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

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Отделение школы (НОЦ): Отделение электроэнергетики и электротехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Вентильно-индукторный электропривод электромобиля

УДК 62-83-523:629.113

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ72	Иванов Василий Николаевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ	Однокопылов Георгий Иванович	д.т.н., доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЭЭ	Розаев Иван Андреевич			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД	Гуляев Милий Всеволодович			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭЭ	Гарганеев Александр Георгиевич	д.т.н.		

Томск – 2019 г.

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

Школа Инженерная школа энергетики (ИШЭ)
Направление подготовки (специальность) 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования высшее профессиональное образование
Отделение школы (НОЦ) Отделение электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ)
Период выполнения весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
12.11.2018	*Обзор литературы*	*20*
11.03.2019	*Расчет тяговой характеристики электромобиля*	*20*
15.04.2019	*Оптимизация контуров регулирования*	*20*
22.05.2019	*Имитационное моделирование*	*20*
10.05.2019	*Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение*	*10*
20.05.2019	*Социальная ответственность*	*10*

СОСТАВИЛ:
Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов Г.И.	д.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А.Г.	д.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Отделение школы (НОЦ): Отделение электроэнергетики и электротехники

Код результата	Результат обучения
Универсальные компетенции	
Р1	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области электроэнергетики и электротехники.
Р2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
Р3	Использовать 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.
Р4	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях электроэнергетики и электротехники.
Профессиональные компетенции	
Р5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
Р6	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.
Р7	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.
Р8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электро-энергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
Р9	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.
Р10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
Р11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
Р12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными доку- ментами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Отделение школы (НОЦ): Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ _____ Гарганеев А.Г.
(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**
5ГМ72	Иванов Василий Николаевич

Тема работы:

Вентильно - индукторный электропривод электромобиля	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	

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.).*	– электромобиль с вентильно-индукторным двигателем мощностью P = 60 *кВт*. Расчеты производить для минимальной m = 1100 *кг* и максимальной m = 1600 *кг* масс. Длина электромобиля a = 4.4 *м*, ширина b = 1.65 *м.* – обеспечить функционирование микроконтроллерной системы управления с обратной связью по моменту и току – разработать имитационную модель вентильно-индукторного электропривода для исследования нормальных и неполнофазных режимов работы в электромобиле.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов *(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).*	Обзор технической литературы по теме тягового вентильно-индукторного электропривода. Моделирование тягового вентильно-индукторного электропривода электромобиля. Расчет предельной тяговой характеристики электромобиля. Исследования нормальных и неполнофазных режимов работы вентильно-индукторного электропривода для электромобиля. Заключение
Перечень графического материала *(с точным указанием обязательных чертежей)*	1. Структурная схема тягвого ВИП электромобиля 2. Имитационная модель ВИП электромобиля. **3.** Результаты исследований.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Подопригора Игнат Валерьевич
Социальная ответственность	Гуляев Милий Всеволодович
Раздел на иностранном языке	Токмашев Денис Михайлович

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение; составление математической модели вентильно–индукторного электропривода электромобиля; заключение.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	

Задание выдал руководитель / консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ	Однокопылов Г.И.	д.т.н., доцент		
Ассистент ОЭЭ	Розаев И.А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ72	Иванов Василий Николаевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ72	Иванову Василию Николаевич

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования.	Объектом исследования является имитационная модель вентильно-индукторного электропривода электромобиля в среде MATLAB (8 корпус, 126 аудитория)
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ потенциально возможных вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды. 2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов	Проанализировать потенциально возможные вредные и опасные факторы при разработке имитационной модели и эксплуатации оборудования: – повышенный уровень шума на рабочем месте; – неудовлетворительное освещение рабочей зоны; – повышенный уровень электромагнитных полей (ЭМП); – неудовлетворительный микроклимат – повышенный уровень напряженности электростатического поля – электробезопасность
3. Экологическая безопасность	– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы, утилизация компьютерной техники и периферийных устройств); – решение по обеспечению экологической безопасности.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Анализ возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. – Пожаровзрывоопастность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Гуляев Милий Всеволодович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ72	Иванов Василий Николаевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ72	Иванов Василий Николаевич

Инженерная школа энергетики		**Подразделение**	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	магистратура	**Направление/специальность**	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение»:	
1. *Стоимость ресурсов научного исследования (НТИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих*	1. *Определить затраты на разработку проекта, в которую входят:* - *Материалы и покупные изделия* - *Основная заработная плата* - *Дополнительная заработная плата* - *Отчисления в социальные фонды* - *Прочие и накладные расходы* *2.Для исследования необходимо два человека: руководитель, студент.*
2. *Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования*	*Отчисления по страховым взносам составляют 28% от ФОТ*
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. *Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ*	*Оценка инновационного потенциала НТИ*
2. *Планирование и формирование бюджета научных исследований*	*Разработка календарного плана работ, сметы расходов.*
Перечень графического материала:	
1. *Расходы на этапе проектирования на материальные затраты.* 2. *Расходы на этапе проектирования на заработную плату.* 3. *Смета затрат.* 4. *Смета наличных капитальных затрат.* 5. *Результаты расчёта приведённых затрат.*	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Подопригора Игнат Валерьевич	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ72	Иванов Василий Николаевич		

Реферат

Магистерская диссертация студента 114 с., 36 рисунков, 20 таблиц, 42 источника, 15 стр. приложения.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, индукторная машина, математическая модель вентильно-индукторного электропривода, имитационная модель вентильно-индукторного электропривода, обрыв фазы электродвигателя, однополярные импульсы напряжения, свойство живучести, электромобиль.

Объектом исследования является вентильно-индукторный электропривод электромобиля.

Цель работы: построение имитационной модели вентильно-индукторного электропривода для исследования аварийных и неполнофазных режимов работы аэлектромобиля, разработка функциональных и структурных схем вентильно-индукторного электропривода электромобиля.

Результаты данного исследования могут найти применение в области тягового электропривода элеткромобилей, а также для промышленного оборудования опасных производственных объектов: нефтегазодобывающих, ядерных, военных, химических, строительных, металлургических и транспортных, где возникает проблема организации управления исполнительными электроприводами с обеспечением свойства живучести.

Работа выполнена с использованием пакета прикладных программ: Microsoft Office 2013, Mathcad 14, MathType 6.0, MatLab (R2019a).

Введение

Вентильный индукторный двигатель (в англоязычной литературе используется термин switched reluctance motor) – это индукторная синхронная машина, которая преобразует энергию путём изменения индуктивности обмоток, располагающихся на зубцах статора, во время перемещения относительно них зубцов магнитопровода ротора. Питание к ВИД поступает от коммутатора, который поочередно переключает обмотки двигателя соответственно перемещению ротора. Управление коммутатором ВИД происходит посредством микропроцессора.

ВИД представляет собой сложную комплексную систему, в которой совместно работают различные по своей физической природе элементы. Для успешного проектирования таких систем необходимы глубокие знания в области механики и конструирования машин, электромеханики, электроники и микропроцессорной техники.

Несмотря на то, что интенсивные работы по изучению и исследованию систем электропривода с ВИД ведутся на протяжении уже двух десятилетий, устоявшейся терминологии для обозначения самого объекта исследования до сих пор нет. В данной работе используется термин “вентильно-индукторный двигатель”.

Перспективность ВИД проявилась в 80-х годах XX века благодаря бурному развитию технологий электронной промышленности и, в первую очередь, силовой электроники. Большой качественный скачок в этом направлении позволил промышленности приступить к серийному выпуску новой элементной базы, обладающей высокими показателями по быстродействию и предельным параметрам. Дальнейший прогресс в области информационных технологий и компьютерной техники, наблюдающийся с 90-х годов XX века, окончательно определил место ВИД в ряду современных и перспективных ЭМ для систем электропривода нового поколения,

позволил реализовать сложные алгоритмы управления, применить для их создания компьютерные системы автоматизированного проектирования.

Современный ВИД представляет собой электродвигатель, работающий совместно с электронным преобразователем, выполненным по интегральной технологии, и микропроцессором, позволяющим осуществить оптимальное управление двигателем с максимальными показателями качества преобразования энергии и датчиком положения ротора.

Однако, как и любое техническое устройство, ВИД имеет и достоинства, и недостатки.

К достоинствам ВИД следует отнести надежность и простоту конструкции, возможность получения как сверхвысоких, так и сверхнизких частот вращения, что, с одной стороны, во многом обуславливается механической прочностью ротора двигателя и тем, что двигатель лишен скользящих контактов, с другой, – электромагнитной редукцией частоты вращения в ВИД и наличием гибкой системы управления. Как правило, ротор ВИД обладает малым моментом инерции, что позитивно отражается на динамике его работы. ВИД способен сохранять работоспособность даже в суровых условиях окружающей среды в диапазоне изменения нагрузок, начиная от холостого хода и заканчивая коротким замыканием. Простая конструкция магнитной системы ВИД и сосредоточенные обмотки, существенно упрощающие обмоточный процесс, делают устройство двигателя технологичным и относительно дешевым, в сравнении с аналогами, кроме того интегральное исполнение составляющих системы управления заметно улучшает массогабаритные показатели машины.

ВИД обладают достаточно широким диапазоном плавного управления частотой вращения ротора, хорошими динамическими и регулировочными характеристиками, а также более чем удовлетворительными энергетическими показателями. Микропроцессорная система управления ВИД дает возможность использовать оптимальные алгоритмы управления двигателем в

соответствии с заданным режимом и осуществлять диагностику состояния всех частей системы электропривода.

К недостаткам ВИД относят повышенный уровень шумов и вибраций, которые возникают из-за пульсаций вращающего момента и действия радиальных сил магнитного притяжения. Необходимость в датчике положения ротора также считается одним из недостатков ВИД. Можно отметить и более высокие отходы электротехнической стали, используемой при штамповке магнитопровода двигателя, являющиеся следствием двухсторонней зубчатости сердечников. Во время работы ВИД напряжения и токи в фазах изменяются по законам, отличающимся от синусоидальных, следовательно, для соблюдения требований, которые предъявляются к потребителям электроэнергии по отдаче высших гармоник в сеть, существует необходимость в установке фильтрующих устройств.

