

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

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Электроприводы и системы управления электроприводов»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Тяговый электропривод подземного электровоза

УДК 62-83-523:004.77

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Колтунова Екатерина Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кладиев Сергей Николаевич	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально- гуманитарных наук	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Амелькович Юлия Александровна	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Отделение электроэнергетики и электротехники	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Дементьев Юрий Николаевич	PhD, к.т.н.		

Томск – 2018 г.

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Универсальные компетенции	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование 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.
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
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.

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

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Электроприводы и системы управления электроприводов»

УТВЕРЖДАЮ:

_____ Ю.Н. Дементьев
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Ж	Колтунова Екатерина Александровна

Тема работы:

Тяговый электропривод подземного электровоза	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(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.).

Максимальная скорость подвижного состава рудничного электровоза: 15км/час .
Максимальный момент, развиваемый электроприводом электровоза в пуско-тормозных режимах: $M_{эпмакс}=800 \text{ Н}\cdot\text{м}$.
Максимальный момент нагрузки: $M_{СМАКС}=600 \text{ Н}\cdot\text{м}$.
Минимальный момент нагрузки: $M_{СМИН}=70 \text{ Н}\cdot\text{м}$.
Требования к тяговому частотно регулируемому электроприводу:
Учесть при определении оптимальной конструкции тягового электропривода режимы работы электровоза, наличие ограничений по скорости, моменту;

	<p>обеспечить требуемые параметры технологического процесса, по показателям разгона, торможения.;</p> <p>разработать адекватную компьютерную модель векторно-частотного управления системы рудничного электровоза;</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Анализ конструкции и характеристик тяговых асинхронных электроприводов</p> <p>Математическая модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза</p> <p>Синтез системы автоматического управления и построение структуры тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза</p> <p>Исследование системы векторно-частотного управления электроприводом в различных режимах нагрузки</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Функциональная и структурная схемы. 2. Имитационная модель. 3. Результаты исследований.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Фигурко Аркадий Альбертович
«Социальная ответственность»	Амелькович Юлия Александровна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:
<p>Введение; обзор литературы по вопросам тягового асинхронного электропривода, составление математического описания механической системы тягового рудничного электровоза, исследование векторно-частотного управления; заключение.</p>

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	09.02.2018 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кладиев Сергей Николаевич	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Колтунова Екатерина Александровна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Ж	Колтуновой Екатерине Александровне

Институт	ИШЭ	Подразделение	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих.</i>	Прейскуранты, расчетные цены и др
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные страховые фонды – 27,1 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Потенциальные потребители результатов исследования. Расчет конкурентоспособности технических решений. SWOT-анализ.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Расчет длительности и стоимости работы.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А.А.	к.э.н, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Колтунова Екатерина Александровна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Ж	Колтуновой Екатерине Александровне

Школа	ИШЭ	Подразделение	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. <i>Объект исследования: технология, алгоритм, методика в производственных условиях.</i></p>	<p>Объектом исследования является электропривод рудничного электровоза и его система управления в горных месторождениях с шахтной выработкой. Результаты диссертационной работы применимы и на других невзрывоопасных шахтных месторождениях.</p>
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. <i>Профессиональная социальная ответственность:</i> 1.1. <i>Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.</i> 1.2. <i>Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов.</i></p>	<p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Состояние воздушной среды; 2) Микроклимат; 3) Производственный шум, вибрация; 4) Недостаточная искусственная освещенность рабочей зоны. <p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Поражение электрическим током; 2) Механические опасные факторы.
<p>2. <i>Экологическая безопасность.</i> 2.1 <i>Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.</i> 2.2 <i>Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.</i></p>	<p>Утилизация металлов корпуса и составных частей.</p>
<p>3. <i>Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</i> 3.1. <i>Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.</i> 3.2. <i>Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.</i></p>	<p>Чрезвычайные ситуации:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Взрывоопасность 2) Обвалы, прорыв воды 3) Пожароопасность
<p>4. <i>Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i> 4.1. <i>Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.</i> 4.2. <i>Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</i></p>	<p>Специальные (характерные для рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Амелькович Ю. А.	к.т.н, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Колтунова Екатерина Александровна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит страниц, рисунка, таблиц, источников, приложения.

Ключевые слова: рудничный электровоз; тяговый асинхронный электродвигатель; частотно-регулируемый электропривод; динамические характеристики; система управления движением, многомассовая модель подвижного состава

Цель работы: разработать схему управления тягового асинхронного двигателя и преобразователя частоты для рудничного электровоза, учитывающие ограничение скорости движения по условиям торможения в режиме номинальной нагрузки, независимое охлаждение двигателей и исполнение корпуса. Разработать математическую модель векторно-частотного управления подвижного состава рудничного электровоза в среде Matlab Simulink с учетом контуров регулирования, временных задержек и учетом мертвого времени ключевых элементов.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Latex с использованием пакетов: Microsoft Visio 2010, Matlab Simulink и представлена на диске (в конверте на обороте обложки).

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
1	Оценка состояния рынка шахтных локомотивов..... 11
1.1	Цели и задачи диссертационной работы 15
2	Принципы построения асинхронного тягового привода шахтного электровоза 16
2.1	Режимы работы тягового электропривода 16
2.2	Выбор ТАД 16
2.3	Структурная схема силового канала электропривода .. 19
3	Расчет параметров асинхронного двигателя и настройка контуров регулирования 22
3.1	Параметры асинхронного двигателя 22
3.2	Проверка адекватности расчетных параметров двигателя..... 25
3.3	Естественные механические и электромеханические характеристики..... 26
3.4	Структурная схема и параметры механической системы 30
3.5	Расчет параметров элементов силового канала электропривода..... 30
3.6	Функциональная схема векторно-частотной системы управления..... 32
3.7	Расчет параметров контуров векторно-частотного управления 35
4	Проектирование имитационной модели векторного управления тягового асинхронного электропривода 39
4.1	Описание имитационной модели 39
4.2	Результаты моделирования 48
5	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..... 51
5.1	Предпроектный анализ..... 51
5.2	Планирование управления научно-техническим проектом 55
6	Социальная ответственность 64
6.1	Профессиональная социальная ответственность 64
6.2	Экологическая безопасность 81
6.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях..... 82

6.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения	
	безопасности	88
	Литература	92

1 Оценка состояния рынка шахтных локомотивов

Изобретение железнодорожных путей берет начало от необходимости транспортировать руду и полезные ископаемые по внутризаводским территориям в России в 18 веке [1]. К двадцатому веку усовершенствование технологий приводит к повсеместному использованию электровозов, как и для гражданской перевозки, так и для шахт. Именно с помощью электрического транспорта производится до 90% объема добычи на подземных рудниках. Такая популярность по сравнению с другим транспортом связана с экономичностью, отсутствием загрязнения и безопасностью.

Электровозы до последнего времени оснащались двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением, они составляли большую часть всех тяговых приводов в городском и рудничном транспорте, благодаря ряду положительных качеств:

- мягкие механические характеристики, которые обеспечивают пуск электровоза с большой нагрузкой и широкие пределы частоты вращения. Меньшее возрастание тока приводит к меньшей потребляемой мощности, в отличие от ДПТ с независимым возбуждением;
- эффективная параллельная работа двух и более двигателей;
- высокая перегрузочная способность, механическая характеристика приобретает линейный характер при нагрузках выше номинальных;

Такая популярность объясняется не только характеристиками двигателей, но и условиями применения. Электроснабжение на постоянном токе от станции питания в шахтах наиболее пригодно из существующих способов. От чего зачастую применяется троллейный вид питания с напряжением питания 175 В с подвижным контактом у электровоза в шахтах с низким требованием по искробезопасности.

Но при этом, все большие требования к энергоэффективности и автоматизации требуют высокого качества транспортировки от рудничных электровозов, которое уже не могут дать текущие системы управления с двигателями постоянного тока. Одно из главных условий - поддержание скорости в зависимости от текущей позиции (подъем, спуск, трогание). Электропривод по-

стоянного тока в сочетании с классической системой реостатного управления обладает недостатками:

- большие потери энергии в устройствах регулирования;
- конструкционные недостатки щеточно-коллекторного узла, который обладает низкой эксплуатационной надежностью. Приводит к повышенным затратам на техническое обслуживание;
- недостатки конечного числа переключений скорости, приводящие к рывкам при трогании и ударам состава или к буксованию, в зависимости от коэффициента сцепления с рельсами;
- отсутствие стабильной системы безопасности от юза или буксования, аварийных режимов работы электропривода, защиты от неправильных действий машиниста;
- сложность поддержки низкой скорости движения, например, при малой нагрузке локомотива с пустым составом, или при изменении угла наклона пути. Такой режим требует от машиниста постоянного переключения контроллера скорости, от чего очень частые броски тока приводят к раннему износу оборудования, как электропривода, так и механической части системы (тормоза, колесные пары).

В ряде работ были рассмотрены недостатки, свойственные ДПТ [2, 3], в том числе и с позиции применения различных устройств регулирования, таких как ТЭРА-1М, или иных систем управления на основе микропроцессоров. В таких системах применены ключевые элементы и импульсная система управления, позволяющие ликвидировать проблемы переключений скорости и ее стабилизации, модернизировать систему аварийных режимов и блокировок. Но данный блок управления не может устранить проблемы, связанные с самим использованием двигателей постоянного тока. При этом было предложено необходимость перехода к более эффективным машинам, а именно к асинхронным электроприводам с частотным управлением, позволяющим достигнуть:

- Уменьшение затрат на обслуживание, повышение эксплуатационной надежности всей системы в целом, включая и состояние рельсового покрытия;
- Улучшение системы управления по скорости, позволяющие контролировать процессы пуска и торможения.
- Применение современных систем безопасности.

Ранее из-за отсутствия достаточной элементной базы было невозможно применять тяговый асинхронный двигатель (ТАД) в транспортной системе XX века, чтобы получить более серьезные преимущества перед ДПТ. Хотя разработки ведутся с середины 70-х годов, управляемые инверторы большой мощности на базе IGBT модулей и низких по стоимости микропроцессоров появились в доступности разработчиков лишь последние два десятка лет.

Из-за особенностей, связанных с питанием асинхронного электродвигателя, требовались и решения в области конструирования самих двигателей, например, для аккумуляторного шахтного электровоза проведена работа - [4, 5].

На российском рынке шахтного рельсового транспорта очевидно высокая доля зарубежных производителей. Например, чешская фирма Ferrit предлагает локомотивы аккумуляторные и контактные модификацией DLPA44F, TLP120F и др, оснащенные асинхронными электроприводами мощностью от 45 кВт до 150 кВт с тяговым усилием от 22 кН до 55 кН. Также ряд фирм используют именно асинхронные электродвигатели, такие как Scharf, ABB.

Российская промышленность чаще всего использует локомотивы, произведенные в Украине, закупленные до 1990 года. Изготовлены локомотивы на таких заводах как ПАО «Электромашина» (г. Харьков), Днепровский электровозостроительный завод; ОАО «Александровский машзавод», ЧАО ПКФ «Амплитуда»; ОАО «Дружковский машзавод». Низкий уровень развития отечественной промышленности остается из-за устаревших технологий и оборудования, отсутствия заказов на НИОКР подобных тематик, отсутствия производства комплектующих.

Несколько российских заводов, таких как Кемеровский машиностроительный завод, ЗАО «Динамо Энерго», Тульский завод ГШО, продолжают заниматься выпуском локомотивов. Хотя в последние три года есть тенден-



Рисунок 1 – Контактный локомотив TLP90F

ция снижения производства из-за малого спроса и конкуренции иностранных производителей, например, по контактными электровозам конкуренция со стороны Украины.



Рисунок 2 – Аккумуляторный локомотив 2AM8Д

В шахтном аккумуляторном электровозе от Кемеровского машзавода типа 2AM8Д используются тяговые взрывозащищенные двигатели постоянного тока типа ЭДР-7П мощностью 12 кВт; сила тяги 24кН. Управление осуществляется контроллером типа ГР-9М, КРВ-2, КР или КТВ-2. Динамо Энерго используют ДТН 45/27 мощностью 45 кВт. Украинские производители также используют двигатели постоянного тока.

Стоит отметить, что ряд проблем, обозначенных у существующих систем с ДПТ, в большей части решены на наземном магистральном железнодорожном транспорте. Такие ограничения на развитие применения ТАД в сфере транспорта горной промышленности связаны с тем, что невозможно применять системы общепромышленного назначения не только из-за необходимости взрыво-защищенных корпусов двигателей, но и их тяжелые условия

работы. Также переоснащение текущего шахтного транспорта не так просто осуществимо, потому что новые решения должны совпадать в пределах массо-габаритных показателей.

Кроме особенностей применения асинхронных двигателей, необходимо учитывать специфической модификации преобразователя частоты, так как стандартные преобразователи рассчитаны на стандартное напряжение, а на троллейной шине горной шахты в звене постоянного тока напряжение составляет 250 В. Напряжение питания аккумуляторной батареи более низкое - от 40 до 185 В.

Возможны различные подходы к решению данной проблемы:

- проектирование тягового асинхронного двигателя на необходимое пониженное питание и такого же инвертора на нестандартное напряжение с током номинального момента двигателя;
- дополнительное преобразование напряжения источника питания через импульсный повышающий трансформатор к инвертору, таким образом, возможно применить общепромышленное оборудование. Но с точки зрения энергоэффективности данный метод не может быть применен.

1.1 Цели и задачи диссертационной работы

На данный момент в работах [2, 3] была разработана имитационная модель подвижного состава, описывающая движение каждого вагона в цепи электровоза, систему двухдвигательного тягового электропривода с регулятором скорости скольжения. На основании проведенного анализа остается ряд нерешенных вопросов:

1. Анализ технологических проблем режимов работы тягового асинхронного двигателя;
2. Рассмотрение возможности применения кранового двигателя в модели с механической системе, разработка иммитационной модели векторного управления электроприводом.
3. Улучшение характеристик ТАД через применение различных регуляторов: классических, фазы-регуляторов, смешанных.

2 Принципы построения асинхронного тягового привода шахтного электровоза

2.1 Режимы работы тягового электропривода

Исходя из данных в литературе производственных условий электровозных перевозок можно оценить, что электровоз занят 28% продолжительности смены на основных перегонах, и еще 19,2% занимает работы по маневровым и вспомогательным задачам.

Скорость движения на основе действующих норм по эксплуатации электровозов для открытых перегонов - 9 км/ч, при маневровых задачах - от 3,6 до 5,4 км/ч. Следует также учитывать уклон пути (3-7 промилле).

Основной показатель, который следует учитывать при проектировании имитационной модели, коэффициент сцепления колеса с рельсой, который соответствует значением 0,07-0,1 и зависит не только от условий эксплуатации, но и от загруженности состава. Малое значение коэффициента колес с рельсами в тяжелых условиях шахт из-за наличия влаги, угольной пыли приводит к избыточному скольжению. Такой результат снижает производительность труда, подвергая риску безопасное движение, приводя к потерям в электроэнергии до 30% [7, 11]. Повышение коэффициента сцепления возможно через подсыпку песка под ведущие оси до 0,4, при этом ухудшается дальнейшее состояние рельс, стрелок, колесно-моторного блока и окружающей среды. Необходимо построить имитационную модель электропривода, учитывая перечисленные факторы.

2.2 Выбор ТАД

Для рационального выбора необходимо опираться на данные, согласно техническому заданию, по характеристикам электровоза TLP90F фирмы Ferrit. Основные параметры, такие как момент инерции, масса электровоза и другие, приведены в таблице 1.

В ходе анализа общей работы шахтных электровозов выявлены условия эксплуатации электродвигателя: большой момент инерции, кратковременные перегрузки за счет изменения ландшафта и угла наклона пути. Поэтому двигатель должен обладать хорошей перегрузочной способностью.

Таблица 1 – Исходные данные тягового электровоза

Название параметра	Значение
мощность, кВт	2x55
Максимальное тяговое усилие, кН	40
Момент инерции привода, приведенный к ротору, кг·м ²	0,89
Радиус колеса по кругу катания, м	0,34
Передаточное отношение редуктора	14,2
Масса электровоза, кг	14000
Масса вагона с грузом, кг	10000
Длина вагона, м	4

Основные, часто используемые двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением, в 14-тонных рудничных контактных электровозов серии К14, ДК-812. Именно данный двигатель выбирается как прототип, чтобы на основе его характеристик выбрать асинхронный электродвигатель. Основные характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики двигателя ДК-812

Название параметра	Значение
мощность, кВт	45
Напряжение, В	380
Номинальная частота вращения, об/мин	1300
Номинальный момент, Н·м	330
КПД, %	86
Масса, кг	460

Близкие к техническим характеристикам постоянных двигателей являются серийные крановые двигатели. Они предназначены для перемещения по рельсам и устойчивы к однократным ударам, адаптированы к любым климатическим условиям, обладают более прочным корпусом в сравнении с остальными общепромышленными электродвигателями.

Для дальнейших исследований выбран асинхронный электродвигатель 55кВт модификацией 4МТКМ2П225L6У1 производителя ”Сибэлектромотор”. Предназначен для работы только в составе ПЧ-АД, поэтому в обозначении двигателя есть буквы ”2П”. Основные характеристики представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики кранового двигателя 4МТКМ2П225L6

Название параметра	Значение
мощность, кВт	55
Напряжение, В	380
Номинальная частота вращения, об/мин	985
Номинальный момент, Н·м	540
КПД, %	90
$\cos \varphi$	0,8
Масса, кг	464



Рисунок 3 – Общий вид кранового двигателя 4МТКМ2П225L6

Данный электродвигатель шестиполюсный, обладает высокой перегрузочной способностью. Класс изоляции электродвигателя – «Н»(180⁰С) по ГОСТ 8865. Степень защиты двигателей – IP54, допустимый уровень вибрации 4,5 мм/сек. Основные отличия от прототипа - больший момент, который позволит компенсировать низкое напряжение питания и снижение тяговых характеристик. При этом по остальным параметрам, таким как время разгона и КПД, крановый двигатель 4МТКМ2П225L6 лучше, чем двигатель постоянного тока ДК-812.

2.3 Структурная схема силового канала электропривода

Общую систему имитационного электропривода можно представить несколькими основными блоками:

- двигатель, отвечающий за электромеханические преобразования;
- преобразователь частоты, регулирующий электрическое преобразование энергии;
- механическая система нагрузки.

В основу структурной схемы силового канала электропривода (рис. 4) заложена структурная схема двухфазного асинхронного двигателя во вращающейся системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора.

В данной системе учтены обратные связи от электродвигателя. На рисунке 4 обозначены: 1 – преобразователь; 2 – асинхронный двигатель во вращающейся системе координат; 3 – одномассовая механическая система.

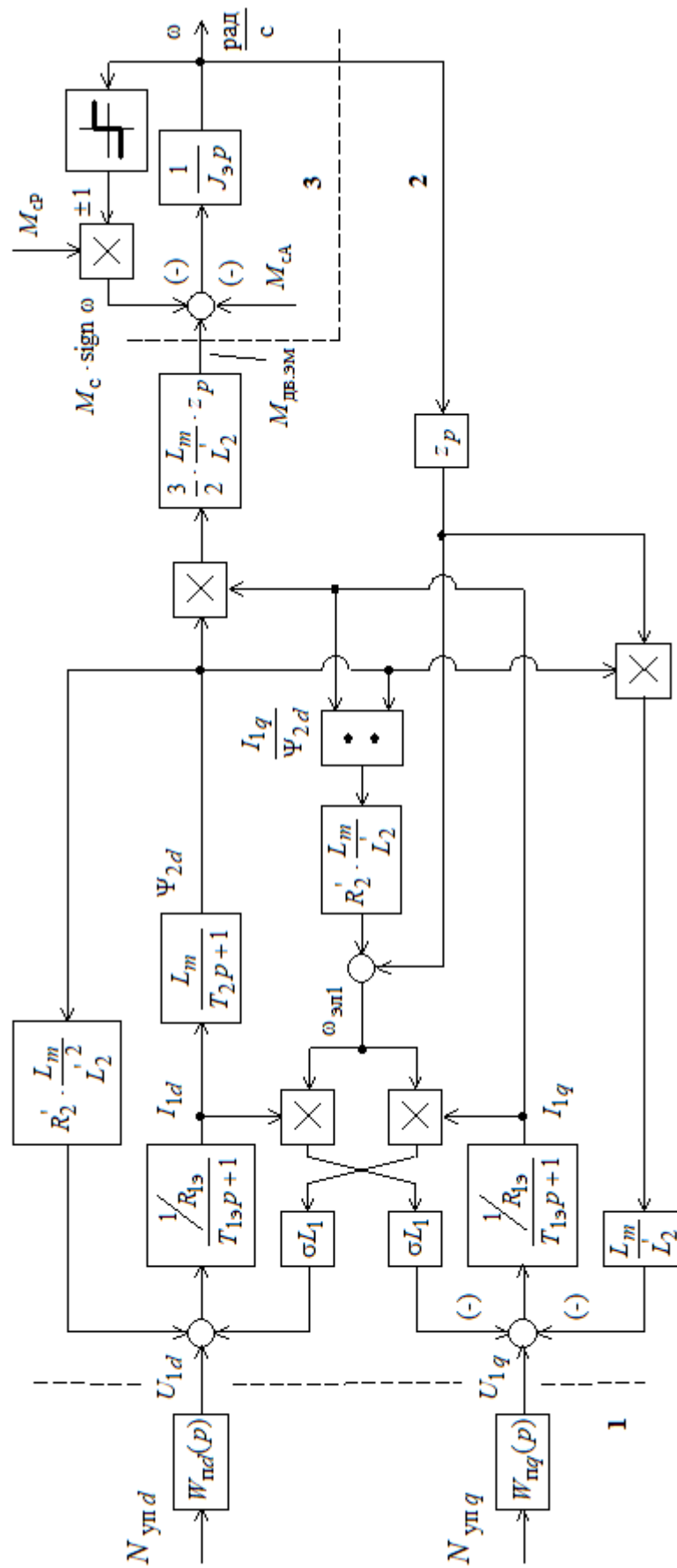


Рисунок 4 – Структурная схема силового канала асинхронного электропривода

Выводы по главе

В данной главе были рассмотрены принципы построения асинхронного тягового привода шахтного электровоза. Определено, что крановые двигатели лучше всего подходят к прототипу - двигателю постоянного тока с последовательным возбуждением ДК-812. В ходе анализа общей работы шахтных электровозов выявлены условия эксплуатации электродвигателя: большой момент инерции, кратковременные перегрузки за счет изменения ландшафта и угла наклона пути. Выбранный асинхронный двигатель 4МТКМ2П225L6 специально предназначен для работы только с системой векторно-частотного управления.

3 Расчет параметров асинхронного двигателя и настройка контуров регулирования

3.1 Параметры асинхронного двигателя

Паспортные данные ранее выбранного кранового двигателя 4МТКМ2П225L6 находятся в таблицах 4, 5.

