{sd}}{dt} - \omega_m \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{sq}, \\ U_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \frac{d\bar{i}_{sq}}{dt} + \omega_m \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{sd} + \omega_m \cdot z_p \cdot \Phi_0, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{sd} \cdot (L_s \cdot i_{sq}) - i_{sq} (L_s \cdot i_{sd} + \Phi_0)), \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (43)$$

Или в нормальной форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{U_{sd} - R_s \cdot i_{sd} + \omega_m \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{sq}}{L_s} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{U_{sq} - R_s \cdot i_{sq} + \omega_m \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{sd}}{L_s} \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{sd} \cdot (L_s \cdot i_{sq}) - i_{sq} \cdot (L_s \cdot i_{sd})) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \end{cases} \quad (44)$$

Структурная схема двигателя, соответствующая системе (44) приведена на рисунке 17. На структурной схеме $T_3 = \frac{L_s}{R_s}$, c – электромагнитная постоянная времени.

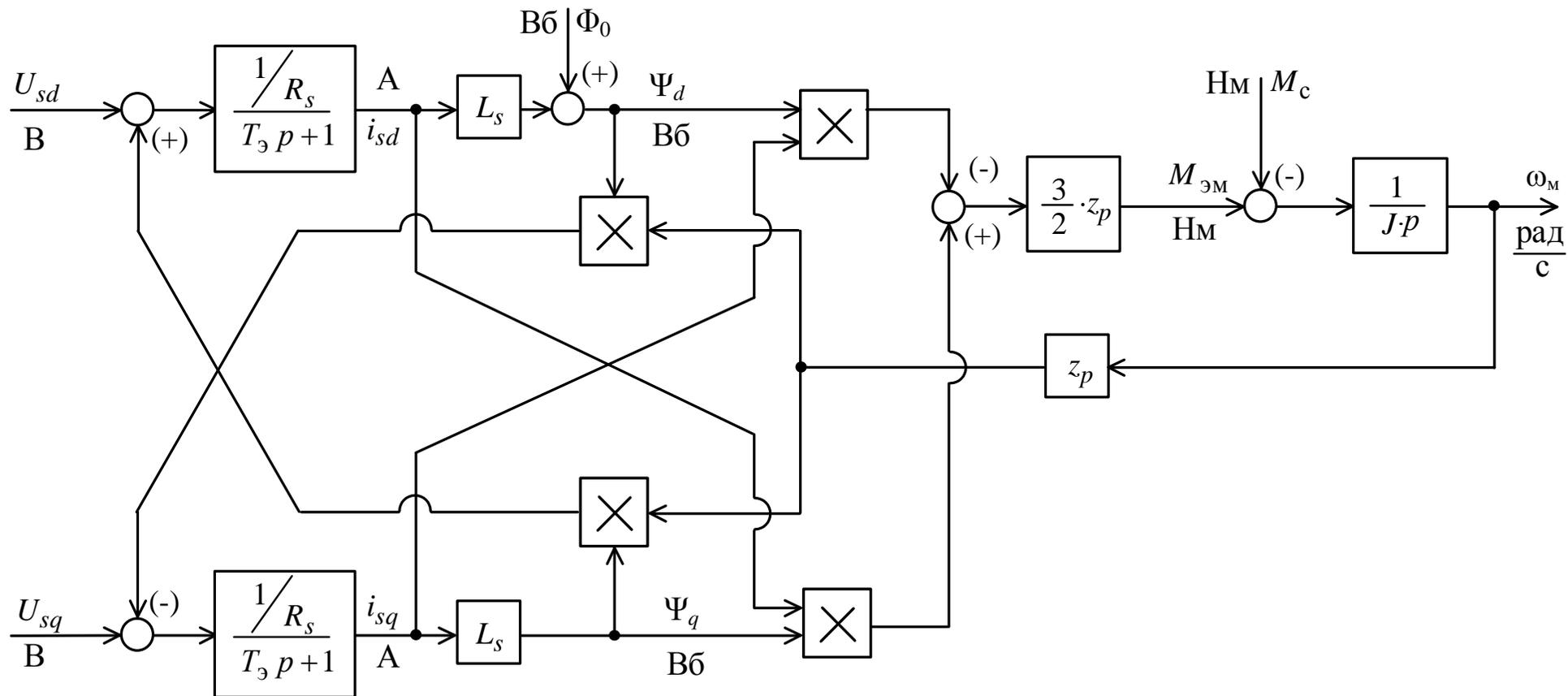


Рисунок 17 – Структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами в подвижной системе координат

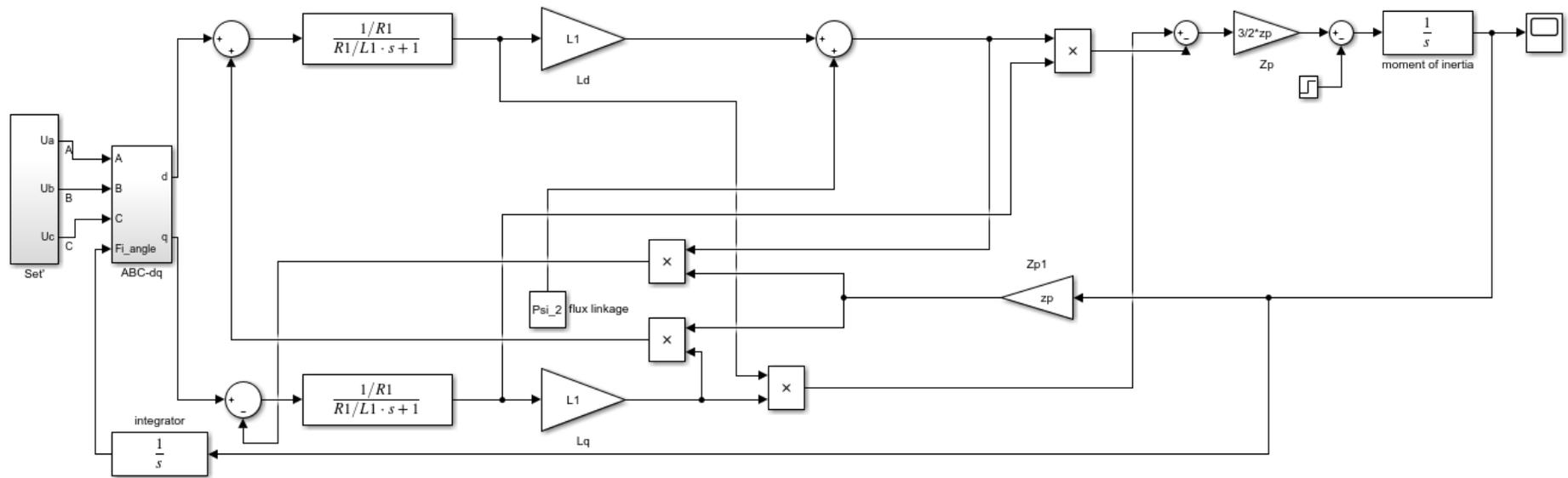


Рисунок 18 – Имитационная модель синхронного двигателя в среде Matlab Simulink в подвижной системе координат

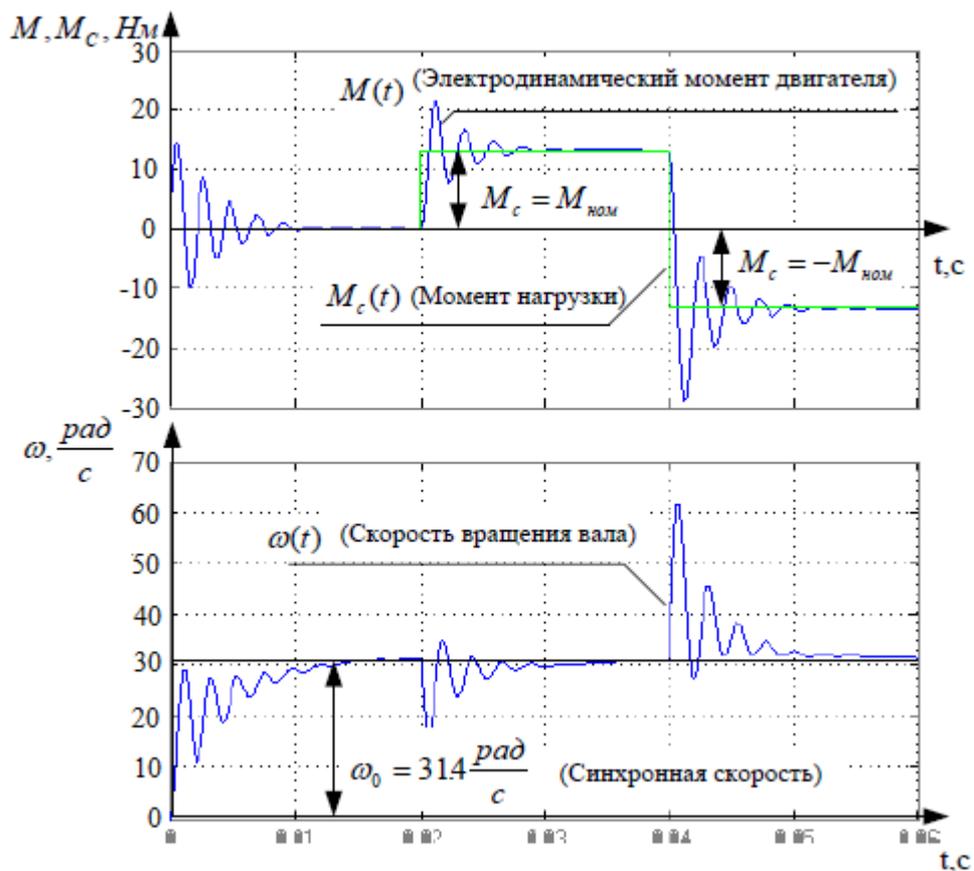


Рисунок 19 – Графики переходных процессов по моменту и по скорости припуске и набросе нагрузки на вал синхронной машины в программной среде MATLAB Simulink

Как видно, имитационная модель, во вращающейся системе координат, выходит на заданную скорость, но во время переходного процесса, при пуске и при набросе нагрузки, возникают колебания по скорости и по моменту.

Для убеждения в том, что обе системы работоспособны и адекватны, проиллюстрируем на одном графике переходные процессы в подвижной неподвижной системе координат.

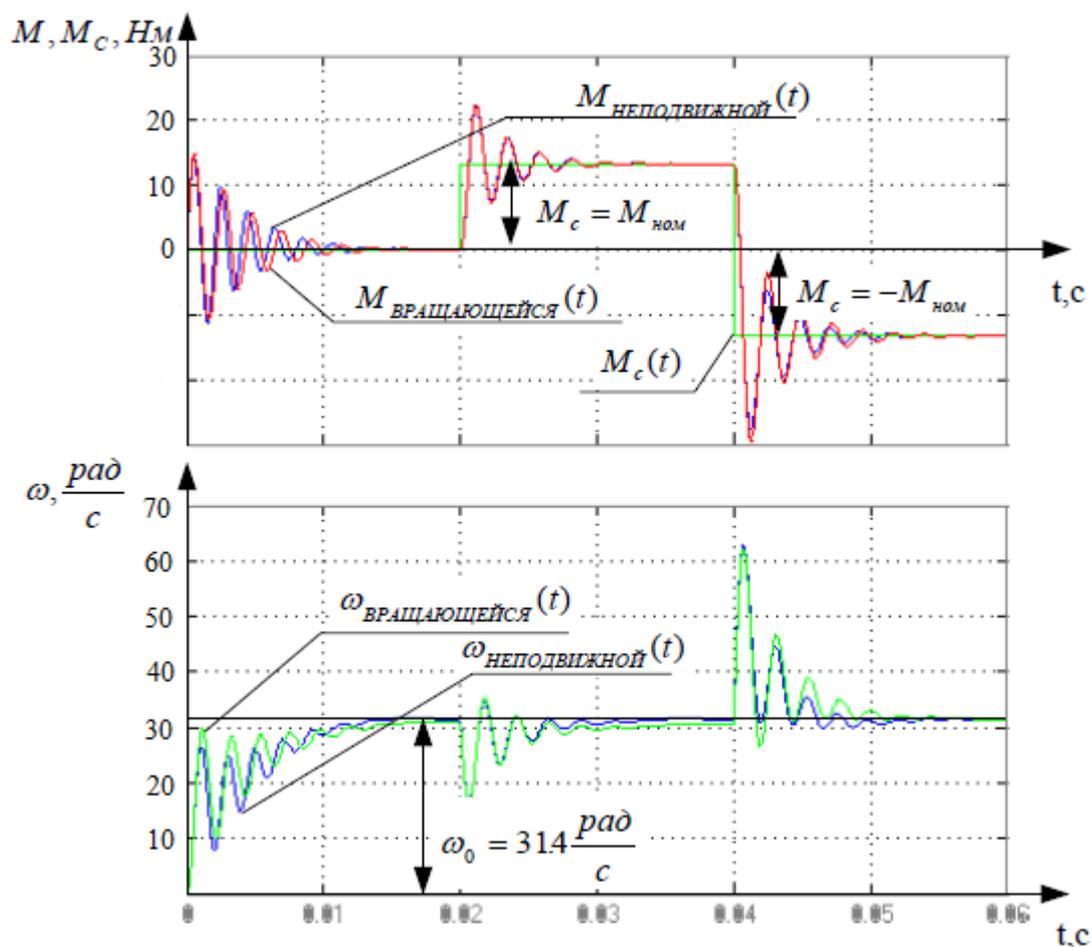


Рисунок 20 – Сравнение переходных процессов при пуске и набросе нагрузке в неподвижной и подвижной координатных системах

По графикам видно небольшое отклонение вращающейся системы от неподвижной. Это связано с допущениями, которые мы приняли выше. Отклонение по скорости составляет $<2\%$ (31.4 рад/с и 31 рад/с соответственно) и по моменту $<1\%$ (11.8 Нм и 11.7 Нм соответственно).

3.3 Структурная схема силового канала электропривода

В силовой канал электропривода входят:

- преобразователь частоты, выполняющий функцию электрического преобразователя;
- электродвигатель, который выполняет функцию электромеханического преобразователя;
- механическая система, которая выполняет функцию механического преобразователя.

При решении задач анализа и синтеза регулируемых синхронных электроприводов обычно применяются модели электродвигателя, составленные на базе обобщенной двухфазной электрической машины и выполненные в неподвижной или вращающейся двухфазной системе координат (d, q). На рисунке 21 приведена структурная схема силового канала непрерывной линейризованной системы преобразователь – синхронный электродвигатель с постоянными магнитами во вращающейся системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора. Входными величинами структурной схемы являются составляющие напряжения управления преобразователя U_{ynd} и U_{ynq} , а выходной величиной – угловая скорость двигателя ω . Данная структурная схема характеризуется следующими промежуточными координатами: – $U_{1d}, U_{1q}, I_{1d}, I_{1q}, \Psi_{1d}, \Psi_{1q}$ составляющие напряжения, тока статора и потокосцепления ротора в ортогональной вращающейся системе координат (d, q); – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

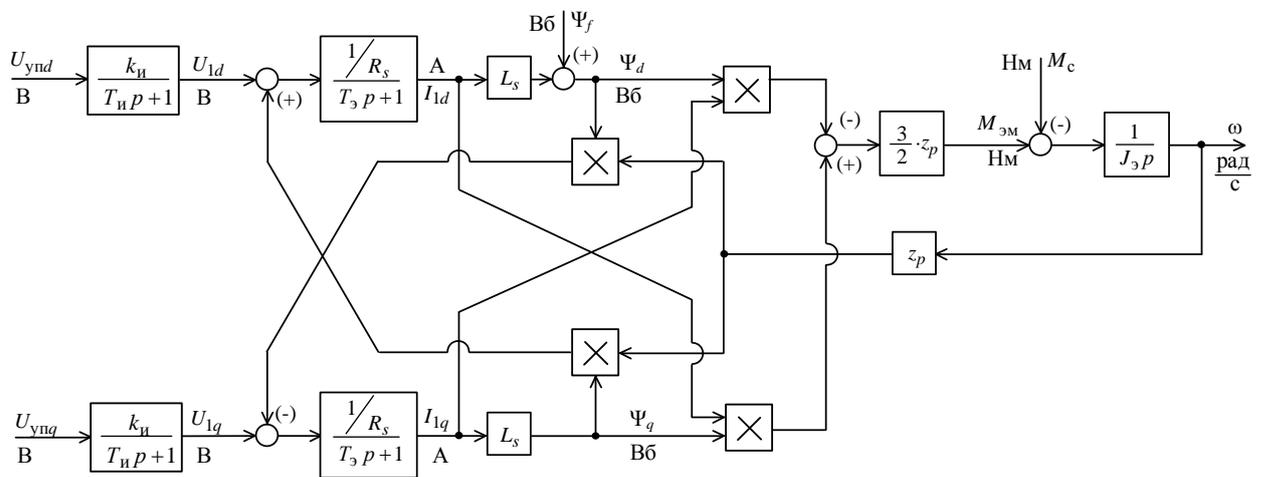


Рисунок 21 – Структурная схема силового канала

3.4 Параметры двигателя и используемые константы

Параметры двигателя:

$R_s = 0,321$ – сопротивление статора, Ом;

$L_d = 0,00356$ – полная индуктивность статора по оси d, Гн;

$L_q = 0,00356$ – полная индуктивность статора по оси q, Гн;

$\text{Flux} = 0,001$ – амплитуда вектора потокосцепления ротора, Вб;

$z_p = 5$ – число пар полюсов двигателя;

$J = 11,9 \cdot 10^{-6}$ – приведённый момент инерции двигателя, кг·м²;

$n_H = 300$ – номинальная скорость вращения двигателя, Об/мин;

$\omega_H = 31,41593$ – номинальная скорость вращения двигателя, рад/с;

$I_H = 1.7$ – действующее значение номинального тока двигателя, А;

$U_{\text{пит}} = 220$ – напряжение питания двигателя, В;

$f_H = 40$ – номинальная частота питающей сети, Гц.

Параметры инкрементного энкодера:

$\text{Qep4Ticks} = 2500$ – число меток на оборот инкрементного энкодера.

Параметры преобразователя частоты:

$U_{dc_bus} = 24$ – величина напряжения на шине постоянного тока преобразователя частоты, В;

$k_u = 140$ – коэффициент усиления преобразователя частоты, В.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

4.1 Оптимизация контура тока по оси d

Оптимизируем внутренний контур тока на модульный оптимум (МО) при заторможенном двигателе ($\omega=0$). При этом внутренняя обратная связь по ЭДС не влияет на процессы в контуре тока. Структурная схема контура тока представлена на рисунке 22.

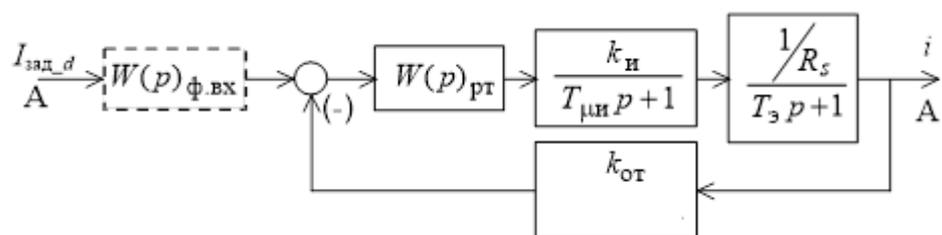


Рисунок 22 – Структурная схема контура тока

Где:

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

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

$W(p)_{рТ}$ – передаточная функция ПИ-регулятора тока;

k_T – коэффициент обратной связи по току В/А;

$T_э$ – электромагнитная постоянная времени, с;

$R_э$ – эквивалентное сопротивление, Ом;

$K_{и}$ – максимальное значение коэффициента усиления преобразователя.

Произведем расчет составляющих контура тока:

При настройке на МО разомкнутый контур тока имеет передаточную функцию[16]:

$$W^{(p)}(p)_{MO} = \frac{1}{a_M T_{\mu\Pi\Pi} (T_{\mu\Pi\Pi} p + 1)}. \quad (45)$$

$T_{\mu\Pi\Pi}$ – малая постоянная времени некомпенсируемого аperiodического звена;

$a_M=1\div 4$ – коэффициент модульной настройки;

$a_M=2$ - стандартный коэффициент настройки контура.

$$T_{\mu T} = T_{инв} = \frac{1}{f_{инв}} = \frac{1}{2000} = 0,0005 \quad (46)$$

Тогда выражение (45) можно переписать в следующем виде:

$$W_{PKT}^{MO}(p) = \frac{1}{p \cdot 2 \cdot T_{\mu T} (T_{\mu T} p + 1)} \quad (47)$$

Передаточная функция регулятора тока для настройки контура на МО $W(p)_{PT}$ находится из уравнения 47

$$W_{PT}(p) \cdot \frac{k_{инв}}{(pT_{инв} + 1)} \cdot \frac{1/R_1}{(p \cdot L_1/R_1 + 1)} \cdot k_{ом} = \frac{1}{p \cdot 2 \cdot T_{\mu T} (T_{\mu T} p + 1)}, \quad (48)$$

Коэффициент инвертора мы можем найти, учитывая. Что максимальное выходное напряжение 140В, а минимальное 1В, тогда:

$$k_{инв} = \frac{U_{\max out}}{U_{PT \max}} = \frac{140}{1} = 140 \quad (49)$$

$$W_{PT}(p) = \frac{1}{p \cdot 2 \cdot T_{\mu T} (T_{\mu T} p + 1)} \cdot \frac{(pT_{инв} + 1)}{k_{инв}} \cdot \frac{(p \cdot L_1/R_1 + 1)}{1/R_1 \cdot k_{ом}} \quad (50)$$

Упрощаем и получаем:

$$W_{PT}(p) = \frac{(p \cdot L_1 / R_1 + 1) \cdot R_1}{p \cdot 2 \cdot T_{\mu T} \cdot k_{инв} \cdot k_{ом}} = \frac{0,321 \left(\frac{0,00356}{0,321} p + 1 \right)}{p \cdot 2 \cdot 0,0005 \cdot 140 \cdot 1} = \frac{0,321(0,011p + 1)}{0,14p} \quad (51)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_{ПИ}(p) = k_{ом} \cdot \frac{(p \cdot T_{pez} + 1)}{p \cdot T_{pez}} = k_{ом} \left(1 + \frac{1}{p \cdot T_{pez}} \right) \quad (52)$$

Тогда функция замкнутого контура тока примет вид:

$$W_{PT}(p) = \frac{L_1}{2 \cdot T_{инв} \cdot k_{инв} \cdot k_{ом}} \cdot \frac{(p \cdot \frac{L_1}{R_1} + 1)}{p \cdot \frac{L_1}{R_1}} \quad (53)$$

Где:

$$k_{pez} = \frac{L_1}{2 \cdot T_{\mu T} \cdot k_{инв} \cdot k_{ом}} = \frac{0,00356}{2 \cdot 0,0005 \cdot 140 \cdot 1} = 0,025 \quad (54)$$

$$T_{pez} = \frac{L_1}{R_1} = \frac{0,00356}{0,321} = 0,011 \quad (55)$$

На основании выше приведенных расчетов и структурной схемы производим сбор и моделирование контура тока I_d в среде Matlab Simulink(рисунок 23).

Все переменные прописаны в m-файле и приведены в приложении А.