Однако следует заметить, что в настоящее время многие из указанных недостатков успешно устраняются: применяются методы косвенного определения положения ротора (бездатчиковое управление), благодаря чему из состава ВИД исключается механический датчик положения, а шумы и вибрации могут быть минимизированы выбором оптимального алгоритма управления и детальным профилированием зубцовой зоны.

В последние годы на базе конструкции ВИД часто проектируют приводы прямого действия (direct drive), т. е. приводы, в которых ЭМ непосредственно встроена в рабочий орган исполнительного механизма с целью максимального сокращения промежуточных кинематических передач, исключения многоступенчатого преобразования энергии и возможности получения более низких габаритов устройства. Это позволяет увеличить точность перемещения и значительно улучшить динамические, энергетические и массогабаритные показатели механизма электропривода.

Простота конструкции, а также особенности принципа действия ВИД создают благоприятную основу для выработки удачных и оригинальных технических решений. Бытовая техника, медицина, добыча и переработка

нефти и газа, электроэнергетика, робототехника, станкостроение, электрический транспорт, автомобилестроение, металлургия, аэрокосмическая промышленность – вот далеко не полный список областей, в которых ВИД успешно конкурируют с другими типами электрических машин.

Отличительная особенность вентильной индукторной машины заключается в том, что конкурентоспособные относительно традиционных электрических машин энергетические и массогабаритные показатели могут быть получены исключительно в случае полезного использования насыщения магнитной системы. Поэтому в таких машинах выбираются такие конструктивные параметры и электромагнитные нагрузки, при которых в зоне перекрытия полюсов статора и ротора достигается сильное локальное насыщение, при соответствующих условиях переходящее насыщение магнитной системы в целом.

В большей части работ, отмечающих достоинства ВИД, говорится о перспективности их применения. Но, к сожалению, на данный момент машины этого типа применяются преимущественно в электроприводах установок широкого применения, для которых не требуются высокие динамические показателей привода (вентиляторы, насосы, бытовая техника различные конвейеры, малогабаритный транспорт и т.д.). Это можно объяснить тем, что присущий ВИД дискретный характер работы в совокупности с нелинейными магнитными характеристиками сильно осложняет применение к ним традиционных методов синтеза регуляторов для замкнутых структур управления необходимых, чтобы достичь требуемых показателей качества управления выходными координатами (такими как момент и скорость). ВИД причисляются к большому классу систем, для которых нелинейные свойства играют огромную роль, важность которой сложно переоценить, поэтому можно получить качественно неверные результаты в случае пренебрежение этими свойствами.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУТОРНЫХ МАШИН 16
1. Устройство ВИД 16
2. Принцип работы ВИД 20
3. Контроль напряжения и тока в ВИД 26
3.1 Контроль напряжения ВИД 26
3.2 Контроль тока ВИД 27
4. Вентильно-индукторные электромеханические преобразователи в современном автомобиле 29
5. Тяговый ВИД на карьерных самосвалах 32
6. Электротрансмиссия с тяговыми вентильно-индукторными двигателясм 33
Выводы по главе 1 35
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ И ПРЕДЕЛЬНЫЙ ТЯГОВЫЙ РАСЧЕТ ВИД 36
2.1 Математическое описание 36
2.2 Тяговый расчет электромобиля 39
Выводы по главе 2. 46
ГЛАВА 4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ 47
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности 47
5.1.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства 47
5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 48
5.2. Производственная безопасность 49
5.2.1. Анализ потенциально возможных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований 49
5.2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов 50
5.3. Экологическая безопасность 55

5.3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду 56
5.3.2. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду 57
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях 57
5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС 57
5.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС 58
ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ 62
5.1. Анализ и оценка научно-технического уровня проекта 62
5.2. Планирование научно-исследовательских работы 63
5.3. Определение трудоемкости работ 65
5.4. Календарный план 67
5.5. Бюджет научно-технического исследования (НТИ) 69
5.6 Бюджет затрат на разработку проекта 69
5.7. Полная заработная плата исполнителей темы 70
5.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) 72
5.9. Расчет прочих затрат 73
Выводы по главе 5. 74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 75
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 75
ПРИЛОЖЕНИЕ А 82

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУТОРНЫХ МАШИН

1. Устройство ВИД

Вентильно–индукторный двигатель (ВИД) – это недорогая, просто сконструированная машина. Поскольку возможна высокоскоростная работа, двигатель подходит для высокоскоростных применений, таких как пылесосы, вентиляторы, бытовая техника и т.д. Как говорилось ранее, недостатком ВИД является необходимость информации о положении вала для правильной коммутации фаз. Кроме того, структура двигателя вызывает шум и пульсации крутящего момента. Чем больше число полюсов, тем больше сглаживается пульсация крутящего момента, но конструкция двигателя и управляющая электроника становятся дороже. Пульсации крутящего момента также могут быть уменьшены с помощью передовых методов управления, таких как профилирование фазного тока.

Структурно, электромеханическую систему с ВИД можно представить следующим образом (рисунок 1.1)

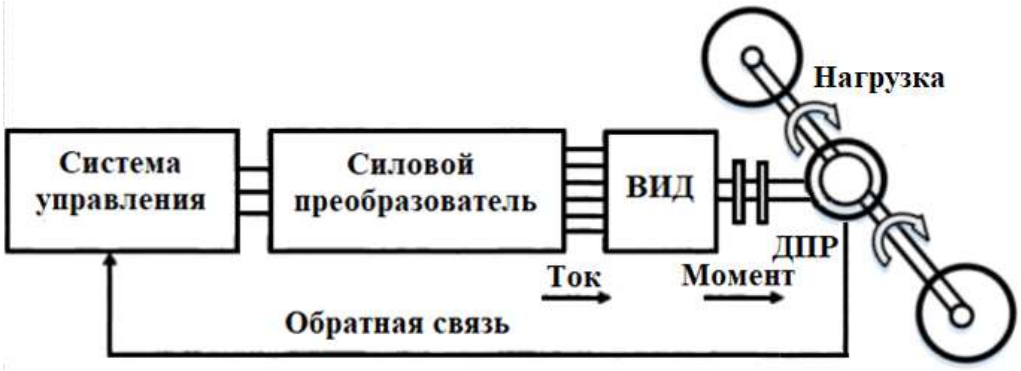

Рисунок 1.1 – Структурная схема ВИД

В состав системы включают: вентильно-индукторный двигатель (ВИД), силовой преобразователь (преобразователь частоты - ПЧ), систему управления и датчик положения ротора (ДПР). ВИД отвечает за преобразование электрической энергии в механическую, ПЧ питает фазы ВИД прямоугольными импульсами напряжения, система управления,

опираясь на сигналы обратной связи, подаваемые ДПР, осуществляет управление всем процессом работы системы.

Статор и ротор вентильно-индукторной машины выполнены шихтованными явнополюсными, причем число полюсов статора и ротора неодинаково: 6/4, 8/6 и т.д. На статоре расположены сосредоточенные обмотки (катушки), соединенные через преобразователь частоты с источником питания постоянного тока. Число фаз обмотки в рассматриваемых машинах, как правило, равно половине числа зубцов статора, поскольку две катушки одной фазы располагаются на диаметрально противоположных зубцах [1].

Например, на рисунке 1.2 приведен пример поперечного сечения индукторной машины с конфигурацией 6/4. Это означает, что статор машины имеет 6 полюсов, а ротор 4, данная конфигурация ИМ имеет 3 фазы напряжения.

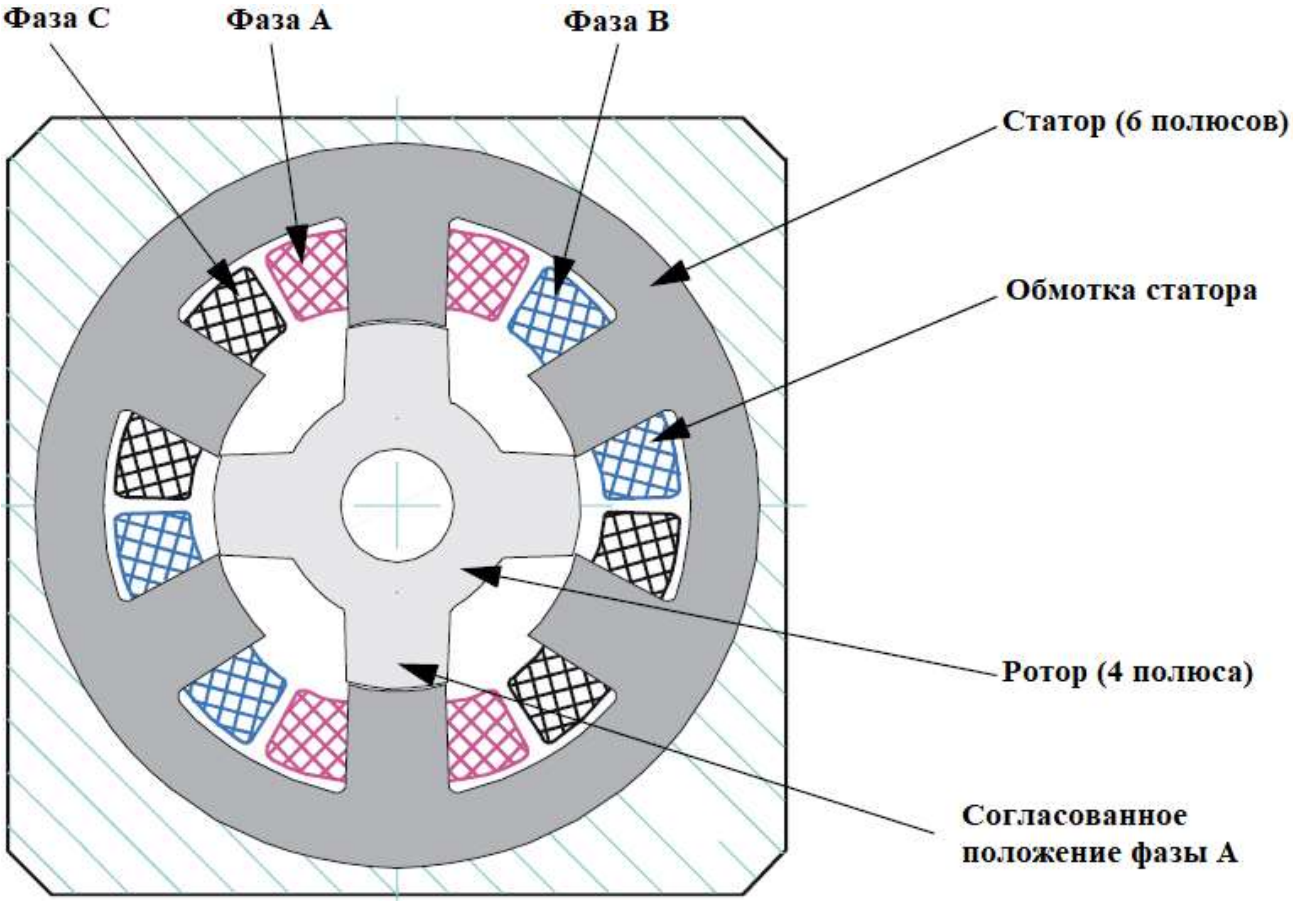

Рисунок 1.2 – Поперечное сечение трехфазной ИМ

Отметим некоторые конструктивные особенности:

– Явнополюсная структура сердечников статора и ротора.