Таблица 4 – Паспортные данные двигателя 4МТКМ2П225L6

n_0 , об/мин	$U_{\text{дв.н}}$, В	$P_{\text{дв.н}}$, кВт	s_n , %	$\cos\varphi$, о.е.	η_n , %	$J_{\text{дв}}$, кг·м ²
1000	380	55	1,5	0,81	90	1,02

Таблица 5 – Паспортные данные двигателя 4МТКМ2П225L6

$m_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{дв.н}}}$	$m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{дв.н}}}$	$m_{\text{м}} = \frac{M_{\text{мин}}}{M_{\text{дв.н}}}$	$k_i = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{дв.н}}}$	Степень защиты
3,4	2,2	3,4	7,4	IP54

Найдем синхронную частоту вращения и номинальную частоту вращения двигателя

$$\begin{aligned}
 n_0 &= \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин}; \\
 \omega_0 &= \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с}; \\
 n_n &= (1 - s_n) = (1 - 0,015) \cdot 1000 = 985 \text{ об/мин}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Ток статора двигателя при номинальной нагрузке:

$$I_{1н} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos\varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{55000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,9} = 114,3 \text{ А}.
 \tag{2}$$

Коэффициент загрузки двигателя принимаем $p_{\text{ч}} = 0,75$. Принимаем зна-

чения КПД и коэффициента мощности как

$$\eta_{\text{ч}} = 0,9 \%; \cos \varphi_{\text{ч}} = 0,761 \text{ о.е.} \quad (3)$$

Ток статора при частичной нагрузке:

$$I_{11} = \frac{P_{\text{H}}}{3 \cdot U_{1\text{H}} \cdot \cos \varphi_{\text{ч}} \cdot \eta_{\text{ч}}} = \frac{55000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,76} = 91,3 \text{ А.} \quad (4)$$

Ток холостого хода двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 \cdot \left(p_{\text{ч}} \cdot I_{1\text{H}} \cdot \frac{1 - s_{\text{H}}}{1 - p_{\text{ч}} \cdot s_{\text{H}}} \right)^2}{1 - \left[p_{\text{ч}} \cdot \frac{1 - s_{\text{H}}}{1 - p_{\text{ч}} \cdot s_{\text{H}}} \right]^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{91,3^2 \cdot \left(0,75 \cdot 114,3 \cdot \frac{1 - 0,015}{1 - 0,75 \cdot 0,015} \right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1 - 0,75}{1 - 0,75 \cdot 0,015} \right)^2}} = 48,3 \text{ А.} \quad (5)$$

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. Принимаем $\beta = 0,7$

$$s_{\text{к}} = \frac{m_{\text{к}} + \sqrt{m_{\text{к}}^2 - (1 - 2 \cdot s_{\text{H}} \cdot \beta \cdot (m_{\text{к}} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_{\text{H}} \cdot \beta \cdot (m_{\text{к}} - 1)} =$$

$$= \frac{0,015 + \sqrt{2,2^2 - (1 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,7 \cdot (2,2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,7 \cdot (2,2 - 1)} = 0,064 \text{ о.е} \quad (6)$$

Найдем значения коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\text{H}}} = 1 + \frac{48,3}{2 \cdot 7,6 \cdot 114,3} = 1,028;$$

$$A_1 = m \cdot U_{1\text{H}}^2 \cdot \frac{1 - s_{\text{H}}}{2 \cdot C_1 \cdot m_{\text{к}} \cdot P_{\text{H}}} = 3 \cdot 220 \cdot \frac{1 - 0,015}{2 \cdot 1,028 \cdot 2,2 \cdot 55000} = 0,57. \quad (7)$$

Теперь можно определить активное сопротивление ротора, приведенное

к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) \cdot C_1} = \frac{0,57}{\left(1 + \frac{1}{0,064}\right) \cdot 1,028} = 0,0343 \text{ Ом.} \quad (8)$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,028 \cdot 0,0343 \cdot 0,7 = 0,0247 \text{ Ом.} \quad (9)$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_{\text{кн}}$:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,064^2} - 0,7} = 0,549 \text{ Ом.} \quad (10)$$

Найдем значение индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 15,6 \cdot 1,028 \cdot 0,0343 = 0,549 \text{ Ом.} \quad (11)$$

Найдем индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$x'_{2\text{н}} = 0,58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,549}{1,028} = 1,644 \text{ Ом.} \quad (12)$$

Найдем индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$x_{1\text{н}} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 0,55 = 0,23 \text{ Ом.} \quad (13)$$

Приведённая индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L'_{2\sigma} = \frac{x_{1\text{н}}}{2\pi \cdot f} = \frac{0,23}{2\pi \cdot 50} = 0,000986 \text{ Ом.} \quad (14)$$

Найдем ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведенную потоком воздушного

зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin\varphi - x_{1H} \cdot I_{1H})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,81 - 0,025 \cdot 114,3)^2 + (220 \cdot 0,58 - 0,23 \cdot 114,3)^2} = 203,2 \text{ В.} \quad (15)$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$x_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{E_1}{48,3} = 4,2 \text{ Ом.} \quad (16)$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре:

$$L_\mu = \frac{x_\mu}{2\pi \cdot f} = \frac{4,2}{2\pi \cdot 50} = 0,0134 \text{ Ом.} \quad (17)$$

3.2 Проверка адекватности расчетных параметров двигателя

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя $M_{\text{эм.н}}$ и $M_{\text{эм.н}}^*$:

$$M_{\text{эм.н}}(s_H) = M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,0343}{104,7 \cdot 0,015 \cdot \left[0,549^2 + \left(0,0247 + \frac{0,0343}{0,015} \right)^2 + \left(\frac{0,0247 \cdot 0,0343}{0,015 \cdot 4,2} \right)^2 \right]} =$$

$$= 562,13 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (18)$$

$$M_{\text{эм.н}}^* = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_\mu}{L_\mu + L'_{2\sigma}} \cdot \Psi_{2H} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2} =$$

$$= \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0,0134}{0,0134 + 0,000986} \cdot 0,9147 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{114,3^2 - 48,3^2} = 561,6 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (19)$$

где $\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot 0 \cdot L_\mu = \sqrt{2} \cdot 48,3 \cdot 0,0134 = 0,9147 \text{ Вб.}$

Должны выполняться условия:

$$M_{\text{эм.н}}^* \approx M_{\text{эм.н}}. \quad (20)$$

По результатам расчета эти условия выполняются.

Параметры схемы замещения электродвигателя сведены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры схемы замещения

R_1 , Ом	$X_{1н}$, Ом	$L_{1\sigma}$, Ом	X_{μ} , Ом	L_{μ} , Ом	R'_2 , Ом	$X_{2н}$, Ом	$L'_{2\sigma}$, Ом	$X_{кн}$, Ом
0,0247	0,23	$7,3 \cdot 10^{-4}$	4,2	0,0134	0,0243	0,31	$9,8 \cdot 10^{-4}$	0,549

3.3 Естественные механические и электромеханические характеристики

Естественная механическая характеристика электродвигателя для частоты $f_{1н} = 50$ Гц рассчитывается по выражению:

$$M(\omega) = \frac{m \cdot U_{1фн}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (21)$$

где m – число фаз двигателя;

$U_{1фн}$ – номинальное фазное напряжение, В.

Критический момент: - рассчитанный по параметрам двигателя:

$$\begin{aligned} M_{\text{эм.к}}(s_k) &= \frac{3 \cdot U_{1фн}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_k \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_k} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_k \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,0343}{104,7 \cdot 0,064 \cdot \left[0,549^2 + \left(0,0247 + \frac{0,0343}{0,064} \right)^2 + \left(\frac{0,0247 \cdot 0,0343}{0,064 \cdot 4,2} \right)^2 \right]} = \\ &= 1207 \text{ Н} \cdot \text{м}; \end{aligned} \quad (22)$$

- рассчитанный по паспортным данным:

$$M_{кп} = m_k \cdot M_H = 2,2 \cdot 562 = 1237 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (23)$$

Критическая угловая скорость:

$$\omega_k = (1 - s_k) \cdot \omega_0 = (1 - 0,064) \cdot 104,7 = 98,02 \text{ рад/с}. \quad (24)$$

На рисунке 5 представлена естественная механическая характеристика электродвигателя.

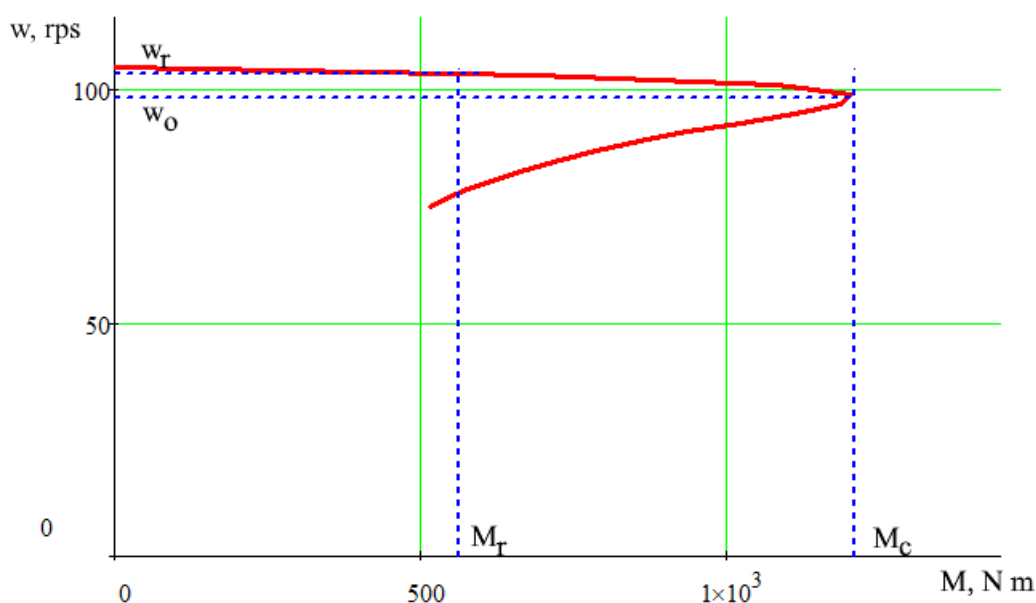


Рисунок 5 – Естественная механическая характеристика электродвигателя

Естественные электромеханические характеристики электродвигателя строятся по выражениям:

- ток ротора, приведенный к обмотке статора, от скольжения:

$$I'_2(\omega) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{\left[X_{кH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}}, \text{ А}. \quad (25)$$

- ток статора:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2 \cdot \sin\varphi_2}, \text{ А}, \quad (26)$$

где

$$\sin\varphi_2 = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_{\text{н}}}\right)^2}}$$

На рисунке 6 представлены естественные электромеханические характеристики электродвигателя.

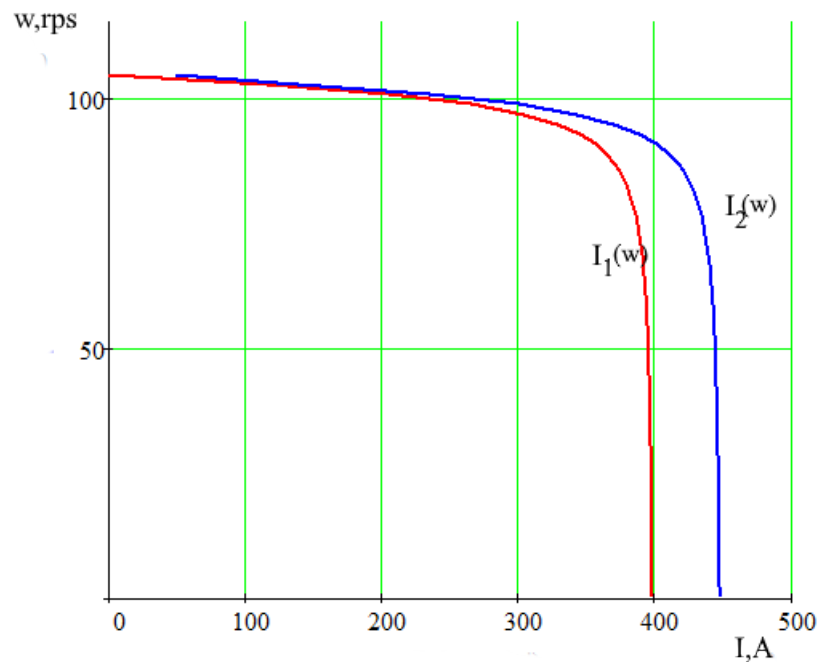


Рисунок 6 – Естественные электромеханические характеристики электродвигателя

Необходимо к полученным графикам механических характеристик добавить значения граничных характеристик длительного и кратковременного режимов работы:

$$\begin{aligned} M_{\text{с.прив.макс}} + \Delta M_{\text{с.дв}} &= 562 + 0,52 = 562,52 \text{ Н} \cdot \text{м}; \\ M_{\text{эп.макс}} + \Delta M_{\text{с.дв}} &= 1,5 \cdot 562 + 0,52 = 843,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned} \quad (27)$$

Зависимость длительно допустимого тока $I_{\text{дв.длит.дп}}(\omega)$ при значении коэффициента вентиляции $k = 0,9$ можно найти как:

$$\begin{aligned} I_{\text{дв.длит.дп}}(\omega) &= I_{\text{дв.н}} \cdot \left(k + \frac{(1-k) \cdot 2 \cdot \omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right) \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \\ I_{\text{дв.длит.дп}}(\omega) &= I_{\text{дв.н}} = 114,3 \text{ А при } \omega \geq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}. \end{aligned} \quad (28)$$

Результаты расчета сведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчета зависимости длительно допустимого тока

ω , рад/с	0	$0,5\omega_{дв.н} = 51,7$	$\omega_{эп.макс} = 104,7$
$I_{дв.длит.дп}$, А	43,514	114,3	114,3

Зависимость длительно допустимого момента электродвигателя $M_{дв.длит.дп}(\omega)$ рассчитывается по формуле:

$$M_{дв.длит.дп}(\omega) = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_\mu}{L_\mu + L'_{2\sigma}} \cdot \Psi_{2н} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{дв.длит.дп}^2(\omega) - I_0^2}. \quad (29)$$

Результаты расчета занесены в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты расчета зависимости длительно допустимого момента

ω , рад/с	0	$0,5\omega_{дв.н} = 51,7$	$\omega_{эп.макс} = 104,7$
$M_{дв.длит.дп}$, Н·м	505,91	562	562

Рассчитанные зависимости представлены на рисунках 7, 8.

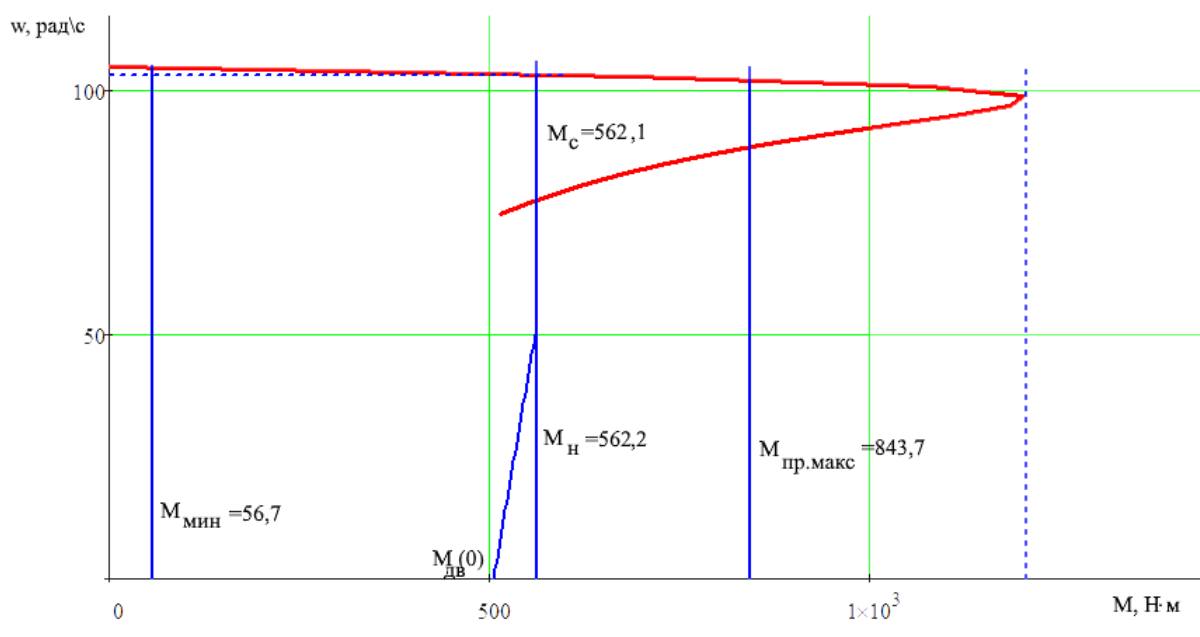


Рисунок 7 – механические характеристики электродвигателя

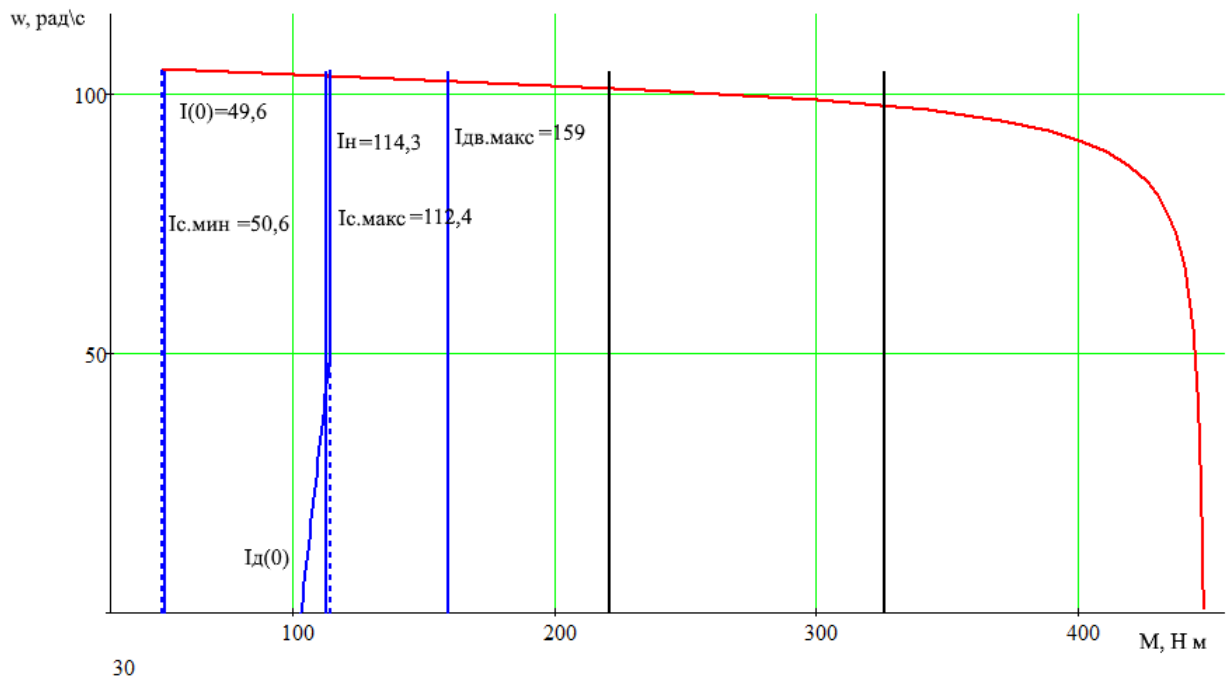


Рисунок 8 – электромеханические характеристики электродвигателя

По результатам построения механических и электромеханических характеристик электропривода должны выполняться условия:

$$M_{\text{дв.макс}}(\omega) \geq M_{\text{с.макс}}; I_{\text{дв.длит.дп}}(\omega) \geq I_{\text{с.макс}}; \quad (30)$$

Следовательно, двигатель выбран правильно.

3.4 Структурная схема и параметры механической системы

В качестве первичной итерации рассмотрим одномассовую механическую систему регулируемого электропривода приведенную для рудничного ТАД в сцепке с пустым составом вагонеток.

3.5 Расчет параметров элементов силового канала электропривода

3.5.1 Параметры преобразователя

В простейшем случае преобразователь частоты представляет звено с чистым запаздыванием на величину периода широтно-импульсной модуляции.

Выбранная частота инвертора ниже, чем принято классическими системами в следствие очень большой мощности электродвигателя:

$$T_{и} = T_{ШИМ} = \frac{1}{f_{ШИМ}} = \frac{1}{2000} = 5 \cdot 10^{-4}, c, \quad (31)$$

где $f_{ШИМ}$ – частота ШИМ инвертора, Гц.

При нормальных условиях эксплуатации тягового асинхронного электродвигателя, то есть питание происходит от промышленного напряжения, то значения амплитудного и фазного напряжения можно принять:

$$U_{1фн} = 220 \text{ В}, U_{1фл} = \sqrt{2} \cdot U_{1фн} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311, 1 \text{ В}. \quad (32)$$

Напряжение звена постоянного тока задается как $U_{d0} = 1, 35 \cdot U_c \text{ В}$, где $U_c, \text{ В}$ – линейное напряжение источника питания.

Мертвое время IGBT-ключей в имитационной модели принято 4 мкс, при периоде ШИМ 250 мкс коэффициент относительной продолжительности включения ключей равен $\gamma_{\text{макс}} = 96, 8\%$.

Условие согласования напряжения:

$$U_{d0} \geq \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1фн}}{\gamma_{\text{макс}}} \geq 556, 7 \text{ В}. \quad (33)$$

Коэффициент усиления инвертора:

$$k_{и} = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} = \frac{546, 5}{\sqrt{3}} = 321, 4. \quad (34)$$

В работе будут рассмотрены только работа на стандартное напряжение, для дальнейших исследований на пониженное напряжение будет необходимо пересчитать параметры обмоток статора для обеспечения требуемого момента.

3.5.2 Дополнительные параметры электродвигателя

Для дальнейших расчетов контуров регулирования необходимо рассчитать несколько дополнительных параметров.

Эквивалентная индуктивность обмоток статора и ротора находится как:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{\mu} = 0, 000734 + 0, 0134 = 0, 014113 \text{ Гн}; \quad (35)$$

$$L'_2 = L_{2\sigma} + L_\mu = 0,000986 + 0,0134 = 0,014364 \text{ Гн.} \quad (36)$$

Рассчитаем коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0,0134^2}{0,01411 \cdot 0,01436} = 0,1171 \quad (37)$$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_{1\text{э}} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2'^2} = 0,0247 + 0,0343 \cdot \frac{0,0134^2}{0,000986^2} = 0,054 \text{ Ом.} \quad (38)$$

Электромагнитные постоянные времени рассчитываются как:

$$T_{1\text{э}} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\text{э}}} = \frac{0,1171 \cdot 0,014113}{0,054} = 0,03034; \quad (39)$$

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{0,01436}{0,0343} = 0,4191. \quad (40)$$

3.6 Функциональная схема векторно-частотной системы управления

Функциональная схема реализации асинхронного частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением с обратными связями по току, скорости и без датчика потокосцепления приведена на рисунке 9.

Основными блоками этой схемы является:

- преобразователь частоты, состоящий из выпрямителя и инвертора;
- блок управления преобразователем при помощи управляющих напряжений и 6-ти канального ШИМ-сигнала для ключевых элементов преобразователя, блок драйверов;
- система подчиненного регулирования координат с контурами токов, потокосцепления ротора и скорости двигателя на основе модели двухфазного двигателя во вращающейся системе координат;
- блок преобразователей управлений двухфазным двигателем во вращающейся системе координат, затем трехфазным двигателем в неподвижной

системе координат;

- датчик интенсивности с S-образной характеристикой;
- блок расчета координат двигателя, на основе измеренных величин, производится вычисление угла поворота φ вращающейся координатной системы d, q .

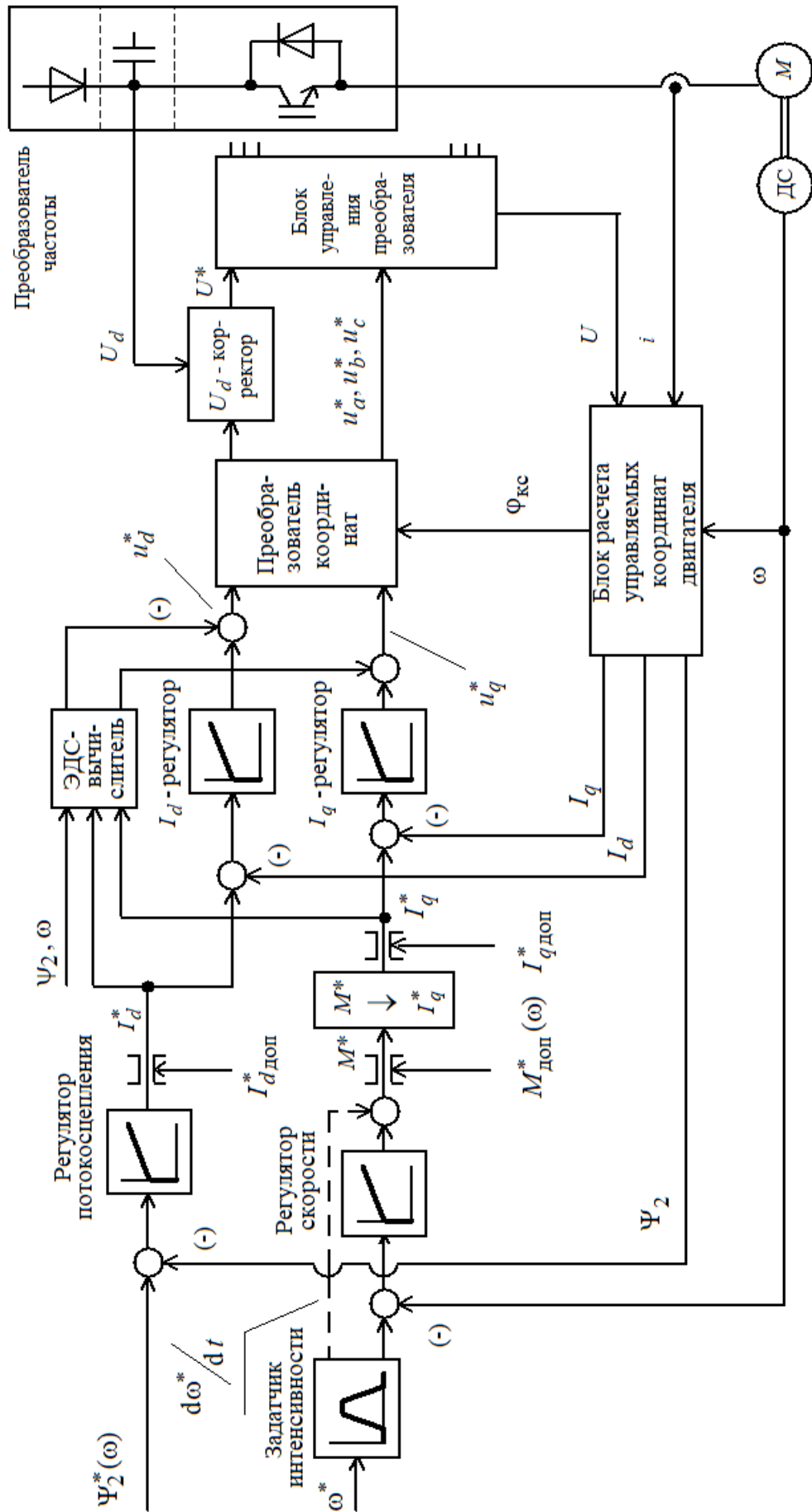


Рисунок 9 – Функциональная схема векторно-частотной системы управления

3.7 Расчет параметров контуров векторно-частотного управления

3.7.1 Контур тока с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком тока

Аналоговые сигналы приходят с двух датчиков тока с фаз обмоток статора и преобразуются при помощи аналогово-цифрового преобразователя в цифровые сигналы. Выбранная разрядность датчика тока выбрана исходя из соображений максимальных значений, которые необходимо измерить. Чем выше разрядность, тем точнее смогут работать контура токов.

$$n_{\text{ащп.дт}} = 12. \quad (41)$$

С учетом возможности перерегулирования $\sigma_T = 1,2$ рассчитаем коэффициент передачи датчика тока:

$$k_{\text{дт}} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{\text{ащп.дт}}}}{\sigma_T \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{эп.макс}}} = \frac{0,5 \cdot 2^{12}}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 188,5} = 6,28. \quad (42)$$

Максимальный ток электропривода принимаем как $I_{\text{эп.макс}} = 192 \text{ А}$.