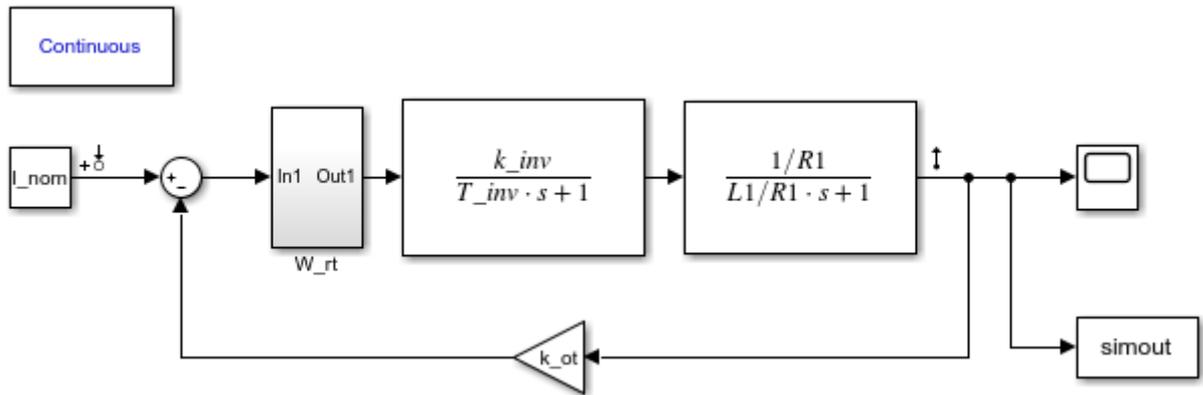


Рисунок 23 – Имитационная модель управления составляющей контура тока I_d в среде Matlab Simulink

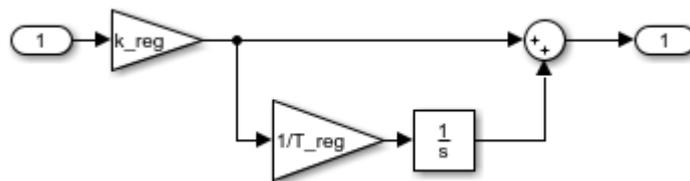


Рисунок 24 – Подсистема ПИ-регулятора скорости

Чтобы оценить правильность всех расчетов, нужно провести сравнение ожидаемых показателей качества замкнутого контура тока по управлению без фильтра на входе с действительными. Ожидаемые показатели для контура будут:

- 1) Установившаяся ошибка $\Delta I_{уст} = 0$;
- 2) – полоса пропускания по модулю и фазе:

$$\omega_n^{(\phi)} = \omega_n^{(M)} = \frac{0,71}{T_{\mu r}} = \frac{0,71}{0,0005} = 420 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

- 3) Перерегулирование $\sigma = 6,7\%$;
- 4) время первого согласования: $t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu r} = 4,1 \cdot 0,0005 = 0,00205 \text{ с}$;

5) время переходного процесса при обработке ступенчатого управляющего воздействия: $t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,0005 = 0,00205 \text{ с}$;

Переходные процессы и частотные характеристики контура тока, настроенного на МО, представлены на рисунках 25 – 26.

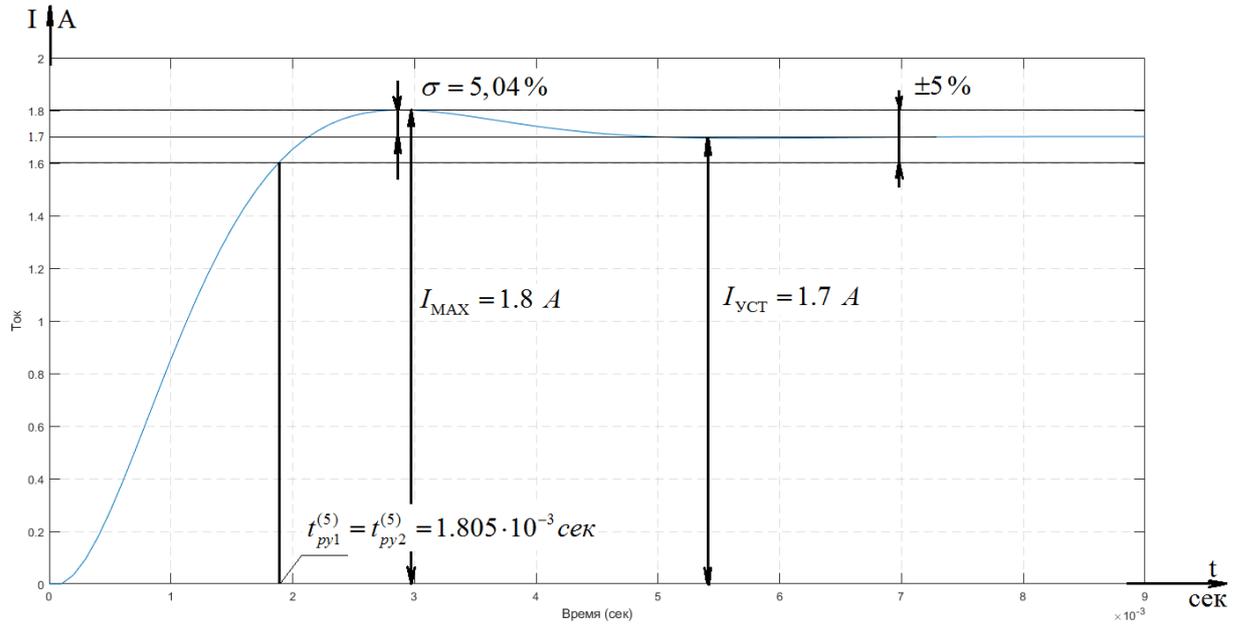


Рисунок 25 – Характеристика переходного процесса контура тока I_d полученная в среде Matlab Simulink

$$\sigma = \frac{I_{МАКС} - I_{уст}}{I_{уст}} \cdot 100\% = \frac{1,8 - 1,6}{1,8} \cdot 100\% = 5\% \quad (56)$$

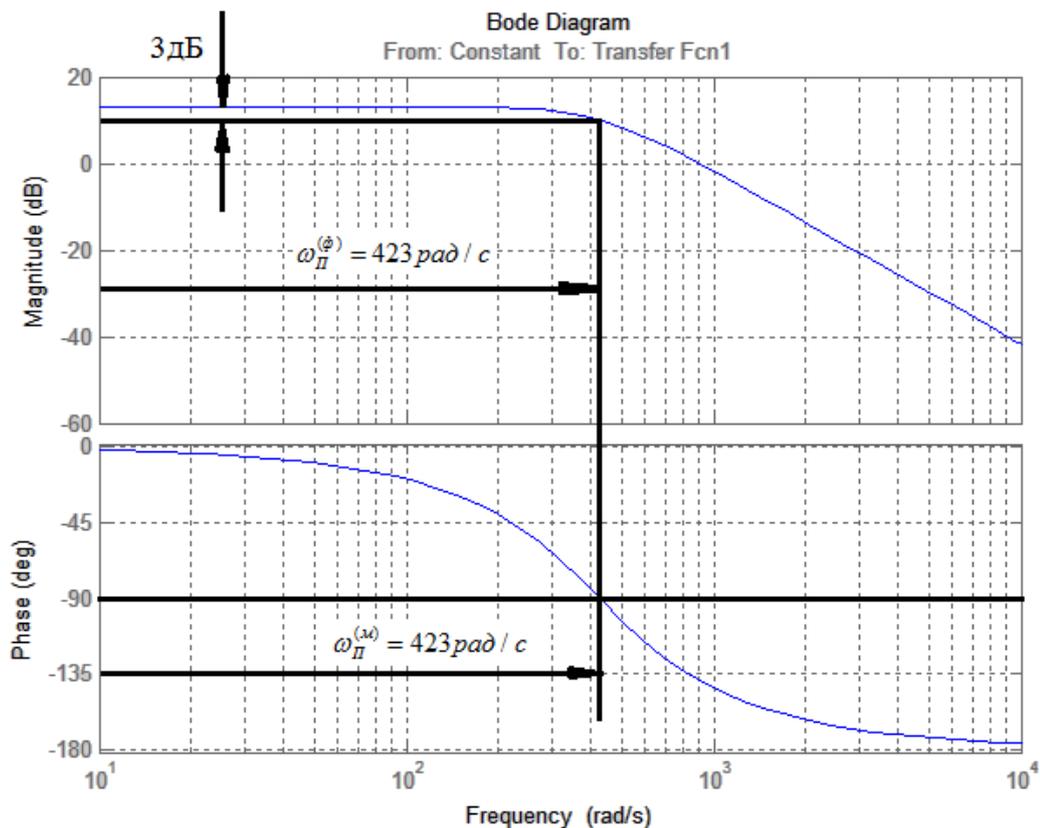


Рисунок 26 – ЛАЧХ и ЛФЧХ характеристики контура тока тока I_d полученные в среде Matlab Simulink

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линейризованного контура то, настроенного на МО, в таблицу 2.

Таблица 2 – Показатели качества переходного процесса по управлению линейризованного контура тока, оптимизированного по МО

$t_{py1}^{(s)}$, с	$t_{py2}^{(s)}$, с	σ , %	$\Delta I_{уст}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\Pi}^{(\phi)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\Pi}^{(m)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$
Ожидаемые показатели					
0,00205	0,00205	6,7	0	420	420
Результаты моделирования					
0,001805	0,001805	5	0	423	423

Сравнивая полученные показатели качества переходных процессов с желаемыми, можно сказать, что они практически одинаковы, из чего следует, что контур тока настроен правильно. Контур тока, оптимизированный по МО, является астатическим по управлению, так как при воздействии на

контур ступенчатого управляющего сигнала установившаяся ошибка равна нулю.

4.2 Оптимизация контура тока по оси q

Для контура управления составляющей вектора тока I_{sy} структурная блок схема и расчетные показатели качества останутся все те же, что для контура с составляющей вектора тока I_q . Поэтому сразу же перейдем к определению показателей качества полученных опытным путем. Имитационная модель представлена на рисунке 27.

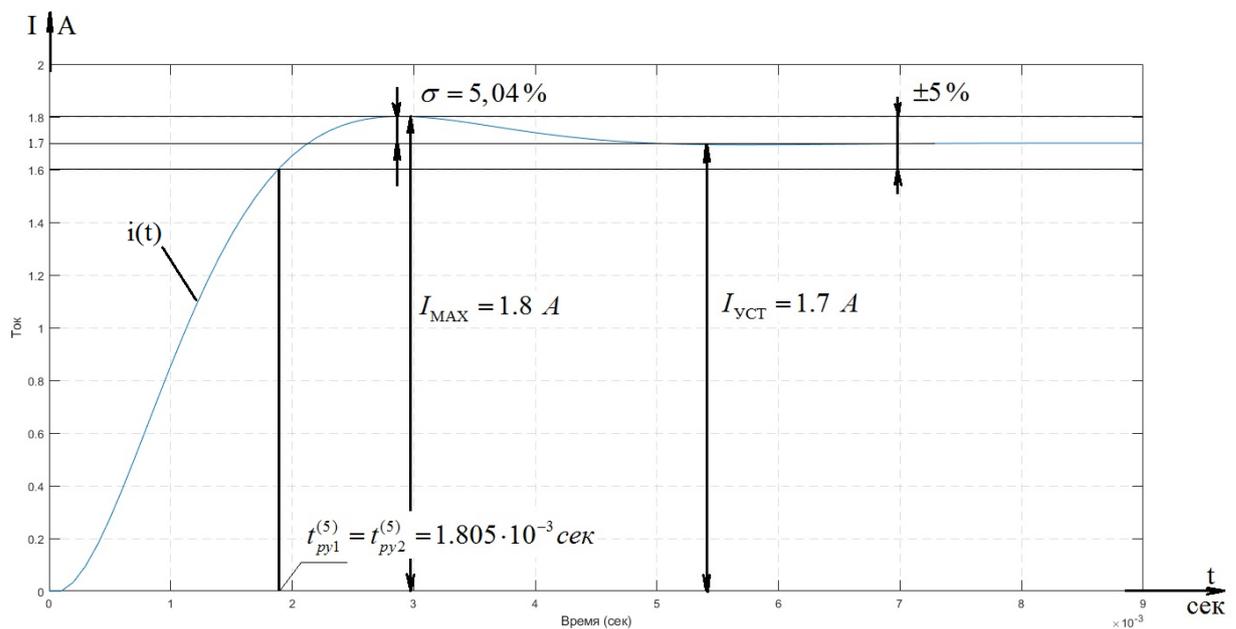


Рисунок 27 – Характеристика переходного процесса контура тока I_d полученная в среде Matlab Simulink

$$\sigma = \frac{I_{MAX} - I_{уст}}{I_{уст}} \cdot 100\% = \frac{1,8 - 1,6}{1,8} \cdot 100\% = 5\% \quad (57)$$

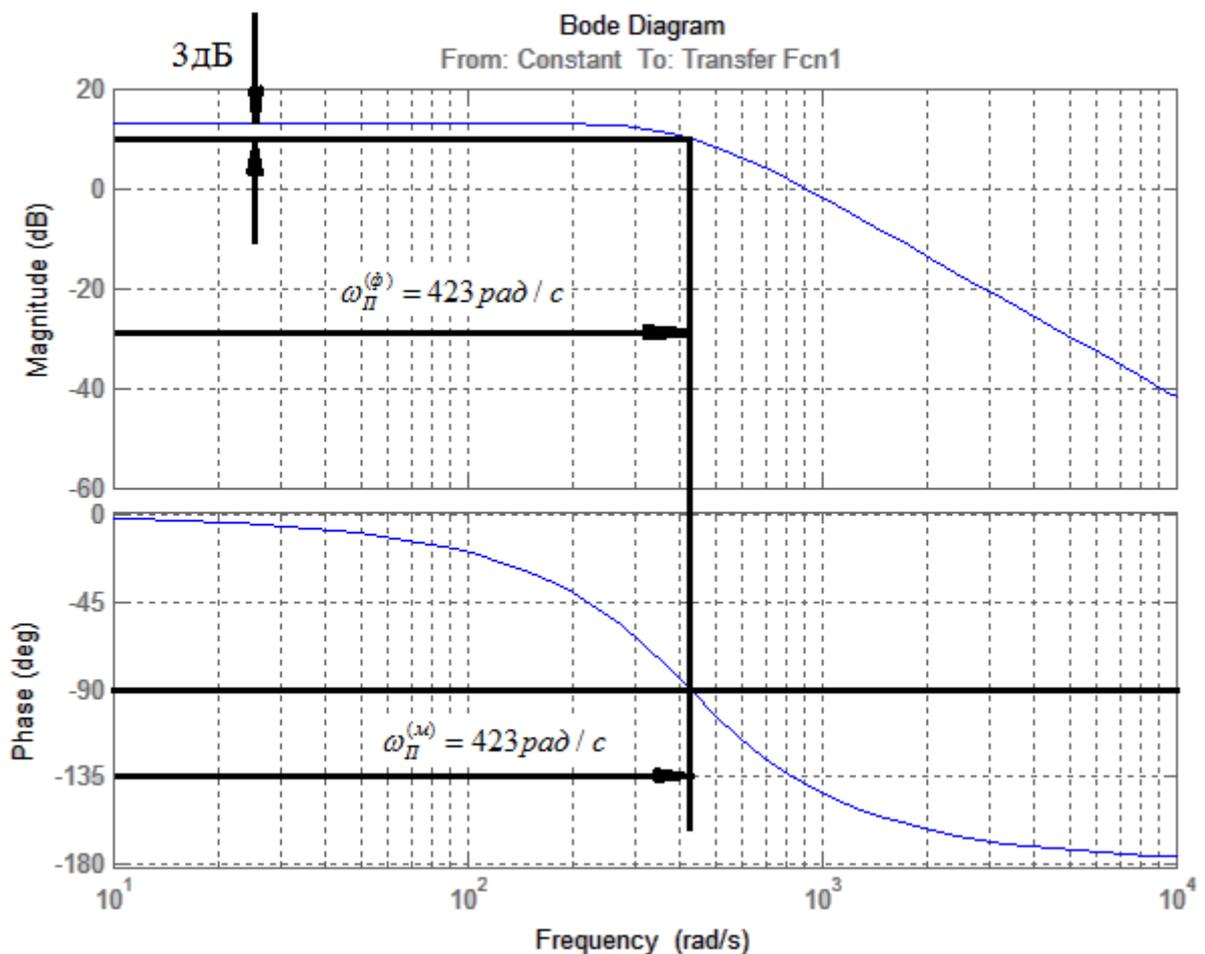


Рисунок 28 – ЛАЧХ и ЛФЧХ характеристики контура тока тока I_d полученные в среде Matlab Simulink.

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линейризованного контура то, настроенного на МО, в таблицу 3.

Таблица 3 – Показатели качества переходного процесса по управлению линейризованного контура тока, оптимизированного по МО

$t_{\text{py1}}^{(s)}$, с	$t_{\text{py2}}^{(s)}$, с	σ , %	$\Delta I_{\text{уст}}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\Pi}^{(\phi)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\Pi}^{(M)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$
Ожидаемые показатели					
0,00205	0,00205	6,7	0	420	420
Результаты моделирования					
0,001805	0,001805	5	0	423	423

Сравнивая полученные показатели качества переходных процессов с желаемыми, можно сказать, что они практически одинаковы, из чего следует,

что контур тока настроен правильно. Контур тока, оптимизированный по МО, является астатическим по управлению, так как при воздействии на контур ступенчатого управляющего сигнала установившаяся ошибка равна нулю.

4.3 Оптимизация контура скорости на симметричный оптимум с фильтром на входе

Настроим на СО+Ф.

При настройке на СО разомкнутый контур скорости имеет передаточную функцию[17]:

$$W_{PKC}^{SO}(p) = \frac{(p \cdot 4 \cdot T_{\mu C} + 1)}{p^2 \cdot 8 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot (p \cdot T_{\mu C} + 1)} \quad (58)$$

$$W_{PT}(p) \cdot W_{ЗКТ}(p) \cdot \Psi_2 \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{1}{pJ_3} \cdot k_{oc} = \frac{(p \cdot 4 \cdot T_{\mu C} + 1)}{p^2 \cdot 8 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot (p \cdot T_{\mu C} + 1)} \quad (59)$$

$$W_{ЗКТ}(p) = \frac{\frac{1}{k_{om}}}{2 \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (p \cdot T_{\mu T} + 1) + 1} \quad (60)$$

Раскроем скобки, получаем:

$$W_{ЗКТ}(p) = \frac{\frac{1}{k_{om}}}{\left[p^2 \cdot 2 \cdot T_{\mu T}^2 + p \cdot 2 \cdot T_{\mu T} + 1 \right]} \approx \frac{\frac{1}{k_{om}}}{\left[p \cdot 2 \cdot T_{\mu T} + 1 \right]} \quad (61)$$

Тогда передаточная функция скорости имеет вид:

$$W_{PT}(p) = \frac{(p \cdot 4 \cdot T_{\mu C} + 1)}{p^2 \cdot 8 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot (p \cdot T_{\mu C} + 1)} \cdot \frac{1}{W_{ЗКТ}} \cdot \frac{2 \cdot p \cdot J_3}{3 \cdot z_p \cdot k_{oc} \cdot \Psi_2} \quad (62)$$

$$T_{\mu C} = 2T_{\mu T} = 2T_{инв} = 0,001 \quad (63)$$

С учетом передаточной функции контура тока примет вид:

$$W_{PC}(p) = \frac{(p \cdot 8 \cdot T_{\mu T} + 1) \cdot \left[p2T_{\mu T} + 1 \right] \cdot k_{om} \cdot 2 \cdot p \cdot J_3}{p^2 \cdot 8 \cdot 4 \cdot T_{\mu T}^2 \cdot (p2T_{\mu T} + 1) \cdot 3 \cdot z_p \cdot k_{oc} \cdot \Psi_2} \quad (64)$$

Преобразуем:

$$W_{PC}(p) = \frac{(p \cdot 8 \cdot T_{\mu T} + 1)}{p \cdot 8 \cdot T_{\mu T}} \cdot \frac{k_{om} \cdot J_{\vartheta}}{3 \cdot z_p \cdot k_{oc} \cdot \Psi_2 \cdot 2 \cdot T_{\mu C}} =$$

$$= \frac{(p \cdot 8 \cdot 0,0005 + 1)}{p \cdot 8 \cdot 0,0005} \cdot \frac{1 \cdot 11,9 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 0,01 \cdot 2 \cdot 0,001} = \frac{0,991 \cdot (0,004p + 1)}{p} \quad (65)$$

$$k_{pez.C} = \frac{k_{om} \cdot J_{\vartheta}}{3 \cdot z_p \cdot k_{oc} \cdot \Psi_2 \cdot 2 \cdot T_{\mu C}} =$$

$$= \frac{1 \cdot 11,9 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 0,01 \cdot 2 \cdot 0,001} = 0,991 \quad (66)$$

$$T_{\mu C} = 2T_{\mu T} = 2T_{инв} = 0,001 \quad (67)$$

$$T_{\Phi} = 8T_{pez.C} = 8T_{\mu T} = 8T_{инв} = 0,004 \quad (68)$$

- установившаяся ошибка: $\Delta\omega_{уст} = 0$;
- перерегулирование: $\sigma = 6.2\%$;
- время первого согласования: $t_{py1}^{(5)} = 13,6 \cdot T_{\mu T} = 13,6 \cdot 0,0005 = 0,0068 \text{ с}$;
- время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия: $t_{py2}^{(5)} = 20,3 \cdot T_{\mu T} = 20,3 \cdot 0,0005 = 0,0115 \text{ с}$;
- полоса пропускания по фазе: $\omega_n^{(\phi)} = \frac{0,18}{T_{\mu T}} = \frac{0,18}{0,0005} = 360 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$;
- полоса пропускания по модулю: $\omega_n^{(m)} = \frac{0,284}{T_{\mu T}} = \frac{0,284}{0,0005} = 568 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Имитационная модель контура скорости, настроенного на СО, с фильтром на входе в программной среде MATLAB Simulink представлена на рисунке 19.

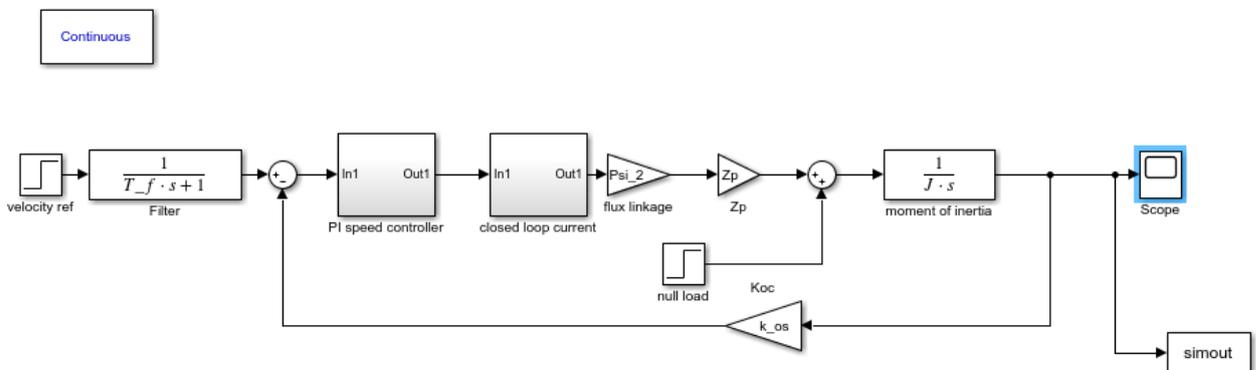


Рисунок 29 – Имитационная модель контура скорости, настроенного на СО+Ф, в программной среде MATLAB Simulink

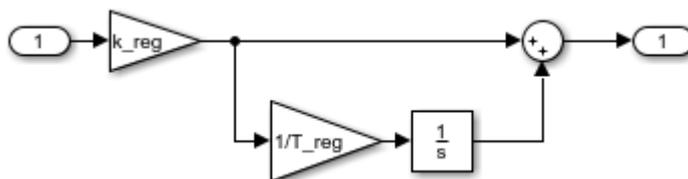


Рисунок 30 – Подсистема ПИ-регулятора скорости

Чтобы оценить правильность всех расчетов, нужно провести сравнение ожидаемых показателей качества замкнутого контура тока по управлению без фильтра на входе с действительными. Ожидаемые показатели для контура будут:

- 1) Установившаяся ошибка $\Delta\omega_{уст} = 0$;
- 2) полоса пропускания по фазе: $\omega_n^{(\phi)} = \frac{0,18}{T_{\mu\Gamma}} = \frac{0,18}{0,0005} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$;
- 3) полоса пропускания по модулю: $\omega_n^{(M)} = \frac{0,284}{T_{\mu\Gamma}} = \frac{0,284}{0,0005} = 118 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.
- 4) Перерегулирование $\sigma = 6.2\%$;
- 5) время первого согласования: $t_{py1}^{(5)} = 13,6 \cdot T_{\mu\Gamma} = 13,6 \cdot 0,0005 = 0,0068 \text{ с}$;
- 6) время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия: $t_{py2}^{(5)} = 20,3 \cdot T_{\mu\Gamma} = 20,3 \cdot 0,0005 = 0,01015 \text{ с}$;

Переходные процессы и частотные характеристики контура тока, настроенного на СО+Ф, представлены на рисунках 31 – 32.