– Относительно небольшое число полюсов. Стоит отметить, что количество полюсов статора превышает количество полюсов ротора.

– Сердечники ротора и статора выполняются из листовой стали.

– Сосредоточенная катушечная обмотка статора может быть как однофазной, так и многофазной.

– В большинстве случаев фаза ИМ имеет две катушки, которые располагаются на диаметрально противоположных полюсах статора. Тем не менее, существуют ИМ, в которых число полюсов статора и ротора удвоено. Например, в четырехфазном исполнении они имеют конфигурацию 16/12. Фаза подобной ИМ имеет две пары катушек, они расположены на полюсах статора таким образом, чтобы их оси были ортогональны.

– В электрическом отношении катушки фазы соединяются последовательно или параллельно, а в магнитном - либо согласно, либо встречно.

– На роторе ИМ отсутствует обмотка.

ВИД приводится в движение импульсами напряжения, связанными с заданным положением ротора. Профиль фазового тока вместе с характеристиками намагничивания определяют генерируемый крутящий момент и, таким образом, скорость двигателя. В связи с этим для работы двигателя требуется электронное управление. Преобразователь частоты, переключающий обмотки статора, может быть реализован в различных конфигурациях, в зависимости от количества фаз двигателя и желаемого алгоритма управления [2]. Конкретная структура преобразователя частоты ВИД определяет свободу управления для отдельной фазы.

Преобразователь частоты с двумя транзисторами и двумя диодами на фазу двигателя является наиболее используемым. Такой преобразователь частоты для 3-фазных ВИД показан на рисунке 1.3. Он обеспечивает

полностью независимое управление отдельными фазами и, таким образом, обеспечивает самую широкую свободу управления. В других вариантах исполнения преобразователей частоты, некоторые из силовых устройств разделяют на несколько фаз, тем самым экономя на стоимости ПЧ, но при этом фазы не могут контролироваться независимо. Следует обратить внимание, что рассматриваемая система ПЧ (рисунок 1.3) является отказоустойчивой (в отличие от ПЧ для асинхронных двигателей переменного тока), поскольку исключает возможность короткого замыкания между фазами.

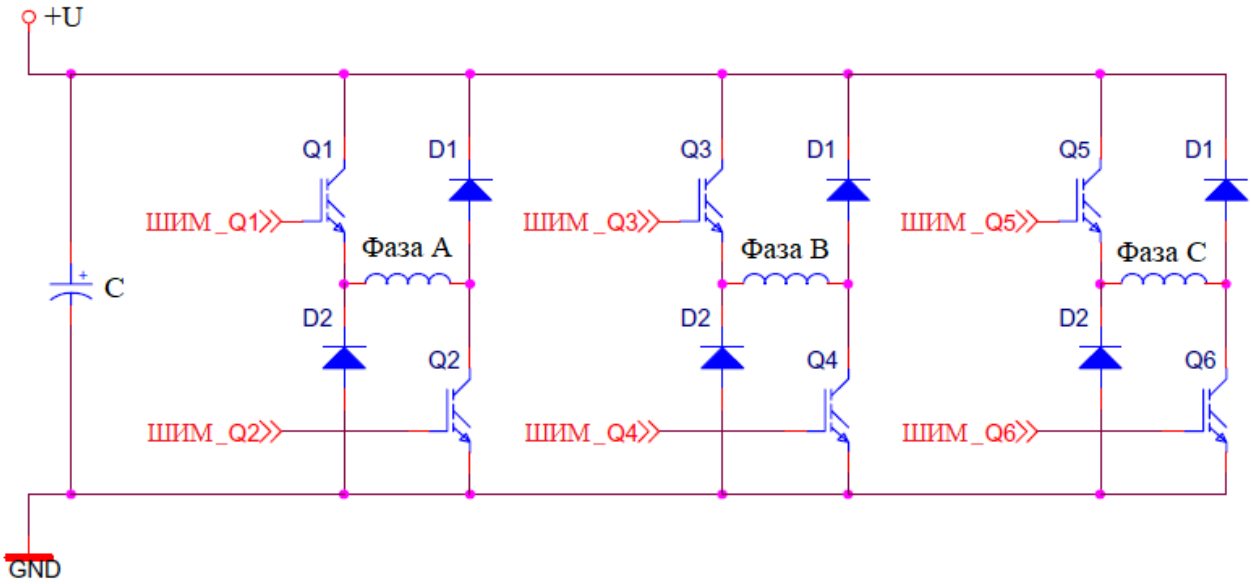

Рисунок 1.3 – Схема преобразователя частоты для 3-х фазного ВИД

На рисунке 1.4 показаны методы ШИМ с мягким и жестким переключением. Управляющие сигналы для верхнего и нижнего транзисторов вышеописанного ПЧ определяют фазное напряжение и, следовательно, фазовый ток. Техника мягкого переключения генерирует меньшие пульсации тока по сравнению с техникой жесткого переключения. Кроме того, она производит меньше акустического шума и меньше электромагнитных помех. Поэтому метод плавного переключения часто является предпочтительным для работы двигателя [3].

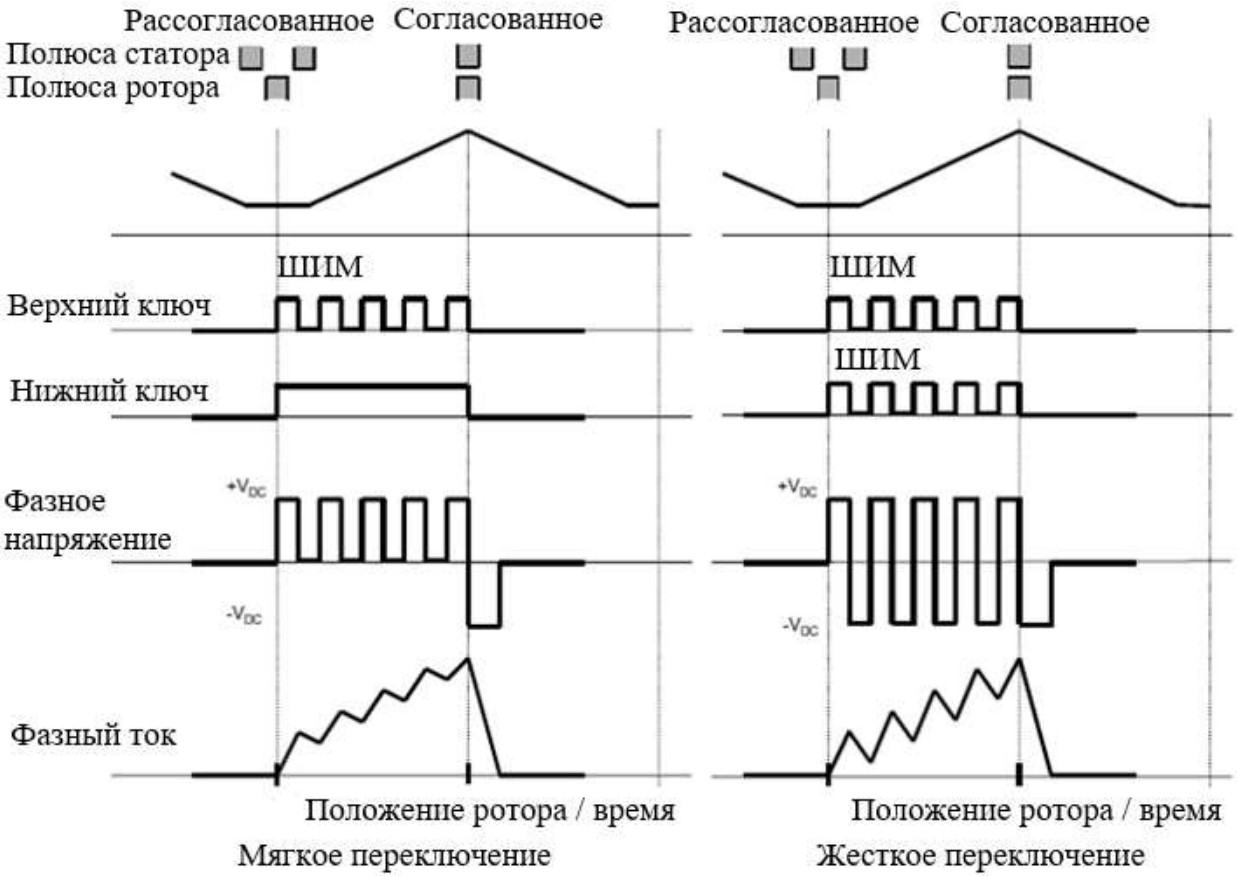

Рисунок 1.4 – Мягкое и жесткое переключение

2. Принцип работы ВИД

Для тягового применения в настоящее время используются различные двигатели переменного тока вместе с соответствующими силовыми преобразователями. Классические двигатели постоянного тока также все еще имеют свою нишу, но уже большей частью по историческим причинам, а не из-а технической целесообразности. Сравнивая различные электродвигатели переменного тока с точки зрения применения в электротяге, можно выделить следующие преимущества и недостатки каждого из типов двигателей [4]:

Асинхронный двигатель относительно прост, надежен, дешев, очень хорошо исследован и освоен в производстве. Имеет проблемы с отводом тепла от ротора, обладает не лучшими массогабаритными показателями.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами имеет лучшие массогабаритные показатели, КПД. Хорошо исследован. Дорог и сложен в

производстве, существует проблема надежного крепления магнитов при больших частотах вращения. Малая зона постоянства мощности, существует риск перенапряжений при отключении преобразователя в зоне искусственного ослабления поля.

Вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением (SRD) – самый простой, дешевый и технологичный в изготовлении, имеет хорошие массогабаритные показатели, большую зону постоянства мощности, хорошо изучен. Так как у него однополярное питание, требует специализированного силового преобразователя. Имеет заметные пульсации момента и вибрацию, с которыми разработчики борются различными методами [5].

Двигатель возбуждается последовательностью импульсов тока, подаваемых на каждую фазу. Следовательно, вращение двигателя происходит при последовательном возбуждении фазных обмоток статора. Импульсы тока должны быть приложены к соответствующей фазе в зависимости от текущего положения ротора, а именно его полюсов. Когда любая пара полюсов ротора точно совпадает с полюсами статора, говорят, что фаза находится в согласованном положении; то есть ротор находится в положении максимальной индуктивности статора (см. рисунок 1). Если межполярная ось ротора находится на одной линии с полюсами статора выбранной фазы, говорят, что фаза находится в рассогласованном положении; то есть ротор находится в положении минимальной индуктивности статора.

Форма фазной индуктивности вентильно-индукторного двигателя является треугольной, с максимальной индуктивностью L_{MAX}, когда фаза ротора находится в согласованном положении, и минимальной индуктивностью, когда фаза в рассогласованном положении. Рисунок 1.4 иллюстрирует идеальную треугольную форму индуктивности всех трех фаз ВИД с выделенной фазой А. Фазы А, В и С электрически смещены на 120° относительно друг друга. Когда соответствующая фаза запитана, интервал

называется углом задержки (θ_{dwell}) [6]. Он определяется углами включения ($\theta_{вкл}$) и выключения ($\theta_{выкл}$).

Когда напряжение подается на фазу статора, двигатель создает крутящий момент в направлении увеличения индуктивности. Когда фаза находится под напряжением с минимальной индуктивностью, ротор перемещается в предстоящее положение с максимальной индуктивностью. Движение определяется характеристиками намагничивания двигателя. Типичная форма тока для постоянного фазового напряжения показана на рисунке 1.5. Для постоянного фазового напряжения фазовый ток имеет свое максимальное значение в положении, когда индуктивность начинает увеличиваться. Это соответствует положению, в котором полюса ротора и статора начинают перекрываться. После отключения фазы, ток фазы падает до нуля.

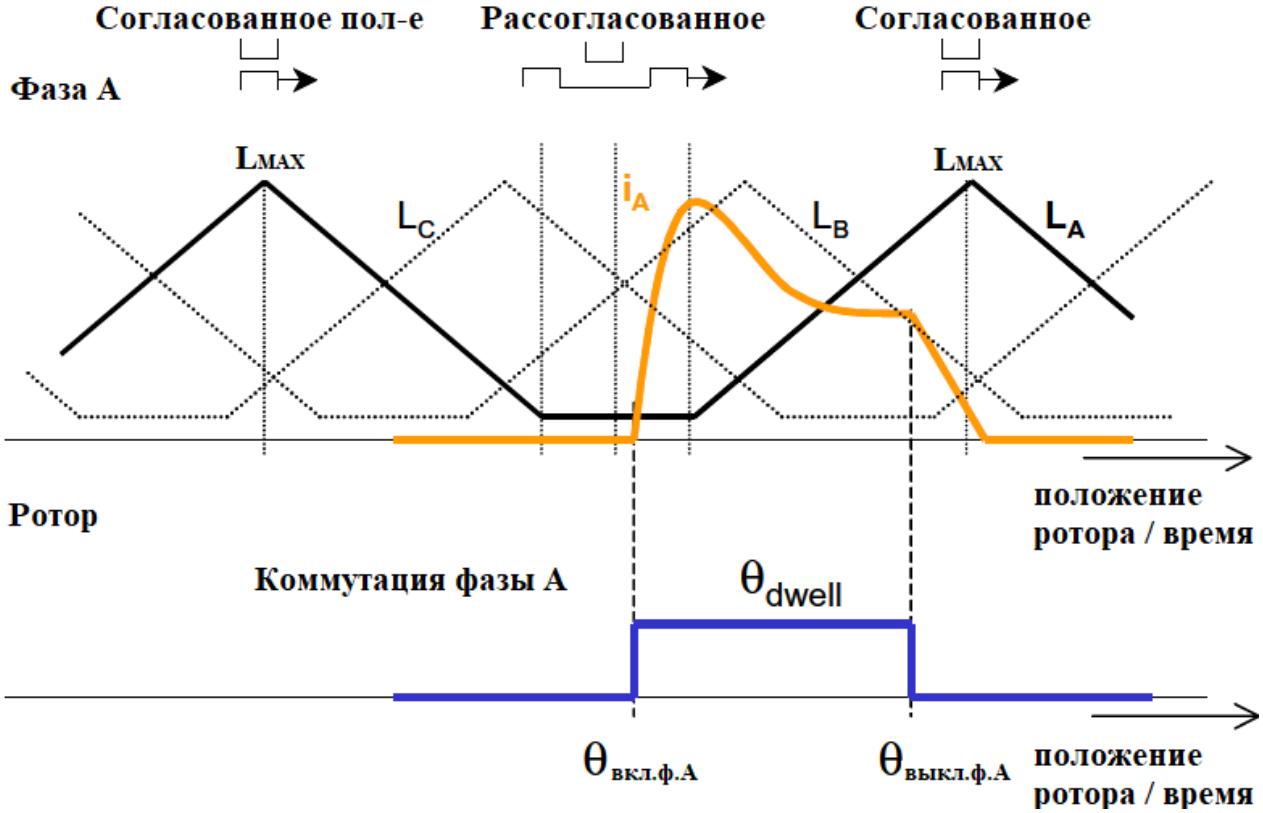

Рисунок 1.5 – Коммутация фазы

Согласованное положение ротора является положением устойчивого равновесия, а рассогласованное – положением неустойчивого равновесия.

Как правило ВИД работает в режиме локального насыщения в зоне перекрытия взаимодействующих полюсов. Поэтому для него характерна зависимость электромагнитных параметров, как от углового положения ротора, так и от фазного тока.

ВИД с числом фаз $m \geq 3$ имеет магнитную систему, выполненную таким образом, что при любом положении ротора найдется группа катушек, при возбуждении которых ротор придет в движение. Это подразумевает отсутствие так называемых “мертвых зон”, в которых ни одна из катушек не имеет возможности создания вращающего момента, что наиболее нежелательно при пуске двигателя. Поэтому необходимо, чтобы число зубцов статора Z_S было не равно числу зубцов ротора Z_R.

На рисунке 1.6 показана картина магнитного поля в поперечном сечении ВИД конфигурации 6/4 при включении (возбуждении) фазы А-х. При этом ротор под действием электромагнитных сил будет вращаться в направлении против часовой стрелки.

Для того чтобы продолжить однонаправленное вращение ротора, необходимо еще до достижения согласованного положения фазы А-х осуществить коммутацию ключей преобразователя частоты, в результате которой фаза А-х должна быть отсоединена от источника питания, а фаза, момент которой стремится продолжить вращение ротора в прежнем направлении, подключена к нему. В данном случае это фаза В-у.

Взаимное положение сердечников статора и ротора, близкое к согласованному положению для фазы А-х, является для фазы В-у близким к рассогласованному положению, это означает, что при подаче на нее напряжения и протекании по ее катушкам тока возникнет отличный от нуля вращающий момент, который будет стремиться повернуть ротор против часовой стрелки.

При последовательной периодической коммутации фаз вращение ротора будет осуществляться со средней угловой скоростью, пропорциональной частоте коммутации.

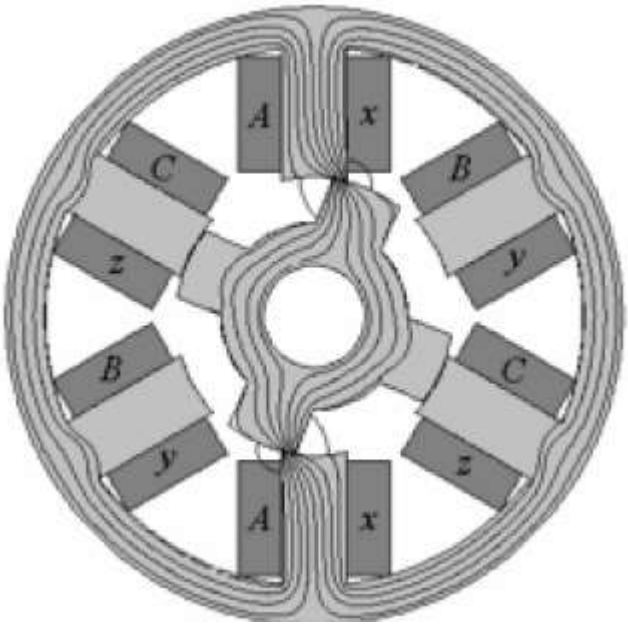

Рисунок 1.6 – Картина магнитного поля в ВИД 6/4

Необходимость коммутации фаз еще до достижения согласованного положения сердечников диктуется желанием получить как можно меньшее значение тока в отключаемой фазе при достижении ее согласованного положения. Дело в том, что после отключения фазы накопленная в ней энергия магнитного поля не может исчезнуть мгновенно. Она расходуется на поддержание постоянства потокосцепления фазы, в силу чего в ней возникает ЭДС самоиндукции, и ток фазы остается отличным от нуля еще некоторое время после ее коммутации. Он замыкается через встречно включенный диод D2, ключ SV2 преобразователя частоты и питающую сеть (рисунок 1.7.б). В конечном итоге ток достигнет нулевого значения (энергия магнитного поля выделится в виде электрических потерь на активных сопротивлениях фазы, встречно включенного диода D2 и ключа SV2). Однако если этот ток будет отличен от нуля в согласованном положении фазы, то при дальнейшем вращении ротора созданное им магнитное поле приведет к возникновению тормозного электромагнитного момента. С целью более быстрого гашения поля в ИМ после отключения фазы на нее подают напряжение обратной полярности (рисунок 1.7.в).