Принимаем $I_{\text{из.макс}} = 326$ из условия

$$I_{\text{из.макс}} \geq \sigma_T \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{эп.макс}} = 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 192 = 322 \text{ А}. \quad (43)$$

Квантование сигналов по времени в цепи обратной связи контура тока выбрано частотой:

$$T_{\text{ос.т}} = 4 \text{ кГц}. \quad (44)$$

Максимальное значение задания на входе контура тока, соответствующее максимальному значению тока:

$$N_{\text{эп.макс}} = \frac{1}{\sigma_T} = \frac{1}{1,2} = 0,833. \quad (45)$$

Коэффициент обратной связи по току

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{1}{0,5 \cdot 2^{n_{\text{ащп.дт}}}} = \frac{1}{2048}; \quad (46)$$

$$k_T = \frac{1}{I_{\text{из.макс}}} = \frac{1}{326} \text{ 1/A.} \quad (47)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора тока:

$$W(p)_{\text{PT}} = k_{\text{PT}} \cdot \frac{T_{\text{PT}} + 1}{T_{\text{PT}} \cdot p}. \quad (48)$$

Принимаем $a_T = 2$, $n_T = 3$. Находим постоянные времени:

$$T_{\mu\text{тэ}} = n_T \cdot \frac{T_{\text{шим}}}{2} = 3 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с;} \quad (49)$$

$$T_{\text{PT}} = T_{1э} = 0,03034. \quad (50)$$

$$T_T = a_T \cdot T_{\mu\text{тэ}} = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (51)$$

Тогда коэффициент регулятора тока:

$$k_{\text{PT}} = \frac{T_{1э} \cdot R_{1э}}{k_{\text{И}} \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\mu\text{тэ}}} = \frac{0,03034 \cdot 0,054 \cdot 326}{321,4 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3}} = 0,5588. \quad (52)$$

Коэффициент компенсационной отрицательной обратной связи регулятора тока I_d :

$$k_{\text{комп.д}} = \sigma \cdot L_1 \cdot z_p \cdot \frac{I_{\text{из.макс}} \cdot \omega_{\text{из.макс}}}{k_{\text{И}}} = 0,117 \cdot 0,014113 \cdot 3 \cdot \frac{326 \cdot 150}{321,4} = 0,7544. \quad (53)$$

Коэффициент компенсационной положительной обратной связи регулятора тока I_q :

$$\begin{aligned} k_{\text{комп.к}} &= \left(\frac{L_m}{L'_2} + \sigma \cdot \frac{L_1}{L_m} \right) \cdot \Psi_{2\text{н}} \cdot z_p \cdot \frac{\omega_{\text{из.макс}}}{k_{\text{И}}} = \\ &= \left(\frac{0,0134}{0,01436} + 0,117 \cdot \frac{0,01411}{0,0134} \right) \cdot 0,9147 \cdot 3 \cdot \frac{150}{321,4} = 1,307. \end{aligned} \quad (54)$$

3.7.2 Контур потокосцепления с ПИ-регулятором без датчика

Номинальное значение потокосцепления $\Psi_{2\text{н}} = 0,9147 \text{ Вб.}$

Частота расчета контура потокосцепления $500 \text{ Гц, } T_{\text{ос.}\Psi} = 2 \cdot 10^{-3}.$

Принимаем $\Psi_{2\text{изм.макс}} = 1 \text{ Вб, } k_{\text{д}\Psi} = 1.$

Постоянная времени регулятора потокосцепления принимается как:

$$T_{p\Psi} = T_2 = 0,4191 \text{ с}; \quad (55)$$

$$T_{\mu\Psi\varepsilon} = T_T + T_{oc.\Psi} = 3 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-3} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (56)$$

Тогда коэффициент регулятора потокосцепления:

$$k_{p\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_\Psi \cdot a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi\varepsilon}} = \frac{0,4119 \cdot 1}{0,01436 \cdot 326 \cdot 2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3}} = 20,8. \quad (57)$$

3.7.3 Контур скорости с ПИ-регулятором и импульсным датчиком

Максимальная скорость электропривода $\omega_{\text{ЭП.макс}} = 103,2 \text{ рад/с}$, поэтому принимаем $\omega_{\text{изм.макс}} = 150 \text{ рад/с}$.

Импульсный датчик скорости на 10000 меток. Коэффициент импульсного датчика скорости:

$$k_{\text{идс}} = \frac{n_{\text{дс}}}{2 \cdot \pi} = \frac{10000}{2 \cdot \pi} = 1592,3 \text{ 1/рад}. \quad (58)$$

Частота работы контура 500 Гц, что соответствует $T_{\text{изм.с}} = 0,002 \text{ с}$.

$$k_{\text{дс}} = k_{\text{идс}} \cdot T_{\text{изм.с}} = 0,002 \cdot 1592,2 = 3,1846; \quad (59)$$

$$k_c = \frac{1}{\omega_{\text{изм.макс}}} = \frac{1}{150} = 0,0067 \text{ /рад}; \quad (60)$$

$$k_{oc.c} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{изм.с}} \cdot \omega_{\text{изм.макс}} \cdot n_{\text{дс}}} = \frac{2 \cdot \pi}{0,002 \cdot 150 \cdot 10000} = 0,0021; \quad (61)$$

$$N_{\text{зс.макс}} = k_c \cdot \omega_{\text{ЭП.макс}} = 0,0067 \cdot 103,2 = 0.6895. \quad (62)$$

Постоянные времени:

$$T_{\mu c\varepsilon} = T_T + \frac{2 \cdot T_{\text{изм.с}}}{n_c} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{2 \cdot 0,002}{2} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (63)$$

$$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c\varepsilon} = 2 \cdot 2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (64)$$

Тогда коэффициент регулятора скорости рассчитывается как:

$$k_c = \frac{J_{\text{ЭМИН}} \cdot k_T}{\Psi_{2H} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\text{мсэ}}} =$$

$$\frac{1,02 \cdot \frac{1}{326}}{0,9147 \cdot 1,5 \cdot \frac{0,0134}{0,01436} \cdot 3 \cdot 0,0067 \cdot 2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3}} = 26,48. \quad (65)$$

Выводы по главе

В данной главе были произведены расчетные работы по определению параметров асинхронного двигателя, построены естественные механические и электромеханические характеристики. Рассмотрена функциональная схема векторно-частотного управления и рассчитаны основные параметры для настройки контуров регулирования и модели в целом, в том числе выбраны значения для преобразователя частоты.

4 Проектирование имитационной модели векторного управления тягового асинхронного электропривода

4.1 Описание имитационной модели

На основе ряда работ [8–10], посвященных исследованию регуляторов скольжения и тяговому асинхронному электроприводу, была построена имитационная модель векторного управления крановым электродвигателем 4М-ТКМ2П225L6 в программной среде *MatLab 2018a*. Структура представлена на рисунке 10. В блоке *Subsystem* находится регулятор скорости локомотива и обработка задания на скорость локомотива с *Timer1*.

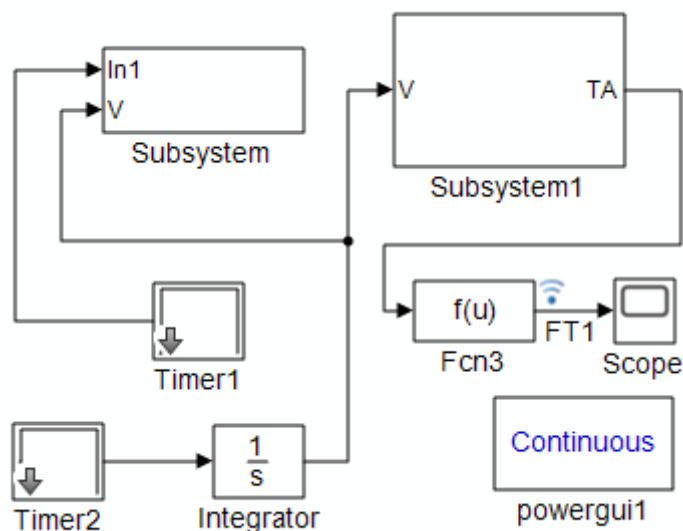


Рисунок 10 – Структура имитационной модели верхнего уровня векторного управления крановым двигателем

На рисунке 11 представлена внутренняя структура блока *Subsystem*. Здесь находятся фильтры *Discrete Transfer Function*, *Discrete Transfer Function1* позволяющие определять скорость скольжения для дальнейшего применения в системе управления *Vector Control*.

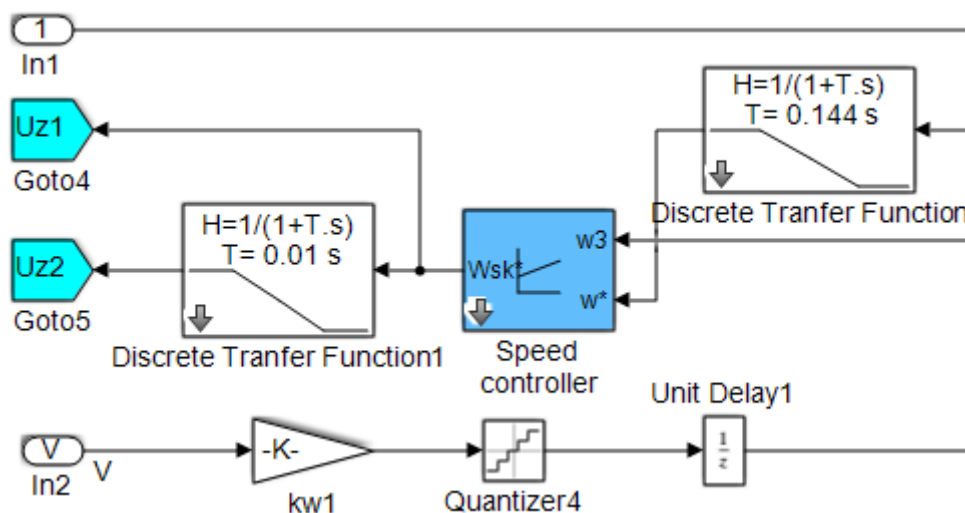


Рисунок 11 – Содержание блока *Subsystem*

Модель системы управления блока *Subsystem1* представлена на рисунках 12, 13 и разделена на две части. На рисунке 12 представлена силовая часть, включающая и механическую часть нагрузки, асинхронный двигатель и модель преобразователя частоты, а также система управления в блоке *Vector Control*. На рисунке 13 представлена обработка всех сигналов обратной связи – датчиков тока и датчиков скорости.

Имитационную модель системы управления электродвигателем *Subsystem1* можно разделить на силовую часть, включающую себя имитационные блоки электромеханических преобразователей (двигателя, нагрузки, инвертора и др.), и на систему управления верхнего уровня с четырьмя контурами, регулирующими скорость, токи I_q , I_d , и потокосцепление, обработкой сигналов обратной связи и координатных преобразований.

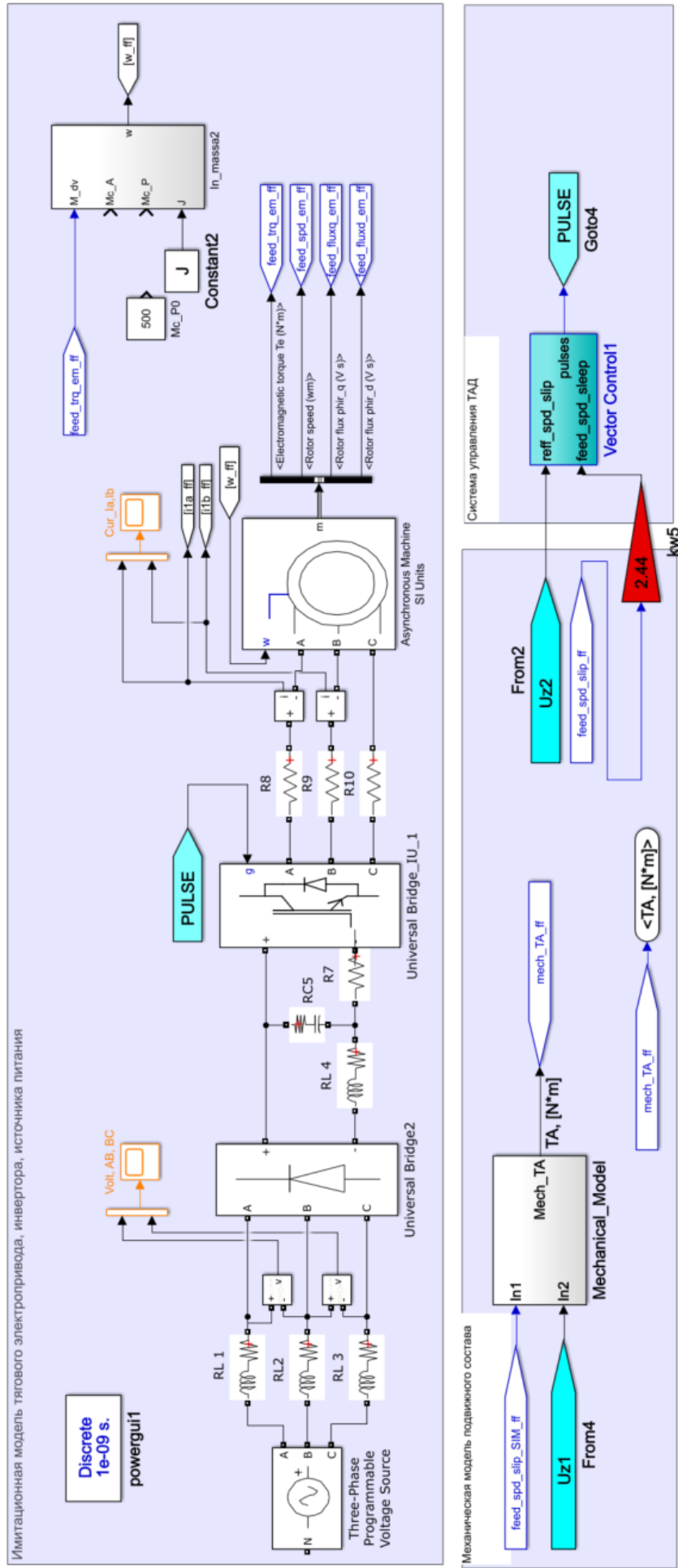


Рисунок 12 – Имитационная модель векторно-частотного управления, ч.1

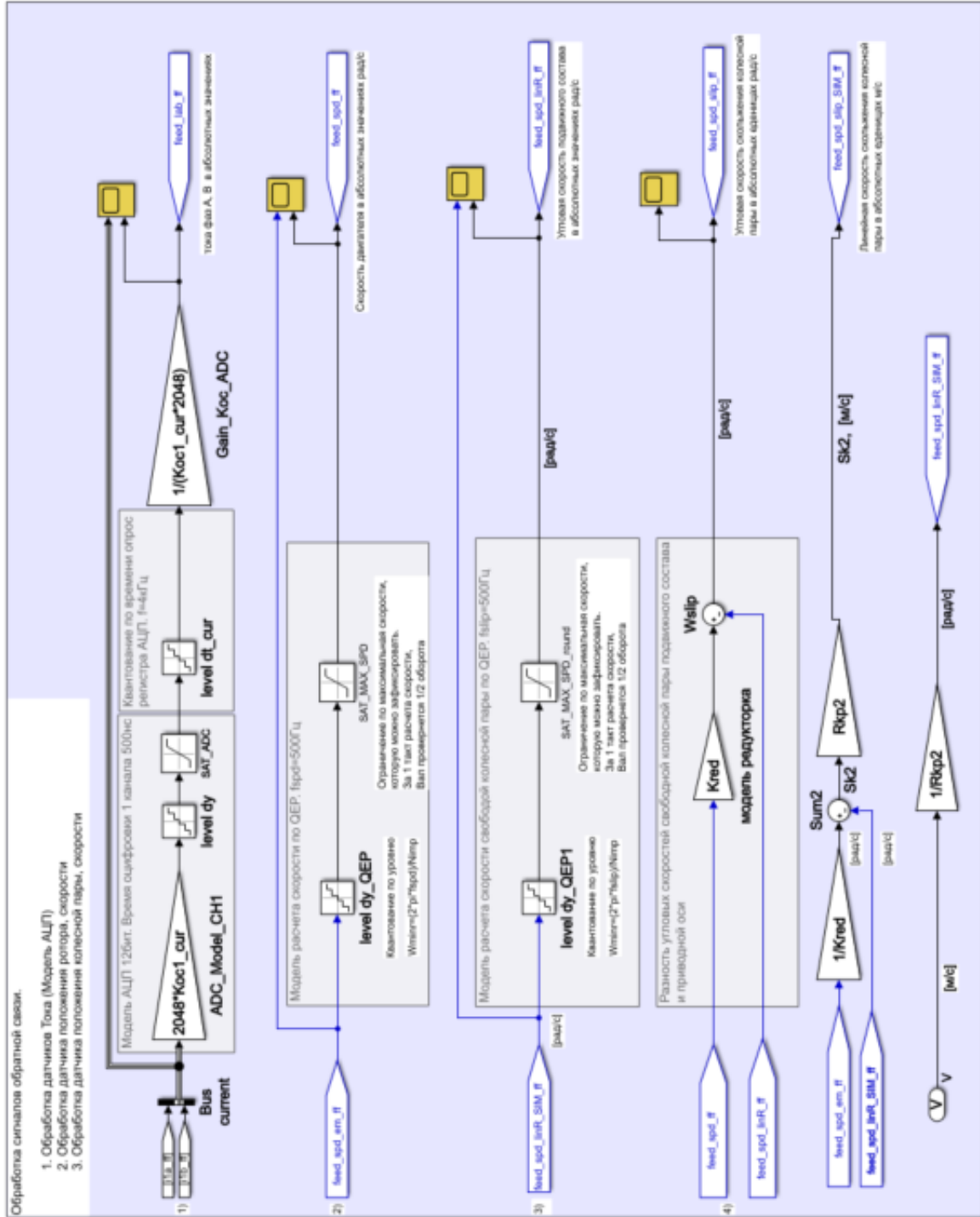


Рисунок 13 – Имитационная модель векторно-частотного управления, ч.2

Рассмотрим силовую часть электропривода, состоящая из преобразователя частоты и асинхронного электродвигателя. Структурная схема представлена на рисунке 14.

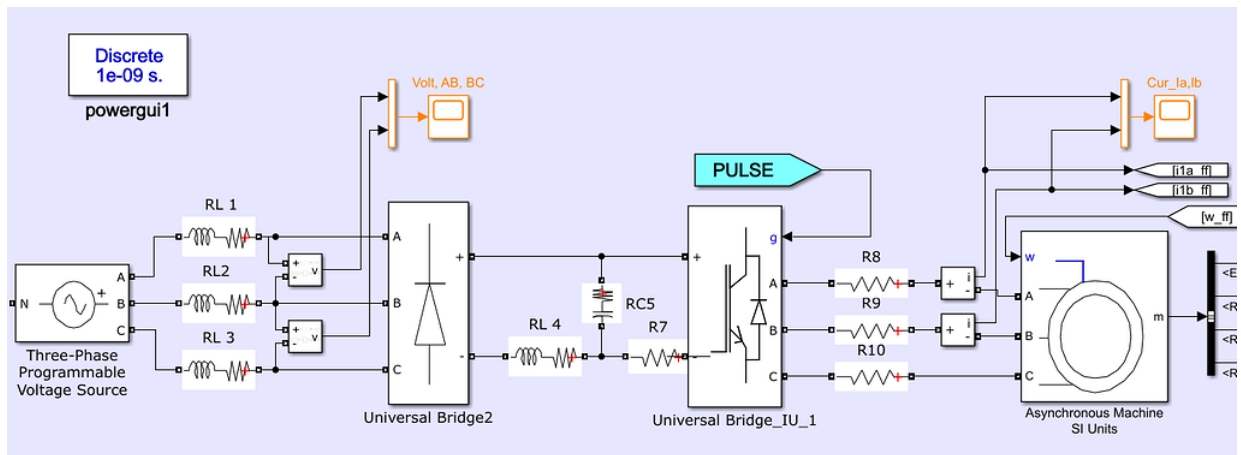


Рисунок 14 – Силовая часть имитационной модели

Блок *Asynchronous Machine SI Units* представляет собой дифференциальную модель асинхронного двигателя в абсолютных единицах Си. Питание на фазы двигателя по схеме звезда приходит от инвертора *Universal Bridge IU_1*, в свою очередь получающий выпрямленное напряжение после трехфазного выпрямителя *Universal Bridge2*, который работает от генератора *Three-Phase Programmable Voltage Source*. Внесенные сопротивления R-L позволяют получить более достоверную работу выпрямителя и инвертора.

Так как основная модель блока инвертора *Universal Bridge IU_1* не учитывает мертвое время работы IGBT-транзисторов, необходимо компенсировать через систему управления через блок заданий PWM (рисунки 15, 16). Временная задержка занимает 4 мкс на каждое открытие-закрытие пары транзисторов. Реализуется данный алгоритм через схему, представленную на рисунке. Комплиментарный ключ не открывается до тех пор, пока предыдущий ключ не закрыт (рисунок 17).

Обработка обратных связей состоит из двух модулей: обработка обратных связей по току от аналоговых датчиков тока и от импульсных датчиков скорости.