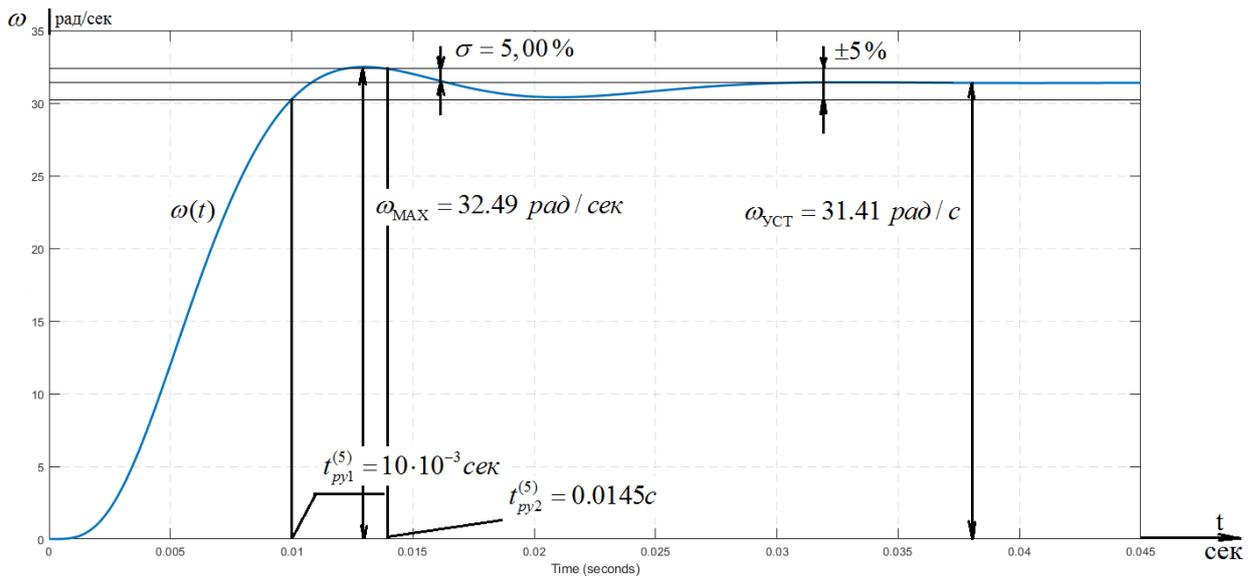


Рисунок 31 – Переходный процесс в контуре скорости, настроенном на СО с фильтром на входе

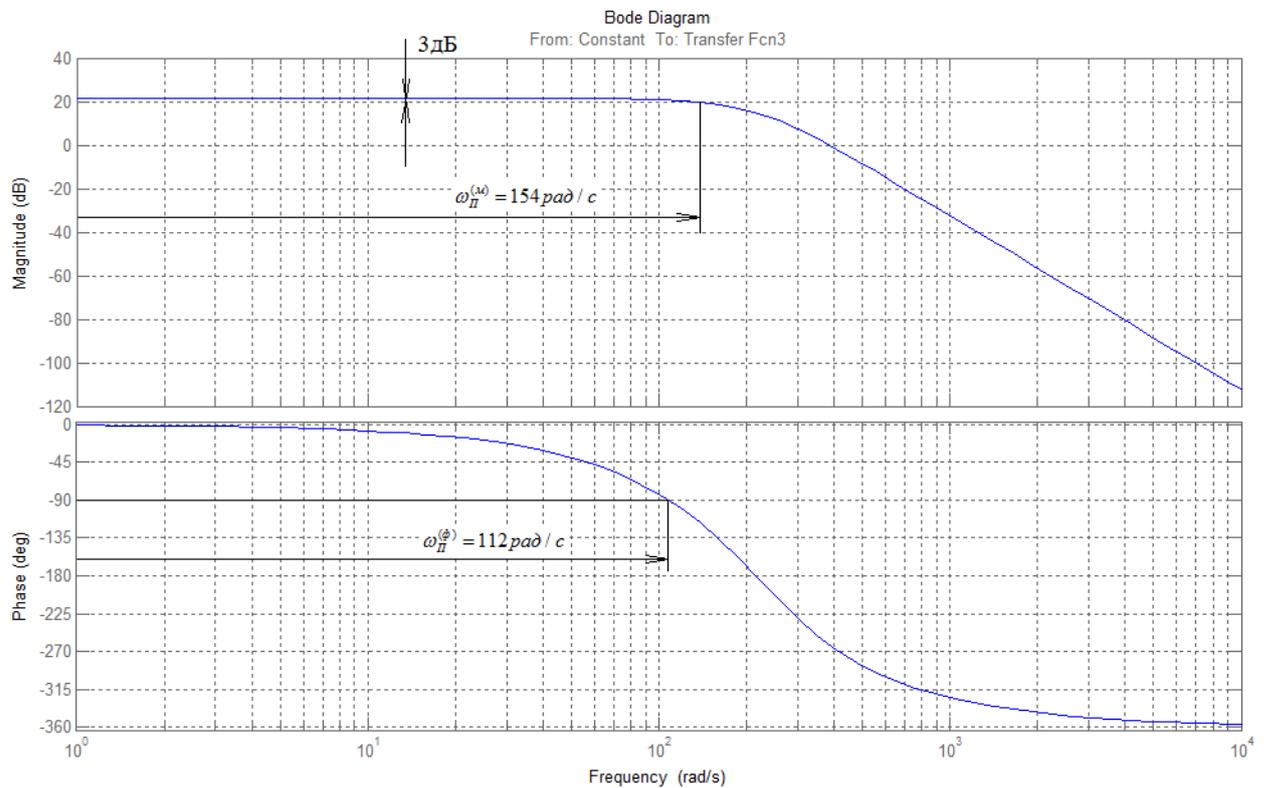


Рисунок 32 – ЛЧХ замкнутого контура скорости, настроенного на СО, с фильтром на входе

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линейризованного контура скорости, настроенного на СО, с фильтром на входе в таблицу 4.

Таблица 4 – Показатели качества переходного процесса по управлению линеаризованного контура скорости, оптимизированного по СО с Ф

$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	σ , %	$\Delta\omega_{уст}$, $\frac{рад}{с}$	$\omega_n^{(\phi)}$, $\frac{рад}{с}$	$\omega_n^{(M)}$, $\frac{рад}{с}$
Ожидаемые показатели					
0,01	0,0145	6,2	0	118	160,00
Результаты моделирования					
0,0068	0,01015	5	0	112	154

После сравнения ожидаемых значений показателей качества переходных процессов в контуре скорости, оптимизированного по СО, с результатами моделирования, можно сказать, что теоретические и полученные значения почти одинаковы с небольшой погрешностью. Контур скорости, оптимизированный по СО, является астатическим по управлению, так как обрабатывает ступенчатый управляющий сигнал без установившейся ошибки.

4.4 Оптимизация контура скорости на симметричный оптимум без фильтра на входе

Ожидаемые показатели качества работы контура без фильтра на входе:

- установившаяся ошибка $\Delta y_{уст} = 0$;
- перерегулирование $\sigma = 43,4\%$;
- время первого вхождения в 5% зону

$$t_{py1}^{(5)} = 2,9 \cdot T_{\mu c} = 2,9 \cdot 0,0005 = 0,00145 \text{ с};$$

- время окончательного вхождения в 5% зону

$$t_{py2}^{(5)} = 14,7 \cdot T_{\mu c} = 14,7 \cdot 0,0005 = 0,00735 \text{ с};$$

- полоса пропускания по модулю

$$\omega_n^{(M)} = \frac{0,85}{T_{\mu c}} = \frac{0,85}{0,0005} = 170 \frac{рад}{с};$$

- полоса пропускания по фазе

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{0,59}{T_{\mu c}} = \frac{0,59}{0,0005} = 300 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Имитационная модель контура скорости, настроенного на СО, без фильтра на входе в программной среде MATLAB Simulink представлена на рисунке 33.

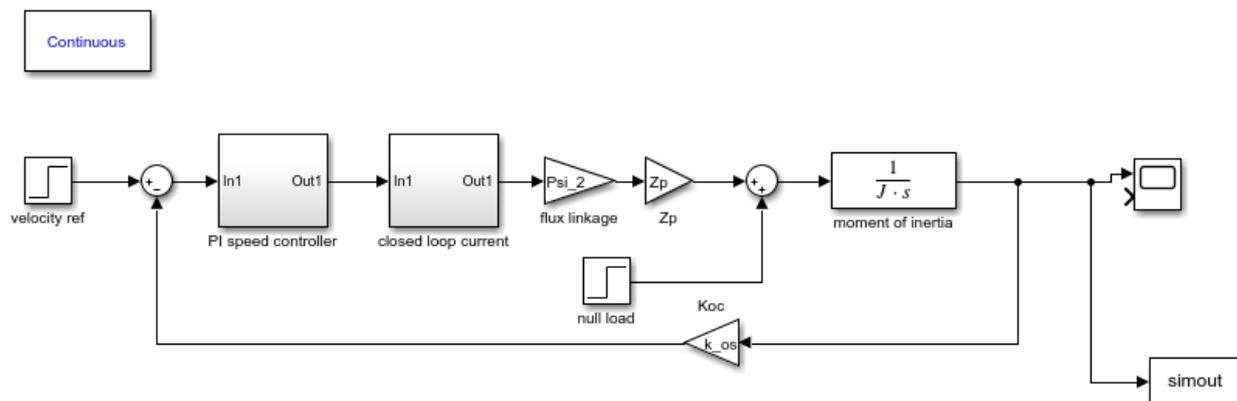


Рисунок 33 – Имитационная модель контура скорости, настроенного на СО без фильтра, в программной среде MATLAB Simulink

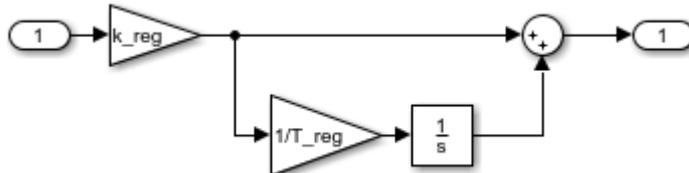


Рисунок 34 – Подсистема ПИ-регулятора скорости

Переходные процессы и частотные характеристики контура тока, настроенного на СО без фильтра, представлены на рисунках 35 – 36.

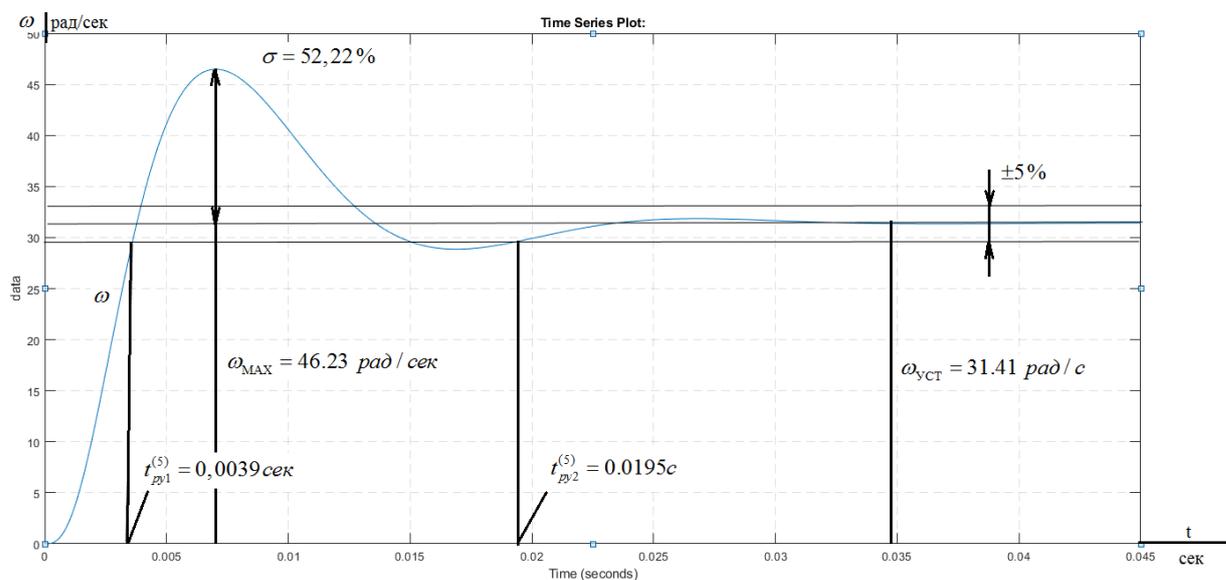


Рисунок 35 – Переходный процесс в контуре скорости, настроенном на СО без фильтра на входе

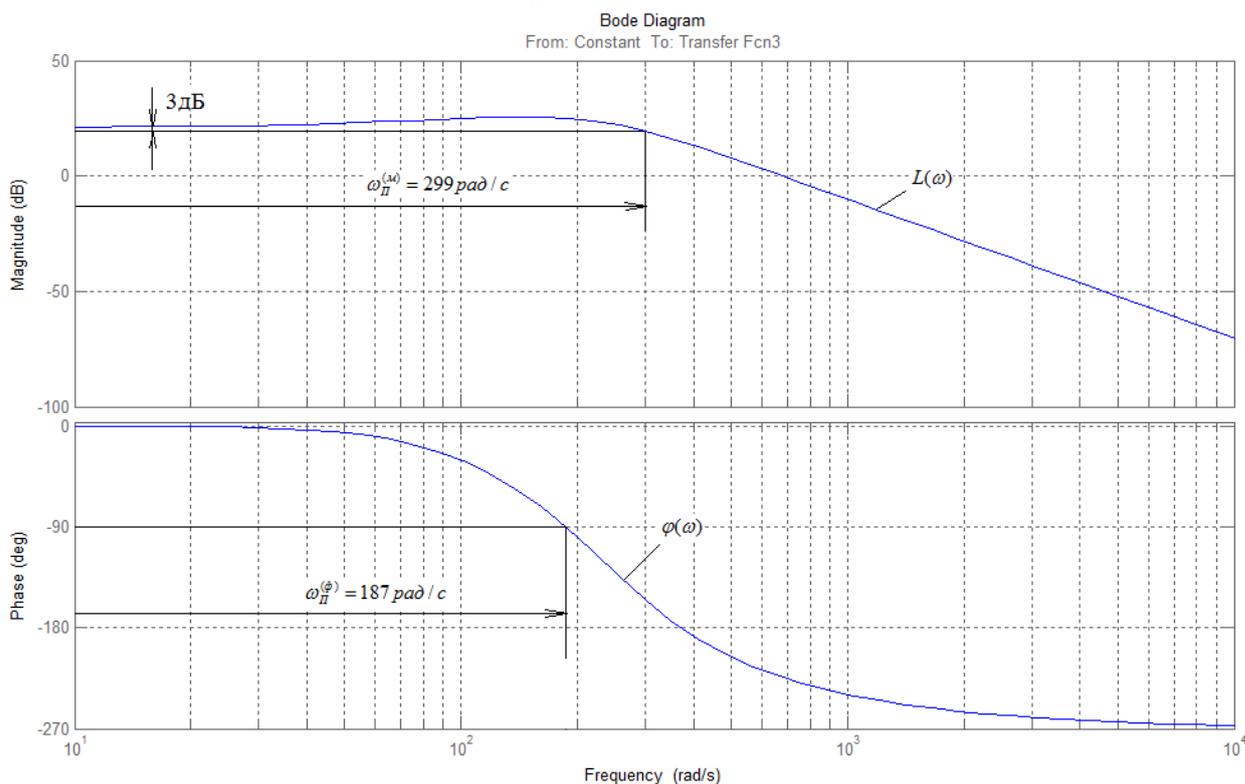


Рисунок 36 – ЛЧХ замкнутого контура скорости, настроенного на СО, без фильтра на входе

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линеаризованного контура скорости, настроенного на СО, без фильтра на входе в таблицу 5.

Таблица 5 – Показатели качества переходного процесса по управлению линеаризованного контура скорости, оптимизированного по СО с Ф

$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	σ , %	$\Delta\omega_{уст}$, $\frac{рад}{с}$	$\omega_{\Pi}^{(\phi)}$, $\frac{рад}{с}$	$\omega_{\Pi}^{(\omega)}$, $\frac{рад}{с}$
Ожидаемые показатели					
0,00145	0,00735	43,4	0	300	170
Результаты моделирования					
0,0039	0,0195	5	0	299	187

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

5.1 Общая линейная модель в неподвижной системе координат

Для проверки работоспособности, соберем полную модель с тремя регуляторами в неподвижной системе координат. Структурная схема полной модели в среде Matlab Simulink представлена на рисунке 37, график переходного процесса по скорости – на рисунке 38.

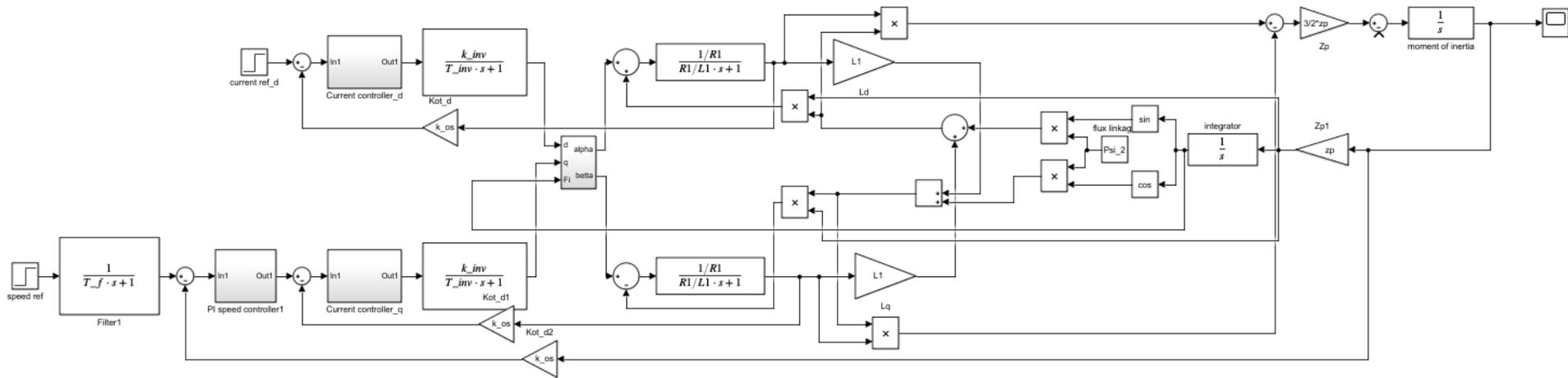


Рисунок 37 – Общий вид модели двигателя в неподвижной системе координат с оптимизированными контурами в среде Matlab Simulink

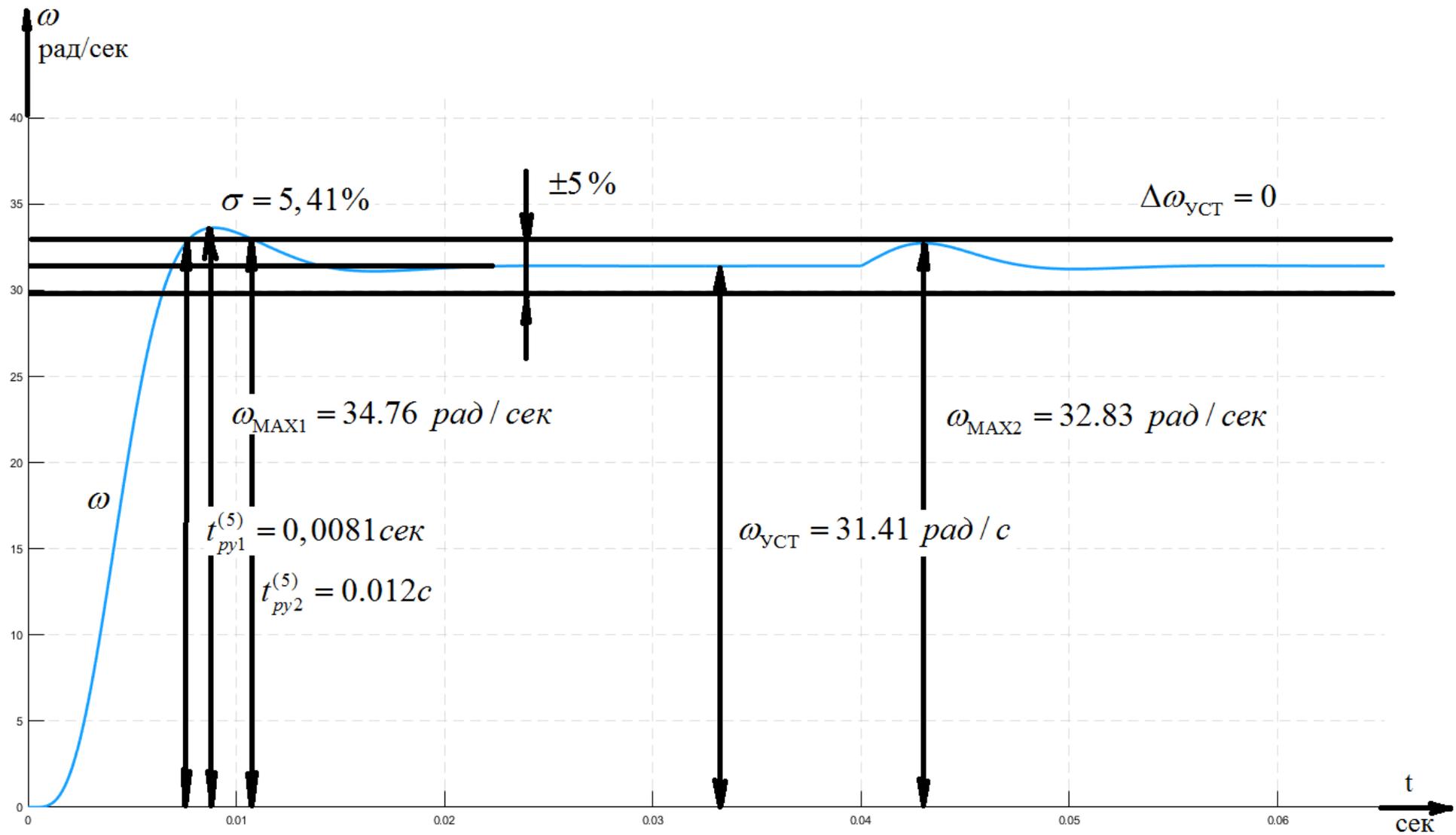


Рисунок 38 – Характеристика переходного процесса полной модели во вращающейся системе координат полученная в среде Matlab Simulink

5.2 Общая линейная модель в подвижной системе координат

Для проверки работоспособности, соберем полную модель с тремя регуляторами так же и в подвижной системе координат. Структурная схема полной модели в среде Matlab Simulink представлена на рисунке 39, график переходного процесса по скорости – на рисунке 40.