Фаза B-y будет находиться под напряжением до тех пор, пока ротор не достигнет положения, близкого к согласованному. При достижении этого положения от ДПР в систему управления поступит соответствующий сигнал, обработка которого приведет к выдаче управляющего воздействия на преобразователь частоты и переключению фаз B-y и C-z. Цикл повторится.

Таким образом, проводя последовательную коммутацию фаз, можно осуществить однонаправленное вращение ротора ИМ. Последовательность коммутации фаз определяется алгоритмом, заложенным в систему управления. Исходными данными для ее работы являются сигналы о положении ротора, поступающие от ДПР, что исключает возможность неправильной коммутации фаз.

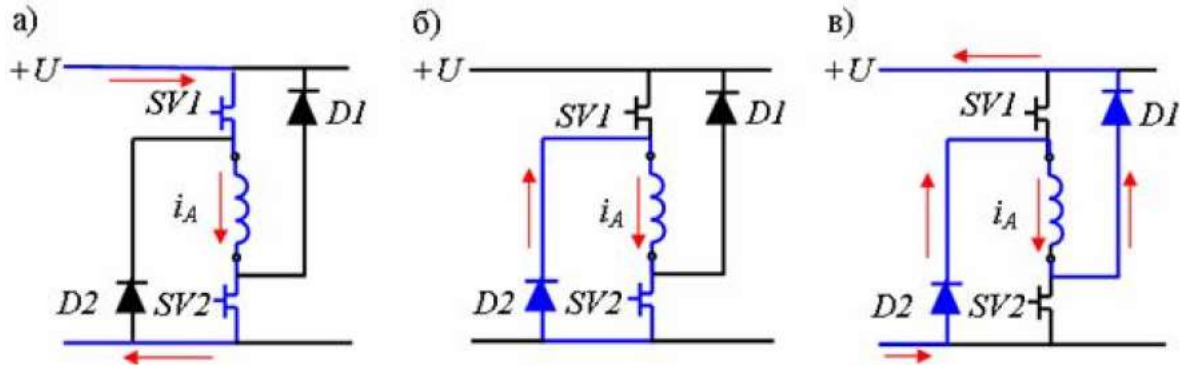

Рисунок 1.7 – Контуры замыкания тока в фазе ВИД на интервале коммутации: а) ключи SV1, SV2 – замкнуты; б) ключ SV1 – разомкнут, SV2 – замкнут; в) ключи SV1, SV2 – разомкнуты; к фазе приложено обратное напряжение;

Угловое положение ротора принято характеризовать углом рассогласования θ. За начало отсчета этого угла разными исследователями принимаются угловые положения, соответствующие или согласованному, или рассогласованному положению сердечников. Этот вопрос не является принципиальным, однако данную особенность необходимо учитывать. В данной диссертации за начало отсчета угла θ принимается согласованное положение сердечников статора и ротора, при котором имеет место

максимальная индуктивность фазы, и, таким образом, при отсутствии рассогласования θ=0°.

3. Контроль напряжения и тока в ВИД

Для ВИД существует ряд методов управления, которые отличаются друг от друга структурой алгоритма управления и оценкой положения ротора. В зависимости от переменных двигателя, которые контролируются, можно выделить два основных метода управления ВИД [6]:

Контроль напряжения, где фазное напряжение является контролируемой переменной.

Контроль тока, где фазный ток является контролируемой переменной.

3.1 Контроль напряжения ВИД

В данном методе, напряжение, приложенное к фазам двигателя, является постоянным в течение всего периода работы фазы. Регулятор скорости непосредственно контролирует напряжение, приложенное к фазе. Регулятор скорости обрабатывает ошибку скорости (разницу между требуемой скоростью и фактической скоростью) и генерирует требуемое фазное напряжение. Фазное напряжение определяется рабочим циклом ШИМ. Фазное напряжение постоянно в течение всего угла работы фазы. Структурно этот метод проиллюстрирован на рисунке 1.8. Профили тока и напряжения показаны на рисунке 1.9. Фазный ток достигает своего пика в том положении, когда индуктивность начинает увеличиваться (полюса статора и ротора начинают перекрываться) из-за изменения в профиле индуктивности.

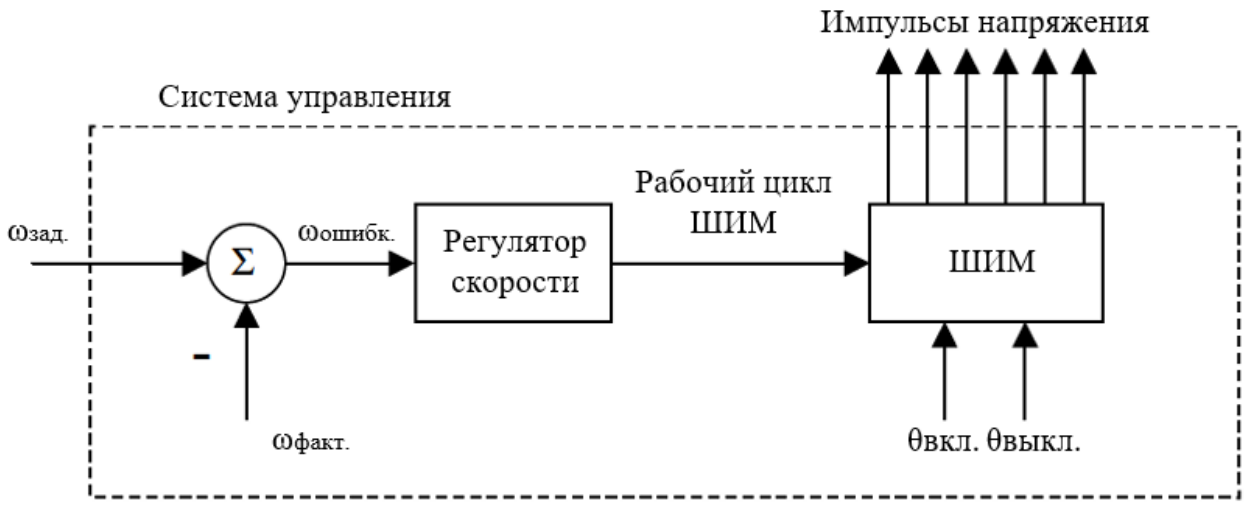

Рисунок 1.8 – Метод контроля напряжения

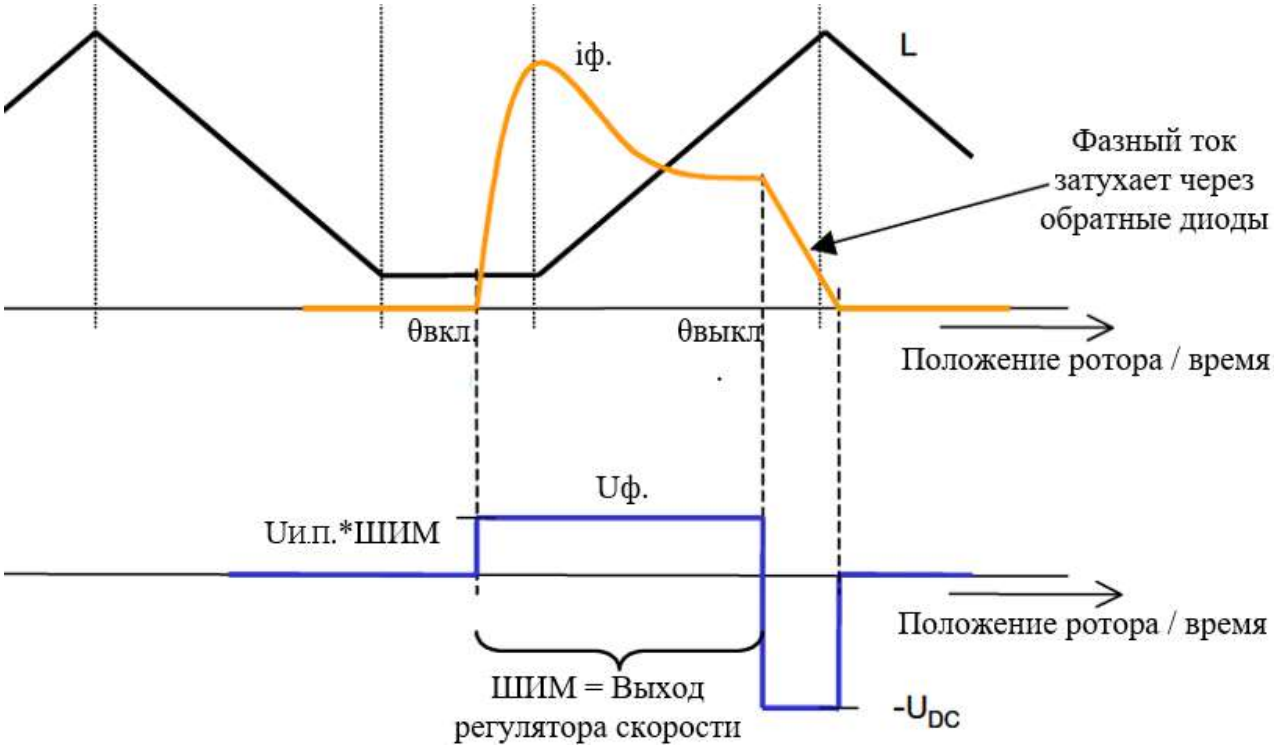

Рисунок 1.9 – Метод контроля напряжения – форма тока и напряжения

3.2 Контроль тока ВИД

В методах управления током, напряжение, подаваемое на фазы двигателя, модулируется для достижения желаемого тока в рабочей фазе. Для большинства методов, требуемый ток постоянен в течение всего периода работы фазы.