Схема обработки АЦП представлена на рисунке 18. Принятое разрешение аналогово-цифрового преобразователя 12 бит. Сначала происходит квантование по уровню через блоки *ADC_Model_CH1*, *Level dy*, с ограничением блоком *SAT_ADC* при частоте 500нс. Далее происходит квантование по вре-

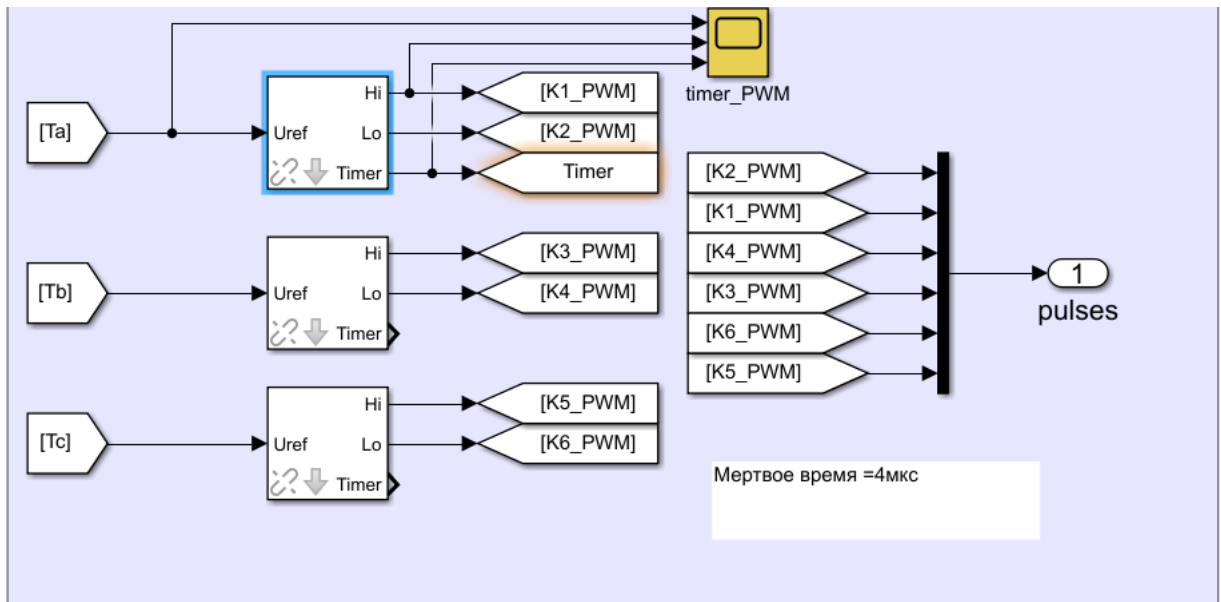


Рисунок 15 – Блок реализации PWM инвертора

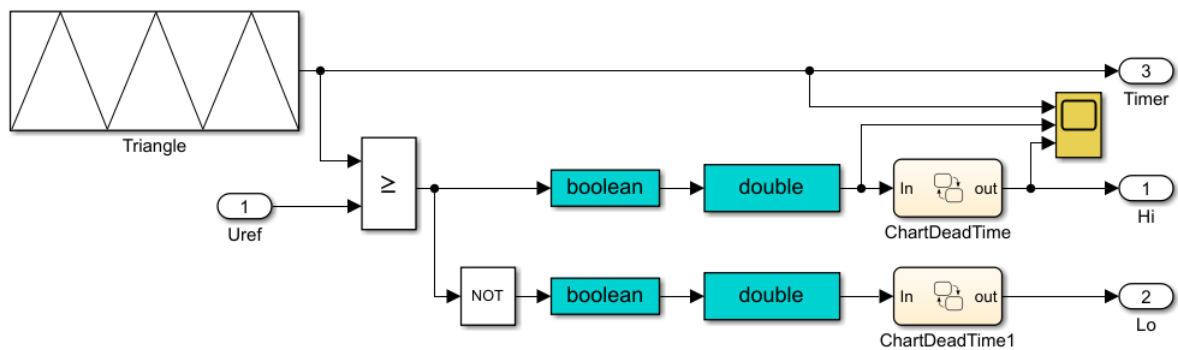


Рисунок 16 – Блок комплиментарных ключей IGBT

мени через блок *level dt_cur* на частоте опроса 4кГц. Для дальнейшей работы работы преобразуется в абсолютных значениях блоком *Gain_Koc_ADC*.

Схема обработки импульсного датчика представлена на рисунке 19. Импульсный датчик скорости содержит 10000 меток, квантуется по уровню блоком *level dy_QEP* на уровне частоты контура 500 Гц.

Для определения скольжения располагается второй датчик скорости на свободной колесной паре и обрабатывается схожим методом (рис. 20).

Рассмотрим подробнее блок управления *Vector Control*. Он стоит из контура тока (рисунок 21), контура потокосцепления (рисунок 22) и контура скорости. Также преобразование координат и наблюдатель потокосцепления представлены на рисунке 24. Одним из важных условий работы реальной

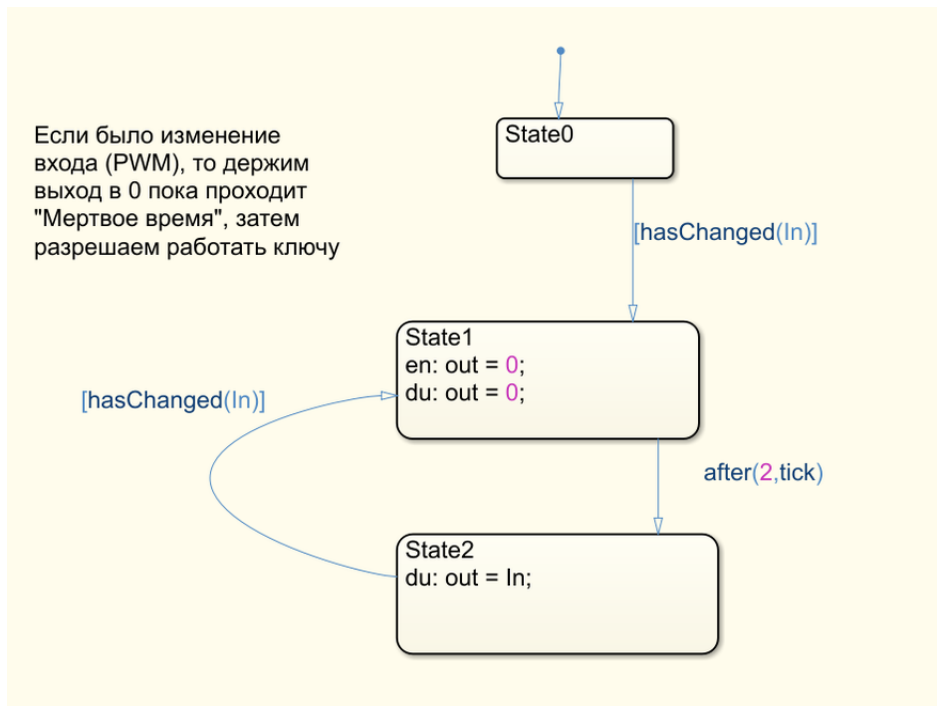


Рисунок 17 – Алгоритм мертвого времени



Рисунок 18 – Схема обработки датчика тока АЦП

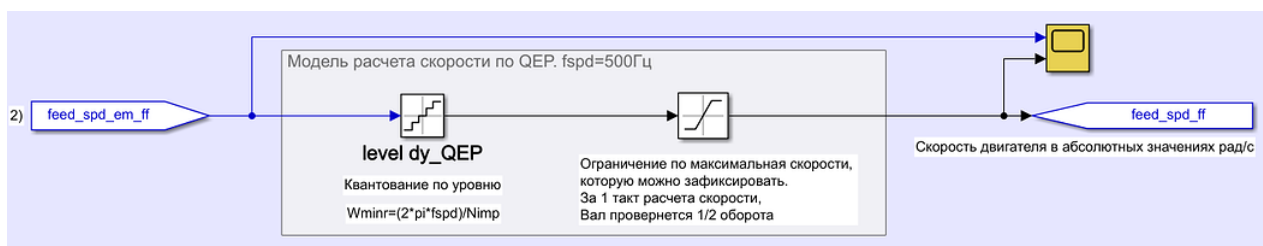


Рисунок 19 – Схема обработки датчика скорости

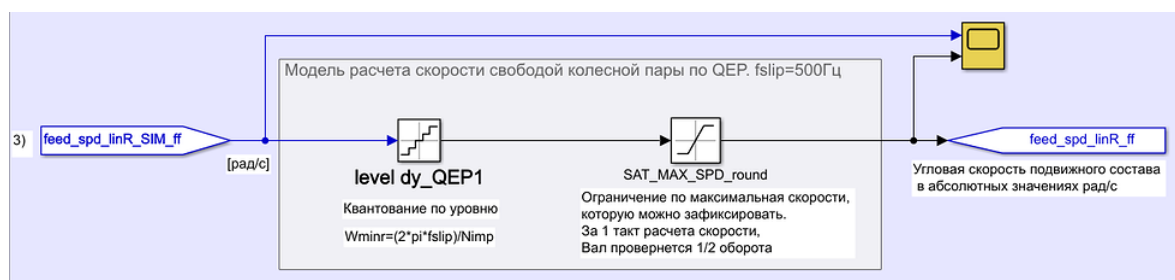


Рисунок 20 – Схема обработки датчика скорости

системы является не только включение в обработку данных обратной связи квантование по уровню и времени, но и на каждый расчет контура своя временная задержка. Схема представлена на рисунке 23.

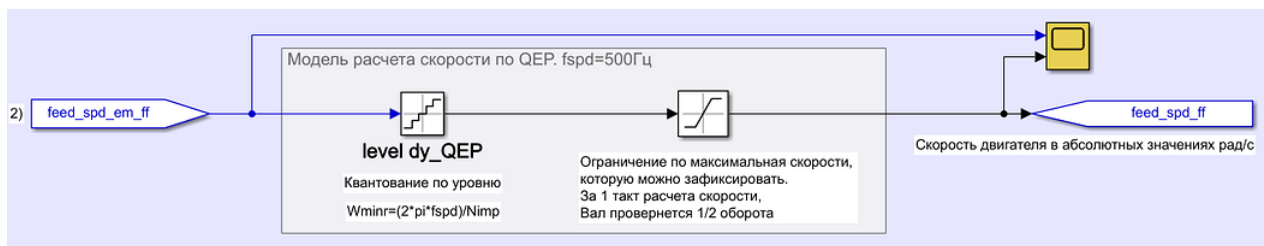


Рисунок 21 – Контур тока

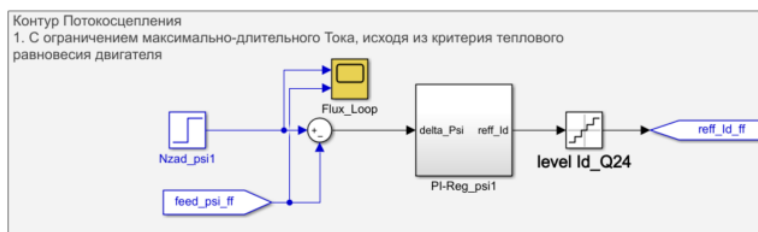


Рисунок 22 – Контур потокосцепления

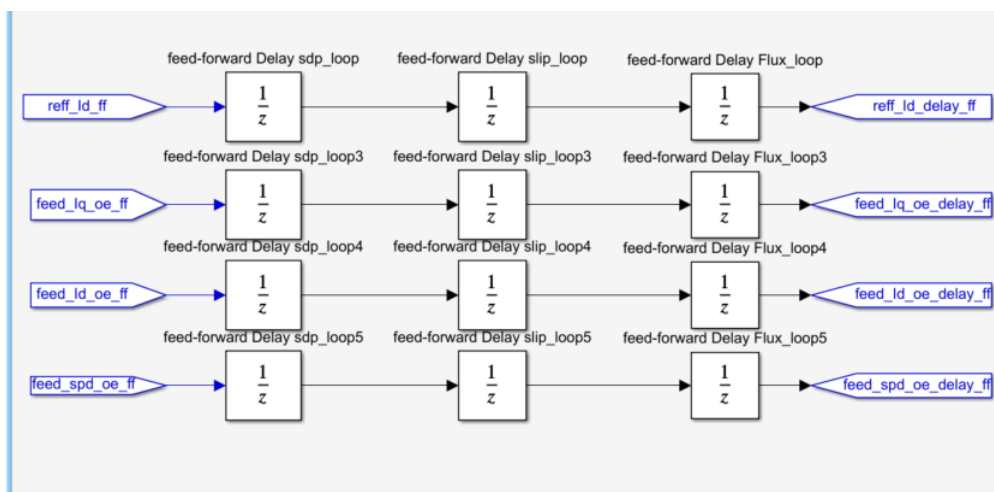


Рисунок 23 – Задержка на управление

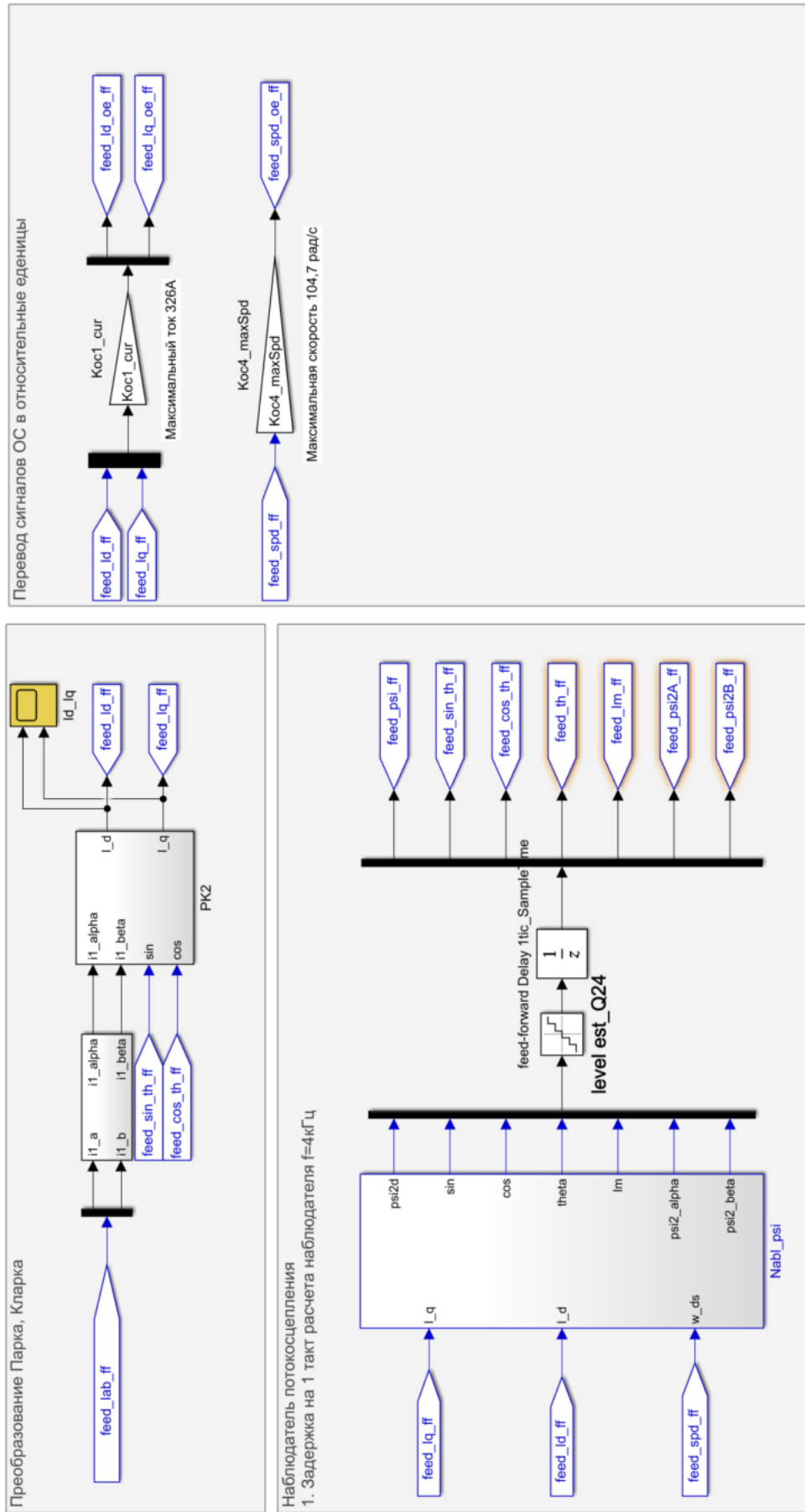


Рисунок 24 – Преобразования координат и наблюдатель потокоосцепления

4.2 Результаты моделирования

В результате моделирования получены ряд графиков, характеризующих работу векторно-частотного управления асинхронным двигателем 4МТКМ2П-225L6У1 мощностью 55кВт. На рисунке 25 представлены ряд графиков, демонстрирующих работу системы. Скольжение поддерживается на уровне 0,1 м/с между ведущей и ведомой колесной пары при разгоне, ограничение скорости поддерживается регуляторами скорости и тока. Основное тяговое усилие, необходимое для перемещения состава, формируется согласно заданной нагрузке, результаты представлены на рисунке 12.

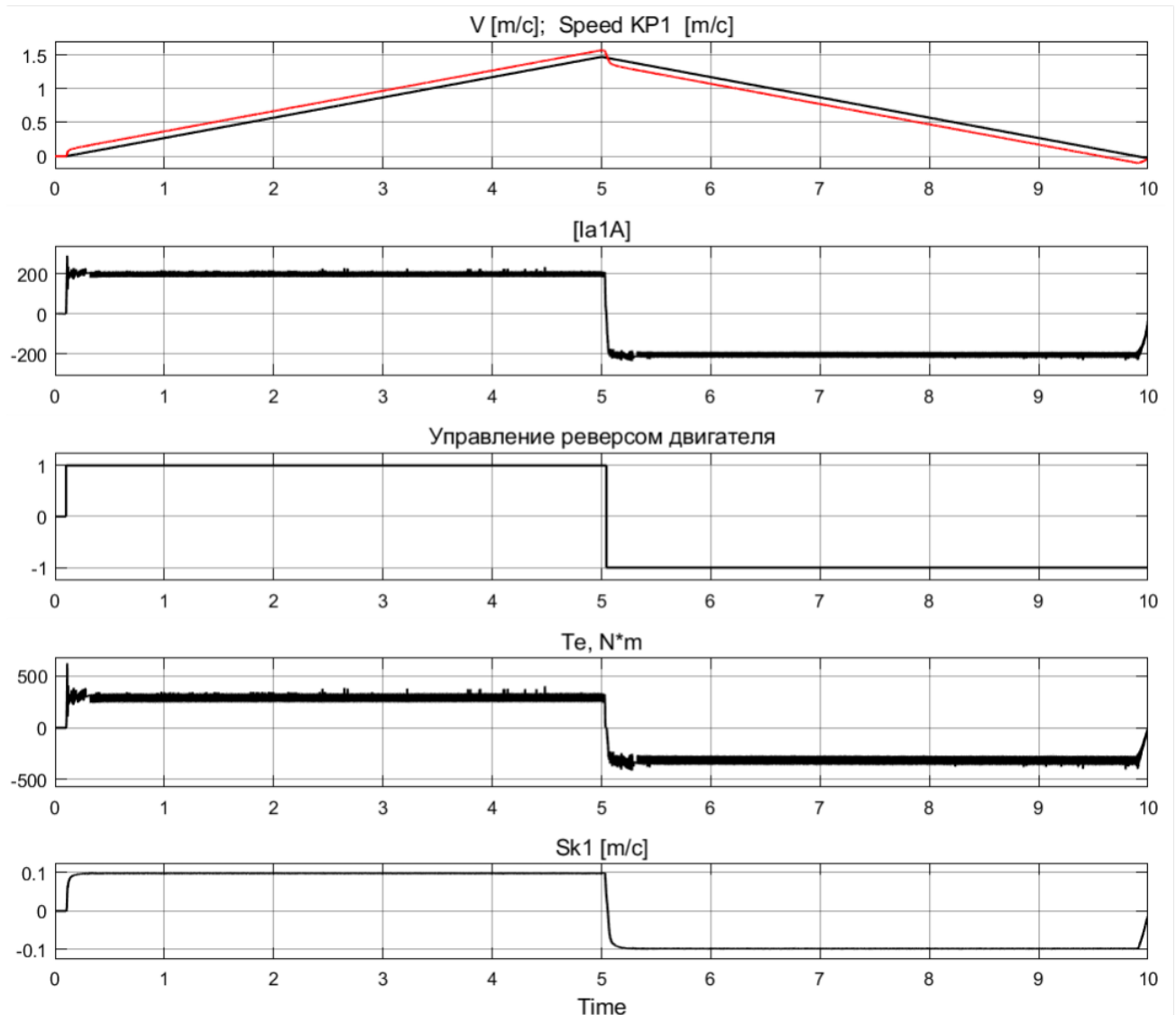


Рисунок 25 – Графики скорости, тока статора, момента и скорости скольжения с заданным коэффициентом сцепления 0,175

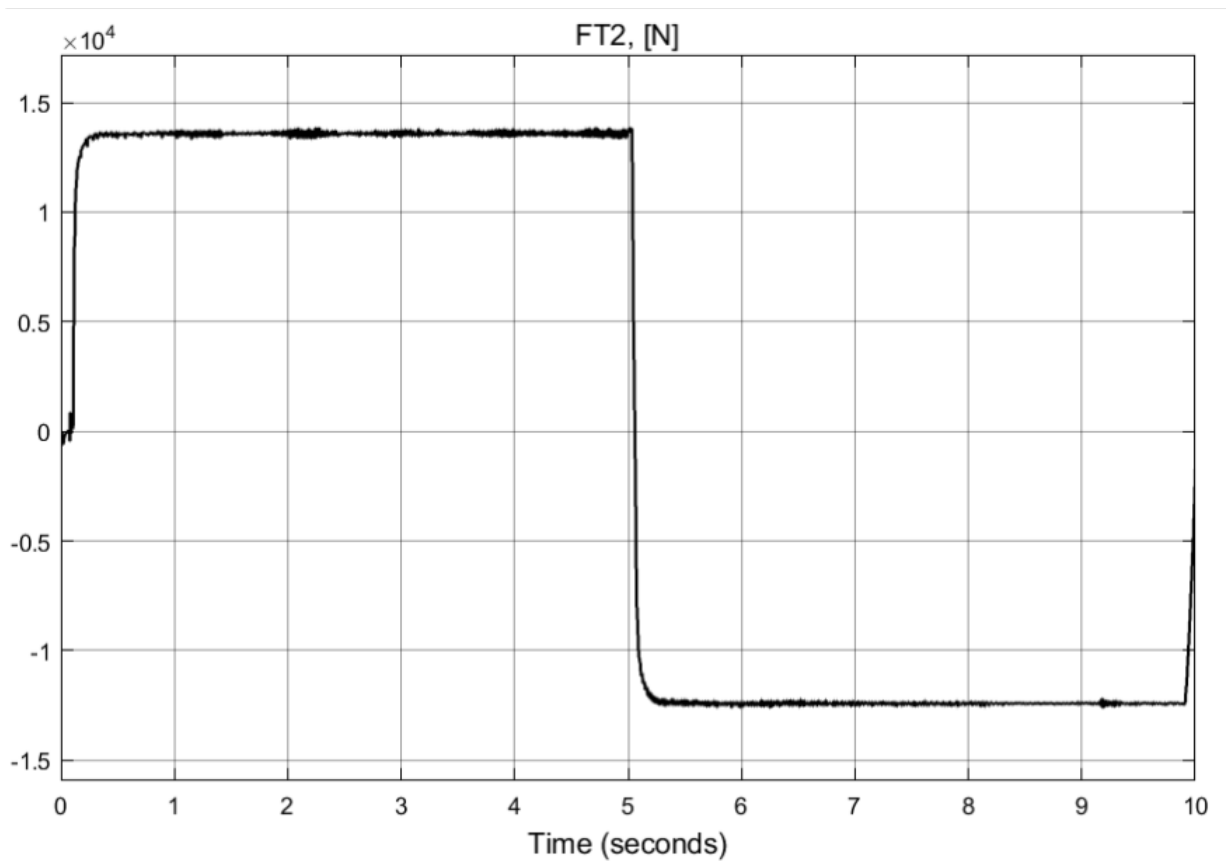


Рисунок 26 – График моментного усилия с заданным коэффициентом сцепления 0,175

Характер изменения скорости – линейный, за счет управления от регулятора скорости скольжения. При этом формируется необходимый момент нагрузки, который определяется весом локомотива и текущим значением сцепления с поверхностью рельса. Данное исследование дает основание сделать вывод, что система векторно-частотного управления с асинхронным тяговым двигателем мощностью 55 кВт отработывает необходимую постоянную скорость при разгоне и торможения, не превышает заданный порог по ограничению тока, создает необходимый момент нагрузки для перемещения локомотива с грузом.

Выводы по главе

В данной главе представлена структура системы векторно-асинхронного управления асинхронного двигателя 4МТКМ2П225L6У1. Описан каждый функциональный блок, в том числе и силовая часть электропривода, система управления и обработка данных обратной связи. Система настроена под максимальную приближенность к реальной модели работы, учтены задержки по времени каждого контура расчета и обработки обратных связей, мертвое вре-

мя транзисторов. Представлены результаты моделирования, доказывающие адекватность и работоспособность системы управления.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Для горной промышленности всегда необходим транспорт, способный быстро и эффективно доставить добытую породу или грузы на большие расстояния. Поэтому поиск новых решений и усовершенствование текущих технологий до сих пор актуальны. Тема данной работы - улучшение систем управления при замене двигателей постоянного тока на асинхронные в электровозах. При этом любые исследования требуют своего анализа на предмет необходимости на рынке. Необходимо сопоставить требуемые ресурсы и наличие реальных проблем у потребителей, чтобы избежать излишних трат при начале работы над проектом. Также одним из этапов является планирование проекта, где грамотная организация выполнения работ нужна для успешного исполнения.