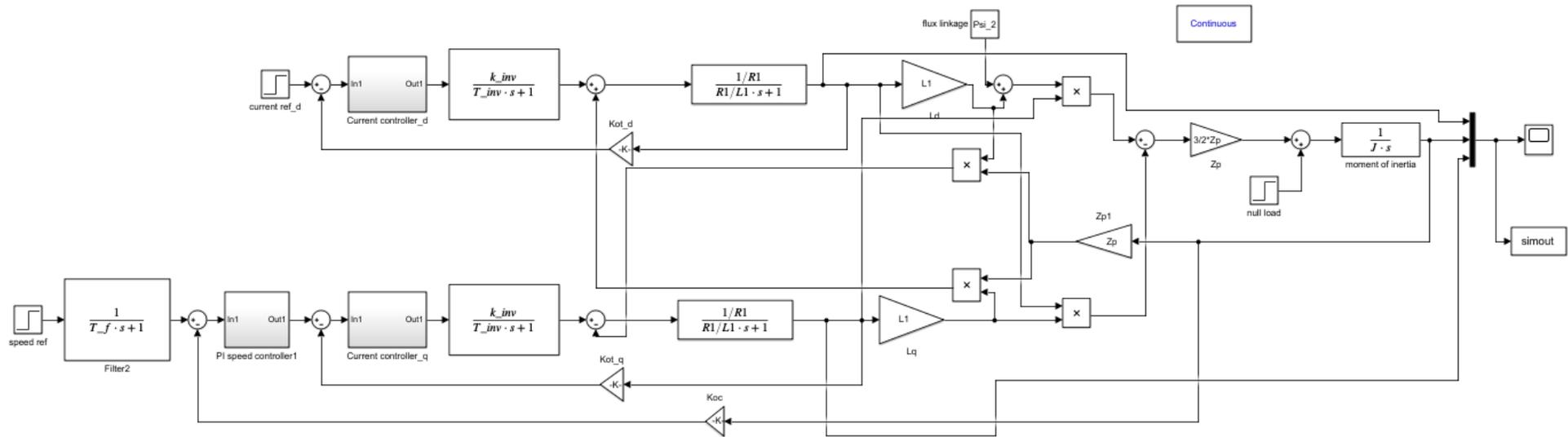


Рисунок 39 – Общий вид модели двигателя в подвижной системе координат с оптимизированными контурами в среде Matlab Simulink

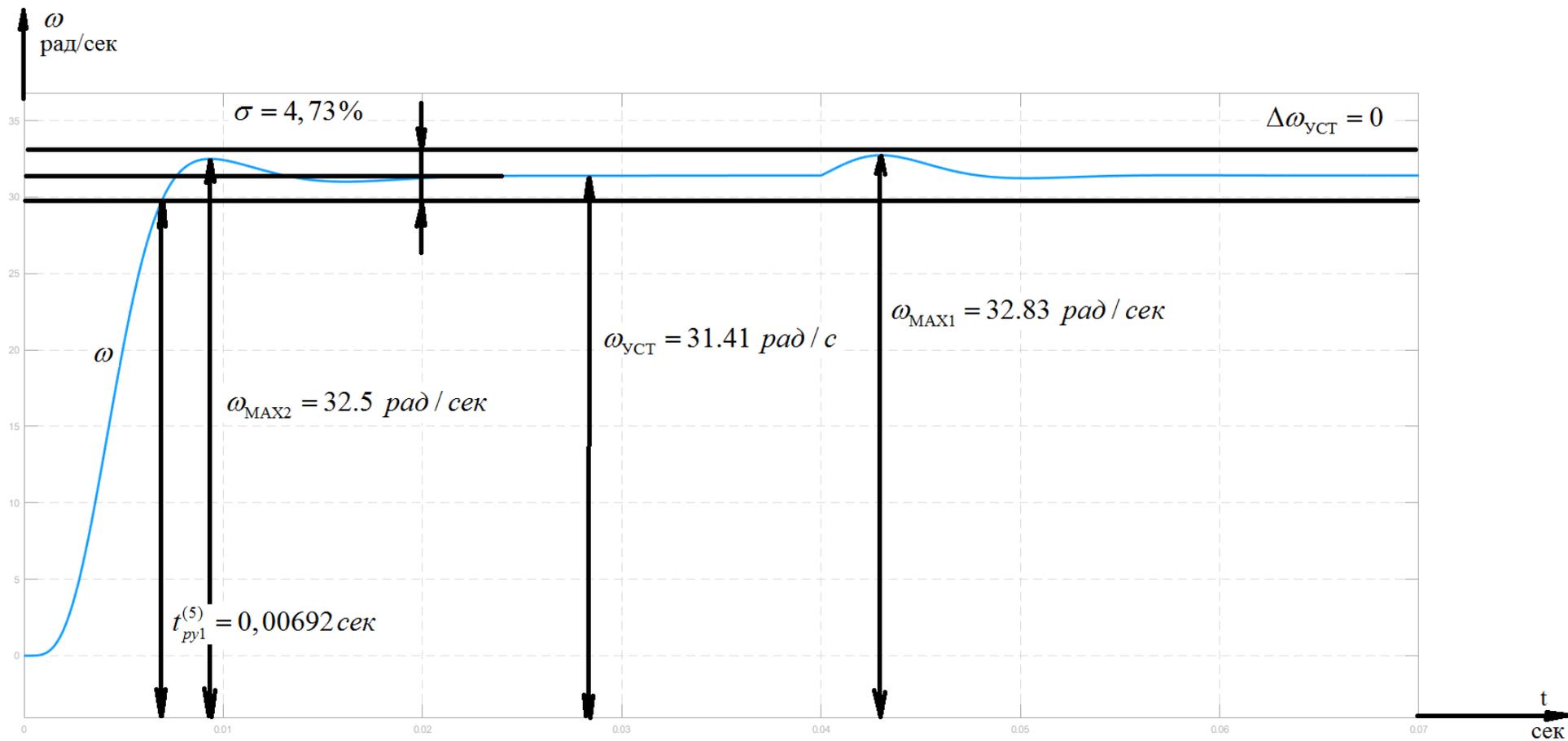


Рисунок 40 – Характеристика переходного процесса полной модели во вращающейся системе координат полученная в среде Matlab Simulink

Показатели качества вращающей и неподвижной системы систем координат

Сведем данные результатов моделирования полной модели в подвижной и неподвижной системе координат в таблицу 6.

Таблица 6. Показатели качества модели во вращающей и неподвижной системе координат

$\Delta\omega_{уст}$, рад/сек	σ , %	$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с
Вращающаяся			
0	4,73	0,00692	0,00692
Неподвижная			
0	5,41	0,0081	0,012

После замены вращающей системы координат на неподвижную произошло несильное отклонение. Также окончательное вхождение в пятипроцентную зону несколько увеличилось.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Для того, чтобы управление электроприводов переменного тока была качественной требуется динамическая регулировка моментного усилия на валу двигателя. При данной регулировке появляется возможность оптимальной настройки электроприводов переменного и постоянного токов. Для возможно обеспечения необходимо ввести ограничения по току и скорости на выходы регуляторов[18].

Однако при наложении ограничений на выходе регуляторов приводит к изменению характера переходных процессов, полученных ранее при оптимизации на различные оптимумы. Так же для приведения картины переходных процессов к удовлетворительному виду необходимо применять коррекцию интегрального насыщения. Интегральное насыщение возникает, когда ПИ или ПИД-регулятор в течение длительного времени должен компенсировать ошибку, лежащую за пределами диапазона управляемой переменной. Поскольку выход регулятора ограничен, ошибку крайне сложно свести к нулю. Из-за этого происходит затягивание времени переходного процесса, увеличение перерегулирования, колебательность. Для коррекции интегрального насыщения воспользуемся схемой приведенной на рисунке 41.

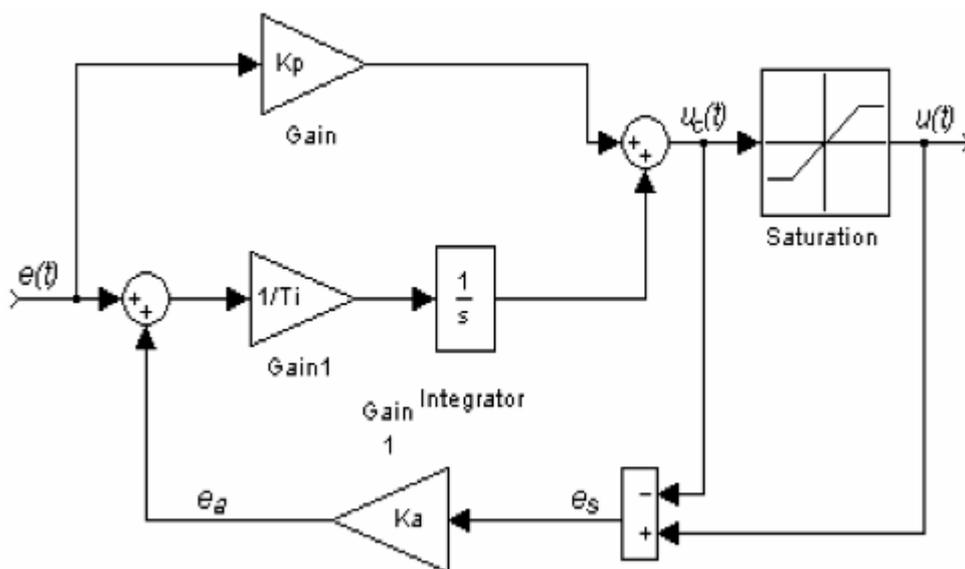


Рисунок 41 – Пример коррекции интегрального насыщения

$$I_{\max} = 2I_H = 2 \cdot 1.7 = 3.4 \text{ A}$$

$$\omega_{\max} = 1.1 \cdot \omega_{\text{ном}} = 1.1 \cdot 31.41 = 34.551 \text{ рад / сек}$$

Так как регуляторы тока являются идентичными, подсистема в обоих случаях будет выглядеть одинаково. Она представлена на рисунке 42.

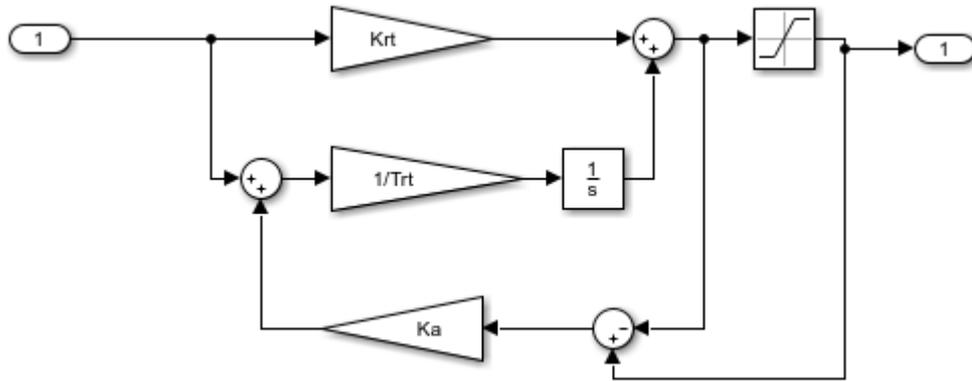


Рисунок 42 – Подсистема нелинейного регулятора тока в среде Matlab Simulink

Подсистема регулятора скорости, с учетом интегрального насыщения, реализованная в Matlab Simulink представлена на рисунке 43.

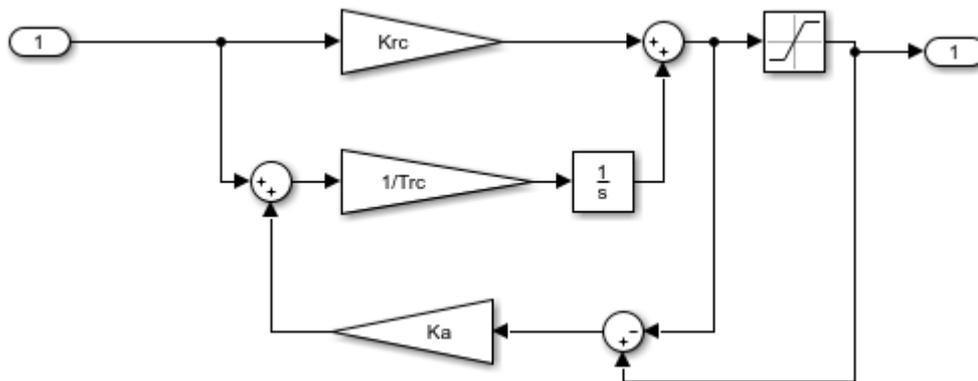


Рисунок 43 – Подсистема нелинейного регулятора скорости в среде Matlab Simulink

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИМ ИНВЕРТОРА В MATLAB SIMULINK

Для управления электроприводом переменного тока, будь то асинхронный двигатель или синхронный с постоянными магнитами, используются инверторы напряжения или автономные инверторы тока. В данной диссертационной работе будем моделировать автономный инвертор напряжения. Как и в других типах преобразователей, управление трехфазным шестиключевым инвертором напряжения осуществляется методом ШИМ.

Как правило система управления задает управляющие воздействия на верхние ключи стоек, а нижние работают в комплементарном режиме, т.е. когда верхний ключ включен, нижний выключен и наоборот. В момент переключения ключей должна быть небольшая задержка во времени – «мертвое время», во избежание коротких замыканий в стойках инвертора.

Существуют несколько видов ШИМ[19]:

- Синусоидальная;
- Синусоидальная с премодуляцией третьей гармоники;
- Векторная.

В данной работе моделируем самую простую-синусоидальную ШИМ. Главным минусом синусоидальной ШИМ является нерациональное использование напряжение звена постоянного тока преобразователя:

$$U_{\text{лин.двиг.ампл.}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{DC} = 0,866 \cdot U_{DC} = 0,866 \cdot 2,34 \cdot U_{\text{фаз}} = 2.0264 \cdot U_{\text{фаз}} \quad (69)$$

Функциональная схема “трехфазный автономный инвертор напряжения с синусоидальной ШИМ – Синхронный двигатель с постоянными магнитами” представлена на рисунке 44.

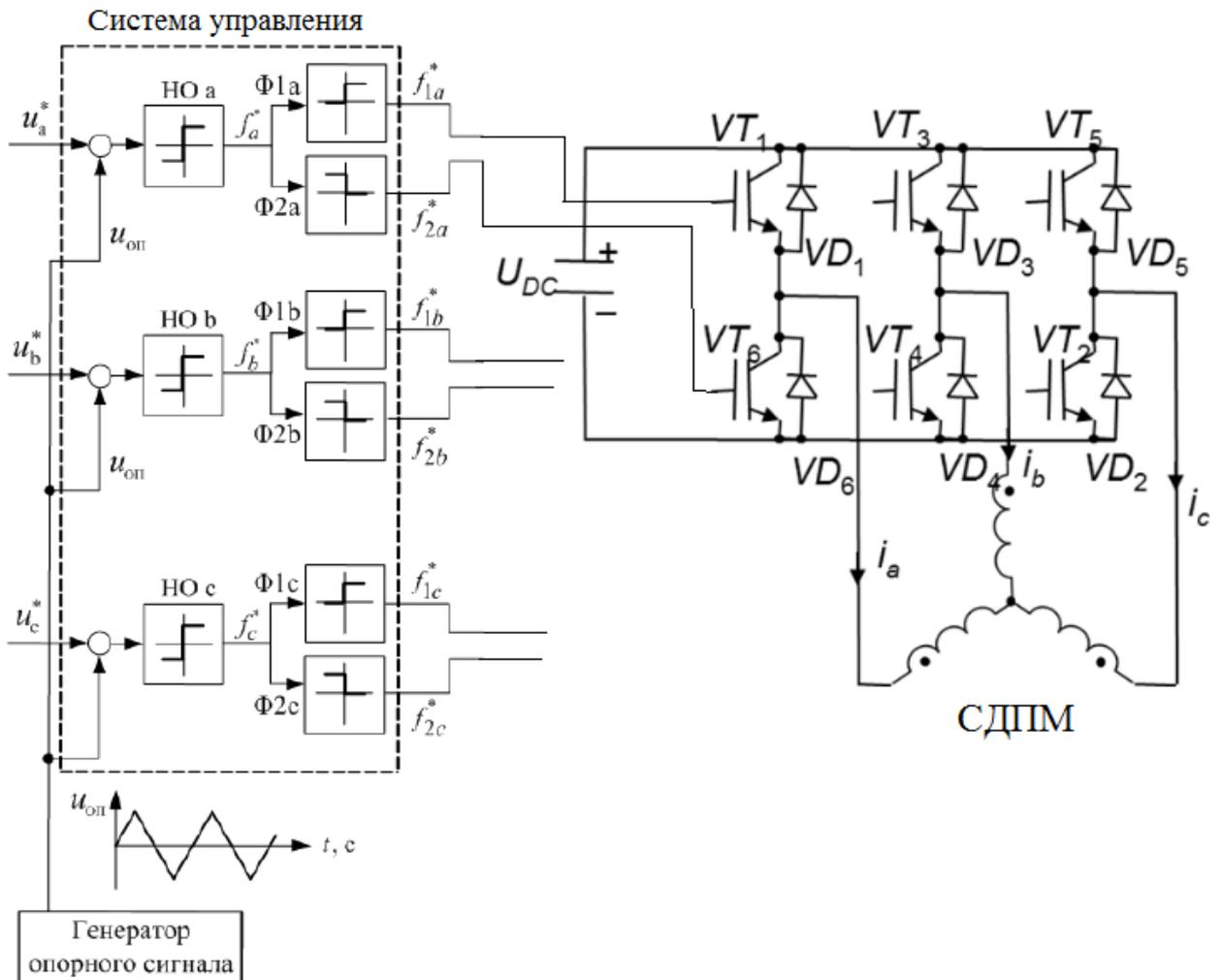


Рисунок 44 – Функциональная схема “трехфазный автономный инвертор напряжения с синусоидальной ШИМ – Синхронный двигатель с постоянными магнитами”

На данной схеме обозначено:

u_a^*, u_b^*, u_c^* – задающие гармонические воздействия:

$$\begin{cases} u_a^* = U_M \cdot \sin(\omega t), \\ u_b^* = U_M \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \\ u_c^* = U_M \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}). \end{cases} \quad (70)$$

$u_{оп}$ – опорное напряжение, представляющее собой пилообразное,

двухстороннее, симметричное напряжение с частотой модуляции значительно превышающей частоту напряжения задания. Математическая модель генератора пилообразного напряжения и его выходные сигналы даны на рисунке 45 и 46.

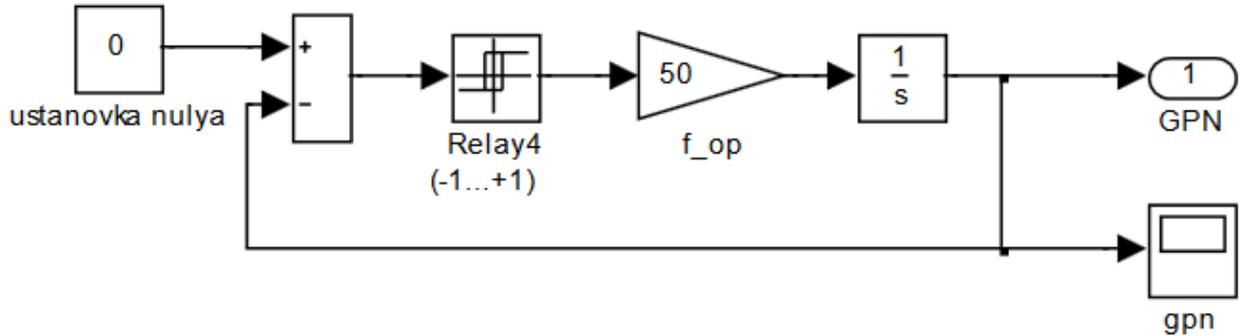


Рисунок 45 – Генератор пилообразного напряжения в среде Matlab Simulink

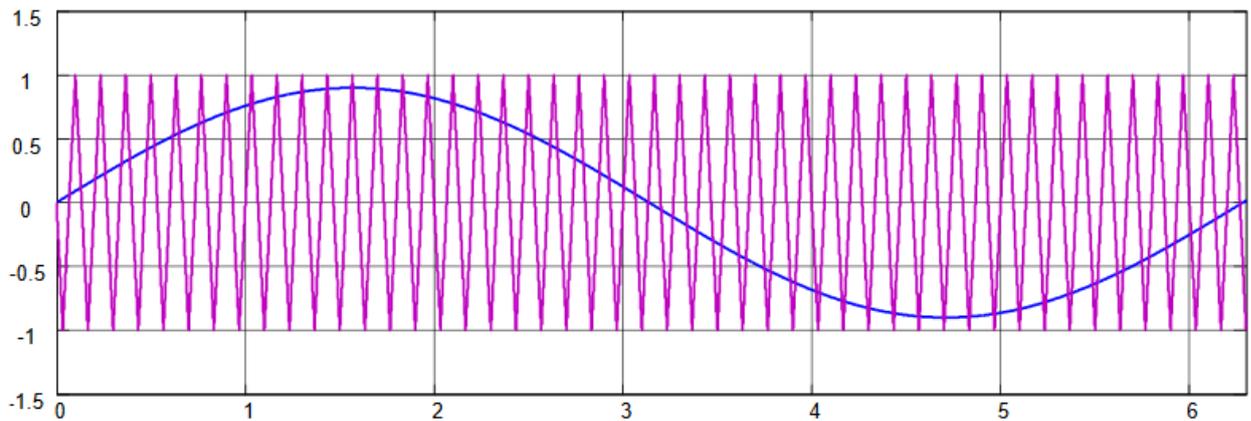


Рисунок 46 – Сравнение выходного сигнала генератора пилообразного напряжения с задающим гармоническим воздействием

HO_a, HO_b, HO_c – нуль-органы, обеспечивающие сравнение сигналов задания с опорным сигналом;

$\Phi_{1a}, \Phi_{2a}, \Phi_{1b}, \Phi_{2b}, \Phi_{1c}, \Phi_{2c}$ – формирователи сигналов управления силовыми ключами;

$f^*_{1a}, f^*_{2a}, f^*_{1b}, f^*_{2b}, f^*_{1c}, f^*_{2c}$ – дискретные выходные сигналы с формирователей, управляющих включением силовыми ключами;

$VT1, VT2, VT3, VT4, VT5, VT6$ – силовые ключи, попеременно подключающие обмотки фаз двигателя к разноименным полюсам источника постоянного напряжения $u_{п.}$

Сигналы $f^*_{1a}, f^*_{2a}, f^*_{1b}, f^*_{2b}, f^*_{1c}, f^*_{2c}$ на выходе нуль-органов HO_a, HO_b, HO_c

показаны на рисунке 47.