Напряжение, подаваемое на фазу, контролируется регулятором тока с внешним контуром управления скоростью. Регулятор скорости обрабатывает ошибку скорости (разницу между требуемой скоростью и фактической скоростью) и генерирует требуемый фазный ток. Регулятор тока оценивает разницу между фактическим и требуемым током фазы и рассчитывает соответствующий рабочий цикл ШИМ. Фазное напряжение определяется рабочим циклом ШИМ. Таким образом, фазное напряжение модулируется со скоростью контура управления током. Этот метод показан на рисунке 1.10.

Обработка регулятора тока должна быть связана с коммутацией фаз. Когда фаза только включается (коммутируется), к фазе применяется коэффициент заполнения 100%. Увеличение фактического тока фазы регулярно сравнивается с заданным током. Как только фактический ток немного превышает заданный ток, регулятор тока начинает отрабатывать ошибку. Регулятор тока контролирует выход рабочего цикла, пока фаза не будет выключена (после коммутации). Процедура повторяется для каждого цикла коммутации двигателя. Формы тока и напряжения показаны на рисунке 1.11. В идеале фазный ток контролируется так, чтобы он соответствовал заданному току.

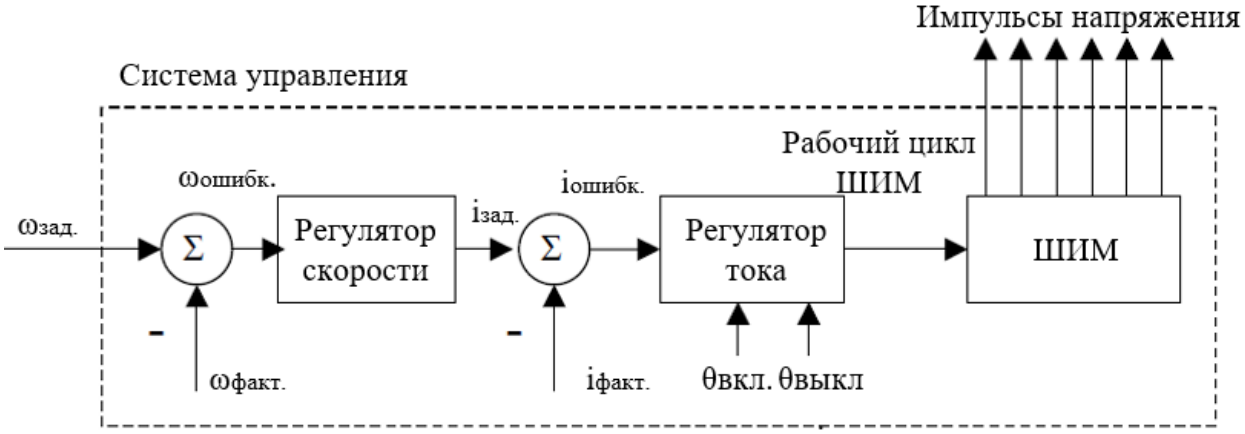

Рисунок 1.10 – Метод контроля тока

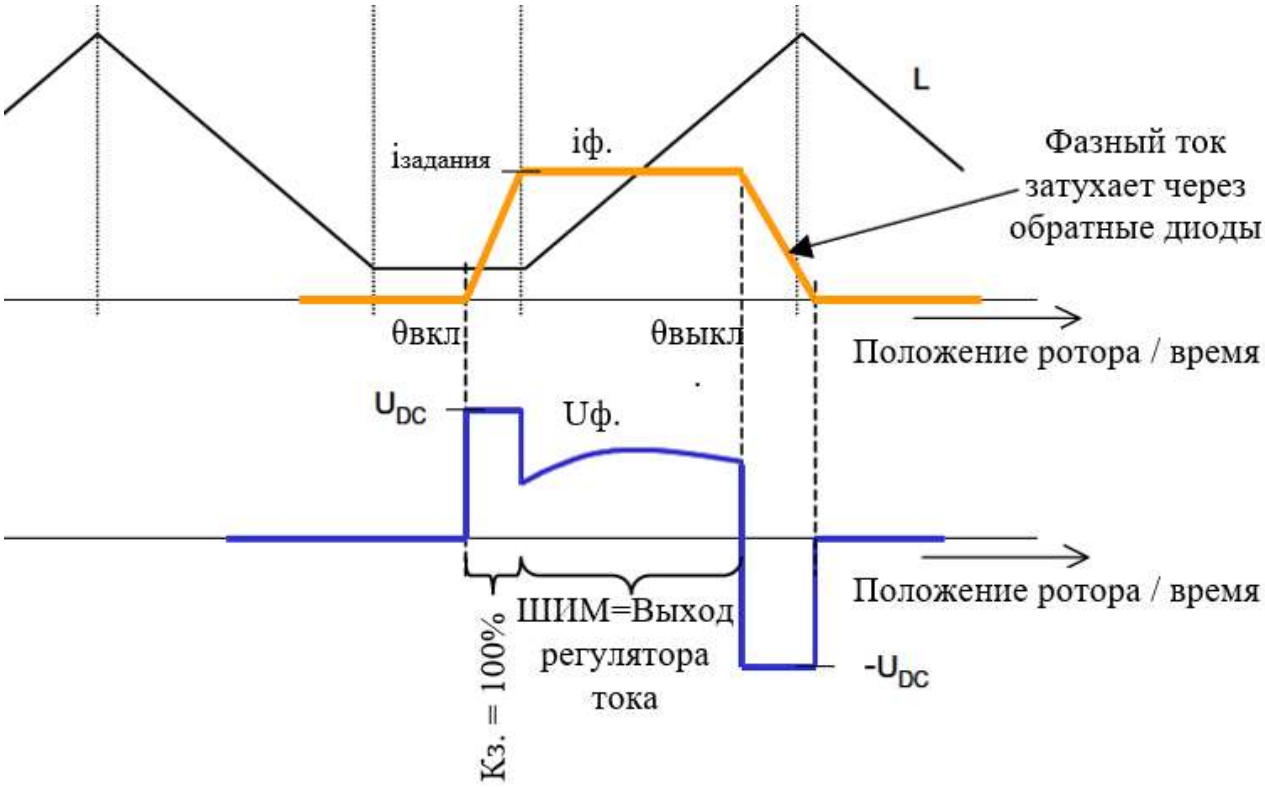

Рисунок 1.11 – Метод контроля тока – формы тока и напряжения

4. Вентильно-индукторные электромеханические преобразователи в современном автомобиле

Одним из направлений деятельности электротехнических и автомобилестроительных компаний становится гибридная установка на базе ВИД, совмещающая в себе характеристики двигателя и генератора, - вентильно-индукторный стартер-генератор (ВИСГ) – устройство двойного назначения, позволяющего производить "холодный пуск" основного двигателя и выполняющего роль обычного генератора при штатной работе основного двигателя. Двигательный режим работы интегрированного в силовую часть стартер-генератора позволяет осуществлять "тихий" запуск двигателя за счет отсутствия зубчатой передачи, повышать скорость запуска и быстро набирать скорость при разгоне. При этом общий вес и габариты двигательной установки остаются примерно на старом уровне, так как стартер-генератор может быть размещен между двигателем и коробкой передач. Наличие стартер-генератора позволяет полностью заглушать

двигатель при кратковременных остановках, даже при остановке на светофоре, что не только экономит топливо, но и способствует снижению выброса в атмосферу продуктов сгорания. Естественно, такая машина должна быть рассчитана на гораздо большую мощность, чем современные автомобильные генераторы. А избыточная электрическая мощность в генераторном режиме может быть использована для перевода на электрический привод всех устройств, получающих сейчас энергию непосредственно от двигателя внутреннего сгорания, что еще больше повысит экономию топлива. Мощности нового генератора хватит для питания дополнительных устройств типа электромагнитного управления клапанами двигателя. Это также способствует экономии топлива и снижению выбросов. Наконец, система со стартер-генератором может использоваться для торможения с преобразованием части кинетической энергии автомобиля в электрическую энергию, запасаемую батареей. Использование в качестве стартер-генератора автономного объекта ВИМ является перспективным направлением, поскольку вентильно-индукторная машина имеет более простую конструкцию, благодаря чему она исключительно надежна, долговечна и технологична; хорошо приспособлена для работы во взрывоопасных и агрессивных средах при повышенной температуре. Важной особенностью вентильно-индукторной машины является отсутствие обмотки на роторе, что существенно повышает ее надежность и снижает стоимость по сравнению с другими видами вентильного электропривода. По экономическим показателям ВИСГ не уступают своим основным конкурентам: приводам на основе синхронной, асинхронной машины и машины постоянного тока. Наличие в структуре машины микропроцессорной системы управления позволяет оптимизировать характеристики двигателя под конкретную нагрузку, что обеспечивает высокие энергетические характеристики системы привода. Основная область применения ВИСГ - энергетические установки, требующие запуска от электрической машины и генерирующие электроэнергию. К данному классу

устройств относятся и двигатели внутреннего сгорания. При этом ВИСГ может заменить не только стартер и генератор, но и выполнять функции маховика, а также позволяет избавиться от некоторых механических передач, что повышает надежность всей системы в целом. Это объясняет существующий повышенный интерес к данному типу электрических машин зарубежных и отечественных автомобилестроительных компаний. За последние годы ими были достигнуты ощутимые результаты в области исследования и проектирования ВИСГ. Однако, несмотря на все усилия, практическое использование этих электрических машин до сих пор весьма ограничено. Трудности, возникающие при проектировании ВИСГ, обусловлены сложностью процессов электромеханического преобразования энергии, происходящего в них. Резко несинусоидальный характер пространственного и временного распределения магнитного поля в отдельных элементах магнитной системы индукторной машины предопределяет принципиальную невозможность использования при проектировании ВИСГ традиционных подходов, основанных на предположении о синусоидальном характере распределении поля и использовании понятия универсальной машинной постоянной. Несмотря на достаточно большое число работ, посвященных исследованию ВИСГ, многие вопросы в области проектирования стартер-генераторов на базе ВИМ остались нерешенными. В частности, не исследованы принципы электромеханического преобразования энергии при совмещении двигательного и генераторного режимов в ВИМ, а также вопросы влияния главных размеров, обмоточных данных и конфигурации магнитной системы на характеристики стартера и генератора. До настоящего времени не существует методики проектирования ВИСГ как единой электрической машины. [7, 8].