5.1 Предпроектный анализ

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Целевой рынок шахтного рельсового транспорта достаточно широк, поэтому необходимо провести сегментирование рынка для определения наиболее широкой группы потребителей результатов исследования. Основное разделение шахтного рельсового транспорта идет по типу питания. При этом сферу применения ограничиваем основной категорией перевозимого груза, то есть только для перемещения полезных ископаемых и пустой породы. Очень важное отличие, что контактные электровозы не могут применяться в шахтах с присутствием метана и других взрывоопасных сред. Поэтому сферы рынка отличаются прежде всего по типу исполнения: электровозы рудничные нормальные — РН; рудничные повышенной надежности — РП; рудничные взрывобезопасные — РВ. Карта сегментирования представлена таблицей 9. Технические решения естественно не ограничиваются только тремя категориями, но в процентном соотношении оставшиеся способы, такие как на канатной тяге или пневматический подвесной транспорт, сильно меньше, чем приведенные.

Обозначения, используемые в таблице 9: СЭЗ – Скуратовский опытно-

Таблица 9 – - Карта сегментирования рынка

		Техническое решение		
		Контактный	Аккумуляторный	Дизельный
Рынок	РН, РП	СЭЗ, Ferrit, Bevex	ДЭВЗ, АМЗ, Bevex, ЧА, ДМ	КБ
	РВ		Ferrit	Scharf

экспериментальный завод; ДЭВЗ – Днепро́вский электро́возостроительный завод; КБ – Кузбасский завод; АМЗ – ОАО «Александровский машзавод», ЧА – ЧАО ПКФ «Амплитуда»; ДМ – ОАО «Дружковский машзавод».

Больше всего производителей имеют в линейке продукции контактные электровозы, так как такой тип решения по характеристикам (скорость, мощность) лучше, чем остальные, а также проще в технологических процессах изготовления. Так как исследование данной работы – это система управления двигателями, позволяющая существенно снизить износ колесных пар и рельс, то данное решение логично предложить прежде всего производителям контактных электровозов. Повышение ресурсоэффективности электровозов и системы в целом – одна из важных задач, на разработку которых заводы постоянно выделяют средства и ищут решения.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Перед началом работы также следует проводить и анализ конкурентных проектов, таким образом, выделив самые сильные и слабые стороны, можно улучшить собственные решения. Данный анализ проводится через оценочную карту (таблица 10), в которой рассматривается конкурентоспособность контактных, аккумуляторных фирмы Ferrit и дизельных электровозов фирмы Scharf. Информация, которую можно отыскать на предмет состава электровозов, очень мала, даже редко указывают тип двигателя, поэтому выделять в критерии оценки параметры системы управления не представляется возможным. Для сравнения в оценочной карте обозначим такие критерии как мощность, габариты, ограничения по применению и другое, а также экономиче-

ские критерии оценки эффективности, в частности, цена, срок изготовления и поставки.

Таблица 10 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _и	Б _{к1}	Б _{к2}	К _и	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Тяговая сила	0,16	5	3	5	0,8	0,48	0,8
2. Энергоэкономичность	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
3. Надежность	0,12	4	4	3	0,48	0,48	0,36
4. Масса	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
5. Безопасность	0,14	4	5	3	0,56	0,7	0,42
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,06	5	5	4	0,3	0,3	0,24
2. Уровень проникновения на рынок	0,03	0	5	4	0	0,15	0,12
3. Цена	0,12	4	4	5	0,48	0,48	0,6
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,11	4	4	4	0,44	0,44	0,44
5. Послепродажное обслуживание	0,03	4	3	4	0,12	0,09	0,12
6. Наличие сертификации разработки	0,08	0	4	4	0	0,32	0,32
Итого	1	40	46	42	3,93	4,14	3,87

В первую очередь сильным конкурентным преимуществом считается наличие сертификации, так как рудничный транспорт обязан быть безопасным, без наличия данного подтверждения нельзя выйти на рынок. Важным аспектом является масса, тяговая сила и энергоэкономность, то есть минимиза-

ция затрат - вот что является преимуществом разработки систем управления контактных электровозов. Если построить производство на высоком уровне и учитывать необходимые условия со стороны покупателя (сертификация, обслуживание и гарантия), то конкурентная способность по предложенному решению в исследовании крайне высока.

5.1.3 Диаграмма Исикава

Диаграмма причины-следствия необходима в предпроектном анализе для отображения причинно-следственных связей и их оценки, возникших при формировании задач, установления проблематики самого исследования. Результат представлен на рисунке 27.

5.1.4 SWOT-анализ

Кроме анализа конкурентных решений необходимо комплексно рассмотреть научно-исследовательскую работу методом SWOT-анализа, что поможет выявить сильные и слабые стороны будущей коммерциализации (таблица 11).

Анализируя результаты интерактивных матриц, можно утверждать, что научно-исследовательская работа обладает сильными сторонами в области конечного получаемого конструктивного и технологического решения, что позволяет использовать возможности получения финансирования по государственным и не только грантам и программам для ликвидации слабых сторон проекта в виде отсутствия доказательной базы, а также помощь со стороны ТПУ и его структур поможет решить проблемы осуществления выхода на рынок и производства в целом.

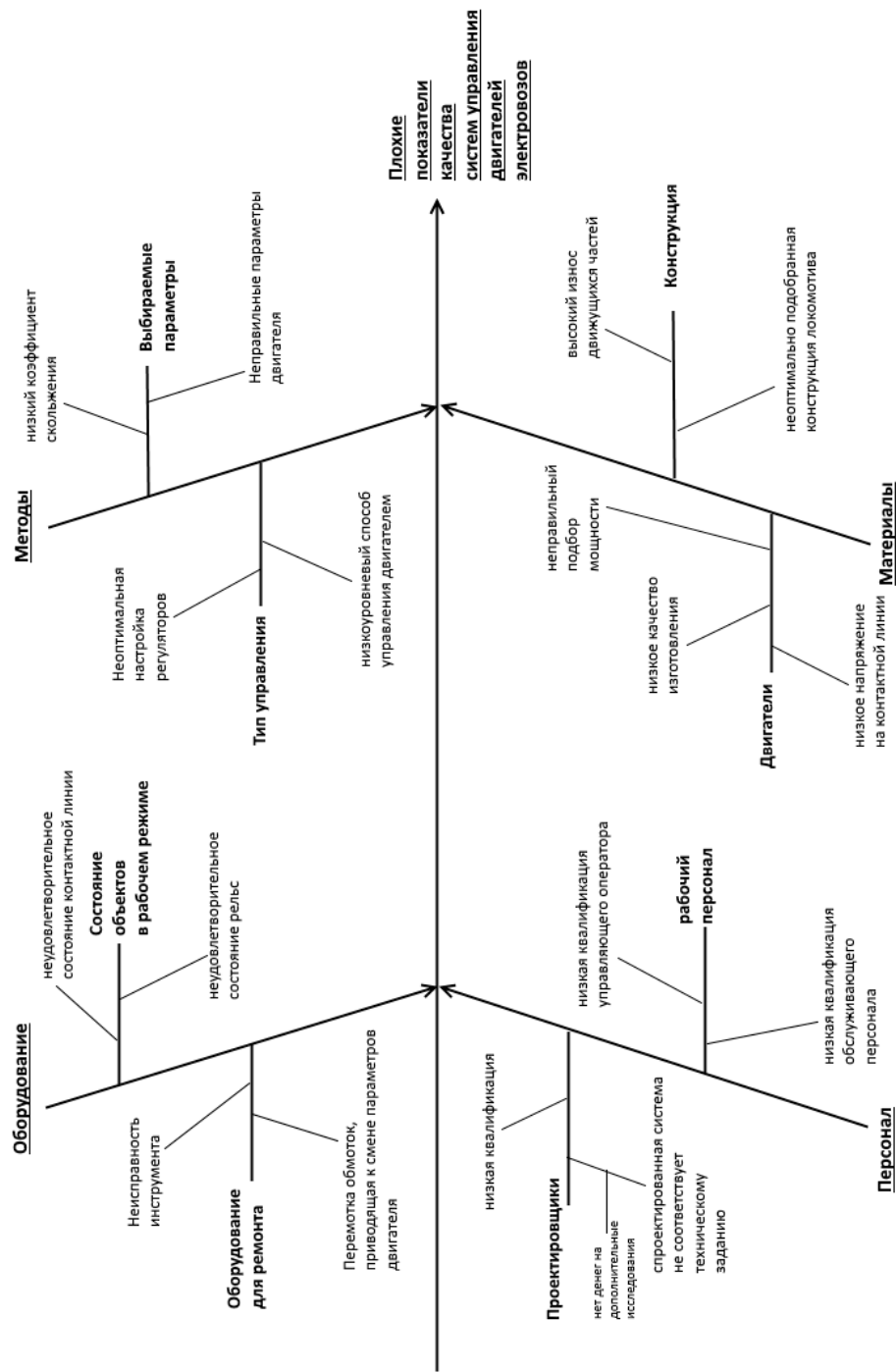


Рисунок 27 – - Диаграмма Исикава

5.2 Планирование управления научно-техническим проектом

Для реализации научно-исследовательской работы исследования необходимо разработать такую структуру разбиения работ, чтобы достичь оптимального результата за минимальные сроки. Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;

Таблица 11 – Матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны НИР: С1. Высокая степень электро- и взрывобезопасности. С2. Заявленная высокая надежность конструкции, удобство и простота в эксплуатации. С3. Применение ресурсоэкономичных материалов, энергоэкономичность. С4. Квалифицированный персонал. С5. Перспективы получения новых разработок.</p>	<p>Слабые стороны НИР: Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки. Сл2. Отсутствие численных расчетов износа путей и пары колес. Сл3. Отсутствие рабочей команды разносторонних профессионалов. Сл4. Отсутствие стороннего финансирования. Сл5. Сложность осуществления выхода на рынок.</p>
<p>Возможности: В1. Свободный сегмент рынка. В2. Использование бизнес-инкубатора ТПУ. В3. Гранты и гос. программы поддержки инноваций. В4. Появление спроса на новый продукт.</p>	<p>В1С1С2С3, В2В3С3С5, В4С3С2.</p>	<p>В2Сл3Сл5, В1В4Сл4Сл3, В3Сл1Сл2Сл5.</p>
<p>Угрозы: У1. Появление предпочтения импортной продукции отечественной.</p>	<p>У1С1С2С3, У2С5С2, У3У4С4С5.</p>	<p>У1У4Сл5, У2Сл2Сл4Сл5, У3Сл1</p>

Продолжение таблицы 11

<p>У2. Увеличение стоимости исходных материалов по разным причинам. У3. Прекращение финансового обеспечения научного исследования. У4. Изобретение более мощных аккумуляторов для аккумуляторных электровозов.</p>		
--	--	--

- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ.

5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

В данном подпункте необходимо составить структуру работ и распределить исполнителей для каждого этапа. Для выполнения научных исследований в рамках магистерской работы требуются следующие специалисты:

- инженер (И);
- научный руководитель (НР).

Порядок этапов выполнения работ приведен в таблице 12.

Таблица 12 – Перечень работ и распределение исполнителей

№	Содержание работ	Исполнители
1	Постановка целей и задач	НР, И
2	Знакомство с литературой по теме, обзор рудничных электровозов	И
3	Составление технического задания	НР
4	Изучение методов расчета, программного обеспечения	И
5	Расчет параметров двигателя и модели	И
6	Выбор регуляторов и их настройка, оптимизация САР	И
7	Оформление пояснительной записки	И
8	Проверка готовой пояснительной записки руководителем	НР, И

Предлагаемая структура работ является оптимальной по выполнению исследований в рамках магистерской работы.

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основной частью стоимости разработки являются трудовые затраты, поэтому необходимо определить трудоемкость работ каждого из участников

научно-исследовательской работы.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается в человеко-днях, для определения среднего значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{min.i} + 2t_{max.i}}{5}, \quad (66)$$

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

$t_{min.i}$ – минимально возможное время, за которое может быть выполнена работа, измеряется в чел-дн.;

$t_{max.i}$ – максимальное время, за которое работа может быть выполнена, измеряется в чел.-дн.

Далее необходимо определить продолжительность работы в рабочих днях, при этом учитывая возможное исполнение несколькими исполнителями параллельно. Такое вычисление нужно для расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей смете научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (67)$$

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

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

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

В таблице 13 приведена длительность работ и число исполнителей этих работ.

Ожидаемое время работы $t_{ожi} = 135$ дней. Результаты планирования показали, что время, затраченное на проектирование для: инженера (И) — 121 день, научного руководителя проекта НР – 27 дней.

На основе таблицы 13 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике (табл 17) выделяем различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу (таблица).

Таблица 13 – - Длительность и трудоемкость работ

Содержание работ	Исполнители	Минимально возможная трудоемкость $t_{min,i}$, чел.-дн.	Максимально возмож. трудоемкость $t_{max,i}$, чел.-дн.	Ожидаемая трудоемкость $t_{ож}$, чел.-дн.	Продолжительность работы T_{pi} , раб. дни
Постановка целей и задач	НР, И	3	7	5	3
Знакомство с литературой по теме, обзор рудничных электровозов	И	12	21	16	16
Составление технического задания	НР	10	15	12	12
Изучение методов расчета, программного обеспечения	И	16	30	22	22
Расчет параметров двигателя и модели	И	14	16	19	19
Выбор регуляторов и их настройка, оптимизация САР	И	27	38	32	32
Оформление пояснительной записки	И	14	21	17	17
Проверка готовой пояснительной записки руководителем	НР, И	9	17	12	12
Итого:				135	133

5.2.3 Бюджет научного исследования

Планирование бюджета должно быть максимально полным и достоверным для отражения всех видов расходов при выполнении научных исследований.

Так как в процессе работы использовались только теоретические исследования и расчеты без изготовления опытных образцов и закупки материалов без привлечения стороннего персонала, то в бюджет входит несколько статей затрат:

Таблица 14 – -Календарный план-график проведения НИОКР

№	Вид работы	Исполнитель	Тк, дни	Продолжительность выполнения работ													
				фев		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Постановка целей и задач	НР, И	3	█													
2	Знакомство с литературой по теме, обзор рудничных электровозов	И	16	█	█												
3	Составление технического задания	НР	12	▨													
4	Изучение методов расчета, программного обеспечения	И	22			█	█										
5	Расчет параметров двигателя и модели	И	19					█	█								
6	Выбор регуляторов и их настройка, оптимизация САР	И	32							█	█	█					
7	Оформление пояснительной записки	И	17										█	█			
8	Проверка готовой пояснительной записки руководителем	НР,И	12													▨	█

- Основная заработная плата исполнителей;
- Дополнительная заработная плата исполнителей;
- Отчисления во внебюджетные страховые фонды;
- Накладные расходы.

5.2.4 Основная заработная плата исполнителей.

В настоящую статью включается основная заработная плата участвующих непосредственно в выполнении работ исследования. Величина расходов по заработной плате считается исходя из трудоемкости работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера.

Основная заработная плата (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ включает в себя оклад и стимулирующих выплат за эффективный труд, умноженных на районный коэффициент:

$$Z_{\text{осн}} = (\text{Окл} + \text{Прем}) \cdot \text{р.к.}, \quad (68)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата участника, руб.;

Окл – оклад, размер денежной выплаты определяется ТПУ, которые распределены в соответствии с занимаемыми должностями, руб.;

Прем – премия, стимулирующие выплаты за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д, руб.;

р.к. – районный коэффициент, % .

Месячный оклад (Окл) руководителя (доцента, к.т.н) составляет 300 рублей в час, а месячный оклад инженера (на должности ассистента НИ ТПУ) 14584,32 рублей. Размер премий принимается 20 % от оклада, районный коэффициент р.к. для Томской области равен 1,3.

При условии, что научный руководитель по распределенной нагрузке выделяется 24 часа на одного студента, а инженер – 121 день, расчет заработной платы участника исследований рассчитывается как произведение дневной заработной платы участника проекта и количества дней (часов) участия в работе:

$$Z = Z_{\text{д}} \cdot N_{\text{д}}, \quad (69)$$

где Z – заработная плата участника за весь период, руб.;

$Z_{\text{д}}$ – дневная заработная плата участника, руб.;

$N_{\text{д}}$ – количество дней, проведенных в работе, дн.

Для расчёта дневной заработной платы необходимо основную заработную плату разделить на среднее количество рабочих дней в месяце. Среднее количество рабочих дней в месяце принимаем равным 22 дням:

$$Z_{\text{д}} = \frac{Z_{\text{осн}}}{22}, \quad (70)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата участника, руб.

Основная заработная плата рассчитана и сведена в таблицу 15.

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили 132333,47 рублей.

5.2.4.1 Отчисления во внебюджетные страховые фонды. В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным зако-

Таблица 15 – - Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	Премия, руб.	Осн. зар. плата $Z_{осн}$, руб.	Зарплата дневная $Z_{д}$, руб.	Зарплата Z , руб.
Инженер	14584,32	2916,86	22751,54	1034,16	125133,47
Руководитель					7200
Итого:					169675,10

нодательством Российской Федерации нормам страховым фондам.

Величина отчислений от затрат на оплату труда определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot Z_{осн}, \quad (71)$$

где $Z_{внеб}$ – величина отчислений во внебюджетные фонды, руб.;

$k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды, %;

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

Коэффициент отчислений принимается равным 27,1%. Отчисления во внебюджетные страховые фонды рассчитаны и сведены в таблицу 16.

Таблица 16 – - Отчисления во внебюджетные страховые фонды

Исполнители	Основная заработная плата $Z_{осн}$, руб.	Отчисления $Z_{внеб}$, руб.
Руководитель	7200	1951,2
Инженер	22751,54	33911,2
Итого:		35862,4

Всего затраты на отчисления во внебюджетные фонды составили 35862,4 рублей.

5.2.4.2 Накладные расходы. Накладные расходы учитывают прочие затраты научно-исследовательской работы, не относящиеся к предыдущим статьям расходов: печать и ксерокопирование, услуги связи и интернета, электроэнергии, и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма предыдущих статей}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (72)$$

где $Z_{\text{накл}}$ – величина накладных затрат, руб.;

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

Коэффициент накладных расходов принят в размере 20%.

Полученные значения статей затрат формируют бюджет научно-исследовательской работы как сумма всех значений (таблица 17).

Таблица 17 – - Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.		
	Руководитель	Инженер	Итоговая сумма
1. Затраты по основной заработной плате	7,2	125	132
2. Отчисления во внебюджетные фонды	2	34	36
Промежуточный результат			168
4. Накладные расходы			33,6
Бюджет затрат НИР			202

Выводы по разделу

От грамотного планирования зависит эффективное исполнение научно-исследовательских работ. Результатом является план, в котором продуманы не только этапы, но и исполнители, а также затраты с учетом необходимых отчислений и накладных расходов, в том числе и заработная плата.

6 Социальная ответственность

Основной целью работы является разработка системы управления асинхронного электропривода рудничного тягового электровоза. Под этими понятиями понимается изучение теоретических аспектов дисциплин электрические машины и электропривод, разработка математических моделей, описывающих механические процессы, и влияние данных эффектов на параметры электропривода, обработка и анализ результатов моделирования. Процесс практического применения полученных результатов связан с эксплуатацией горного оборудования в условиях шахтной выработки. Исходя из этого, можно сделать вывод, что основная работа оператора электровоза, в котором будут реализованы новые алгоритмы управления связаны непосредственно с шахтным производством, которому сопутствует соответствующий список вредных и опасных производственных факторов.

6.1 Профессиональная социальная ответственность

Самоходные транспортные машины (автомобили, самосвалы, самоходные вагоны, тракторы и др.) находят все более широкое применение в подземных условиях для транспортирования грузов и людей благодаря своей маневренности, высокой производительности, способности перевозить крупногабаритные грузы, возможности преодолевать большие подъемы, небольших радиусов закруглений; универсальности, обеспечивающей использования их для различных работ.

Опасности, связанные с применением самоходных машин в подземных условиях, заключаются в том, что они работают в стесненном пространстве, в условиях ограниченной видимости, неровной и, зачастую, обводненной проезжей части; имеется опасность возникновения пожара в связи с использованием горюче-смазочных материалов (ГСМ). Машины с электрическим приводом могут являться причиной поражения электрическим током, неисправность электрооборудования может вызвать пожар и взрыв газа и пыли.

Несчастные случаи могут происходить также из-за неудовлетворительного содержания проезжей части и свободных проходов в выработках, допуска к эксплуатации машин с неисправностями, перевозки людей в непредназначенных для этих целей машинах и выработках.

6.1.1 Анализ вредных производственных факторов

В соответствии с Правилами безопасности в угольных и горных шахтах [11], можно выделить ряд вредоносных профессиональных факторов:

1. Состояние воздушной среды;
2. Микроклимат производственных помещений;
3. Производственный шум, вибрация;
4. Недостаточная искусственная освещенность рабочей зоны;

6.1.1.1 Состояние воздушной среды Проходя по горным выработкам, атмосферный воздух изменяет свой состав, уменьшается содержание кислорода O_2 , увеличивается количество азота N_2 и Углекислого газа CO_2 , выделяются другие вредные и ядовитые газы (угарный газ, окислы азота, сероводород и др.). В соответствии с ПБ [12, 13] в угольных шахтах должны быть соблюдены следующие нормы чистоты воздуха:

- Кислорода - не менее 20%;
- Оксида углерода (CO) - не более 0,0017% (взрывается при 13,5-70%);
- Окислов азота - не более 0,00025%;
- Двуокись углерода (CO_2);
- Сероводород (H_2S) - не более 0,00071%, образуется при разложении органических веществ и горении угля;
- Сернистый газ (SO) - не более 0,00038%, сильный раздражающий запах, тяжелее воздуха, образуется при взрывных работах, пожарах, ядовит;
- Окислы азота (NO_2) - не более 0,0026, тёмно-бурый цвет и резкий запах, тяжелее воздуха;
- Аммиак - до 0,002, ядовит, резкий запах;
- Водород (H_2) - горит и взрывается при концентрации 4-96%. Температура воспламенения на 100-200 градусов ниже, чем у метана;

- Компрессорные газы - продукты разложения смазочных масел компрессоров. Для предотвращения их образования необходимо устанавливать фильтры и маслоотстойники.

Вдыхаемые с воздухом мелкие частички пыли могут вызвать заболевание лёгких - пневмокониоз (угольный - антракоз, породный - силикоз).

При нормальном состоянии носоглотки и дыхательных путей, до 90% вдыхаемой пыли задерживается, но крупные пылевые частицы сильно травмируют слизистую оболочку. Под влиянием пыли происходит перерождение лёгочной ткани. При попадании в лёгкие породной пыли, содержащей SiO_2 , образуется кремниевая кислота H_2SiO_3 , ускоряющая разрушение. Пневмокониоз развивается достаточно медленно (до 10-15 лет). Возможность возникновения заболевания зависит от массы вдыхаемой пыли и содержания в ней SiO_2 . Наиболее опасна пыль 0,1-0,2 мкм.

ПДК для пыли, при содержании в ней SiO_2 :

- $SiO_2 > 70\%$ - 1 мг/м³;
- $SiO_2 > 70\%$ - 1 мг/м³;
- $SiO_2 = (10-70)\%$ - 2 мг/м³;
- $SiO_2 = (5-10)\%$ - 4 мг/м³;
- SiO_2 до 5% - 10 мг/м³ (6 мг/м³ - антрацитовая пыль).

Активных средств лечения пневмокониоза не существует, поэтому основная работа ведётся в направлении профилактики и ранней диагностики:

- медосмотры;
- лечебно-профилактические мероприятия;
- уменьшение пылеобразования, пылеподавление (инженерно-технические мероприятия);
- противопылевые респираторы.

Согласно ПБ, на каждой шахте должен быть проект комплексного обеспыливания, утверждённый техническим директором. Инженерно-технические мероприятия по комплексу обеспыливания делятся на три группы:

1. Снижение или устранение пылеобразования;
2. Подавление и улавливание пыли;
3. Вынос летучей пыли из выработок и обеспыливание воздушного потока:
 - запрещается подача свежей струи воздуха по стволам, оборудованными скипами, опрокидными клетями;
 - не допускается подача свежего воздуха по наклонным стволам и выработкам оборудованным ленточными конвейерами за пределами выемочного участка;
 - при прочих равных условиях следует отдавать предпочтение технологиям, уменьшающим пылеобразование;
 - разработка и применение технологий ведения очистных работ без постоянного присутствия людей в лаве;
 - предварительное увлажнение угля в массиве;
 - орошение: очистные и проходческие комбайны, места перегрузки, погрузки, разгрузки;
 - пневмогидроорошение: применение водовоздушной смеси (туманообразователи - могут образовывать облако длиной до 50-70 метров);
 - подавление пыли пеной;
 - воздушные эжекторы: водяной факел, вырываясь из форсунки создаёт тягу воздуха, образуется тонкодисперсионная смесь;
 - пылеулавливание: на очистных и проходческих комбайнах и бурении скважин;
 - обеспыливающее проветривание: при скорости струи, достаточной для выноса пыли от места образования, но при этом осевшая пыль не взмётывается. Оптимальная по пылевому фактору скорость струи в подготовительных забоях 0,4-0,6 м/с, в очистных 1,5-3 м/с (max 4 м/с min 0,25 м/с).