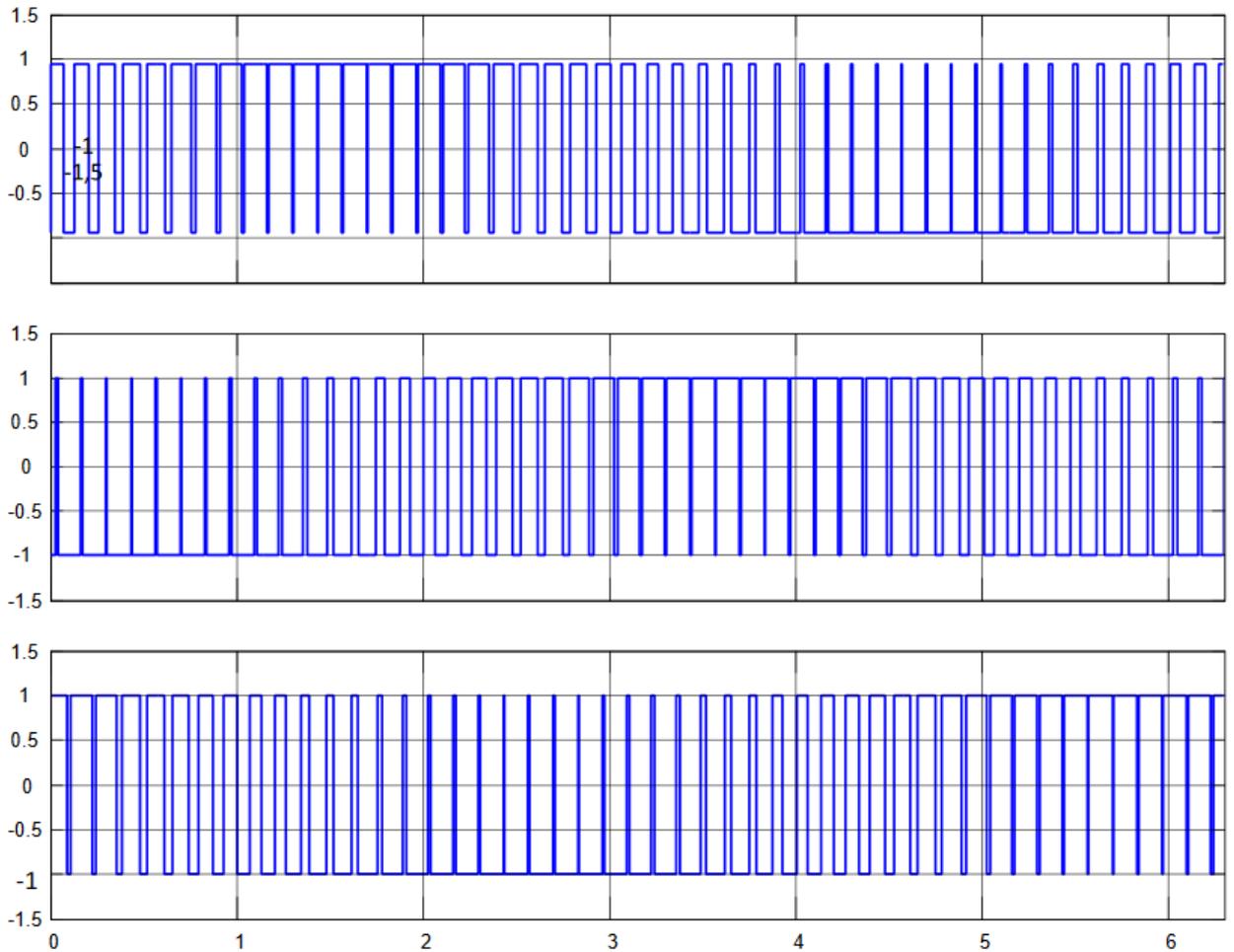


Рисунок 47 – Сигналы f^*_{1a} , f^*_{2a} , f^*_{1b} , f^*_{2b} , f^*_{1c} , f^*_{2c} на выходе нуль-органов HO_a , HO_b , HO_c

Импульсные напряжения, подаваемые на двигатель $u_{aШИМ}$, $u_{bШИМ}$, $u_{cШИМ}$ связанные с постоянным напряжением u_{on} и выходными сигналами нуль-органов HO_a , HO_b , HO_c f^*_{1a} , f^*_{2a} , f^*_{1b} , f^*_{2b} , f^*_{1c} , f^*_{2c} запишем в виде следующей системы уравнений(71):

$$\begin{cases} U_{aШИМ} = \frac{1}{6} \cdot \sin(2f_a - f_b - f_c), \\ U_{bШИМ} = \frac{1}{6} \cdot \sin(-f_a + 2f_b - f_c), \\ U_{cШИМ} = \frac{1}{6} \cdot \sin(-f_a - f_b + 2f_c). \end{cases} \quad (71)$$

Реализация импульсных напряжений $u_{abc \text{ шим}}$ в неподвижной трехфазной системе координат abc представлена в Simulink-Matlab на рисунке 48. Результаты моделирования напряжений $u_{abc \text{ шим}}$ даны на рисунке 49.

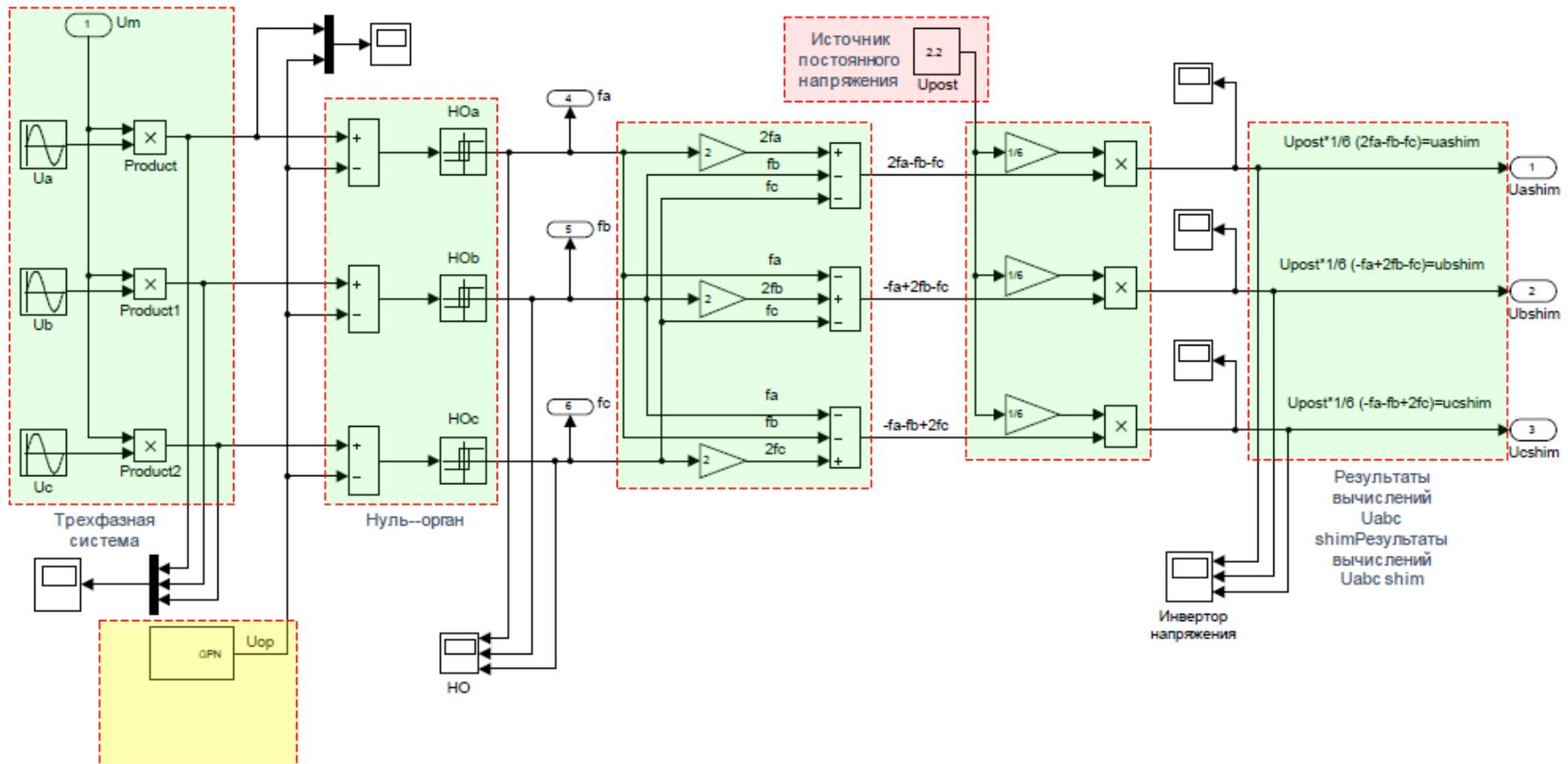


Рисунок 48 – Математическая модель синусоидальной ШИМ и инвертора напряжения в Matlab Simulink

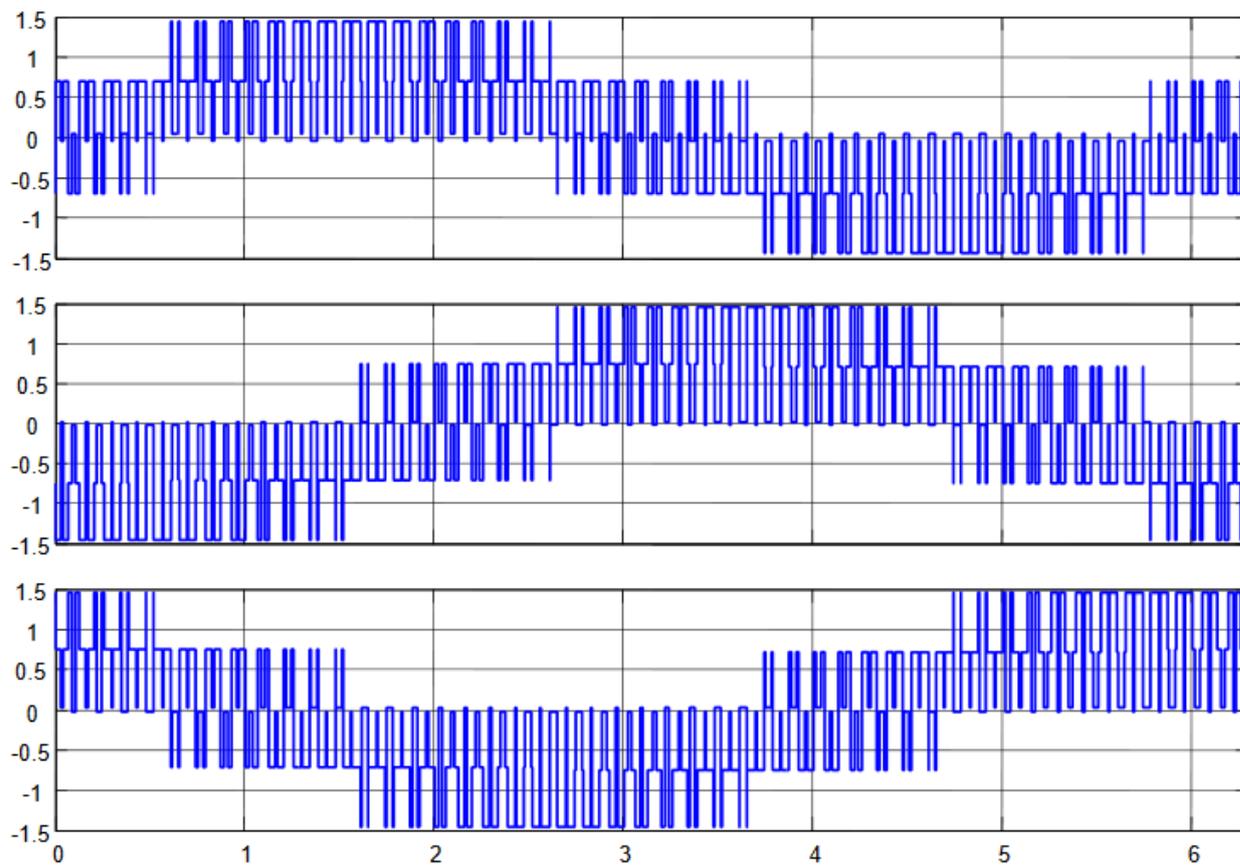


Рисунок 49 – Выходные напряжения ШИМ

Далее при моделировании частотного преобразователя на транзисторы будут подаваться сигналы с НО.

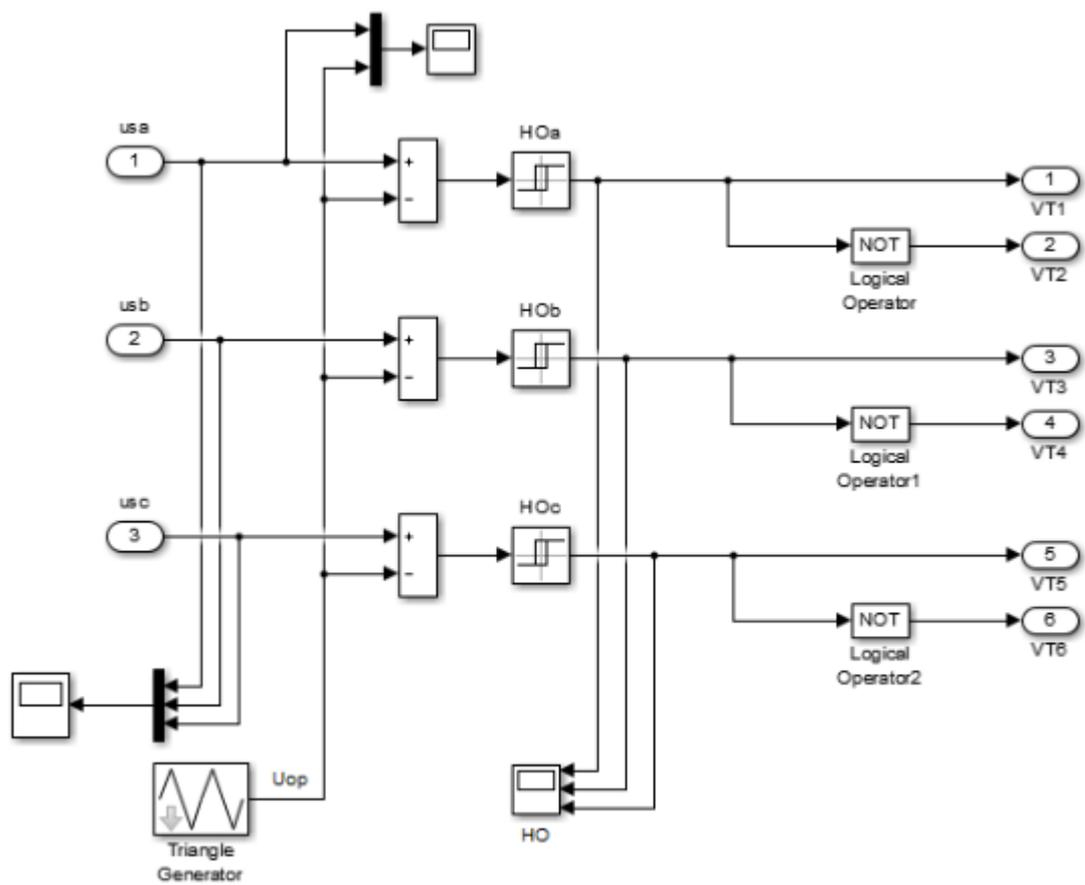


Рисунок 50 – Структурная схема блока ШИМ в Matlab Simulink

8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ СО ЗВЕНОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Модель преобразователя частоты выполнена на базе IGBT-транзисторов.

В преобразователях частоты с промежуточным звеном постоянного тока напряжение питающей сети подается через выпрямитель и фильтр на инвертор. Инвертор, управляемый от системы управления, формирует напряжение на выходе преобразователя в соответствии с принятым законом регулирования. Инвертор преобразователя служит для формирования, заданного системой управления напряжения на обмотках двигателя.

В данной работе представлена классическая схема шестиключевого инвертора[20].

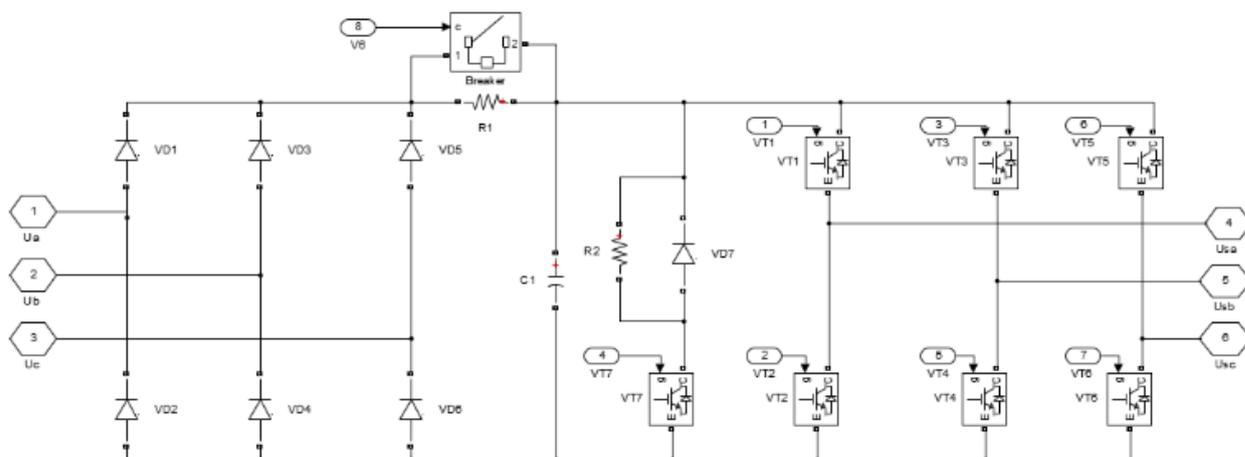


Рисунок 51 -Структурная схема частотного преобразователя

В модели приняты следующие допущения:

- IGBT-транзисторы являются идеальными ключами;
- диоды являются идеальными элементами;
- В модели не учитывается генераторное торможение, поэтому нет необходимости в седьмом ключе и резисторе;
- в емкостном фильтре не учитывается зарядный ток, поэтому можно исключить из схемы добавочный резистор с шунтирующимся контактором.

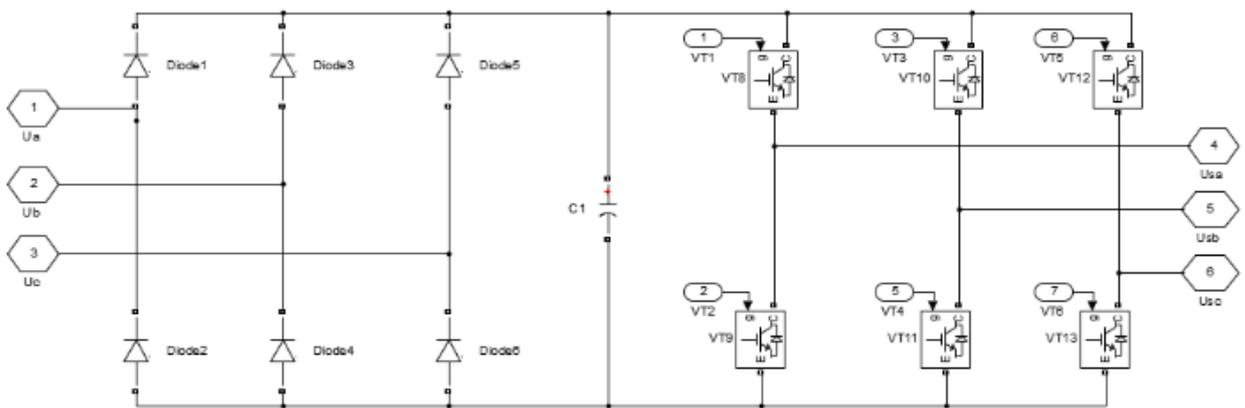


Рисунок 52 – Структурная схема частотного преобразователя с принятыми допущениями

9. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ СИСТЕМЫ “АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ” синхронный ДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ВЕКТОРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Скалярный режим формирования напряжения питания не подходит для контроля СДПМ с нагрузкой на низких оборотах. Но данный режим наилучшим образом подходит для выполнения сервисных функций: проверки работоспособности инвертора напряжения, полярности сигналов датчиков тока и сигнала скорости.

Основа векторной системы управления – дифференциальные уравнения, (пункт 3.2), описывающие электрическую машину как в динамике, так и в статике. Момент при этом получают с помощью управления амплитудой и мгновенной фазой вектора тока статора или вектора статорного напряжения.

Корректность управления в динамике векторного управления дает возможность получать высокодинамичные и прецизионные электроприводы переменного тока, которые обеспечивают наивысшую точность и скорость регулирования [21].

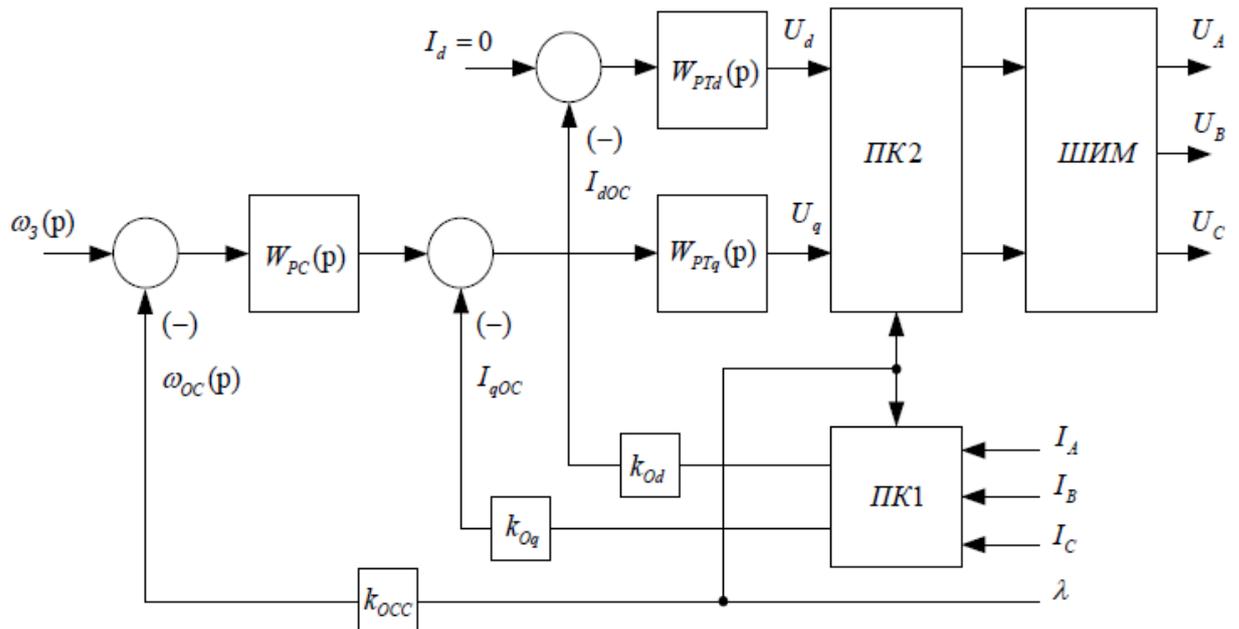


Рисунок 53 – Структурная схема векторной системы управления СДПМ

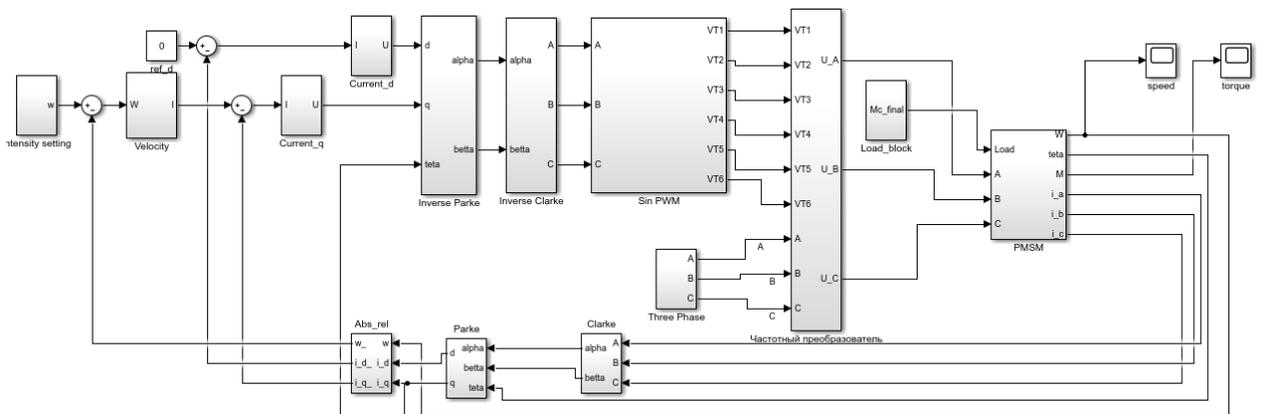


Рисунок 54 - Модель САУ скорости системы "АИН ШИМ -СДПМ" с векторным управлением в Matlab Simulink

Запуск модели произведем в четырех режимах:

- 1) Пуск;
- 2) Набор нагрузки;
- 3) Сброс нагрузки;
- 4) останов.

Так же для задания по скорости будем использовать: ступенчатое задание, линейный задатчик интенсивности и S-образный задатчик интенсивности, который представлен на рисунке 55.