5. Тяговый ВИД на карьерных самосвалах

Двигатель ИД-500 производства Бородинского РМЗ предназначен для модернизации тягового электропривода карьерного автосамосвала БелАЗ 75131 Тугнуйского разреза. ИД-500 были установлены на автосамосвал вместо выработавших ресурс тяговых двигателей постоянного тока ЭК-420. Бескорпусный шестифазный ИД-500 был выполнен с учетом габаритных и присоединительных размеров родных тяговых двигателей самосвала. Корпусом для него послужила статорная корзина, испещренная вентиляционными каналами. При модернизации на ВИД, были заменены не только два тяговых двигателя, но и система управления и автоматики, входящая в состав электромеханической трансмиссии БелАЗа. Индукторный электропривод обеспечил тягу при трогании полностью загруженного самосвала, не менее 60 тонн, преодоление при полной загрузке 10-ти градусного уклона, без останова, со скоростью 15 км/ч и обеспечил скорость самосвала при движении с грузом, без уклона, не менее 50 км/ч. Требуемые показатели по скорости и тяги были успешно достигнуты и превышены. Это позволило значительно увеличить грузооборот и производительность комплекса, в котором задействован автосамосвал. Индукторный электропривод проявил себя как высоконадежный и отказоустойчивый, с высоким КПД, и улучшенной ремонтопригодностью. В сопоставимых условиях модернизированный самосвал имеет среднюю скорость движения на 2.9 км/ч выше, удельный расход дизельного топлива на 3 г/т*км ниже, чем БелАЗ 75131 с традиционными мотор-колесами. Водители отмечают плавное трогание с места, более быстрый набор скорость, безотказную и плавную работу вспомогательной тормозной системы, отсутствие резкого торможения при нажатии педали и рпи срабатывании ограничения скорости, что характерно для стандартного привода. В связи с отсутствием щеточного механизма, снижается время ежедневного и планового обслуживания. В

связи с отсутствием пневмоконтакторов снизились отказы по управлению электроприводом [9].

6. Электротрансмиссия с тяговыми вентильно-индукторными двигателясм

Данная тема была рассмотрена в рамках диссертации на соискание ученной степени кандидата технических наук. Диссертационная работа выполнялась в рамках НИР по созданию нового тягового электропривода на базе ВИД НВ для гибридной электротрансмиссии многоколесных транспортных средств. НИР объединил усилия большого количества научных групп, предприятий. Проектирование тяговых двигателей и генератора выполнялось научной группой Русакова А.М. (кафедра «Электротехнические комплексы автономных объектов» НИУ «МЭИ»); проектирование и производство микропроцессорных систем управления, разработка алгоритмов управления двигателями и электротрансмиссией в целом – научной руппой Козаченко В.Ф. (каф. АЭП НИУ «МЭИ», ООО "НПФ Вектор", г. Москва) с непосредственным участием автора диссертации; проектирование и производство силовых тяговых преобразователей – научной группой Острирова В.Н. (кафедра АЭП НИУ «МЭИ», ООО "НПП Цикл+", г.Москва); изготовление опытных образцов двигателей, стенда для их испытания – ОАО «Сарапульский электрогенераторный завод», г. Сарапул; тягового генератора – Тушинский машиностроительный завод, г. Москва; изготовление бортовой системы управления (БИУС) – ООО «Технопрактика», г. Москва; изготовление макетного образца гибридного транспортного средства – ООО «ВИЦ» г. Нижний Новгород; испытания проводились на полигоне Научно-исследовательского и испытательного центра бронетанковой техники (НИИЦ БТ), г. Кубинка.

Разработана структура системы управления тяговым ВИД НВ с зависимым управлением током возбуждения от тока статора, программно имитирующая машину последовательного возбуждения. Структура проверена моделированием в пакете MATLAB/Simulink и подтверждена экспериментальными исследованиями. Получен диапазон работы привода в зоне постоянства мощности равный 10:1.

Разработаны и проверены экспериментально алгоритмы, обеспечивающие согласованную и полностью автономную работу всех устройств электротрансмиссии на основе изменения поведения устройств в зависимости от текущего напряжения в звене постоянного тока.

Разработана компьютерная модель тягового ВИД НВ, учитывающая влияние вихревых токов контура возбуждения, выявленных при испытаниях опытных образцов ВИД НВ.

Синтезированы энергосберегающие алгоритмы, уменьшающие потери в инверторе за счет оптимизации векторной ШИМ. Согласно моделированию и лабораторным испытаниям на макете привода, динамические потери в ключах инвертора уменьшаются на 16%.

Разработано низкоуровневое программное обеспечение для микроконтроллера силового преобразователя, реализующее синтезированные для управления ВИД алгоритмы

Также был разработан комплекс специальных программных средств исследования привода и электротрансмиссии, позволяющей производить параметрирование и осциллографирование работы всех устройсв, входящих в распределенную систему управления электротрансмиссии.

Была разработана методика испытаний тяговых ВИД НВ, структура экспериментального стенда. Проведены экспериментальные исследования разработанной СУ и опытных образцов тяговых двигателей ВИД НВ мощностью 35 кВт. Получена экспериментальная зависимость выходного момента двигателя от тока статора и тока возбуждения, тяговая характеристика, согласующаяся с теоретическим расчетом.

Авторами были проведены ходовые испытания макета 8-и колесного транспортного средства массой 22 тонны на основе электротрансмиссии. Макетный образец показал максимальную скорость 97 км/ч, преодолел поъем 30 градусов, продемонстрировал режим разворота на месте и высокую топливную экономичность. Все заложенные в систему управления идеи себя оправдали, хотя и потребовали некоторых доработок по ходу испытаний [10].

Выводы по главе 1

1. В данной главе проведен анализ вентильно-индукторных машин, его устройства и принципа действия. Также был произведен обзор российской и зарубежной литературы и отмечены существующие решения в области тягового вентильно-индукторного электропривода.

2. Приведены преимущества ВИП перед другими типами электроприводов. Особенности конструкции и независимость между фазами обеспечивают ВИД высокое качество по надежности и безотказности при эксплуатации.

3. Из проведенного обзора следует, что основные исследования были направлены на разработку решений для тягового ВИП в нормальных режимах работы. Исследований, рассматривающих неполнофазные режимы работы тягового ВИП проведено не было.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ И ПРЕДЕЛЬНЫЙ ТЯГОВЫЙ РАСЧЕТ ВИД

2.1 Математическое описание

ИМ - это электромеханический преобразователь энергии. Полученная из сети электрическая энергия преобразовывается в механическую. Энергия отдаётся в нагрузку. Описание этого исходя из второго закона Кирхгофа для электрической цепи. Он описывается балансом энергии и мощностей.

Фаза индукторной машины наделена индуктивным сопротивлением, которое меняется в широком диапазоне.

Закон Кирхгофа выглядит:

$$u + e = iR \tag{1}$$

где u - напряжение сети, i - мгновенное значение тока фазы, e -ЭДС.

Так как $e = -\frac{d\psi}{dt}$, то напряжение:

$$u = iR + \frac{d\psi}{dt} \tag{2}$$

где ψ - потокосцепление обмотки.

Потокосцепление ψ является функцией 2-х переменных: тока i и угла поворота ротора γ:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial i}\cdot\frac{di}{dt} + \frac{\partial\psi}{\partial y}\cdot\frac{d\gamma}{dt} = L\frac{di}{dt} + \Omega\frac{d\psi}{d\gamma} \tag{3}$$

где $L\frac{di}{dt}$ - трансформаторная ЭДС, $L = \frac{\partial\psi}{\partial i}$ - дифференциальная индуктивность фазы, $\Omega = \frac{d\gamma}{dt}$ - угловая частота вращения ротора, $\Omega\frac{\partial\psi}{\partial\gamma}$ - ЭДС вращения.

Эти уравнения показывают нам соотношения, ЭДС, наводимая в обмотках ЭМ, получается из 2-х составляющих. Первая это изменение тока в

обмотке. Второй составляющей является ЭДС вращения. Характер движения, который приводит к ее возникновению, различный.

Исходя из формул (2) и (3) получаем:

$$u = iR + L\frac{di}{dt} + \Omega\frac{d\psi}{d\gamma} \tag{4}$$

В следствии умножения тока на правую и левую часть выражения (4), получим уравнения баланса мощностей:

$$p = p_{эл} + p_{мех} + p_w \tag{5}$$

где $p = ui$ - мгновенная мощность, получаемая от источника питания, $p_{эл} = i^2R$ - мгновенная мощность, выделяющаяся в виде тепла, $p_{мех} = i\Omega\frac{\partial\psi}{\partial\gamma}$ - мгновенная механическая мощность, $p_w = iL\frac{di}{dt}$ - мгновенная мощность, идущая на приращение энергии, запасенной в магнитном поле.

Мгновенная мощность, входящая в уравнение баланса мощностей (5), определяется следующим выражением:

$$p_{мех} = i\Omega\frac{\partial\psi}{\partial\gamma} \tag{6}$$

Механическая мощность определяется произведением частоты вращения ротора на электромагнитный момент:

$$p_{мех} = \Omega M \tag{7}$$

Сравнивая (6) и (7), можно получить выражение для мгновенного электромагнитного момента через производную потокосцепления по углу поворота ротора.

$$M = i\frac{\partial\psi}{\partial\gamma} \tag{8}$$

Выражение для момента можно получить, в том числе использую уравнения баланса энергии.

Для случая вращающейся электрической машины, зависимость механической энергии от электромеханического момента при изменении положения ротора фазы "A" записывается как [11]:

$$\Delta W_A = M_A \cdot \Delta\gamma$$

где: M_A – электромеханический момент двигателя, формируемый фазой "A"; W_A – механическая энергия, формируемая фазой "A" на интервале $\Delta\gamma$ угла поворота ротора, где: γ – угол положения ротора в радианах.