6.1.1.2 Микроклимат Показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях [14], являются:

- температура воздуха и поверхностей (учитывается температура поверхностей ограждающих конструкций (стены, потолок, пол), устройств (экраны и т.п.), а также технологического оборудования или ограждающих его устройств);
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

Оптимальные микроклиматические условия установлены для оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах.

Согласно [14], параметры микроклимата для машинистов электровозов должны соответствовать таблице 18, категория работ по уровню энергозатрат - Па. К категории Па относятся работы с интенсивностью энергозатрат 151-200 ккал/ч (175-232 Вт), связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения.

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.) должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 19.

Для поддержания соответствующих микроклиматических параметров в помещении используются системы отопления и вентиляции. Система отопления обеспечивает достаточное постоянное и равномерное нагревание воздуха в помещении в холодный период года. Систему отопления рассчитывают на возмещение потерь теплоты через ограждающие конструкции здания, на нагрев проникающего в помещение холодного воздуха.

Таблица 18 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха		Температура поверхности, С	Отн. влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		Ниже опт. величин	Выше опт. величин			Ниже опт. величин	Выше опт. величин
холодный	Па (175-232 Вт)	17,09-18,9	21,1-23,0	16,0-24,0	15-75	0,1	0,3
теплый	Па (175-232 Вт)	18,0-19,9	22,1-27,0	17,0-28,0	15-75	0,1	0,2

Таблица 19 – Допустимые величины интенсивности теплового излучения от производственных источников

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового излучения, Вт/м ² , не более
25-50	70
не более 25	100

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха в помещении предприятия применяют систему естественной вентиляции, но для обеспечения наиболее комфортных условий работы в весенне-летнее время года этого недостаточно. Поэтому предлагается установка вентиляторов или системы кондиционирования.

Система кондиционирования воздуха предназначена для поддержания постоянной температуры, влажности и очистки воздуха от загрязнения вредными веществами.

6.1.1.3 Производственный шум и вибрации Уровни шума на рабочих местах и в рабочих зонах не должны превышать предельно-допустимых значений (ПБ §629) [16].

Источниками технологического шума в шахтах являются вентиляторы главного и частичного проветривания, насосные водоотливные установки, трансформаторные подстанции и выпрямители тока, компрессорное и холодильное оборудование с непрерывным циклом работы. При работе вентиляторов (без глушителей шума), оборудования турбокомпрессорных станций уровень звука достигает 100–110 дБА.

Добычные и проходческие комбайны, механизированные комплексы, струговые и скреперные установки, лебёдки, подъёмные машины, буровые станки, ручные перфораторы и другие механизмы генерируют непостоянный прерывистый шум, уровни которого на рабочих местах и в рабочих зонах составляют: у пневмозакладочных машин – 119 дБА (без глушителей шума); буровых станков – 95–105 дБА; проходческих комбайнов – 95–100 дБА (в зависимости от типа машин); электровозов – 80–85 дБА; движущихся грузовых вагонеток и вагонеток для перевозки людей – 85–90 дБА.

Работа по обслуживанию угольных комбайнов, рудничного рельсового и безрельсового транспорта связана с воздействием общих вибраций низких и средних частот, уровни которых повышенные. При ведении подземных работ в рудных шахтах источниками шума являются перфораторы, самоходные буровые установки, скреперные лебёдки, погрузочные и транспортные машины, вагоноопрокиды и другие машины и механизмы. Общее в воздействии вибрации при обслуживании машин и механизмов состоит в передаче вибрации к человеку через пол, сиденье, рычаги управления, сочетание вибрации рабочего места с локальной вибрацией. Следует отметить, что при работе разных машин, механизмов уровни вибрации и характер её воздействия на рабочего существенно отличаются.

Оборудование с повышенным уровнем шума должно устанавливаться в местах, где шум не мешает производственному процессу.

$$L = 10\log(I \div I_0) = 20\log(P \div P_0), \text{ дБ}, \quad (73)$$

где I - интенсивность шума, I_0 - интенсивность звука на пороге слышимости

Таблица 20 – Уровни шума

Рабочие места (зоны и виды работ)	Предельно допустимые уровни шума, дБА
Горные выработки, производственные помещения, территория поверхности	80
Кабины наблюдений и дистанционного управления: - без резервной связи по телефону - с резервной связью по телефону	80 - 65
Высококвалифицированные работы, требующие внимания и сосредоточенности	60

(10-12), Вт/м². Болевой порог $L = 140$ дБ.

Вибрация:

$$L_1 = 20 \log(V \div V_0), \text{ дБ}, V_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с} \quad (74)$$

- виброскорость, соответствующая давлению $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

$$L_2 = 20 \log(a \div a_0), \text{ dB}, a_0 = 3 \cdot 10^{-4} \quad (75)$$

- виброускорение.

Допустимые уровни вибрации приведены в таблице 21 [16].

Высокие уровни вибрации и шума на рабочих местах, показатели профессиональной заболеваемости обуславливают необходимость проведения нижеприведенного комплекса мероприятий по нормализации параметров физических факторов на рабочих местах основного и вспомогательного персонала.

1. На всех предприятиях в технической документации на машины и механизмы должны быть отражены их шумо-вибрационные характеристики. При организации планового и профилактического ремонтов горного оборудования необходима обязательная последующая проверка вибрационных и шумовых характеристик, отмечаемых в специальном журнале контроля и

Таблица 21 – Уровни вибрации рабочих мест категории транспортно-технологической

Средне-геометрические частоты, Гц	Предельно допустимые значения по осям X, Y, Z							
	Виброускорения				Виброскорости			
	м/с ²		дБ		м/с·10 ⁻²		дБ	
1,6	0,25		108		2,50		114	
2,0	0,22	0,40	107	112	1,80	3,50	111	117
2,5	0,20		106		1,30		108	
3,15	0,18		105		0,98		105	
4,0	0,16	0,28	104	109	0,63	1,30	102	108
5,0	0,16		104		0,50		100	
6,3	0,16		104		0,40		98	
8,0	0,16	0,28	104	109	0,32	0,63	96	102
10,0	0,20		106		0,32		96	
12,5	0,25		108		0,32		96	
16,0	0,32	0,56	110	115	0,32	0,56	96	101
20,0	0,40		112		0,32		96	
25,0	0,50		114		0,32		96	
31,5	0,63	1,10	116	121	0,32	0,56	96	101
40,0	0,79		118		0,32		96	
50,0	1,00		120		0,32		96	
63,0	1,30	2,20	122	127	0,32	0,56	96	101
80,0	1,60		124		0,32		96	

сравнения с материалами технической документации.

2. При эксплуатации оборудования, вибрация которого превышает допустимые уровни, следует предусматривать такую организацию производ-

ственных операций, которая исключала бы постоянное действие на рабочего вибрирующего оборудования (инструмента). Допустимая суммарная длительность работы с виброинструментами и оборудованием устанавливается в соответствии с СанПиН 2.2.2.54096 «Гигиенические требования к ручным инструментам и организации работ» [28].

3. При организации технологических процессов на подземных работах следует шире использовать переносные буровые установки, самоходные буровые установки с дистанционным управлением, что позволит снизить удельный вес ручного перфораторного бурения, уменьшить уровни шума, воздействующие на рабочих, и практически исключить вредное влияние вибрации.

4. Для снижения уровней общей вибрации рабочих мест на автосамосвалах, ПДМ, буровых установках и др. машин следует использовать подвески сиденья ПСТС, предназначенные для защиты человека-оператора от действия вертикальных и горизонтальных вибрационных воздействий. Это приспособление выполнено на тросовых упругих элементах и может быть укомплектовано типовым посадочным местом.

5. Для снижения вибрации на подножках погрузочных машин периодического действия следует поставить амортизаторы колпачкового типа. С учётом внутрисменного использования погрузочных машин, равного 0,3, скорректированное значение виброскорости находится в пределах от допустимого в 1,11–2,6 раза. Установлено, что при увеличении количества резиновых втулок с 2 до 6 на подножке погрузочной машины непрерывного действия скорректированное значение виброскорости снижается в 1,22 раза.

6. Для снижения шума шахтных машин и механизмов следует оборудовать серийно выпускаемые перфораторы, погрузочные машины, скреперные лебёдки резиновыми глушителями.

7. Учитывая специфику горных работ, следует обязательно применять средства индивидуальной защиты, в большинстве случаев они позволяют обеспечить надёжную защиту от шума и существенно улучшить санитарно-гигиенические условия труда.

6.1.1.4 Рудничное освещение Для освещения применяют:

1. сетевое освещение:

- стационарное действует в течении всего срока службы выработки;

- полустационарное переносится по мере продвижения забоя;
- местное освещение применяется на передвижных машинах.

2. аккумуляторные переносные светильники:

- ручные - аккумулятор составляет единое целое с лампой;
- головные (СГГ1К, "Кузбасс СГВ-2, "Украина").

В шахтах применяются светильники РН, РП и РВ исполнения. Для питания электросветильников, применяемых в очистных забоях и ламп, встроенных в машины используется напряжение не более 127В, остальных выработок - 220В.

Светильниками, питаемыми от электросети в подземных условиях должны освещаться (ПБ §531):

- электромашинные, лебедочные и диспетчерские камеры, ЦПП, локомотивные гаражи, здравпункты, раздаточные камеры ВМ, подземные ремонтные мастерские;
- транспортные выработки в пределах ОД.;
- приёмные площадки уклонов и бремсбергов, разминовки в околоствольных и участковых откаточных выработках, участки выработок, где производится перегрузка угля, пункты посадки людей в транспортные средства и подходы к ним;
- призабойное пространство стволов, сопряжений и камер при проходке и проходческие подвесные балки;
- очистные выработки на пологих и наклонных пластах, оборудованные механизированными комплексами и струговыми установками;
- постоянно обслуживаемые электромашинные установки, передвижные подстанции и распределительные пункты, вне пределов спец. камер;
- выработки оборудованные ленточными конвейерами и подвесными канатно-кресельными дорогами, предназначенные для перевозки людей;
- людские ходки, оборудованные механизированной перевозкой людей;

- призабойное пространство подготовительных выработок, проводимых с применением проходческих комплексов или комбайнов, должно освещаться встроенными в комплекс или комбайн светильниками.

Освещение способствует снижению травматизма и повышению производительности труда (до 25%). Нормы освещённости в основных горных выработках:

- очистной комплексно-механизированный забой, $E = 5$ лк;
- проходческий забой, $E = 10$ лк;
- откаточные и вентиляционные штреки, $E = 1$ лк;
- стрелочные переводы, $E = 2-5$ лк;
- машинные камеры (ЦПП, РПП, водоотлив), $E = 10$ лк.

Рабочее освещение следует предусматривать для всех помещений зданий, а также участков открытых пространств, предназначенных для работы, прохода людей и движения транспорта. Для помещений, имеющих зоны с разными условиями естественного освещения и различными режимами работы, необходимо раздельное управление освещением таких зон.

Инженер механик рудничного подземного электровоза в основном, но не в целом, проводит мероприятия по техническому осмотру тяговой машины, проверки узлов, производит подготовку всех систем электровоза, а так же вносит изменения в техническую документацию в связи с заменой оборудования. Рабочая поза – стоя (в основном).

Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормативных условий работы в помещениях и проводится в соответствии с Сан-ПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [7].

6.1.2 Анализ опасных производственных факторов

6.1.2.1 Поражение электрическим током Работа с электрическим током требует особой осторожности: электрический ток поражает внезапно, когда человек оказывается включенным в цепь прохождения тока. Причины поражения электрическим током:

- прикосновение к токоведущим частям, оголенным проводам, контактам электроприборов, рубильников, ламповых патронов, предохранителей, находящихся под напряжением;
- прикосновение к частям электрооборудования, металлическим конструкциям сооружений и т.п., в обычном состоянии не находящихся, но в результате повреждения (пробоя) изоляции оказавшихся под напряжением;
- нахождение вблизи места соединения с землей оборванного провода электросети;
- нахождение в непосредственной близости от токоведущих частей, находящихся под напряжением выше 1000 В;
- прикосновение к токоведущей части и мокрой стене или металлической конструкции, соединенной с землей;
- одновременное прикосновение к двум проводам или другим токоведущим частям, которые находятся под напряжением;
- несогласованные и ошибочные действия персонала (подача напряжения на установку, где работают люди; оставление установки под напряжением без надзора; допуск к работам на отключенном электрооборудовании без проверки отсутствия напряжения и т.д.).

Опасность поражения электрическим током отличается от других производственных опасностей тем, что человек не в состоянии без специальных приборов обнаружить ее на расстоянии. Часто эта опасность обнаруживается слишком поздно, когда человек уже оказался под напряжением.

Действие электрического тока на живую ткань носит разносторонний характер. Проходя через тело человека, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

Существуют три основных вида поражения электрическим током: электрические травмы, электрические удары, электрический шок.

Все существующие мероприятия, обеспечивающие безопасность использования электроэнергии, можно условно разделить на три группы [15]. Организационные мероприятия включают в себя:

- правильный подбор персонала, обслуживающего электроустановки (запрещение использования труда лиц моложе 18 лет, а также не обученных и не прошедших медицинское освидетельствование для работы данного вида);
- обучение правилам безопасности при обслуживании электроустановок, т. е. проведение специального обучения для выполнения работ с повышенной опасностью, аттестации, инструктажей по безопасности труда, разработка и издание инструкций по охране труда, применение средств пропаганды правил электробезопасности (плакатов, видеофильмов и пр.);
- назначение ответственных за электрохозяйство лиц;
- контроль за правильностью устройства электропроводок и установкой электрооборудования в соответствии с ПУЭ [15];
- проведение периодических осмотров, измерений и испытаний электрооборудования (в сухих помещениях — 1 раз в два года, в сырых — ежегодно, при этом сопротивление рабочей изоляции проводов, кабелей и электрооборудования в процессе эксплуатации не должно быть менее 0,5 и 2 М Ом для двойной или усиленной изоляции), а в случае несоответствия предъявляемым требованиям — его ремонта;
- контроль за надежностью СИЗ от поражения электрическим током.

К техническим мероприятиям относят:

- применение устройств (предохранителей, отключающих реле и т. п.) защиты электроустановок и сетей от перегрузок, а также токов коротких замыканий;
- защиту людей и животных от прикосновения к токоведущим частям оборудования посредством применения глухого ограждения высоковольтного оборудования и размещения его в отдельных зданиях, изоляции токоведущих частей электрооборудования, установки защитных ограждений, расположения электроприборов на недоступной для людей и животных (более 2 м) высоте;

- защита от поражения электрическим током при переходе напряжения на металлические корпуса электроустановок; устройство защитного заземления; зануление электроустановок в сетях с глухо-заземленной нейтралью; применение защитного отключения;
- использование электрооборудования с малым (менее 42 В) напряжением;
- выравнивание потенциалов электрооборудования и земли в местах нахождения людей и животных;
- изоляция электроустановок и электродвигателей от корпусов рабочих машин; применение диэлектрических настилов и изолирующих площадок.

Применение индивидуальных электрозащитных средств подразделяют на основные и дополнительные изолирующие защитные средства, а также на вспомогательные приспособления.

Основные изолирующие защитные средства имеют изоляцию, способную длительно выдерживать рабочее напряжение электроустановки, обеспечивая безопасность человека при контакте с токоведущими частями. К таким средствам относят:

- в электроустановках с напряжением до 1000 В — диэлектрические перчатки, изолирующие штанги, изолирующие и токоизмерительные клещи, слесарно-монтажный инструмент с изолированными рукоятками, а также указатели напряжения;
- в электроустановках с напряжением свыше 1000 В — изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения.

Дополнительные защитные средства не могут самостоятельно защитить человека от поражения электрическим током, но при совместном использовании они усиливают изолирующее действие основных защитных средств. К дополнительным средствам защиты при работе в электроустановках до 1000 В относят диэлектрические галоши, коврики, подставки и площадки;

в электроустановках свыше 1000 В — диэлектрические перчатки, боты и коврики, а также диэлектрические основания.

Необходимо отметить, что при отсутствии какого-либо дополнительного средства защиты (например, диэлектрического коврика) нельзя применять ни одно из основных. Вспомогательные приспособления предназначены для защиты людей от сопутствующих опасных и вредных производственных факторов при работе с электрооборудованием и, кроме того, от падения с высоты. К ним относят экранирующие комплекты и устройства для защиты от воздействия электрического поля, противогазы, защитные каски, страховочные канаты, монтерские когти, предохранительные монтерские пояса и т. п.

6.1.2.2 Опасные механические факторы Требования к средствам защиты от механических опасностей приведены в нормативных документах. Общие требования к средствам защиты от механических опасностей приведены в ГОСТ 12.4.011-87 [23], а их классификация — в ГОСТ 12.4.125-83 [24].

Наиболее типичным источником механических негативных факторов являются вращающиеся детали, движущиеся механизмы, незащищённые подвижные элементы производственного оборудования, подъёмно-транспортное оборудование, неправильно-выбранные методы обработки, неправильно выбранное техническое обслуживание, непредвиденные нагрузки на оборудование. К перечисленным источникам можно добавить непрочность конструкции, связанной с коррозией металла, падение на скользком полу, падение с высоты, технологический транспорт, промышленные роботы.

Различные типы механического движения и действий присущи почти всем машинам, и понимание этого – первый шаг к защите от опасностей, которую они могут представлять. Существует дополнительная опасность, когда на вращающихся частях машин имеются прорези, выступающие болты, шпонки, установочные винты.

Несчастные случаи могут происходить также из-за неудовлетворительного содержания проезжей части и свободных проходов в выработках, допуска к эксплуатации машин с неисправностями, перевозки людей в непредназначенных для этих целей машинах и выработках.

Применение самоходных транспортных машин разрешается:

1. в шахтах, не опасных по газу и пыли - по всем выработкам шахт;

2. в шахтах I и II категории по газу и опасных по пыли - по откаточным выработкам, омываемым свежей с ту ей воздуха;
3. в шахтах III категории и сверхкатегорных - только по главным откаточным выработкам, омываемым свежей струей воздуха.

Зазоры между крепью выработок и наиболее выступающей частью транспортной машины или размещенным в ней оборудованием принимаются равными 1,2 м со стороны прохода людей и 0,5 м с противоположной стороны. В выработках должны быть установлены типовые дорожные знаки, регулирующие движение. Освещение выработок должно обеспечивать водителю хорошую видимость на пути движения машины для наблюдения за дорогой, осмотра кровли и боков выработок, заблаговременно различать встречные машины и передвигающихся по выработкам людей.

К управлению самоходными транспортными машинами допускаются лица, прошедшие специальное обучение и получившие удостоверение на право управления машинами. Периодически водители должны проходить переподготовку со сдачей экзаменов по технике безопасности и по уходу за машинами и эксплуатации. Каждая самоходная транспортная машина должна иметь единый инвентарный номер, за ней прикрепляется постоянная бригада водителей, в течение смены машина обслуживается одним водителем.

Водитель в начале смены перед выездом на работу обязан произвести приемку от сменного водителя, при этом необходимо производить тщательный осмотр машины и проверку исправности рулевой, тормозной, электрической, гидравлической, пневматической систем; а также исправность осветительных приборов, звуковой и световой сигнализации; наличие средств пожаротушения и др. Все обнаруженные при проверке неисправности должны быть занесены в журнал учета неисправностей. Категорически запрещается приступать к работе на неисправной машине.

При движении машины следует строго соблюдать правила безопасного движения. Обгон машин категорически запрещен. Объезд стоящего транспортного средства или оборудования водитель может производить, только предварительно убедившись в безопасности маневра. При пересечении выработок нужно снижать скорость и подавать звуковые сигналы.

Передвижение людей в выработках, где происходит движение самоход-

ных транспортных машин, разрешается при условии, если ширина выработок больше габарита машины не менее чем на 1,3 м. При работе самоходных машин в выработке шириной менее 3,8 м запрещается присутствие людей в пределах маршрута движения машины.

Максимальная скорость движения груженого самоходного вагона с электрическим приводом и кабельной подачей электроэнергии не должна быть более 7 км/ч, а порожнего - 8 км/ч при движении по выработкам шириной по низу от 3 до 3,8 м. При большей ширине выработок максимальная скорость движения вагона должна соответствовать паспортным данным. На закруглениях выработок скорость ограничивается до 3 км/ч.

Водителю запрещается управлять машиной с кабины в положении стоя, покидать рабочее место в процессе движения машины, передавать управление другим лицам, перевозить людей в машине больше количества посадочных мест, Водитель не должен отлучаться от машины. При кратковременных, отлучках он обязан отключить двигатель, затормозить машину, вынуть ключ зажигания и снять реверсивную рукоятку контролера у вагонов (с электроприводом) и взять ключ (рукоятку) с собой. Фары должны необходимо оставаться включенными. При длительных остановках водитель должен отвести машину на место стоянки, отключить двигатель и фары, включить стояночный тормоз.

Для каждого типа электрических самоходных машин в технической документации указываются: правила технической эксплуатации, правила контроля и регулировки привода, максимальная нагрузка на двигатель.

Производятся ежесменные и периодические осмотры технического состояния транспортных машин. Машину, не прошедшую профилактический осмотр, эксплуатировать запрещается. Особое внимание при осмотрах обращают на устройства, обеспечивающие безопасность работы машин. Результаты осмотра заносят в журнал.

6.2 Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Электропривод рудничного электровоза является электромеханическим объектом, который создает тепловое и

магнитное излучение. При этом, двигатели поставляются в защищенном корпусе. Корпус двигателя заземлен и экранирует излучение, поэтому влияние на окружающую среду отсутствует. Прямое антропогенное загрязнение веществами почв, вод или воздуха отсутствует.

Каждый электродвигатель и его системы управления содержат ценные цветные металлы. В большинстве случаев в электродвигателях имеются латунные и бронзовые щетки, различные втулки и шайбы, а также некоторые разновидности медных обмоток и алюминиевых деталей корпуса. Общий вес всех основных металлов, которые содержатся непосредственно в электродвигателе действительно очень мал. Что касается основного веса всего электродвигателя, то сюда входит корпус, роторный и статорный металл. Некоторые медные детали электродвигателя в соответствии с собственным химическим составом действительно отличаются от меди, которая используется в медных кабелях или в любых других медных сплавах.

При окончании срока эксплуатации и демонтажа электродвигателя (электродвигателей), при невозможности его (их) дальнейшего использования на объектах, необходимо провести следующие мероприятия:

- а) разобрать электродвигатель (электродвигатели) и отделить цветные и черные металлы для последующей переработки или использования;
- б) оставшиеся части электродвигателя (электродвигателей) утилизировать в соответствии с инструкцией на утилизацию данного материала.

6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайные ситуации в шахтах возникают из-за отсутствия или сбоя в работе систем, ограничивающих или предотвращающих возникновение аварийной ситуации, неэффективность методов устранения которой может иметь тяжелые последствия. Таким образом, чрезвычайную ситуацию можно определить как непредвиденное событие, угрожающее здоровью и благополучию персонала или работе шахты и требующее эффективных и своевременных ответных мер для предотвращения или смягчения его последствий.

Все виды работ в горном деле связаны с особым риском и могут привести к возникновению чрезвычайной ситуации. Факторы риска, связанные с подземными горными выработками, включают выделение метана и образование

угольной или сульфидной пыли, приводящие к взрыву, и возможность спонтанного воспламенения угля. При подземной добыче руды чрезвычайные ситуации возникают при обвале пластов породы (прорывы, обвалы, разрушение подвесных стен или опор). Риск при работе в открытых карьерах связан с использованием мощного высокоскоростного машинного оборудования, возможностью внезапных взрывов и нарушения стабильности склонов. Опасные взрывы химических соединений, протечка и возникающий в результате прорыва дамбы поток могут случиться при добыче руды.

6.3.0.1 Взрывоопасность Основными факторами, влияющими на взрывчатость угольной пыли, являются ее дисперсность и концентрация, выход летучих веществ, зольность и содержание влаги, а также вид источника воспламенения и состав шахтного воздуха. Наиболее опасны в отношении взрыва пылевые частицы размером от 10 до 75 мкм. Тонкодисперсная пыль размером менее 10 мкм обладает пониженной взрывчатостью [25].

Для предупреждения взрывов угольной пыли на каждой шахте, отрабатывающей пласты, опасные по пыли, осуществляются мероприятия, основанные на применении воды (гидропылевзрывозащита) и на применении инертной пыли (сланцевая пылевзрывозащита). В местах интенсивного отложения пыли (конвейерные выработки, погрузочные пункты, участки выработок у опрокидывателей), а также в обводненных выработках должны применяться способы предупреждения взрывов угольной пыли, основанные только на использовании воды [11].

6.3.0.2 Обвалы, прорыв воды Вода, удаляемая с территории объектов горных работ, должна сбрасываться в ближайший водоток или в место, исключающее возможность ее обратного проникновения через трещины, провалы или водопроницаемые породы в выработки и заболачивание прилегающих территорий. Запрещается производить сброс (сток) вод в отвалы [26].