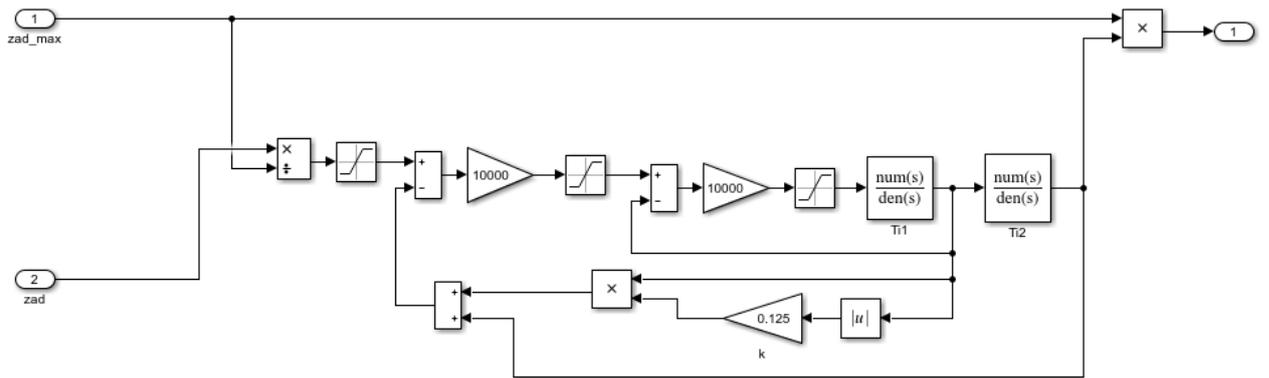


Рисунок 55 – Имитационная модель S-образного задатчика интенсивности в Matlab Simulink

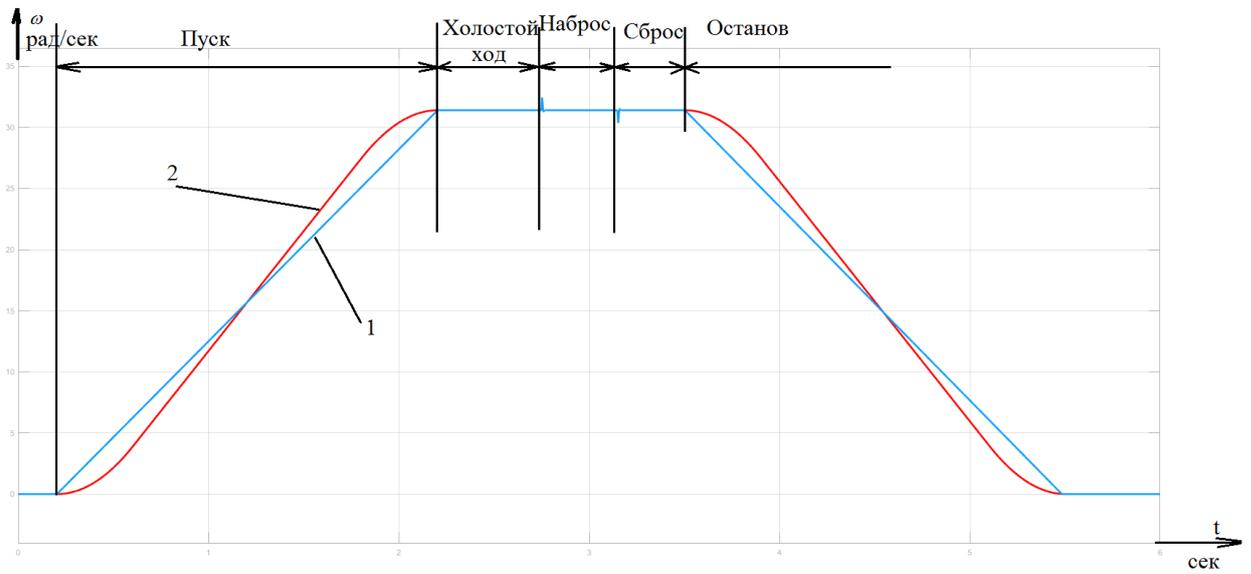


Рисунок 56 – Переходные процессы скорости двигателя при пуске, набросе, сбросе и останове с линейным(1) и S-образным задатчиком(2) интенсивности

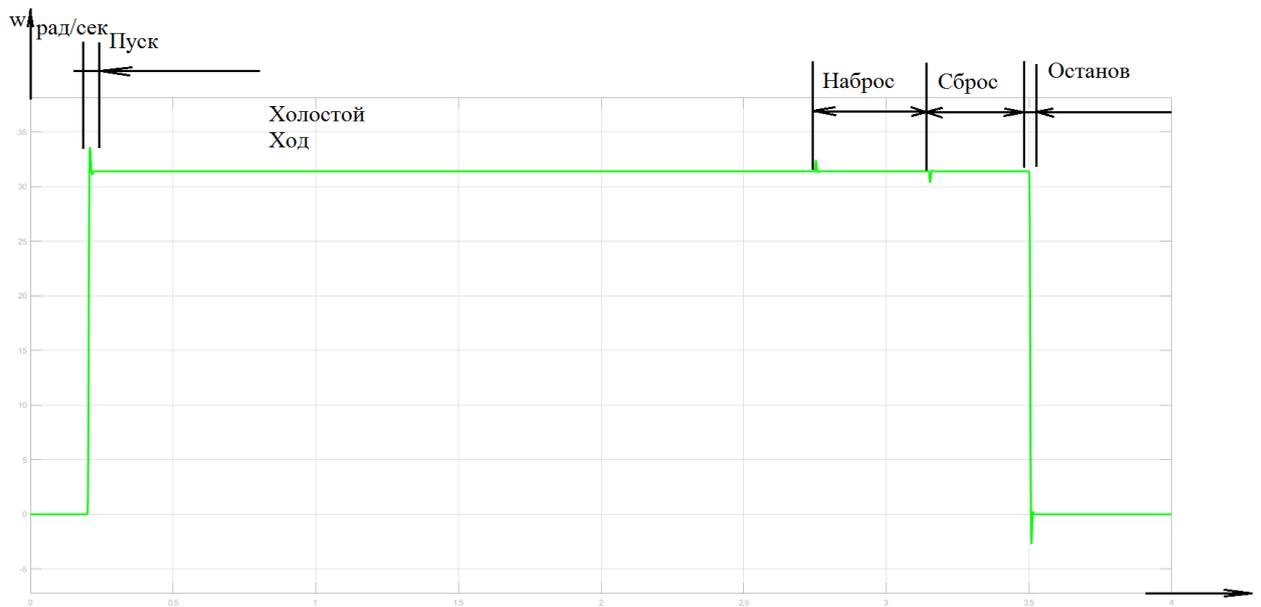


Рисунок 57 – Переходные процессы скорости двигателя при пуске, набросе, сбросе и останове со ступенчатым задатчиком скорости

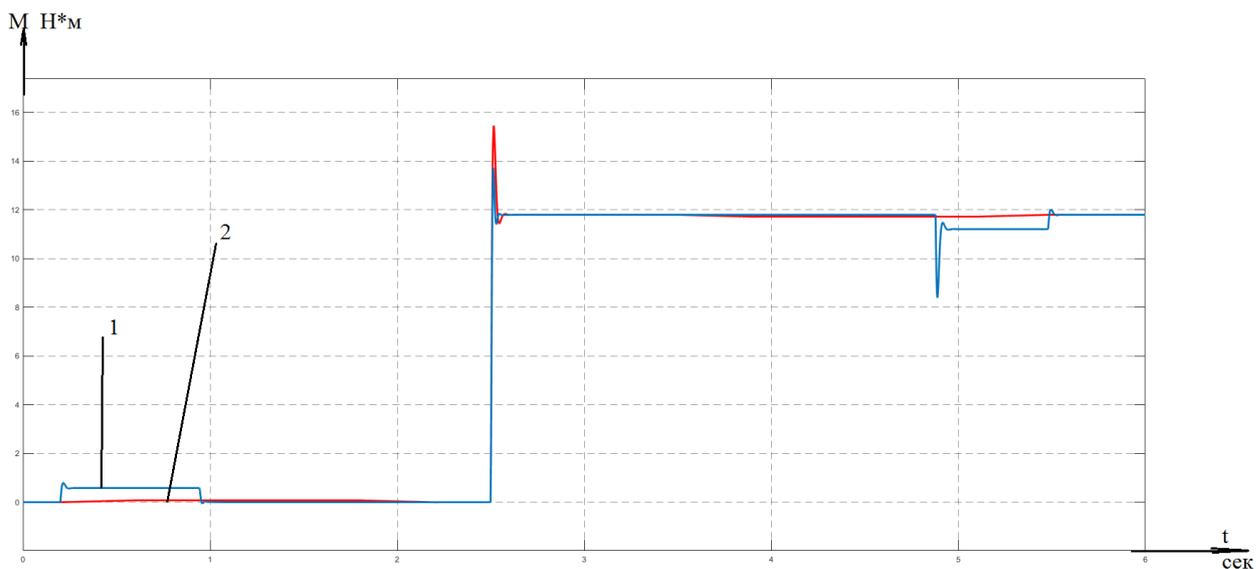


Рисунок 58 – Переходные процессы электромомента двигателя при пуске, набросе, сбросе и останове с линейным(1) и S-образным(2) задатчиком интенсивности

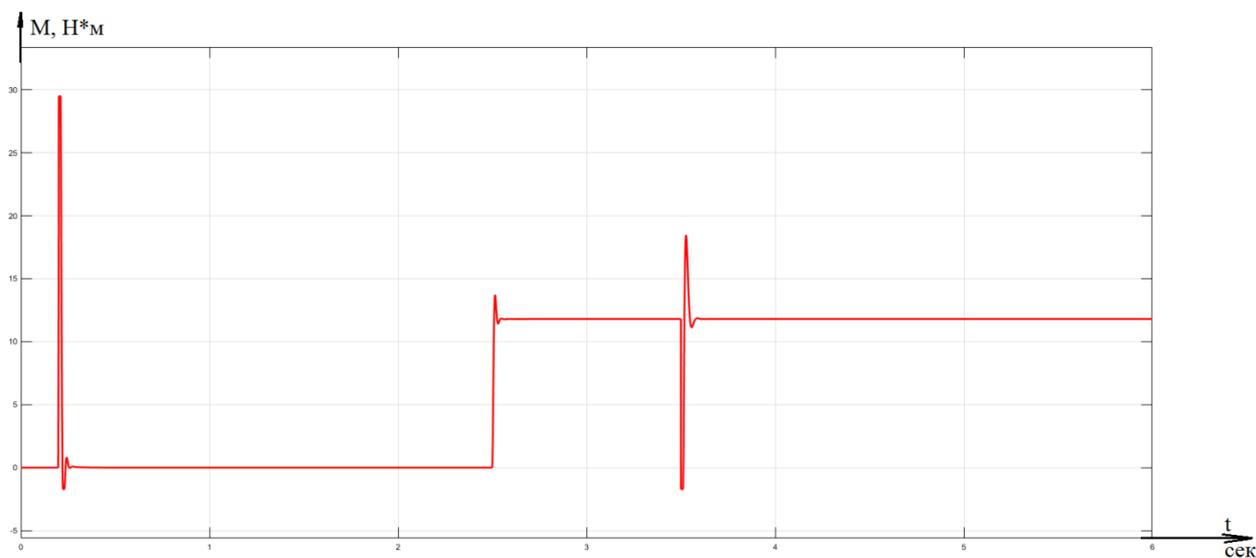


Рисунок 59 – Переходные процессы электромомента двигателя при пуске, набросе, сбросе и останове со ступенчатым задатчиком скорости

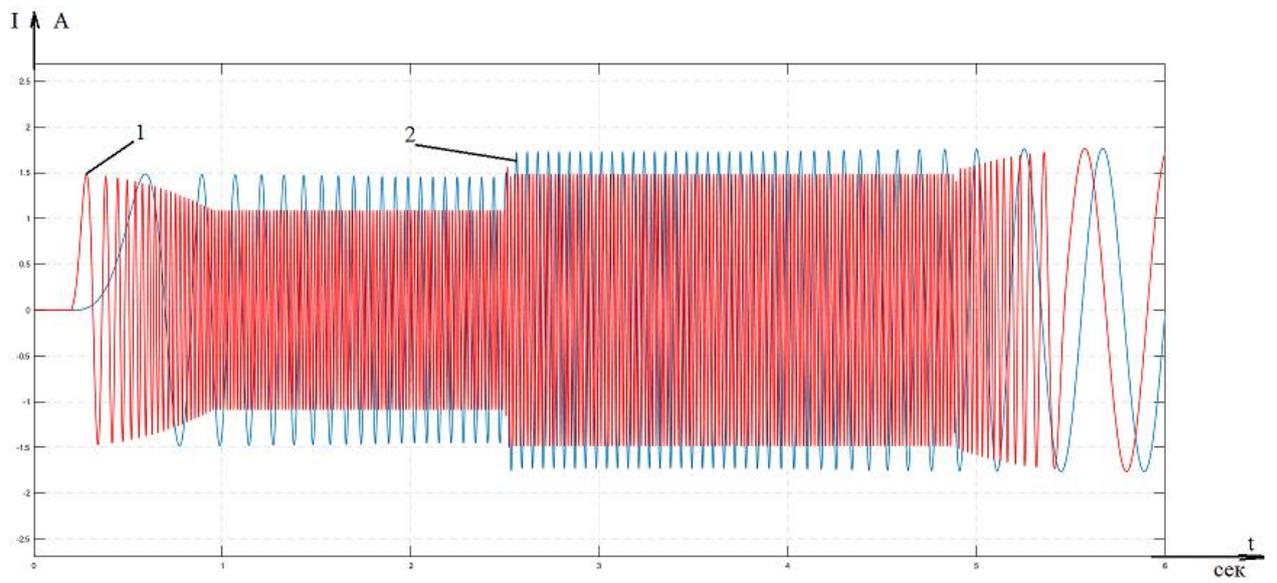


Рисунок 60 – Ток в фазе А двигателя при пуске, набросе, сбросе и останове с линейным(1) и S-образным(2) задатчиком интенсивности

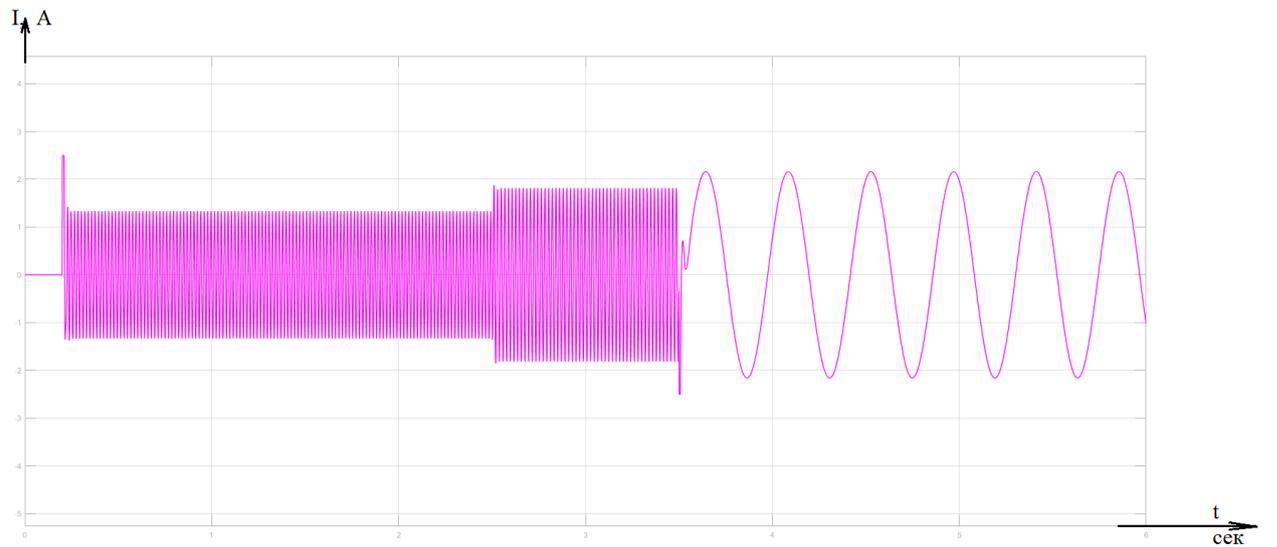


Рисунок 61 – Ток в фазе А двигателя при пуске, набросе, сбросе и останове со ступенчатым задатчиком скорости

10. ОПЫТНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Данный раздел представляет собой коммерческую тайну компании ООО “Мехатроника-Софт” и поэтому был скрыт из общего доступа.

11. КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА

Данный раздел представляет собой коммерческую тайну компании ООО “Мехатроника-Софт” и поэтому был скрыт из общего доступа.

12. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

12.1 Введение

В разделе социальная ответственность рассматриваются: правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, производственная безопасность, экологическая безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Данная магистерская работа посвящена разработке системы управления шахтного электровоза.

Область применения электровоза – промышленность. Данное оборудование (система управления) устанавливается в кабинетах и лабораториях. Пользователями являются квалифицированные специалисты, которые умеют пользоваться данным оборудованием.

В последнее время этические проблемы техники все больше выходят на первый план в связи с повышением социальной ответственности ученого, инженера, проектировщика в современном обществе, потому что конечная цель техники - это служение людям, но без нанесения ущерба другим людям и природе. Техника не может более рассматриваться как ценностно нейтральная и должна отвечать не только технической функциональности, но и критериям экономичности, улучшения жизненного уровня, безопасности, здоровья людей, качества окружающей природной и социальной среды и т.п. В связи с этим активно обсуждается вопрос о том, что такое экологическая, компьютерная, хозяйственная этика и т.д. Инженер обязан прислушиваться не только к голосу ученых и технических специалистов, к голосу собственной совести, но и к общественному мнению. Каждый раз, принимая какое-либо конкретное техническое решение, он несет за него и моральную ответственность, особенно если неверно принятое решение повлечет за собой негативные последствия. Даже сухие технические стандарты служат, в конечном счете, достижению безопасности и надежности производимой

техники. Если инженер и проектировщик не предусмотрели наряду с ее экономичным и четким - с точки зрения технических требований - использованием также безопасного, бесшумного, удобного, экологичного и т.п. применения, из средства служения людям техника может стать враждебной человеку и даже подвергнуть опасности само существование человечества.

12.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Рабочее место – место, где работник должен находиться или куда ему необходимо прибыть в связи с его работой и которое прямо или косвенно находится под контролем работодателя.

Постоянное рабочее место – место, на котором работник находится большую часть (более 50% или более 2 часов непрерывно) своего рабочего времени.

Рабочая зона – пространство высотой до 2 м от уровня пола или площадки, на котором находятся места постоянного или временного пребывания работников.

Находясь на своем рабочем месте, т.е. в производственной среде, человек может подвергаться действию целого ряда опасных и (или) вредных производственных факторов, от действия которых он должен быть максимально защищен. В соответствии с ГОСТ 12.2.061-81 «Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам» рабочее оборудование, инструмент, приспособления должно полностью отвечать требованиям безопасности, окружающая производственная среда соответствовать санитарно-гигиеническим требованиям и, кроме того, рабочее место должно быть организовано таким образом, чтобы человек при выполнении работы затрачивал минимальное количество энергии. Соблюдение этих условий будет способствовать постоянно высоко производительному безопасному труду. Правильная организация рабочего

места подразумевает знание и выполнение эргономических требований, которые определяются существующими стандартами. Так ГОСТ 12.2.032-78. «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» определяет общие эргономические требования к рабочему месту при выполнении работ сидя, а ГОСТ 12.2.033-78. «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования» – при выполнении работ стоя.

Режим труда и отдыха – это устанавливаемые для каждого вида работ порядок чередования периодов работы и отдыха и их продолжительность.

Рациональный режим – это такое соотношение и содержание периодов работы и отдыха, при которых высокая производительность труда сочетается с высокой и устойчивой работоспособностью человека без признаков чрезмерного утомления в течение длительного времени. Один из основных вопросов установления рационального режима труда и отдыха – это выявление следующих принципов их разработки:

- Удовлетворение потребностей производства. Режим труда и отдыха строится применительно к наиболее рациональному производственному режиму, с тем, чтобы обеспечить нормальное исполнение работником своих обязанностей;
- Обеспечение наибольшей работоспособности человека. Нельзя строить режим труда и отдыха без учета работоспособности человека и объективной необходимости организма в отдыхе;
- Сочетание общественных и личных интересов. Режим труда и отдыха должен быть ориентирован в некоторой степени на удовлетворение личных интересов трудящихся и отдельных категорий работников (женщин, детей, учащихся и т. д.).

Научно обоснованным режимом труда и отдыха считается такой режим, который одновременно сочетает сохранение и повышение работоспособности и производительности труда с сохранением здоровья

работников и созданием благоприятных условий для всестороннего развития человека.

Здоровье человека напрямую связано с его работоспособностью и утомляемостью, а от состояния здоровья во многом зависит успешность трудовой деятельности работника. Утрачивание резервных возможностей, сопротивляемости организма к внешним и внутренним негативным факторам ведут к существенному снижению эффективности профессиональной трудовой деятельности.

12.3 Производственная безопасность

Таблица 11. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	ГОСТ 12.1 005- 88 СанПиН 2.2.4.548-96
Превышение уровня шума	+	+	+	ГОСТ 12.1.003- 83 ГОСТ 12.1.012- 90
Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	СНиП 23-05-95
Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278- 03
Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека		+	+	ГОСТ 12.1.038- 88 ССБТ

12.4 Анализ опасных и вредных факторов труда

12.4.1 Микроклимат

Микроклимат производственных помещений – это комплекс физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда. Поддержание микроклимата рабочего места в пределах гигиенических норм – важнейшая задача.

Параметры микроклимата оказывают непосредственное влияние на самочувствие человека и его работоспособность. Например, понижение температуры и повышение скорости воздуха способствует усилению конвективного теплообмена и процесса теплоотдачи при испарении пота, что может привести к переохлаждению организма.

При повышении температуры возникают обратные явления. Установлено, что при температуре воздуха более 30 град. работоспособность человека начинает падать.

Переносимость человеком температуры, как и его теплоощущение в значительной мере зависит от влажности и скорости движения воздуха. Чем больше относительная влажность, тем меньше испаряется пота в единицу времени и тем быстрее наступает перегрев организма. Особенно неблагоприятное воздействие на тепловое самочувствие человека оказывает высокая влажность при температуре более 30 град., т.к. при этом почти вся выделяемая теплота отдается в окружающую среду при испарении пота. При повышении влажности (более 80%) пот не испаряется, а стекает каплями с поверхности кожного покрова. Возникает так называемое проливное течение пота, изнуряющее организм и не обеспечивающее необходимую теплоотдачу.

Недостаточная влажность воздуха (менее 20%) также может оказаться неблагоприятной для человека вследствие интенсивного испарения влаги со

слизистых оболочек, их пересыхания и растрескивания, а затем и загрязнения болезнетворными микроорганизмами.

Таблица 12 – Допустимые и оптимальные параметры микроклимата в производственном помещении.

Период года	Категория работ	Температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая
Холодный	Тяжелая - III	16-18	13-19	40-60	<75	<0,3	<0,5
Теплый		18-20	15-26		<75 (при 24°С)	<0,4	0,2-0,6

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещении ВЦ должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

В зимнее время в помещении необходимо предусмотреть систему отопления. Она должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

12.4.2 Шум и вибрации

Одни из вредных факторов на производстве – шум и вибрации.

Шум на рабочем месте создается движением шахтного электровоза и производственным оборудованием.

Шум, являясь общебиологическим раздражителем, не только действует на слуховой аппарат, но может вызвать расстройство сердечно-сосудистой и нервной систем, пищеварительного тракта, а также способствует

возникновению гипертонической болезни. Кроме того, шум является одной из причин быстрого утомления работающих, может вызвать головокружение, что в свою очередь может привести к несчастному случаю.

Вибрация от оборудования передается через конструкции и пол к человеку и вызывает общую вибрацию его тела. Особо вредны колебания с частотой 6—9 Гц, близкой к частоте колебаний человека. При этом возникает резонанс, который увеличивает колебания внутренних органов, расширяя или сужая их, что весьма вредно.

Систематическое воздействие вибрации вызывает вибрационную болезнь (неврит) с потерей трудоспособности. Эта болезнь возникает постепенно, вызывая головные боли, боли в суставах, судороги пальцев, спазмы сосудов и нарушение питания тканей тела. В особо тяжелых случаях в организме человека наступают необратимые изменения, приводящие к инвалидности.

Таблица 13. Допустимые уровни шума (ГОСТ 12.1.003-83)

Категория машины	Уровни звукового давления (ДБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, по дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Выполнение всех видов работ	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Таблица 14. Допустимые амплитуды виброперемещений для различных условий воздействий вибрации (ГОСТ 12.1.012-90)

Частота гармонической составляющей, Гц	Амплитуда виброперемещения, $m \times 10^{-3}$		
	на постоянных рабочих местах стационарных машин в производственных помещениях	в производственных помещениях, не имеющих источников вибрации	в помещениях работников умственного труда и персонала, не занимающегося физическим трудом
2	1,4	0,57	0,2026
4	0,25	0,1	0,0354
8	0,063	0,025	0,0090
16	0,0282	0,112	0,0039
31,5	0,0141	0,0056	0,0020
63	0,0072	0,0028	0,0010

Мероприятия по борьбе с шумом:

- уменьшение уровня шума в источнике его возникновения: повышение качества балансировки вращающихся деталей, улучшение смазки трущихся поверхностей;
- звукопоглощение и звукоизоляция;
- установка глушителей шума;
- рациональное размещение оборудования;
- применение специальных средств индивидуальной защиты: противозумные наушники, шлемы, вкладыши.

Защита от вибраций должна начинаться, прежде всего, с их ликвидации.

Коллективные методы защиты:

- улучшение работы механизмов;
- применение амортизаторов (резиновых, пружинных, пневматических);
- использование виброгасящего основания под соответствующее оборудование.

Средства индивидуальной защиты: специальные рукавицы, перчатки, виброзащитные прокладки и обувь.

12.4.3 Отсутствие или недостаток естественного света, недостаточная освещенность рабочей зоны

Естественный свет имеет высокую биологическую и гигиеническую ценность, так как обладает благоприятным для зрения человека спектральным составом и оказывает положительное воздействие на психологическое состояние человека - создает ощущение связи его с окружающим миром. Отсутствие или недостаток естественного освещения в рабочем помещении классифицируют как вредный производственный фактор.

Недостаточная степень освещения рабочего места и помещения является вредным фактором, пагубно влияющим на здоровье человека, вызывающим ухудшение зрения. Неудовлетворительное освещение может, кроме того, являться причиной травматизма. Неправильная эксплуатация, так же, как и ошибки, допущенные при проектировании и устройстве осветительных установок, могут привести к пожару, несчастным случаям. При таком освещении снижается производительность труда и увеличивается количество допускаемых ошибок.

Всеобщим межотраслевым документом, содержащим нормы естественного и искусственного освещения предприятий, является СНиП 23-05-95.

К системам освещения предъявляются следующие требования:

- Соответствие освещенности на рабочих местах характеру зрительной работы. До определенного уровня увеличение освещенности повышает производительность труда за счет улучшения условий видения объектов. Дальнейшее увеличение освещенности экономически нецелесообразно;

- Достаточно равномерное распределение яркости на рабочей поверхности. При неравномерной яркости глаз вынужден в процессе работы переадаптироваться, что ведет к утомлению зрения;
- Отсутствие резких теней на рабочих поверхностях. Резкие тени, находящиеся в поле зрения человека, искажают размеры и формы объектов различения. Это повышает утомление зрения; движущиеся тени могут привести к травмам;
- Постоянство освещенности во времени. Колебания освещенности вызывают необходимость переадаптации глаза и приводят к значительному утомлению;
- Правильная цветопередача. Спектральный состав света должен соответствовать характеру работы;
- Обеспечение электро-, взрыво- и пожаробезопасности;
- Экономичность.

Нормы рабочего освещения приведены в таблице 15. Пайка SMD-компонентов относится к зрительным работам высокой точности (Ш, б). При этом контраст компонентов с фоном печатной платы средний.

Таблица 15. Нормы освещённости на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении

Характер истика зрительно й работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зритель ь-ной работ ы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характе -ристика фона	Искусственное освещение		
						Освещённость, лк		
						При системе комбинированного освещения		При систем е общего освеще ния
						всего	в том числе от общего	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Высокой точности	Св. 0,30 до 0,50	III	а	Малый	Тёмный	2000 1500	200 200	500 400
			б	Малый Средний	Средний Тёмный	1000 750	200 200	300 200
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Тёмный	750 600	200 200	300 200
			г	Средний Большой «	Светлый « Средний	400	200	200

На рабочих местах, где отсутствует естественное освещение и условия освещения в целом оценены классом 3.2., можно снизить или устранить «вредность» за счет выполнения следующих мероприятий:

- защита временем (в случае пребывания работника в помещении без естественного освещения менее 25% рабочей смены, условия труда по естественному освещению оцениваются как допустимые (класс 2), а от 25% до 75% - как вредные 1-й степени (класс 3.1));
- улучшение условий, создаваемых искусственным освещением (при фактическом обеспечении повышенного на ступень уровня нормированной освещенности и надлежащем качестве искусственного освещения условия освещения в целом оцениваются классом 3.1, а не 3.2);
- профилактическое ультрафиолетовое (УФ) облучение работающих даже при оценке искусственного освещения классом 3.1, а естественного освещения классом 3.2, позволяет снизить степень

вредности естественного освещения и оценить освещение в целом классом 3.1.

Источники УФ-излучения устанавливаются вместе с обычными осветительными лампами, благодаря чему обычное искусственное освещение обогащается УФ-излучением. Во время пребывания в учебном или производственном помещении, где установлены такие облучатели, человек подвергается УФ-облучению небольшой интенсивности.

При недостатке на рабочем месте естественного освещения и оценке естественного освещения классом 3.1 можно выполнить следующие мероприятия:

- защита временем (в случае пребывания работника в помещении с недостаточным естественным освещением менее 50% рабочей смены условия труда по естественному освещению оцениваются как допустимые с классом 2);
- улучшение условий, создаваемых искусственным освещением (при фактическом обеспечении повышенной на ступень нормированной освещенности и надлежащем качестве искусственного освещения условия труда по освещению в целом оцениваются как допустимые с классом 2);
- анализ степени загрязнения стекол в светопроемах, их чистка и последующие контрольные измерения КЕО;
- если недостаток естественного освещения обусловлен затенением зелеными насаждениями, обеспечение сноса деревьев;
- в случае наличия в помещении зон с достаточным и недостаточным естественным освещением изменение расположения рабочих мест с их перемещением в зону с достаточным естественным освещением;
- косметический ремонт помещения с использованием светлых отделочных материалов и последующие контрольные измерения КЕО.

В каждом конкретном случае после анализа ситуации принимаются

соответствующие решения, которые вносятся в план мероприятий по улучшению условий труда работников.

12.4.4 Электробезопасность

Электробезопасность – это целый комплекс мероприятий, нормативных документов, предписаний и защитного снаряжения, который направлен на уменьшение вероятности воздействия на людей электрического тока, статического электричества, электромагнитного поля и других факторов, которые могут вызвать травмы различной степени тяжести и даже привести к летальному исходу.

Прохождение электрического тока через тело человека вызывает поражение различных органов, оказывает воздействие на нервную систему, кровеносно-сосудистую систему человека, на кровь, сердце, мозг и т.д.

Пороговый ощутимый ток, поражая человека, может стать косвенной причиной несчастного случая, вызвав непроизвольные ошибочные действия, усугубляющие существующую ситуацию (работа на высоте, вблизи токоведущих, движущихся частей и т. д.). Увеличение сверхпорогового ощутимого тока вызывает у человека судороги мышц и болезненные ощущения.

ГОСТ 12.1.038—88 ССБТ устанавливает нормы предельно допустимых значений напряжений прикосновения и токов, распространяемые на производственные и бытовые электроустановки постоянного и переменного тока с частотой 50 и 400 Гц и соответствующие прохождению тока по пути «рука-рука» или «рука-нога». Предусмотрены нормы для нормального (неаварийного) режима работы электроустановок и аварийного режима.

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, приведенных в таблице 16.

Таблица 16. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов

Ток	U, В	I, мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

Напряжения прикосновения и токи приведены при продолжительности воздействия не более 10 мин в сутки и установлены, исходя из реакции ощущения.

Напряжения прикосновения и токи для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (выше 25°C) и влажности (относительная влажность более 75%) должны быть уменьшены в три раза.

Для бытовых электроустановок напряжением до 1000 в и частотой 50 гц в аварийных режимах предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов в зависимости от времени воздействия приводятся в таблице 17.

Бытовыми электроустановками считаются электроустановки, которые используются в жилых, коммунальных и общественных зданиях всех типов, с которыми могут взаимодействовать как взрослые, так и дети.

Таблица 17. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов

t(сек)	0,01 - 0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Vпр (В)	220	200	100	70	55	40	35	30	27	25	12

Для производственных электроустановок напряжением выше 1000 В с глухим заземлением нейтрали и частотой 50 гц в аварийных режимах предельно допустимые значения напряжений прикосновения в зависимости

от времени воздействия не должны превышать значений, указанных в таблице 18.

Таблица 18. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов

t(сек)	0,01	0,2	0,5	0,7	1	от 1 до 5
U_{пр} (В)	500	400	200	130	100	65

Электропоражения людей в условиях промышленного предприятия предупреждаются благодаря:

- a. техническим решениям, исключающим возможность включения людей в цепь тока между двумя фазами или между одной фазой и землей, способом, при котором токоведущие части, нормально находящиеся под напряжением, недоступны для случайного прикосновения. Это обеспечивается надежной изоляцией, ограждением, расположением их на недоступной высоте или под землей, блокировками и другими способами;
- b. снятию напряжения с токоведущих частей во время работ, при которых не исключена возможность прикосновения к ним;
- c. устройствам валентного заземления или автоматического отключения, обеспечивающим в случае повреждения изоляция и перехода напряжения на металлические части электроустройств ограничение напряжения по величине или отключение неисправного оборудования и аппаратуры;
- d. применению в электроустройствах безопасного напряжения в зависимости от условий, в которых они эксплуатируются;
- e. правильному выбору производственной среды. При этом следует иметь в виду, что влага, сырость, токопроводящая пыль, едкие пары и газы (ведущие к разрушению изоляции), высокая температура воздуха, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные и т.

п.). наличие большого количества заземленного металлического оборудования повышают опасность электрических установок.

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 1000В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками.

12.5 Экологическая безопасность

Важными направлениями охраны окружающей среды следует считать совершенствование технологических процессов и разработку нового оборудования с меньшим уровнем выбросов в окружающую среду, замену и по возможности широкое применение дополнительных методов и средств защиты окружающей среды.

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): 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.

В качестве дополнительных средств защиты применяют аппараты и системы для очистки газовых выбросов, сточных вод от примесей. Важную роль в защите окружающей среды отводится мероприятиям по рациональному размещению источников загрязнения: оптимальное расположение промышленных предприятий с учетом местности; установление санитарно-защитных норм вокруг промышленных предприятий.

Производственные сточные воды после соответствующей очистки могут быть повторно использованы в технологическом процессе, для чего создаются системы оборотного водоснабжения либо замкнутые (бессточные) системы водоснабжения и канализации, при которых исключается сброс каких-либо вод в водоёмы.

Вследствие использования работниками душевых и туалетов образуются жидкие отходы для удаления, которых применяют канализационную систему.

12.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации при работе с объектом исследования: возникновение пожара и электропоражение.

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 м³.

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности; разработка схемы действия 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.

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 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.

Даже если при электропоражении работающий внешне сохранил формат нормального самочувствия, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья, т.е. пострадавшему должна быть обеспечена скорая медицинская помощь. 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.

Выводы по разделу

В результате выполнения раздела «Социальная ответственность» были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. Проведен анализ опасных и вредных факторов труда согласно действующей нормативно – технической документации. В разделе были описаны источники возникновения вредных факторов, их воздействие на организм человека, приведены допустимые нормы с необходимой размерностью и были предложены средства защиты (коллективные и индивидуальные) для минимизации воздействия факторов. Также были рассмотрены вопросы экологической безопасности и выбраны наиболее вероятные виды чрезвычайных ситуаций. Для ЧС указаны источники возникновения и разработаны меры по предупреждению и возникновению. Был разработан порядок действий в результате возникновения ЧС и меры по ликвидации последствий.

Полученные результаты по разделу «Социальная ответственность» имеют большую значимость в практическом применении. Весь собранный материал основан на нормативных документах, которые регламентируют

действия каждого выявленного опасного и вредного производственного фактора. При соблюдении всех требований безопасности, рабочий персонал будет полностью защищен от всех вредных, опасных факторов, чрезвычайных ситуаций и несчастных случаев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная магистерская диссертация была посвящена разработке и исследованию эффективной системы управления для синхронного двигателя с постоянными магнитами, который непосредственно установлен на шахтный электровоз.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что разработанная система управления является рабочей и пригодной для использования в учебных целях. Показатели качества переходных процессов двигателя и модели имеют небольшие погрешности [п.5 табл.6], что вполне допустимо с учетом принятых допущений. Повышение показателей качества переходных процессов может быть произведено в результате более точного представления математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами и на основе перенастройке контуров тока и скорости с учетом более сложной математической модели. Статическая ошибка по возмущению равняется 0, а максимальное перерегулирование модели 4,73 %, что полностью удовлетворяет техническому заданию, поскольку энергоэффективность и грамотное расходование электроэнергии при применении аккумуляторных батарей в шахтных и рудничных электровозах имеет важное значение для горнодобывающей промышленности и других отраслей промышленности, где доставка и перемещение грузов рельсовым транспортом является приоритетной.

Так же верно разработанная уточненная система управления, учитывая все факторы и аспекты данной промышленности, поможет продлить срок службы электрического двигателя, поскольку будут отсутствовать перегрузки по току, что предотвратит перегревание обмоток двигателя, и, как следствие, разрушение изоляции. Отсутствие перегрузки по моменту благополучно скажется на подшипниковом щите, поскольку будут отсутствовать биения. А повышение быстродействия, за счет установки современных микроконтроллеров сократит время отклика на изменение

направления движения, либо на торможение, что приведет к более точному движению.

В качестве экономического обоснования исследования определены ключевые особенности продвижения учебного стенда с применением разработанной системы управления для шахтного электровоза на Российский рынок, в учебные лаборатории вузов, имеющих направления подготовки, связанные с электроприводами. Для этого была рассчитана себестоимость стенда, определены целевые сегменты потребителей, проанализированы перспективы дальнейшего развития в данной области и обоснована конкурентоспособность учебного стенда на рынке.

В результате выполнения раздела «Социальная ответственность» были проанализированы вредные и опасные факторы, воздействующие на научного сотрудника, в момент выполнения его работы, согласно действующей нормативно –технической документации. Рассмотрены правовые и организационные моменты по обеспечению безопасности труда. В данном разделе были проанализированы такие вопросы, как экологическая безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях. Для этого рассмотрены возможные случаи их возникновения и проработаны методы по их предотвращению.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Подземный транспорт шахт и рудников. Справочник / Под общ. Ред. Г. Я. Пейсаховича, И. П. Ремизова. — М. : Недра, 1985. С 565.
2. Шахтный подземный транспорт: Справочное издание. — В 2-х т. — Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт. — Т. 1. / Под общей ред. Б. А. Грядущего. Изд. 2-е перераб. и доп. — Донецк: «ВИК», 2011. С. 480.
3. Пармас Я.Ю. Судьба асинхронного привода / Я.Ю. Пармас // Электрическая тепловая тяга. –1992. – № 1. – С. 41–45.
4. Анализ эксплуатации шахтных электровозов / В.Г. Щербаков [и др.]// Вестник ВЭЛНИИ. Электровозостроение: сб. науч. тр. – Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 1997. – № 37. –С. 143–147.
5. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга / С.А. Волотковский. – 4-е изд., перераб. И доп. – М.: Недра, 1981. – 389 с.
6. Аккумуляторный рудничный электровоз с тяговым приводом трехфазного тока // Железные дороги мира. – 1997. - №. 9. – С. 31-35
7. Носков А.Л. Российское электровозостроение на пороге XXI века/ А.Л. Носков // Вестник ВЭЛНИИ. Электровозостроение: сб. науч. тр. – Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 1999. – № 41. – С. 3-14.
8. Корельский Д.В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами, 2001. – с. 155–159.
9. С.J. O'Rourke et al. "A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, no. 4, pp. 2070-2083, Dec. 2019.
10. R.H. Park Two Reaction Theory of Synchronous Machines AIEE Transactions 48:716–730 (1929).

- 11.Осин И.Л. Синхронные электрические двигатели малой мощности: учеб. пособие для вузов / И.Л. Осин. – М: Издательский дом МЭИ, 2006. – 216 с.
- 12.Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. - М.: учебник для студ. вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – : Энергия, 1980. - 928 с.
- 13.Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины: Синхронные машины. - М.: Высшая школа, 1990.
- 14.Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для вузов. – 2-ое изд., перераб. и доп. - Л.: Энергия, 1974.
- 15.Бербиренков И.А., Лохнин В.В. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе электромобиля // Известия ТПУ. Энергетика. – 2011. - Т. 318. № 4. – С. 148–150.
- 16.Kessler C. Uber die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise. Teil III. Die optimale Einstellung des Reglers nach dem Betragsoptimum // Regelungstechnik. – 1955. – В. 3. – Н. 2. – S. 40–49.
- 17.Kessler C. Das symmetrische Optimum. Teil I und III // Regelungstechnik. – 1958. – В. 6. – Н. 11. – S. 395–400; Н. 12.– S. 432–436.
- 18.Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: учеб. пособие / Р.Т. Шрейнер. - Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 279 с.
- 19.Чернышев А.Ю., Кояин Н.В. Проектирование электрических приводов: Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 120 с.
- 20.Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты: – Екатеринбург УРО РАН, 2000. - 654 с.
- 21.ГОСТ 2.855-75 Горная графическая документация. Обозначения условные горных выработок

Приложение А

Листинг программы расчета в среде MATLAB Simulink

```
R1=0.321;
L1=0.00356;
I_nom=1.7;
%напряжение максимальное инвертора
U_max_rt=140;
%напряжение минимальное инвертора|
U_min_rt=1;
%несущая частота инвертора
f_pwm=2000;
%коэф. инвертора
k_inv=U_max_rt/U_min_rt;
T_inv=1/f_pwm;
%коэф. обр. связи по току
k_ot=1;
%коэф. пи регулятора
k_reg=L1/(2*T_inv*k_inv*k_ot);
T_reg=L1/R1;

T_f=8*T_inv;
Psi_2=L1*I_nom;
Zp=5;
J=0.0008;
k_os=k_ot;

%Нелинейности
Ux=0.312*Uamp;
Uy=0.95*Uamp;
Ix=1.5*Iamp;
Iy=2*Iamp;

Imax=2*Iamp;
Umax=Uamp;
```

Приложение Б
(справочное)

Development of a control system for traction electric drive for a mine electric locomotive

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Волков А. С.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпушкин С. В.	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качалов Н. А.	к.п.н.		

Томск 2020 г.

1 Introduction to reference frame theory

1.1 Overview

As the application of ac machines has continued to increase over this century, new techniques have been developed to aid in their analysis. Much of the analysis has been carried out for the treatment of the well-known induction machine. The significant breakthrough in the analysis of three-phase ac machines was the development of reference frame theory. Using these techniques, it is possible to transform the phase variable machine description to another reference frame. By judicious choice of the reference frame, it proves possible to simplify considerably the complexity of the mathematical machine model. While these techniques were initially developed for the analysis and simulation of ac machines, they are now invaluable tools in the digital control of such machines. As digital control techniques are extended to the control of the currents, torque and flux of such machines, the need for compact, accurate machine models is obvious.

Fortunately, the developed theory of reference frames is equally applicable to the synchronous machines, such as the Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM). This machine is sometimes known as the sinusoidal brushless machines or the brushless ac machine and is very popular as a high-performance servo drive due to its superior torque-to-weight ratio and its high dynamic capability. It is a three-phase synchronous ac machine with permanent-magnet rotor excitation and is designed to have a sinusoidal torque-position characteristic.

The aim of this section is to introduce the essential concepts of reference frame theory and to introduce the space vector notation that is used to write compact mathematical descriptions of ac machines. Over the years, many different reference frames have been proposed for the analysis of ac machines. The most commonly used ones are the so-called stationary reference frame and the rotor reference frame.

1.2 Three-phase to two-phase transformation (Clarke transformation)

Three-phase ac machines are conventionally modeled using phase variable notation. However, for a three-phase, star-connected machine, the phase quantities are not independent variables so that:

$$\begin{aligned} i_{sA}(t) + i_{sB}(t) + i_{sC}(t) &= 0 \\ v_{sA}(t) + v_{sB}(t) + v_{sC}(t) &= 0 \\ \varphi_{sA}(t) + \varphi_{sB}(t) + \varphi_{sC}(t) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

where i_s , v_s and ϕ_s denote stator phase currents, voltages and flux linkages, respectively.

As a result of this redundancy in the phase variable representation it is possible to transform the system into an equivalent two-phase representation. The transformation from three-phase to two-phase quantities is written in matrix form as:

$$\begin{bmatrix} i_{sa}(t) \\ i_{s\phi}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\gamma) & \cos(2\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \sin(2\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA}(t) \\ i_{sB}(t) \\ i_{sC}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

where $\gamma = 2\pi/3$. The transformation is equally valid for the voltages and flux linkages.

The stator current space vector is defined as the complex quantity:

$$\underline{i}_s(t) = i_{sa}(t) + j i_{s\phi}(t) \quad (3)$$

and it is possible to write (2) more compactly as:

$$\underline{i}_s(t) = \frac{2}{3} \left[i_{sA}(t) + \underline{a} i_{sB}(t) + \underline{a}^2 i_{sB}(t) \right] \quad (4)$$

where \underline{a} is a vector operator that produces a vector rotation of $\gamma = 2\pi/3$ and is defined as:

$$\underline{a} = \exp(j\gamma) = \cos(\gamma) + j\sin(\gamma) \quad (5)$$

The choice of the constant in the transformations of (2) and (4) is somewhat arbitrary. Here, the value of $2/3$ is adopted. Its main advantage is that magnitudes are preserved across the transformation. Therefore, sinusoidal phase currents with

a peak magnitude of I_m produce a current space vector with a peak magnitude of I_m . For this transformation, the inverse relationship is written:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \\ i_{sC}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ \cos(2\gamma) & \sin(2\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

As the aim of any digital current control scheme is to control current amplitude, it is felt that this form is more suitable for control purposes. Transformation (2) and its counterpart (6) are denoted hereafter as the Forward Clarke Transformation and the Reverse Clarke Transformation, respectively.

The space vector may be viewed in the complex plane as shown in Figure 1. The conventional magnetic axes of the three machine phases are separated by $\gamma = 2\pi/3$. The real or $s\alpha$ axis of the new two-axis coordinate system is arbitrarily chosen to coincide with the s_A axis. Obviously, the imaginary or $js\beta$ axis lies in quadrature with the $s\alpha$ axis. The current space vector is shown at an arbitrary location in the complex plane. The phase currents may be obtained by projecting the current space vector onto the respective phase axis.

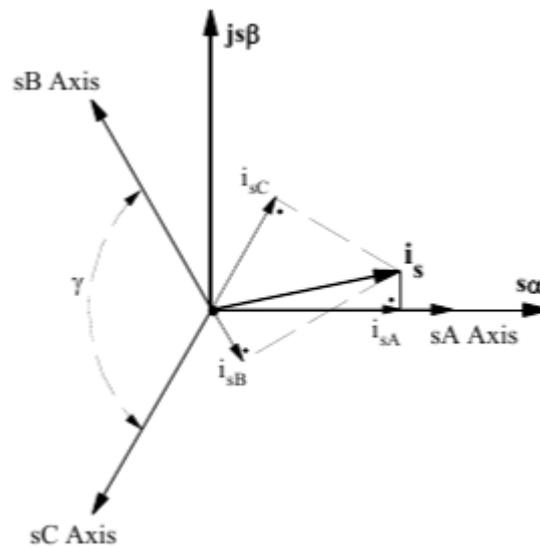


Figure 1 – Relationship of stator current space vector and stator phase currents.