При отработке пластов лавами по падению (восстанию) на участках пластов, где существует угроза прорыва воды (пульпы или глины), из каждой очистной выработки должен быть обеспечен выход на вышележащий горизонт.

В коротких очистных забоях, в которых уголь добывается гидравлическим или механогидравлическим способом без постоянного присутствия ра-

ботников в забое, разрешается использовать в качестве второго выхода вентиляционные сбойки или специально оборудованные скважины диаметром не менее 850 мм, проводимые на соседние выемочные выработки (штрек или печь). Расстояние между сбойками или скважинами должно быть более чем 30 м. При применении системы поэтажной отработки второй выход разрешается иметь на расстоянии не более 100 м от места установки гидромонитора.

6.3.0.3 Пожароопасность Пожарная безопасность регламентируется ГОСТ 12.1.004-91, ГОСТ 12.1.- 010-76; ОСТ 29.12.0.004-82, строительными нормами и правилами (СНИП) [20–22]; типовыми правилами пожарной безопасности для промышленных предприятий.

Рудничные пожары - пожары, возникающие непосредственно в горных выработках, массиве полезных ископаемых и отработанном пространстве. К рудничным пожарам относятся и пожары в надшахтных зданиях, на складах, которые могут распространиться на выработки, или отравить в них атмосферу газообразными продуктами горения.

По причинам возникновения, рудничные пожары подразделяются:

- эндогенные (самовозгорание);
- экзогенные (от внешнего источника).

В зависимости от места возникновения рудничные пожары бывают:

- поверхностные;
- подземные.

Подземные рудничные пожары являются одной из наиболее опасных аварий в шахте. Их особенностью является плохая доступность для активного тушения непосредственным воздействием. Наличие за очагами пожаров, по ходу вентиляционной струи, высокой температуры, дыма и других продуктов горения не позволяет организовать тушение горящей выработки с двух сторон. Под действием огня выходит из строя и теряет свою несущую способность крепь горной выработки, что приводит к обрушению пород кровли, ещё больше осложняющему аварию. Пожары в шахтах и рудниках, опасных

по газу и пыли, могут привести к взрыву газопылевой смеси в ходе ведения аварийно-спасательных работ. Особенной опасностью рудничных пожаров является распространение по горным выработкам продуктов горения.

Наиболее опасны экзогенные пожары. Они быстро активизируются и за короткое время могут отравить атмосферу горных выработок на большом протяжении.

Подземный пожар в своём развитии проходит три стадии:

1. Возгоранию свойственно нарастание количество сгорающего в единицу времени материала, расхода на горение кислорода, повышение концентрации углеродосодержащих газов (CO , CO_2), увеличение температуры продуктов горения.
2. Развившийся пожар характеризуется полным расходом кислорода на горение и максимальной концентрацией углеродосодержащих газов, при постоянном расходе воздуха, сгоранием в единицу времени постоянного (максимального) горючего материала и постоянством температуры продуктов горения.
3. В стадии затухания наблюдается увеличение в продуктах горения концентрации кислорода, снижение содержания углеродосодержащих газов и уменьшение температуры пожарных газов.

Развитие пожара зависит от мощности и длительности действия начального теплового импульса, количества и характера расположения горючего материала и скорости воздушного потока у очага.

По мере увеличения площади горения наблюдается повышение температуры продуктов горения, нарастание содержания оксида и диоксида углерода, метана и водорода. По достижении температуры пожарных газов 500-550 градусов, пожар стабилизируется. При этом, концентрация кислорода в продуктах горения, как правило не превышает 15-16%, тогда как содержание диоксида достигает 5-6%.

Тушение подземных пожаров осуществляется следующими способами:

1. Активный - непосредственное воздействие на очаг пожара огнегасительными средствами (водой, пеной, песком и т.п.), или разборкой очагов с заливкой горящей массы водой. Этот способ обычно применяют

при всех пожарах, в начале их возникновения. Тушение пожара активным способом производят, как правило, со стороны свежей струи воздуха, одновременно принимают меры по преграждению распространения огня по исходящей струе (водяной завесы, удаление крепи, устройство завалов и т.п.).

- Пенно-воздушный способ: поперёк выработки натягивают матерчатую сетку, на неё наносится пенообразующая жидкость, образующая в ячейках сетки тонкие плёнки, срываемые затем воздушным потоком с образованием пены.
 - Тушение инертной паро-газовой смесью: в выработке устанавливается генератор паро-газовой смеси. Производительность генератора должна равняться воздушному потоку (весь воздух заменяется смесью).
2. Пассивный - изоляцией пожарного участка перемычками с засыпкой (при необходимости) провалов, тампонированием трещин целика и вмещающих пород. К изоляции прибегают, когда пожар нельзя ликвидировать непосредственным тушением из-за недоступности очагов горения непосредственному воздействию активными средствами.
3. Комбинированный - непосредственное тушение в комплексе с изоляцией пожарных участков, затоплением их водой, или заполнением инертными газами. Способ используют, когда пожар принял значительные размеры и непосредственное тушение не даёт должного эффекта, или когда невозможно ликвидировать пожар только путём изоляции [27].

При тушении подземных пожаров применяют следующие вентиляционные режимы:

- сохраняют существующий до возникновения пожара;
- сохраняют существующее направление вентиляционной струи с увеличением или уменьшением расхода воздуха;
- реверсируют (опрокидывают) вентиляционную струю, с сохранением, увеличением, или уменьшения расхода воздуха;

- закорачивание вентиляционной струи, при нормальном, или реверсивном её направлении;
- нулевая вентиляция, путём исключения выработок пожарного участка из вентиляционной сети шахты, или остановки вентилятора главного проветривания.

Предупреждение самовозгорания угля [27]:

- Безопасными являются способы вскрытия, которые обеспечивают надёжную изоляцию выемочных участков;
- должны применяться схемы проветривания с минимальной депрессией;
- наклонные стволы, капитальные уклоны, должны быть пройдены по породе или по пластам, не склонным к самовозгоранию;
- применение этажного способа подготовки.

При выборе системы разработки самовозгорающихся пластов учитываются следующие факторы:

- величина и характер потерь угля;
- скорость подвигания очистного забоя - пожаробезопасной является скорость подвигания, при которой продолжительность подвигания лавы меньше инкубационного периода самовозгорания угля;
- продолжительность отработки выемочного поля;
- возможности изоляции выработанного пространства по мере подвигания очистного забоя;
- важную роль играют схемы и способы проветривания.

Разработка тонких и средней мощности пластов производится длинными столбами. Мощные пологие и наклонные пласты менее опасны в пожарном отношении, чем крутые и разрабатываются наклонными слоями с обрушением. Мощные крутые пласты отрабатываются с закладкой.

6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Законодательство РФ об охране труда основывается на Конституции РФ и состоит из федерального закона, других федеральных законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ. Для реализации этих законов приняты Постановления Правительства РФ “О государственном надзоре и контроле за соблюдением законодательства РФ о труде и охране труда”, “О службе охраны труда”, “О Федеральной инспекции труда” и др.

В горном законодательстве [29] закреплены такие основные принципы обеспечения безопасности работ по использованию природных ресурсов, как приоритет безопасности человека и окружающей среды; государственное регулирование норм и правил безопасного ведения работ; создание безопасных и здоровых условий труда на каждом рабочем месте, обеспечение безопасного ведения технологических процессов в соответствии с нормами и правилами безопасного ведения работ.

Статья 24 Закона РФ «О недрах» устанавливает целый ряд обязанностей недропользователя (работодателя) по обеспечению безопасного ведения работ [30]. Работодатель, в частности, обязан осуществлять допуск к работам лиц, имеющих специальную подготовку и квалификацию, а к руководству горными работами – лиц, имеющих соответствующее специальное образование; обеспечивать лиц, занятых на горных и буровых работах, специальной одеждой, средствами индивидуальной и коллективной защиты; применять машины, оборудование и материалы, соответствующих требованиям правил безопасности и санитарным нормам; разрабатывать и проводить мероприятия, обеспечивающие охрану работников предприятий, ведущих работы, связанные с использованием недрами, и населения в зоне влияния указанных работ от вредного влияния этих работ.

Повышенная интенсивность и потенциальная опасность подземных работ обуславливает необходимость предоставления занятым на них работникам дополнительных отпусков в пределах до 14 календарных дней.

В ст.221 Трудового кодекса РФ предусмотрено, что на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением, работни-

кам бесплатно выдаются сертифицированные специальная одежда, специальная обувь и другие средства индивидуальной защиты, а также смывающие и (или) обезвреживающие средства в соответствии с типовыми нормами.

Выводы по разделу

В разделе представлены вредные и опасные факторы, влияющие на машиниста оператора рудничного подземного электровоза в ходе его работы, основные меры их профилактики и ликвидации. Также рассмотрена экологическая безопасность разрабатываемого решения, безопасность в чрезвычайных ситуациях и их меры предосторожности.

Соблюдение условий труда позволяют повысить производительно и эффективность выполняемой работ в соответствии с правовыми нормами безопасности.

Заключение

В результате проведенных теоретических исследований привода тягового рудничного электровоза в квалификационной работе решены задачи, позволяющие реализовать построение ТАД рудничного электровоза на базе серийных образцов без изменения конструкции станины двигателя, создать систему векторно-частотного управления для рассмотрения динамических режимов работы.

Определено, что применения серийного тягового асинхронного привода для подземного рудничного электровоза невозможно без внесения конструктивных изменений. В частности, применение двигателей общепромышленного исполнения не возможно для использования на рельсовом транспорте по причине несоответствия по внешним механическим воздействиям. В результате исследований, по динамике разгона, энергетическим показателям, конструктивным особенностям удалось выделить наиболее перспективный двигатель 4МТКМ2П225L6У1.

Были рассчитаны основные параметры для построения имитационной модели управления. На основе разработанной математической модели, была построена имитационная модель асинхронного электропривода в программе *Matlab2018a*, которая позволяет реализовать способ управления процессом автоматического косвенного обнаружения начала буксования колесной пары электровоза в реальном масштабе времени, для реализации которого введена схема фильтрации сигнала пропорционального моменту электропривода колесной пары при отработке гармонической составляющей сигнала задания момента и переменного тока. Имитационная модель позволяет:

- реализовать оптимальное управление тягой электровоза, с точки зрения реализации максимальной тяги и исключения режимов буксования колес в условиях плоского движения подвижного состава на подъемах и спусках при изменяемом профиле пути;
- ввести автоматическое ограничение скорости состава при поворотах для исключения возможности схода колесных пар с рельсового пути при учете неровностей и отклонения от идеального расположения;
- реализовать компенсацию механических колебаний вызванных наличием

ем упругих связей в сцепных устройствах между вагонами подвижного состава. За счет электромеханического их демпфирования средствами частотно-регулируемых электроприводов.

Результатом исследования выступает разработанная имитационная модель векторно-частотного управления крановым двигателем 4МТКМ2П225L6У1 мощностью 55кВт в режиме реального времени, позволяющая формировать управляющие воздействия на электропривод колесной пары для обеспечения оптимального переходного процесса разгона-торможения по критерию максимальной тяги.

Литература

- [1] Экономика железнодорожного транспорта: Учеб. для вызов ж.д. трансп./ Н.П.Терешина, В.Г.Галабурда и др. – М.: УМЦ ЖДТ России, 2006.
- [2] Работа Стаса
- [3] Диссертация Вильнина
- [4] Аккумуляторный рудничный электровоз с тяговым приводом трехфазного тока. // Железные дороги мира. 1997. - № 9. - С. 31—35.
- [5] Промышленные испытания электровозов с асинхронными приводом на Объединенном Кировском руднике ОАО «Апатит». /Пивнев В. А., Герман А. Г., Леонтьев В. М., Чернигов В. М. //Горное оборудование и электромеханика, 2006. - № 3. - С. 37-38.
- [6] Федоренко С.В. О потерях энергии при работе электровоза в режиме боксования. В сб.:Горная электромеханика и автоматика.-К.: Техника, 1974, В 25, с.130-136.
- [7] Ренгевич А.А. Энергетический баланс рудничных электровозов.-В сб.:Вопросы рудничного транспорта, вып.5, Госгортехиздат, 1961, с.247-258.
- [8] Вильнин А.Д., Десятов А.В., Терехин В.Б. Компьютерная модель асинхронного электропривода рудничного электровоза // Сборник трудов международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», 18-22 апреля 2011 г., Т. 1. 581 с. Томск: ТПУ, 2011. Р. 447–449.
- [9] Вильнин А.Д., Десятов А.В., Терехин В.Б. Исследование асинхронного привода рудничного электровоза // Сборник трудов международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», 18-22 апреля 2011 г., Т. 1. 581 с. Томск: ТПУ, 2011. Р. 445–447.

- [10] Вильнин А.Д., Кладиев С.Н., Пякилля Б.И. Метод обнаружения явления буксования в тяговом электровозе // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. Vol. 3 (39), № 9901–2013. P. 264–266.
- [11] Правила безопасности в угольных шахтах, введенные в действие приказом МЧС России от 19.03.2013 № 550.
- [12] Руководство по безопасности: «Рекомендации по прогнозу и выбору мер, направленных на снижение запыленности рудничного воздуха в угольных шахтах» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 4 марта 2016 г. № 83).
- [13] ГОСТР 57718-2017. "Горное дело. ВЕНТИЛЯЦИЯ РУДНИЧНАЯ".
- [14] СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 13.06.2003 г.
- [15] Правила устройства электроустановок (ПУЭ). М., Энергоиздат, 1986.
- [16] СН 2.2.4/2.1.8.562-96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31.10.1996 г.
- [17] СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
- [18] Справочная книга для проектирования электрического освещения / Под ред. Г.М. Кнорринга. Л., "Энергия 1976.
- [19] Ус А.Г., Елкин В.Д. Практическое пособие предназначено для курсового и дипломного проектирования для студентов дневной и заочной форм обучения специальностей 1-43 01 03 "Электроснабжение 1-43 01 07 "Техническая эксплуатация энергооборудования организаций". - Гомель, 2004.
- [20] ГОСТ 12.2.007.9-93. «БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ. ЧАСТЬ 1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ».
- [21] Правила пожарной безопасности в Российской Федерации (ППБ 01-03), введенные в действие приказом МЧС России от 18.06.2003 № 313.
- [22] ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ "Пожарная безопасность. Общие требования"
- [23] ГОСТ 12.4.011-87 ССБТ-« Средства защиты работающих. Общие

- требования».
- [24] ГОСТ 12.4.125-83 Система стандартов безопасности труда. Средства коллективной защиты работающих от воздействий механических факторов. Классификация.
- [25] А. Т. Айруни. Взрывоопасность угольных шахт. - Горное дело, 2011.
- [26] Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых". Приказ N 599 от 11 декабря 2013 г.
- [27] Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Инструкция по предупреждению эндогенных пожаров и безопасному ведению горных работ на склонных к самовозгоранию пластах угля". ПРИКАЗ № 517 от 16 декабря 2015 года.
- [28] СанПиН 2.2.2.54096 «Гигиенические требования к ручным инструментам и организации работ»
- [29] Статья 13 Федерального закона «О государственном регулировании в области добычи и использования угля, об особенностях социальной защиты работников организаций угольной промышленности» // СЗ РФ. 1996. №26. Ст.3033 (в ред. Федерального закона от 30 декабря 2008 г. №309-ФЗ).
- [30] СЗ РФ. 1995. №10. Ст.823 (в ред. Федерального закона от 27.12.2009 г. №374-ФЗ).

1. УЧАСТИЕ В КОНФЕРЕНЦИЯХ					
№	Название конференции	место проведения	дата проведения	статус конференции	участие (очное/заочное)
1.	IV Международный молодежный форум "Интеллектуальные энергосистемы"	г. Томск, НИТПУ	10-14.10.2016г	Всероссийская	очное
2.	Всероссийская (с международным участием) молодёжная научно-практической конференция «Введение в энергетику»	г. Кемерово, КузГТУ.	23-25.11.2016г	Всероссийская	очное
3.	"Наука: открытый формат" в рамках Недели науки Томской области	г. Томск, Дом Ученых	03.02.2018 г.	Региональная	очное
2. ПРОЧИЕ ПУБЛИКАЦИИ					
№	Название публикации	выходные данные		кол-во стр.	
1.	Koltunova E. A. , Ikonnikova K. V. , Lyarushkin S. V. Development of Soft-Hardware Platform for Training System Design of Electrotechnical Complexes and Electric Drives	MATEC Web of Conferences. - 2017 - Vol. 91, Article number 01041. - p. 1-4		3	
2.	Колтунова Е. А. Мексконструктор как средство обучения автоматизации электропривода	Введение в энергетику: сборник материалов II Всероссийской (с международным участием) молодёжной научно-практической конференции, Кемерово, 23-25 Ноября 2016. - Кемерово: КузГТУ , 2016 - С. 1-3.		2	

Приложение А

Analysis of traction electric drives of mine electric locomotives

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Колтунова Екатерина Александровна		

Консультант отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Образцов К.В.			

Консультант – лингвист отделения ИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Соколова Э.Я.			

1.1 General description of operation of traction electric drives

The railways have been implemented in the early 18th century. The electric locomotives have been widespread after 1930s for underground operation in coal mines. The 90% of the production volume at underground mines is produced by means of electric transport. Such popularity is caused by economical efficiency, no pollutions and safety.

Electric locomotives were equipped with series DC motors. This type of motors is also used for most urban and mine transport. The advantages of DC motor are:

- soft mechanical characteristic that ensures the start with a heavy load and wide limits of the rotation speed;
- efficient parallel operation of two or more motors;
- high overload capacity;
- mechanical characteristic has linear, when loads are higher than nominal ones.

Such popularity is explained by the conditions of use. DC power supply is most suitable from existing methods. A trolley supply has a voltage of 175 V with a movable contact at a locomotive.

But control systems with DC motors can't provide new increasing demands for energy efficiency. One of the main conditions is constant speed. The disadvantages of DC motor with the rheostat control system are:

- energy losses in control devices;
- disadvantages of the brush-collector junction, leading to increased operation costs;
- finite number of positions of the controller, resulting in motion ripple and hitting, when locomotive is starting. The locomotive can skid, depending on the creep coefficient;
- no protection system from skidding and abnormal conditionals of the drive;

- drive can't operate a low speed, when locomotive has low load. The driver has to constantly switch the speed controller. The current surges lead to early wear of the drive and the mechanical part of the system (brakes, wheel sets) [1,2].

Problems of DC motors are solved on the surface railway transport. But general purpose drives can not be used in mine transport. Because drives must be explosion proof and meet operating conditions. The re-equipment of the current mine transport is not easy to carry out, because the new solutions must meet with the requirements of current solutions.

The variable-frequency drive is more efficient system. The induction motor allows to have:

- reduced maintenance costs, increased operational reliability of the rail;
- improved speed control system, processes of starting and braking.
- application of the modern safety systems.

Also it is necessary to applicate the modifications of the frequency converter with low voltage. The voltage of trolley supply is 250 V. The battery voltage is lower - from 40 to 185 V.

1.2 Choice of the motor

Induction electric motors are chosen to have proper traction characteristics. They have to be close in mass and dimensions with a prototype of DC traction motor DK-812. This motor is installed on mine electric locomotives of type K14, K14M, 14KR [3,4].

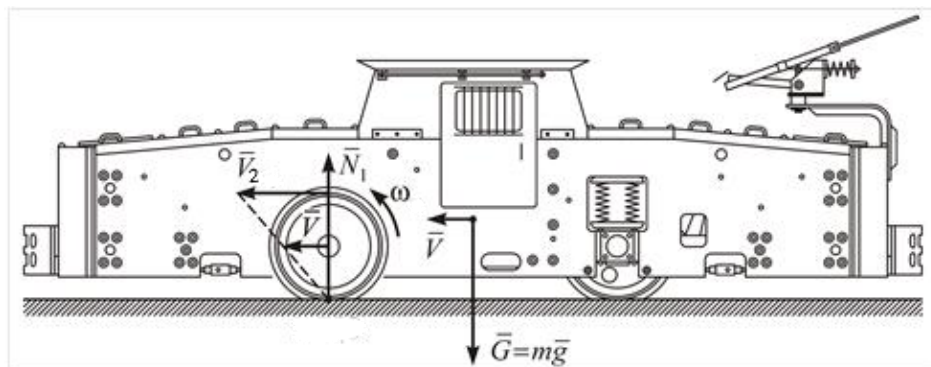


Figure 1. Mine electric locomotive K14

The DK-812 motor has two nominal operating modes: S2 (short-term) and S1 (long-term). The nominal parameters are presented in Table 1. Figure 2 shows the view of the DC traction motor.



Figure 2. General view of DC motor DK-812

Table 1. Characteristics of DC motor DK-812

Operating mode	S2 (short-term)	S1 (long-term)
Voltage, V	=250	
Power, kW	45	35
Rotation speed, rpm	1300	1480
Max. rotation speed, rpm	4000	
Torque, N · m	333	225
Stator phase current, A	=210	=162
Efficiency,%	86	87,5
Cos φ	460	

The motor has a steel frame. The brush-collector junction is the most vulnerable part.

Brushes will be damaged and sparked from vibration. At present, this type of traction motors is not competitive.

The closest to traction motors are regular crane induction motors. They are also developed for movement on rails. They are resistant to current surges. The motors have a rugged frame compared to general purpose drives.

The motors have good design. The housing with the terminal box is made of a strong cast-iron. The insulation of the stator winding has of heat resistance class H (180°C). There are motors of close to power 55kW with a prototype (DK-812). Designation of the motor is 4MTKM2P225L6Y1. Ingress protection of motor is IP54. The main parameters of the crane motor are presented in table 2.



Figure 3. General view of the crane induction motor
4MTKM2P225L6

The crane motor exceeds the DC-812 DC motor by the starting properties (speed and acceleration time). The high torque value exceeds the prototype by more than 1.6 times.

The power supply system is made for a contact locomotive of type K14, KT14. The DC voltage of trolley supply is 250V ($\pm 30\%$). The specified voltage will give a significant effect on the operation of the traction motor. It can reduce the motor torque below the limits for traction conditions.

Table 2. Characteristics of the crane frequency-controlled induction motor 4MTKM2P225L6

Operating mode	S2 (short-term)	S1 (long-term)
Voltage, V	~380	
Power, kW	55	43
Rotation speed, rpm	985	990
Max. rotation speed, rpm	3800	
Torque, N · m	533	318
Stator phase current, A	~114	~83,4
Efficiency,%	90	88,5
Cos φ	0,81	0,67
Weight, kg	464	

* Specified mass with of paws (IM2003).

1.3 Calculation of the parameters

The parameters of the crane motor 4MTKM2P225L6 are presented in table 3.

Table 3. Parameters of motor 4MTKM2P225L6

n_0, rpm	Rated load					
	U, V	P, kW	$s, \%$	$\cos \varphi, ru$	$\eta, \%$	$J, kg \cdot m^2$
1000	380	55	1,5	0,81	90	1,02
$m_s = \frac{M_{start}}{M_{rat}}$	$m_c = \frac{M_{max}}{M_{rat}}$		$m_m = \frac{M_{min}}{M_{rat}}$	$k_i = \frac{I_{inr}}{I_{rat}}$	Ingress protection	
3,4	2,2		3,4	7,4	IP54	

Let's find the synchronous speed and the rated speed:

$$\begin{aligned}
n_0 &= \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ [rpm]}; \\
\omega_0 &= \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ [rad / s]}; \\
n_r &= (1 - s_r)n_0 = (1 - 0,015) \cdot 1000 = 985 \text{ [rpm]}.
\end{aligned} \tag{1.1}$$

Stator current at rated load is:

$$I_{1r} = \frac{P_r}{3 \cdot U_{1r} \cdot \cos \varphi_r \cdot \eta_r} = \frac{55000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,9} = 114,3 \text{ [A]}. \tag{1.2}$$

We accept efficiency at partial load:

$$\eta_p = 0,9, \quad \% \tag{1.3}$$

We accept a motor power factor at partial load:

$$\cos \varphi_p = 0,761, \quad \text{[p.u.]} \tag{1.4}$$

Stator current at partial load is:

$$I_{11} = \frac{P_r}{3 \cdot U_{1r} \cdot \cos \varphi_p \cdot \eta_p} = \frac{55000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,761} = 91,3 \text{ [A]}. \tag{1.5}$$

The motor load factor is $p_p = P/P_r = 0,75$. Let's find the no-load current of

an induction motor:

$$\begin{aligned}
I_0 &= \sqrt{\frac{I_{11}^2 \cdot (p_p \cdot I_{1r} \cdot \frac{1-s_r}{1-p_p \cdot s_r})^2}{1 - (p_p \cdot \frac{1-s_r}{1-p_p \cdot s_r})^2}} = \\
&= \sqrt{\frac{91,3^2 \cdot (0,75 \cdot 114,3 \cdot \frac{1-0,015}{1-0,75 \cdot 0,015})^2}{1 - (0,75 \cdot \frac{1-0,015}{1-0,75 \cdot 0,015})^2}} = 48,3 \text{ [A]}.
\end{aligned} \tag{1.6}$$

We determine the ratio for calculating the critical slip from the Closs formula.