Consider the case of a balanced set of three-phase stator currents:

$$\begin{aligned}
i_{sA} &= I_m \sin(\theta - \varphi) \\
i_{sB} &= I_m \sin(\theta - \gamma - \varphi) \\
i_{sC} &= I_m \sin(\theta - 2\gamma - \varphi)
\end{aligned} \tag{7}$$

where I_m is the magnitude of the phase currents, $\theta = \omega t$ is the angular position in radians and ϕ is the phase angle. Using (2) the currents of (7) may be transformed to the equivalent two-phase representation to give:

$$\begin{aligned}
i_{sq} &= I_m \sin(\theta - \varphi) \\
i_{sp} &= -I_m \cos(\theta - \varphi)
\end{aligned} \tag{8}$$

so that the current space vector of such a system may be written as:

$$\begin{aligned}
\mathbf{i}_s &= I_m \sin(\theta - \varphi) - jI_m \cos(\theta - \varphi) \\
&= -jI_m e^{j(\theta - \varphi)}
\end{aligned} \tag{9}$$

which describes a circular trajectory in the space vector plane.

Therefore, a balanced three-phase system in phase variables transforms into a circular locus in the equivalent two-axis representation. The radius of the circle is the peak magnitude of the phase quantities. The circular locus is described at a rate equal to the angular frequency of the phase quantities.

1.3 Vector rotation (Park transformation)

This transformation converts vectors in a balanced two-phase orthogonal stationary system into an orthogonal rotating reference frame.

Basically, the three reference frames considered in this implementation are:

1. Three-phase reference frame, in which I_a , I_b , and I_c are co-planar three-phase quantities at an angle of 120 degrees to each other.
2. Orthogonal stationary reference frame, in which I_α (along α axis) and I_β (along β axis) are perpendicular to each other, but in the same plane as the three-phase reference frame.
3. Orthogonal rotating reference frame, in which I_d is at an angle θ (rotation angle) to the α axis and I_q is perpendicular to I_d along the q axis.

The stator current, voltage and flux linkage space vectors are complex quantities defined in a reference frame whose real axis is fixed to the magnetic axis of stator winding s_A . However, the corresponding quantities defined for the rotor circuit of a three-phase ac machine are similarly stated in a reference frame fixed to the rotor. In the analysis of electrical machines, it is generally necessary to adopt a common reference frame for both the rotor and the stator. For this reason, a second transformation, known as a vector rotation, is formulated that rotates space vector quantities through a known angle.

In the space vector diagram of Figure 1, the axes of the space vector plane are stationary. Meanwhile the space vectors of the current, voltage and flux linkages rotate about these axes at a rate equal to the angular frequencies of the corresponding phase quantities. If instead a new reference frame is defined where the axes are made to rotate at the same rate as angular frequency of the phase quantities, stationary current, voltage and flux linkage space vector result.

Consider applying the vector rotation through an angle θ :

$$\underline{v} = e^{-j\theta} \quad (10)$$

to the current space vector of (3). The current space vector in this new reference frame is given by:

$$\underline{i}_{dq} = i_{sd} + j i_{sq} = \underline{i}_s e^{-j\theta} \quad (11)$$

which may also be written in matrix form as:

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix} \quad (12)$$

The real component of the current space vector in this new reference frame is the direct axis component while the imaginary component is called the quadrature axis component.

The relationship of the real and imaginary components of the current space vector in the original stationary two-axis reference frame and the new rotating reference frame is shown in Figure 2. Clearly, from the viewpoint of the stationary

($\alpha\beta$) frame, both the current space vector and the direct and quadrature axes are rotating at a speed ω . However, when viewed from the rotating reference frame, the current space vector is stationary. The real axis of the rotating reference frame is located at an angle θ from the real axis of the stationary reference frame. The elimination of position dependency from the machine electrical variables is the main advantage of a vector rotation. This transformation will be referred to as the Reverse Park Transformation.

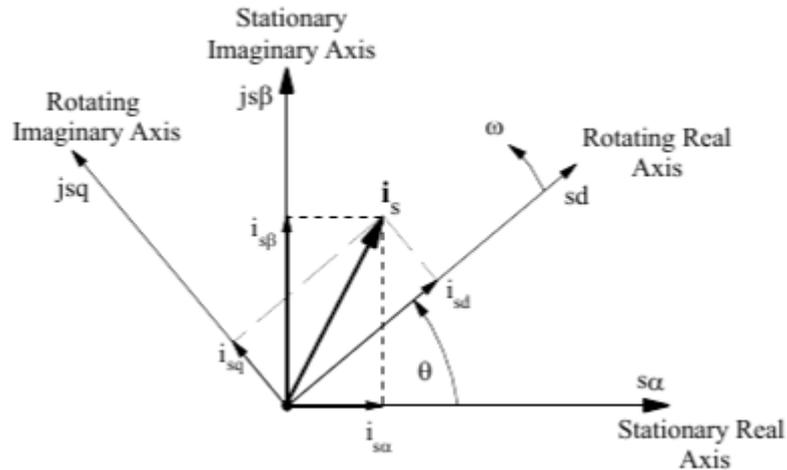


Figure 2 – Relationship of current space vector components in stationary and rotating reference frames.

The inverse vector rotation, to transform from a rotating to a stationary reference frame, may be written:

$$\underline{i}_s = \underline{i}_{dq} e^{j\theta} \quad (13)$$

or in matrix form as:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (14)$$

This rotation is commonly called the Forward Park Transformation.

Consider the application of the vector rotation of (10) to the current space vector of (9) derived for the balanced set of stator currents:

$$\underline{i}_{dq} = -jI_m e^{-j\varphi} \quad (15)$$

so that:

$$\begin{aligned} i_{sd} &= -I_m \cos(\varphi) \\ i_{sq} &= -I_m \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (16)$$

which are independent of the instantaneous angular position of the phase quantities.

Therefore, a balanced three-phase system in phase variables may be transformed into an equivalent two-axis representation that is independent of the angular position by applying a three-phase to two-phase transformation followed by a vector rotation by the angular position of the phase quantities.

1.4 Practical implementation of the transformations

In this section, some considerations are made about the overall computational efficiency of the transformations.

The Forward Clarke Transformation given by (2) may be reduced into a computationally more efficient form by explicitly substituting the (constant) cosine and sine values and applying the first equation of (1). It is easily seen that these actions lead to:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sA}(t) \\ \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{sB}(t) - i_{sC}(t)) \end{bmatrix} \quad (17)$$

The Reverse Clarke Transformation given by (6) is implemented by explicitly substituting the (constant) cosine and sine values and applying the first equation of (1):

$$\begin{bmatrix} i_{sA}(t) \\ i_{sB}(t) \\ i_{sC}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ -\frac{1}{2}i_{s\alpha}(t) + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}(t) \\ -\frac{1}{2}i_{s\alpha}(t) - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Unlike the Clarke transformations, both Park transformations require the real-time computation of the transforming matrix itself. This entails the evaluation of one sine and one cosine function for each.

However, the forward and reverse matrices are mutually transposed. More efficient usage of these transformations is therefore to calculate the sine and cosine

function once and to build the two matrices by reversing the sign of the sine where appropriate. This will be explained more in detail in the next section.

At last, it may be noted that the two transformation steps of (2) and (12) can be combined into a single transformation that may be written as:

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \gamma) & \cos(\theta - 2\gamma) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \gamma) & -\sin(\theta - 2\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix} \quad (19)$$

This transformation converts the phase quantities to the rotating reference frame in a single step.

However, it is often more desirable and computationally more efficient to apply the transformation in two steps as described previously. In this way it is necessary to compute only two sinusoidal functions of position unlike the six required for (19).

1.5 Introduction to PMSM

Despite their comparatively high-cost permanent magnet synchronous machines (motors) (PMSM) are getting increasingly involved in electrical engineering and electric power sector. Because of the top energetic characteristics among modern electromechanical converters PMSM are used both in low-speed high-accuracy motion control systems (brushless DC motors – BLDC) and in very high-speed systems having a primary field of application covering gas turbine generators, compressor drives, expansion machines and electromechanical energy storages [1,2].

The possible application for PMSM is an autonomous decentralized low-power source which requires an electric starter-generator. Aspects of structure designing electric starter-generator for the autonomous cogeneration plant based on the rotary vane external combustion engine (as well as the features and advantages of this type of engines) were considered in [3,4].

Fig. 3 shows the diagram of electrical energy generating using intermediate DC link (power factor corrector (DC/DC) 2) and two bidirectional blocks such as

active front end (AFE) converter 1 and inverter 3 along with the corresponding control systems 4, 5, 6 [5].

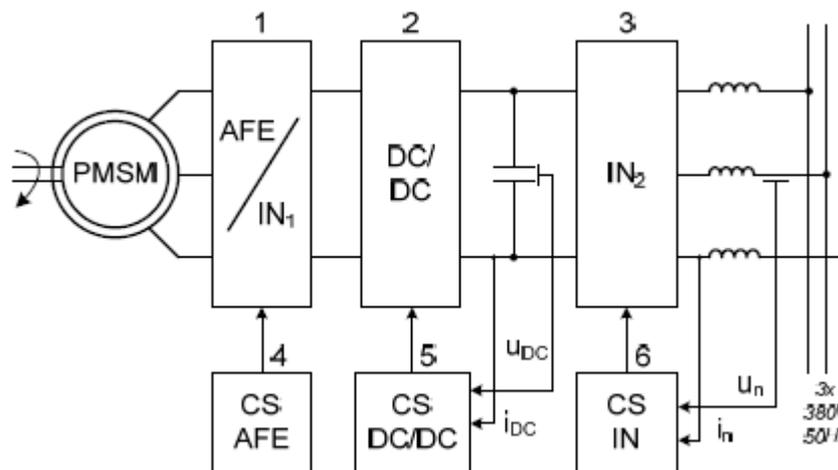


Figure 3 – The diagram of the autonomous generator plant with PMSM.

The referenced paper [3] contains the results of modeling and experiments in the generator mode of the plant while an investigation of the system starting operating modes is also of interest.

1.6 Functional synchronous electric scheme with scalar control

The functional diagram of the implementation of synchronous frequency-controlled electric drive with scalar control is shown in Picture 6.

The main functional elements of the controlled synchronous electric drive with frequency scalar control are:

- The frequency converter;
- Control unit converter, including a 3-phase generator system control voltage, and generator 6-channel PWM signal and the drive unit;
- Generator-characteristics;
- Speed dial intensity with linear-shaped or C shaped characteristic;
- Sensors generally linear motor current;
- Unit of calculation of the actual value of the current phase of the motor current;

- Model of the frequency converter;
- Model of the synchronous motor;
- Single-mass model of a mechanical system with a static moment load active and reactive nature;
- Model current limiting circuit with a PI controller and a current sensor.

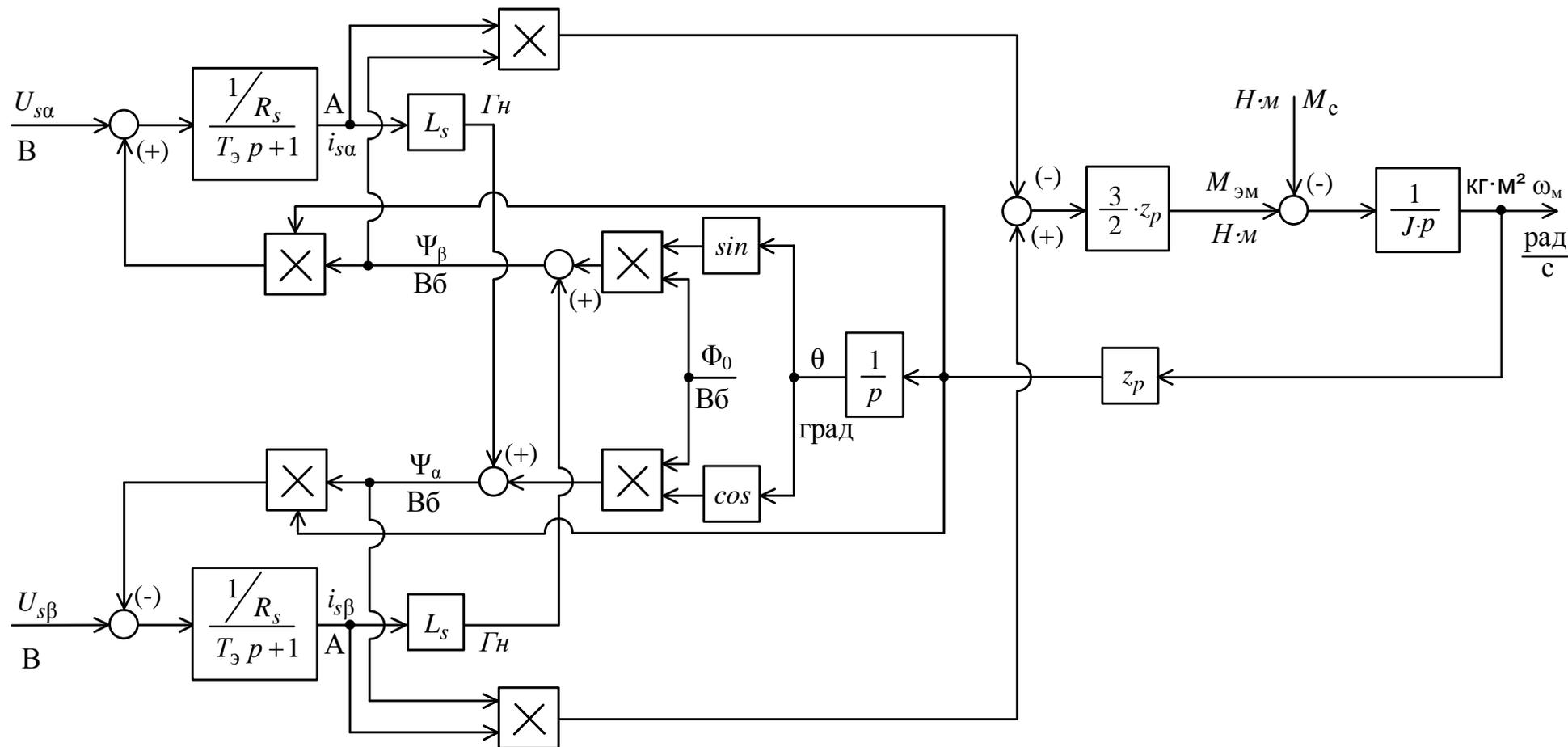


Figure 5 – Block diagram of a two-phase synchronous motor in the stationary stator alpha, beta coordinate

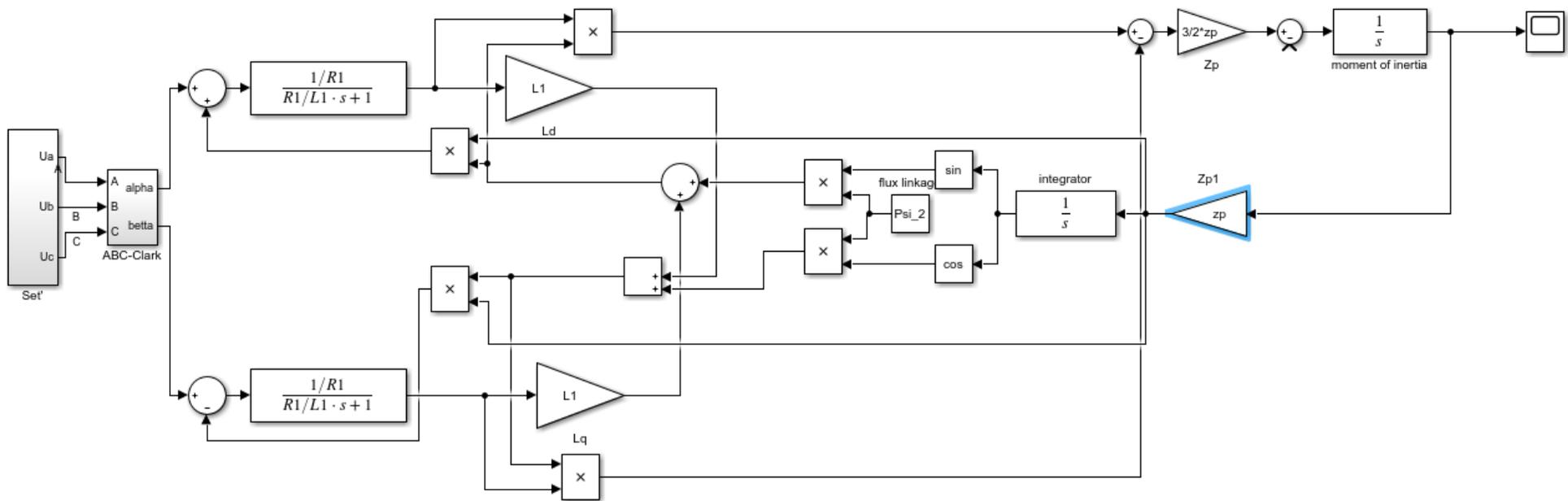


Figure 6 – Simulation model of a synchronous motor in a Matlab Simulink environment in a fixed coordinate system

1.8 The mathematical model of the PMSM in a rotating coordinate system

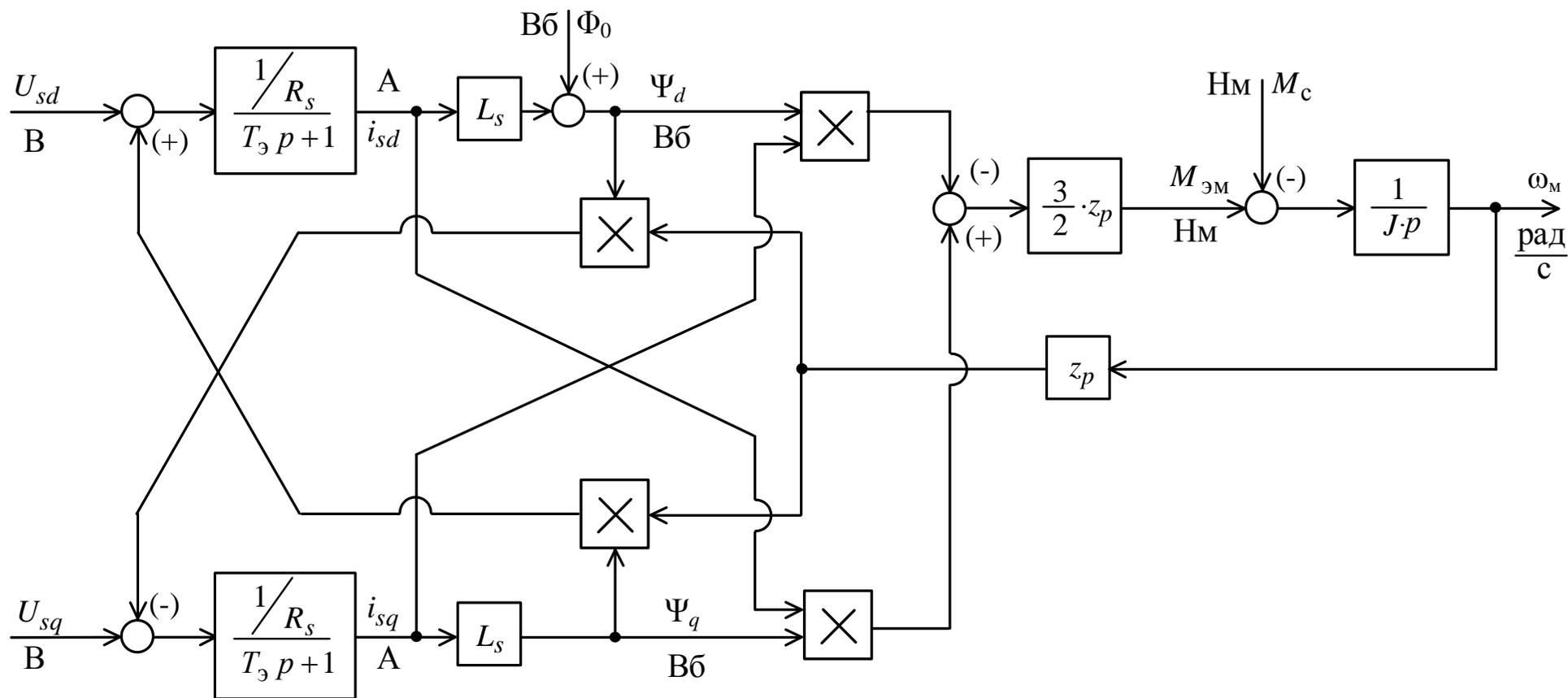


Figure 7 – Block diagram of a two-phase synchronous motor in the stationary stator d, q coordinate

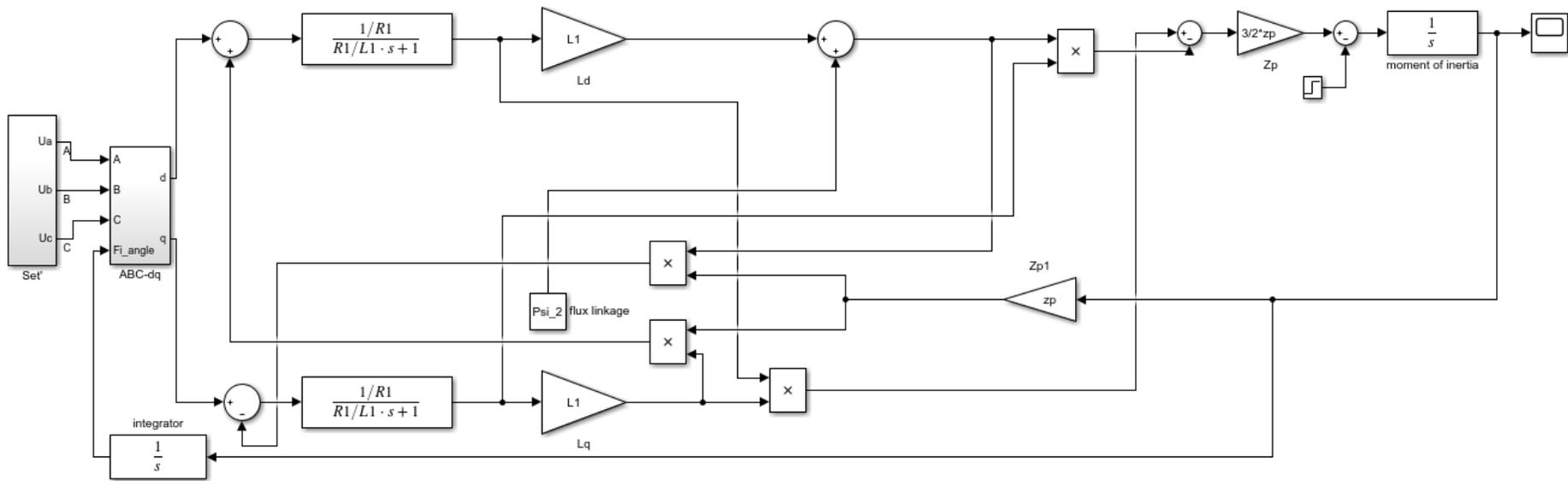


Figure 8 – Simulation model of a synchronous motor in a Matlab Simulink environment in a rotating coordinate system

1.9 Findings of the research work of variable frequency electric drive with vector control

1. Electric drives with frequency vector control and speed sensor have good leveling properties, which allows you to adjust the motor speed over a wide range, generate transients with limited acceleration and jerk, to limit the maximum engine torque, to provide uniform load distribution and coordination of the engine speed in the case of multi-engine drive.

2. Vector control systems throughout the speed range of the engine provide a constant flux setpoint, for this reason, at a voltage of the electric network does not provide the nominal speed of the motor in the first control zone at a given nominal flow.

1.10 General conclusions on the results of simulation studies variable frequency electric locomotive

1. An electric locomotive may use a frequency-controlled synchronous electric drive with scalar and vector control with and without an encoder speed sensor. When you select a control method should be considered virtues mentioned above and management methods disadvantages.

2. Power frequency vector control allows a good deal with the regulation of the electric locomotive speed at low frequencies, which increases the accuracy of the control of this control method.