We take $\beta = 0,75$:

$$s_c = s_r \cdot \frac{m_c + \sqrt{m_c^2 - [1 - 2 \cdot s_r \cdot \beta \cdot (m_c - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_r \cdot \beta \cdot (m_c - 1)} =$$

$$= 0,015 \cdot \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - [1 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,7 \cdot (2,2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,7 \cdot (2,2 - 1)} = 0,064 \text{ [p.u.]} \quad (1.7)$$

Let's find the values of the coefficients:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1r}} = \frac{48,3}{2 \cdot 7,6 \cdot 114,3} = 1,028; \quad (1.8)$$

$$A_1 = m \cdot U_{1r}^2 \cdot \frac{1 - s_r}{2 \cdot C_1 \cdot m_c \cdot P_r} = 3 \cdot 220 \cdot \frac{1 - 0,015}{2 \cdot 1,028 \cdot 2,2 \cdot 55000} = 0,57. \quad (1.9)$$

Now it is possible to determine the rotor resistance, reduced to the stator:

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + \frac{1}{s_c}) \cdot C_1} = \frac{0,57}{(1 + \frac{1}{0,064}) \cdot 1,028} = 0,0343 \text{ [Ohm]}. \quad (1.10)$$

Stator resistance is:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,028 \cdot 0,0343 \cdot 0,7 = 0,0247 \text{ [Ohm]}. \quad (1.11)$$

Define a parameter γ , that allows us to find the short-circuit impedance X_c

:

$$\gamma = \sqrt{(\frac{1}{s_c^2}) - \beta^2} = \sqrt{(\frac{1}{0,064^2}) - 1} = 15,6. \quad (1.12)$$

Let's find the short-circuit impedance:

$$X_c = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 15,6 \cdot 1,028 \cdot 0,0343 = 0,549 \text{ [Ohm]}. \quad (1.13)$$

Let us find the rotor impedance, reduced to the stator winding:

$$x'_{2r} = 0,58 \cdot \frac{X_c}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,549}{1,028} = 1,644 \text{ [Ohm]}. \quad (1.14)$$

Let us find the stator impedance:

$$x_{1r} = 0,42 \cdot X_c = 0,42 \cdot 0,55 = 0,23 \text{ [Ohm]}. \quad (1.15)$$

We find the EMF, induced by the air gap flow in the stator winding:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1r} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1r})^2 + (U_{1r} \cdot \sin \varphi - x_{1r} \cdot I_{1r})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,81 - 0,025 \cdot 114)^2 + (220 \cdot 0,58 - 0,23 \cdot 114)^2} = 203,2 \text{ [V]}. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Then the magnetization impedance:

$$x_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{203,2}{48,3} = 4,2 \text{ [Ohm]}. \quad (1.17)$$

1.4 Choice of the converter and parameters of the power circuit

Let's choose a converter of company Simovert Vector Control 6SE70 (fig. 4) with the parameters:

- $P=102 \text{ kW}$, $I=147 \text{ A}$ at a frequency $f=5000 \text{ Hz}$;
- $I_{max} = 221 \text{ A}$ at a current duration of 60 s ;
- Mains supply voltage is set $U = (380 \div 420) \text{ V}$.

Time intervals of model calculation are:

- Time step calculation $\Delta t = 0.000001 \text{ s}$;
- PWM frequency $f = 5000 \text{ Hz}$;

- PWM period $T = 1 / f = 0.0002 \text{ s}$.



Figure 4. Simovert Vector Control 6SE70

We select the parameters of the supply transformer for the rated current of the phase winding:

$$I_r = I_{1r} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{U_c} = 114,3 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{420} = 103,7 [A]..$$

We accept, that $R = 265 \text{ mOhm}$, $L = 1 \cdot 10^{-3} \text{ H}$.

We accept $C = 7500 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ from condition:

$$C \approx (100 \div 300) \cdot P_r, \mu F,$$

where P_r – Rated motor power, kW.

We accept $U_{on} = 430 \text{ V}$, $U_{off} = 400 \text{ V}$ from condition:

$$U_{off} > \sqrt{2} \cdot U_{max} = \sqrt{2} \cdot 420 = 593.97 [V] \text{ and } U_{on} \geq (1.05 \div 1.1) \cdot U_{off}.$$

1.5 Calculation of mechanical and electromechanical characteristics

The mechanical characteristic of the electric motor is plotted according to the expression:

$$M(\omega) = \frac{m \cdot U_{1r}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_r \cdot \left[\left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_r \cdot X_\mu} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_r} \right) + X_c^2 \right]}, N \cdot m,$$

where m - number of phases of the motor;

U_{1r} - rated phase-to-phase voltage, V.

We calculate the critical torque according to:

- motor parameters:

$$M_c = \frac{m \cdot U_{1r}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_c \cdot \left[\left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_c} \right) + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_c \cdot X_\mu} \right) + X_c^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,0343}{104,7 \cdot 0,064 \cdot \left[\left(\frac{0,0247 \cdot 0,0343}{0,064} \right) + \left(0,0247 + \frac{0,0343}{0,064 \cdot 4,2} \right) + 0,55^2 \right]} = 1207 [N \cdot m];$$

- reference shhet:

$$M_c = m_c \cdot M_r = 2,2 \cdot 562 = 1237 [N \cdot m].$$

Critical speed is:

$$\omega_c = (1 - s_c) \cdot \omega_0 = (1 - 0,064) \cdot 104,7 = 98,02 [rad / s].$$

Rated speed is:

$$\omega_r = \omega_0 \cdot (1 - S_r) = 104,7 \cdot (1 - 0,015) = 103,4 [rad / s].$$

Figure 5 shows natural mechanical characteristic of the motor.

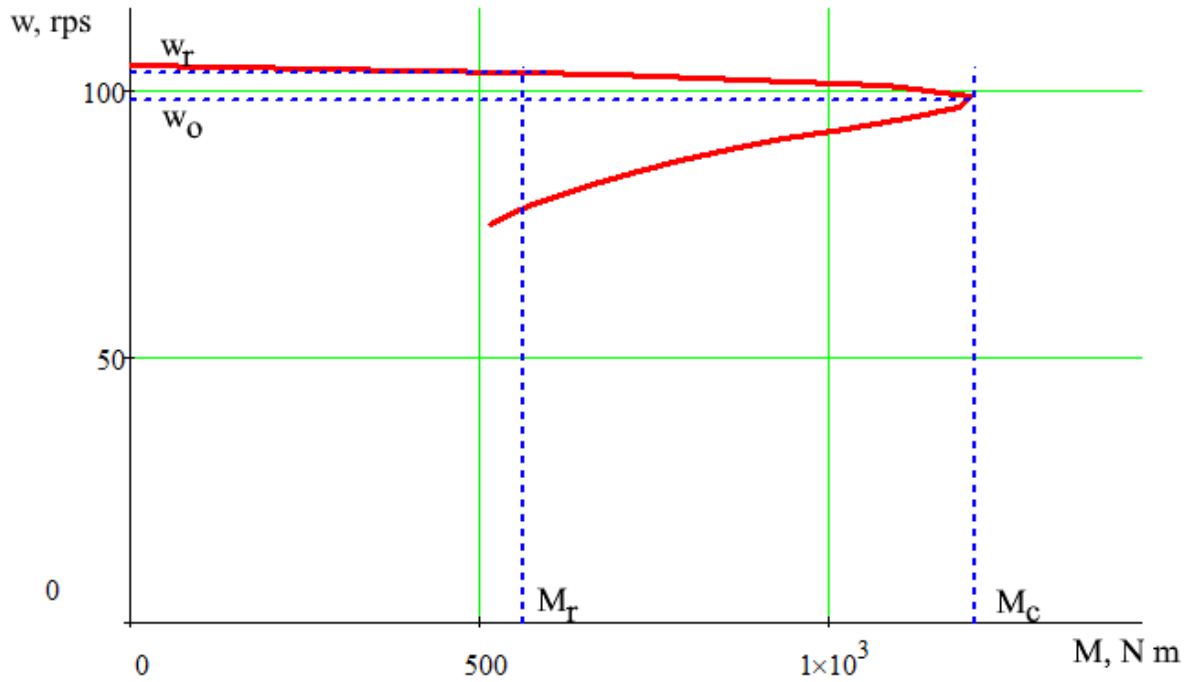


Figure 5 – natural mechanical characteristics of the motor

The electromechanical characteristics are plotted according to the expressions:

- rotor current, reduced to the stator winding, from slip:

$$I_2'(\omega) = \frac{U_{1r}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_r}\right)^2 + X_c^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_r \cdot X_\mu}\right)^2}}, \text{A.}$$

- stator current:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}, \text{A}$$

where

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_c}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_c}\right)^2 + X_c^2}}.$$

Figure 6 shows the natural electromechanical characteristics of the motor.

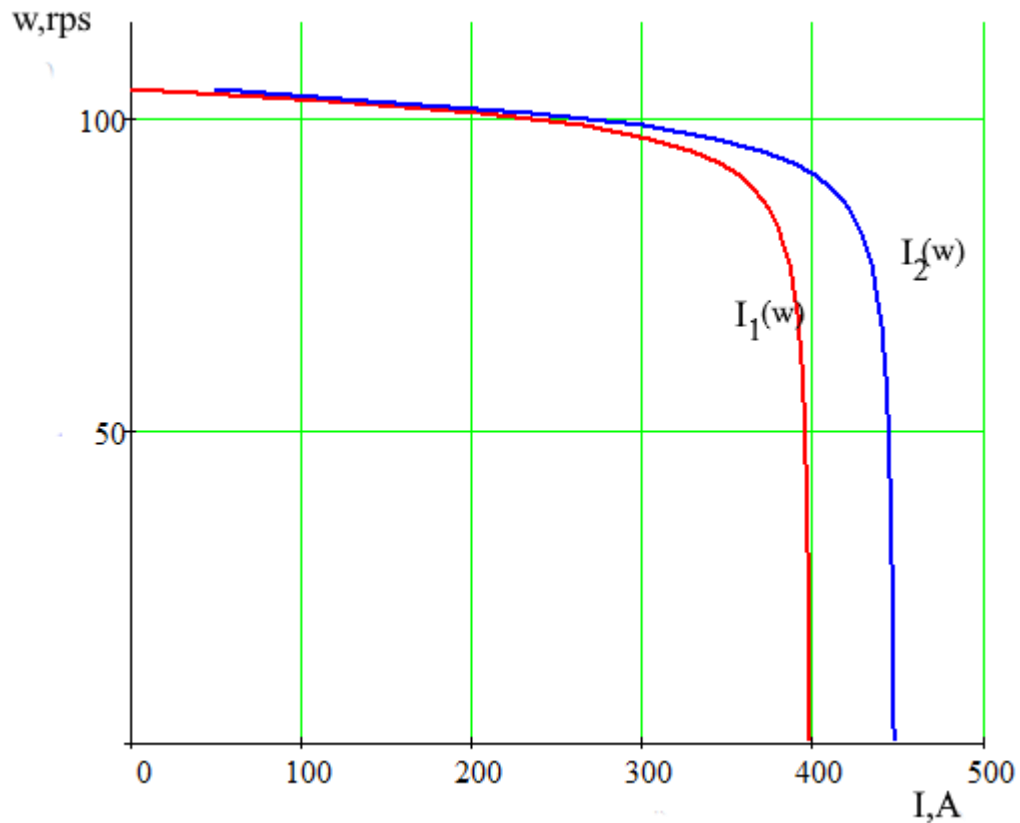


Figure 6 - natural electromechanical characteristics of the motor

1.7 Research of direct starting processes

It is necessary to assemble the circuit to simulate the processes of direct starting under the MatLab 2018a software environment.

Direct starting is accomplished by applying voltage from a the *Three-Phase Programmable Voltage Source* to the *Asynchronous Machine Si Units2* motor model. The block diagram is shown in figure 6.

Figure 7 shows direct starting with the stator winding circuit «Y» for the standard voltage of the stator is 220V.

Figure 8 and 9 shows direct starting with the stator winding circuit «Δ» for the standard voltage of the stator is 220V and the reduced voltage of 178V.

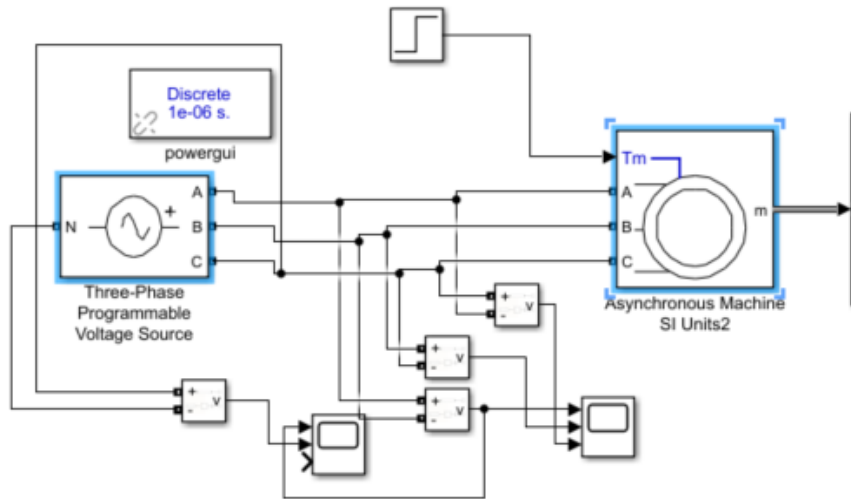


Figure 6 – Block diagram of simulation

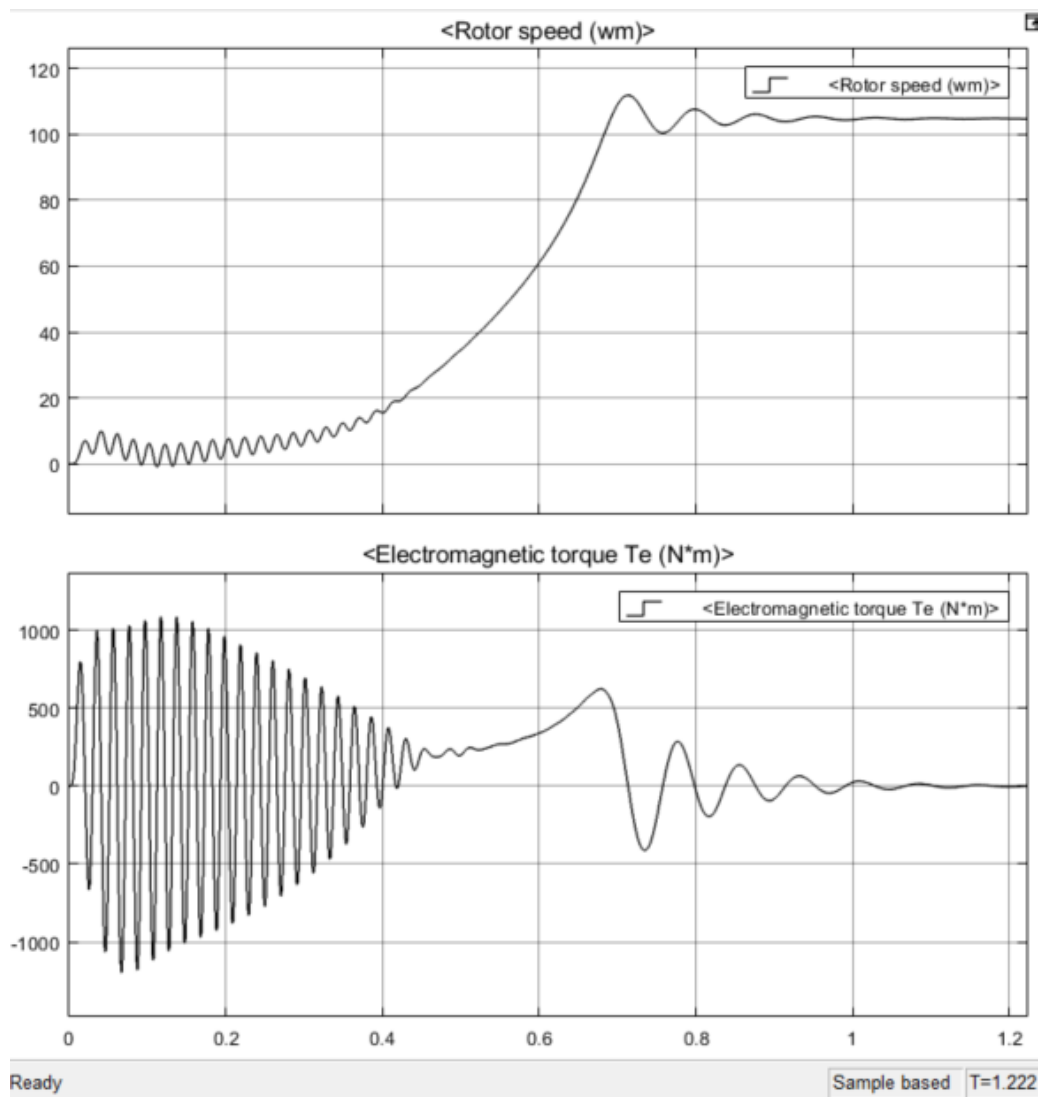


Figure 7. Dynamic characteristics of the direct starting with the stator windings circuit «Y»

Line 1 shows the dependence of the rotation speed of the motor shaft (n , rpm) on time; line 2 - the torque on the shaft (M , $N\cdot m$); line 3 - the module of the resulting stator current vector.

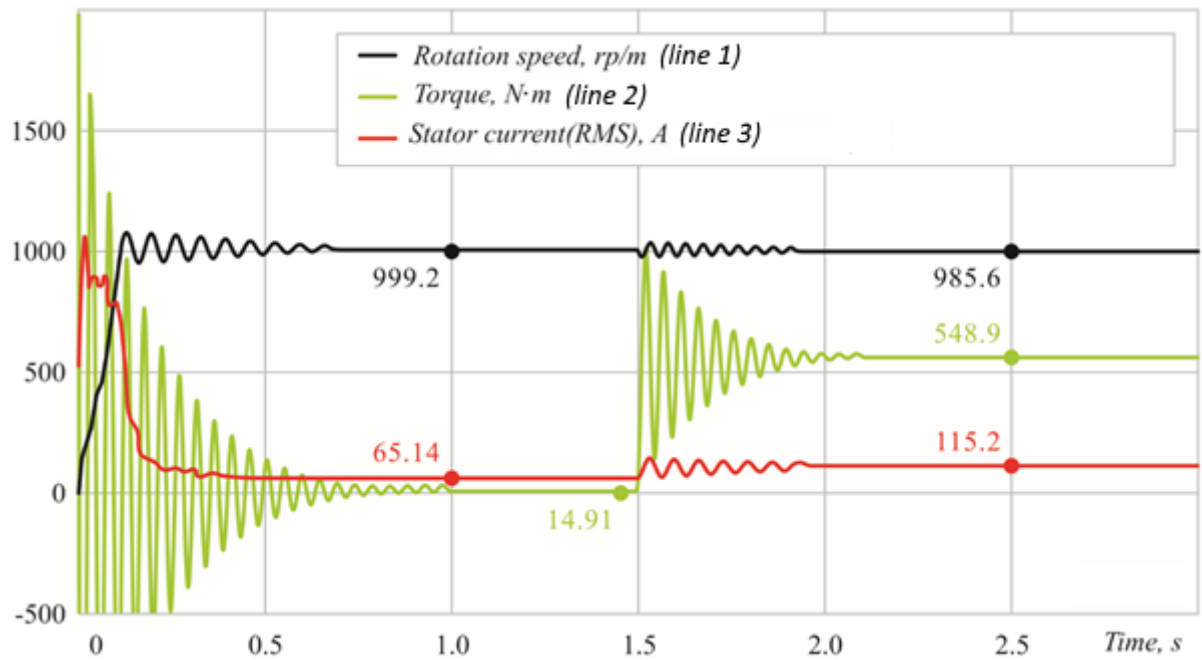


Figure 8. Dynamic characteristics for a standard voltage of 220V with the stator windings circuit « Δ »

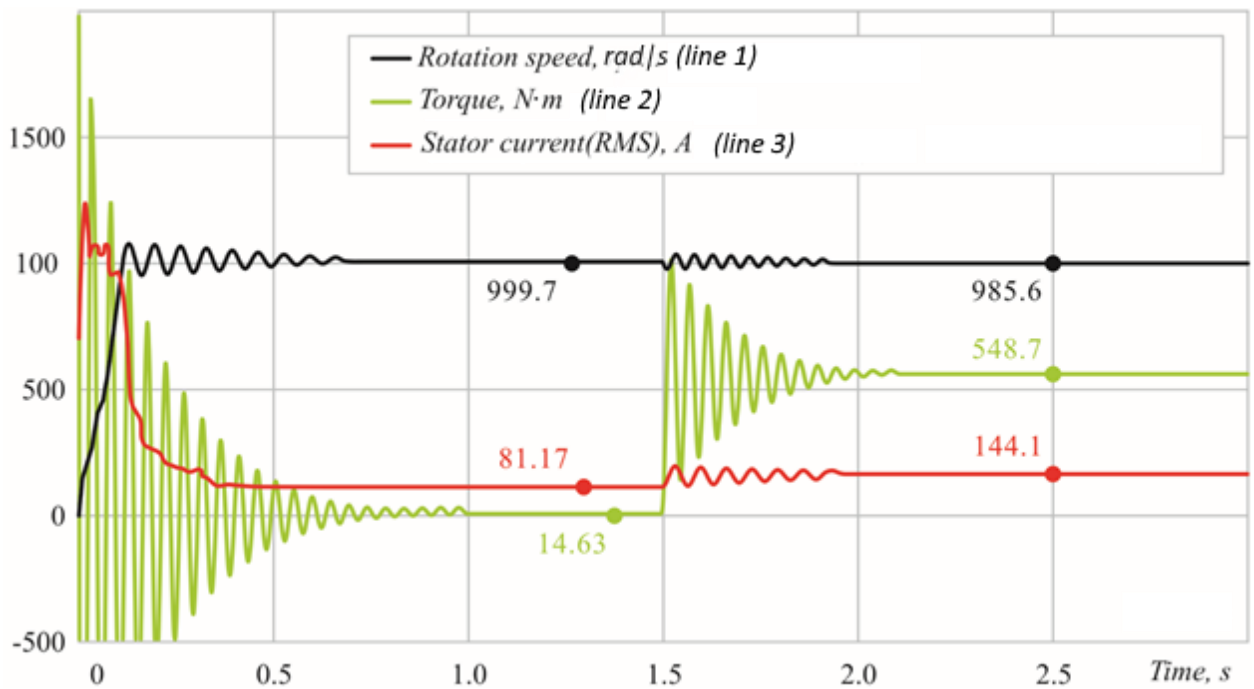


Figure 9. Dynamic characteristics for a reduced voltage of 178V with stator windings circuit « Δ »

Conclusion

The analysis of reference sources has shown that systems with series DC motor are out-of-date. Because of a lot of disadvantages there is no point to continue research the systems with DC motors. The traction induction motor is better for operation in mine electric locomotives.

A traction induction motor with power of 55 kW was selected for research. All the main parameters and characteristics has been calculated, on the basis of which it is possible to further develop a vector control system.

References

1. Parmas Y.A. The fate of an induction drive. // Electric thermal draft. - 1992. - No. 1 - c 41-45
3. Sinchuk O.N., Udoenko O.A., Chumak V.V. Peculiarities of transient electromagnetic processes in traction electric drive with impulse voltage converter of mine electric storage electric locomotives. // Electrical Engineering, 2004, №6. - P.58-60.
4. Volotkovsky S.A. Electric arc draft. - 4 th ed., Per-re. and additional. -M .: Nedra, 1981. - 389 p.
5. Zhulev O.N., Ivanchenko I.K., Kurochka A.L., Yanov V.P. Problems of creating electric locomotives with induction traction drivers. // Electromechanics.-1983.-No. 11.- C. 19-27.
6. A. Bakhvalov, A.A. Zarifyan, V.N. Kashnikov. Simulation of the electromechanical system of an electric locomotive by a synchronous traction drive. / Ed. E. M. Plokhova-M .: Transport, 2001. - 286 p.
7. A.L. Noskov. Russian electric locomotive building on the threshold of the XXI century. / Electric Locomotive Industry: Sat. sci. tr. / JSC "VELNII". - Novocherkassk, 1999. - T. 41. - P. 3 - 14.
8. Accumulator mine electric locomotive with traction drive three-phase current. // Railways of the world. 1997. - No. 9. - P. 31-35.