Принимая момент на валу двигателя равным электромагнитному моменту, изменение механической энергии равно изменению магнитной коэнергии $\Delta W'_A$ [12]:

$$W'_A = \frac{1}{2} \cdot L_{dA}(i_A, \gamma),$$

поэтому:

$$M_A = \frac{\Delta W_A}{\Delta\gamma} = \frac{\Delta W'_A}{\Delta\gamma} = \frac{\partial L_{dA}(i_A, \gamma)}{\partial\gamma} \cdot \frac{i_A^2}{2}.$$

Моменты фаз A, B, C ВИД могут быть определены как:

$$\begin{aligned} M_A &= \frac{\partial L_{dA}(i_A, \gamma)}{\partial\gamma} \cdot \frac{i_A^2}{2}; \\ M_B &= \frac{\partial L_{dB}(i_B, \gamma)}{\partial\gamma} \cdot \frac{i_B^2}{2}; \\ M_C &= \frac{\partial L_{dC}(i_C, \gamma)}{\partial\gamma} \cdot \frac{i_C^2}{2}; \end{aligned} \tag{9}$$

Возвращаясь к формуле (8) запишем уравнения моментов для трех фаз:

$$\begin{aligned} M_A &= i_A \frac{\partial\psi_A(i_A, \gamma)}{\partial\gamma}; \\ M_B &= i_B \frac{\partial\psi_B(i_B, \gamma)}{\partial\gamma}; \\ M_C &= i_C \frac{\partial\psi_C(i_C, \gamma)}{\partial\gamma} \end{aligned} \tag{10}$$

Момент двигателя представляет собой сумму моментов (10), формируемых фазами, учитывая, что фазы не зависимы и не связаны

электрическими и магнитными взаимодействиями. Поэтому суммарный момент трехфазного ВИД:

$$M = M_A \cdot (i_A, \gamma) + M_B \cdot (i_B, \gamma) + M_C \cdot (i_C, \gamma) \quad (11)$$

Уравнение движения электропривода:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J}(M - M_c) \quad (12)$$

где: J – суммарный момент инерции электропривода; p - число пар полюсов; ω – частота вращения; Mc – момент сопротивления двигателя; M – электромагнитный момент ВИД.

2.2 Тяговый расчет электромобиля

При проектировании транспортного средства, не зависимо от типа привода, который приводит его в движение, всегда задаются определенными технико-эксплуатационными показателями. Задачей силовых агрегатов является обеспечение их выполнения. Основными эксплуатационными показателями, влияющими на выбор силовых агрегатов, являются: полный вес транспортного средства G; геометрические параметры транспортного средства; количество ведущих колес n; номинальная скорость передвижения $V_{ном}$; номинальный преодолеваемый подъем $i_{ном}$; номинальная сила тяги $F_{ном}$; максимальная скорость передвижения Vмакс; предельный преодолеваемый подъем $i_{пр}$; максимальная сила тяги $F_{макс}$; мощность энергетической установки P [13].

Необходимо учитывать, что данные эксплуатационные показатели должны обеспечиваться при допустимом нагреве силовых агрегатов тяговой системы, заданном удельном расходе энергии и энергетической эффективности.

Базируясь на эксплуатационных параметрах можно определить энергетические и силовые характеристики привода. Стоит оговориться, что в силу мобильности, любое автономное транспортное средство обладает

определенными ограничениями по мощности. Так максимальная мощность двигателя внутреннего сгорания, генератора, аккумуляторной батареи ТС всегда определенная величина. По этой причине предельная тяговая характеристика ТС должна соответствовать постоянству мощности [14]. Реализуемая мощность ТС равна произведению силы тяги на скорость, соответственно тяговая характеристика транспортного средства в идеальном случае соответствует закону равноплечей гиперболы [15].

Важным преимуществом вентильно-индукторного двигателя является то, что он обладает тяговой механической характеристикой, характеристикой постоянной мощности [16]. Несомненно, другие типы двигателей, например, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, синхронный двигатель на постоянных магнитах, могут реализовать заданную характеристику. Но при их применении скорее всего придется использовать электрическую машину завышенной мощности, как это сделано в автомобилях Tesla, где используется асинхронный двигатель. Это несомненно приведет к ухудшению массогабаритных показателей системы электропривода [17].

В силу вышеизложенного одной из первоочередных задач является определение мощности ВИД и предельной тяговой характеристики ТС. Для определения мощности ВИД рассматривают уравнение тягового баланса [18]. Тяговый баланс ТС можно представить выражением:

$$F_k = F_\Sigma = F_f + F_\alpha + F_w + F_J \tag{13}$$

где F_f – сила сопротивления качению, F_α – сила сопротивления уклона, F_w – сила сопротивления воздушной среды, F_J – сила инерции.

$$F_f = f \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha\,, \tag{14}$$

где m – масса ТС, g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения, f – коэффициент сопротивления качению, α – угол уклона дорожного полотна.

$$F_f = \pm m \cdot g \cdot \sin\alpha \tag{15}$$

$$F_w = 0{,}5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \tag{16}$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, ρ = 1,2 км/м^3 – плотность воздуха, S – площадь миделя.

$$F_J = m \cdot \frac{dv}{dt}, \tag{17}$$

где dv/dt – ускорение ТС.

Если принять, что

$$\psi = f(\cos\alpha + \sin\alpha), \tag{18}$$

$$K_w = \frac{0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S}{m \cdot g}, \tag{19}$$

$$K_J = \frac{1}{g}, \tag{20}$$

$$G = m \cdot g, \tag{21}$$

то уравнение тягового баланса примет вид

$$F_K = F_\Sigma = G \cdot (\psi + K_w \cdot v^2 + K_j \frac{dv}{dt}). \tag{22}$$

В таком случае уравнение мощностного баланса можно представить, как

$$P_K = F_K \cdot v = G \cdot (\psi + K_w \cdot v^2 + K_j \frac{dv}{dt}) \cdot v, \tag{23}$$

где P_K – суммарная тяговая мощность, подводимая к ведущим колесам.

На основе выражения (22) можно построить предельную тяговую характеристику. Для этого необходимо определить ключевые точки, которые задаются тремя характерными участками (рисунок 2.1). Отрезок AB характеризует максимальное тяговое усилие. Точка B определяет граничную скорость максимального тягового усилия. Точка D определяет наибольшее тяговое усилие при максимальной скорости. Участок BD определяется выбранной мощностью автономной установки. Точка C определяется максимальным тяговым усилием при номинальном угле подъема и номинальной скорости. Точка C предопределяет энергетическую эффективность системы. В этой точке система привода должна реализовать

максимальный КПД. Поэтому номинальная скорость должна соответствовать скорости преобладающей при заданных эксплуатационных условиях [19].

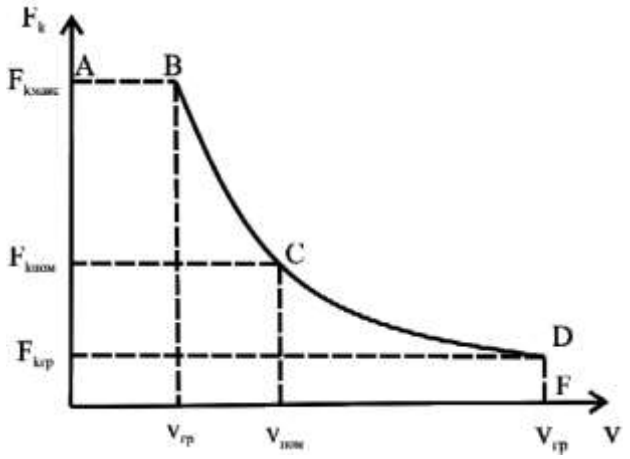

Рисунок 2.1 – Предельные тяговые характеристики транспортного средства

Мощность, масса, длина и ширина электромобиля определены техническим заданием. Зададим дополнительные параметры, соответствующие типовому автомобилю С класса и сведем их в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры электромобиля

Максимальная скорость автомобиля, [м/с]	50
Максимальная скорость автомобиля, [км/ч]	180
Минимальная масса автомобиля, [кг]	1100
Полная масса автомобиля, [кг]	1600
Длина автомобиля, [м]	4,4
Ширина автомобиля, [м]	1,65
Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,3
Коэффициент сопротивления качению	0,01
Площадь миделя,]м^2]	2
Номинальный угол подъема, [град]	15
Мощность, [кВт]	60
Удельная мощность, [кВт/т]	54,5

За основу был принят расчет [19]. Максимальная мощность определяется как:

$$P_{макс} = \frac{G \cdot (f + K_w \cdot V_{макс}^2) \cdot V_{макс}}{\eta_\Sigma}, \quad (24)$$

где f и K_w –коэффициенты сопротивления движению, η_Σ – суммарный КПД системы, примем η_Σ = 0,84.

И соответственно тяговую характеристику ТС $F(v)$ определяют, как:

$$F(v) = \frac{P_{макс} \cdot \eta_\Sigma}{v}. \quad (25)$$

Определим из выражения (24) максимальную скорость электромобиля при минимальной массе:

$$V_{макс0} = 50 \text{ м/с}.$$

При полной массе:

$$V_{макс} = 43,7 \text{ м/с}.$$

Определим ключевые точки тяговой характеристики для рассматриваемого электромобиля. Используя уравнения (22)–(25) так же можно найти номинальную скорость электромобиля. Для начала определим параметры для движения без какого-либо подъема дорожного покрытия. Тогда решив уравнение (26) найдем номинальную скорость движения.

$$\frac{P_{макс} \cdot \eta_\Sigma}{v_{ном}} = \frac{G \cdot (f + K_w \cdot V_{ном}^2) \cdot V_{ном}}{\eta_\Sigma} \quad (26)$$

Расчетная номинальная скорость для минимальной массы:

$$V_{ном} = 15 \text{ м/с}.$$

Расчетная номинальная скорость для полной массы:

$$V_{ном} = 13 \text{ м/с}.$$

Далее, рассчитаем номинальную скорость для номинального угла подъема. Тогда среднюю расчетную скорость для номинального угла подъема найдем из равенства (27).

$$\frac{P_{макс} \cdot \eta_{\Sigma}}{v_{ном}} = \frac{G \cdot (f(\cos\alpha + \sin\alpha) + K_w \cdot V_{ном}^2) \cdot V_{ном}}{\eta_{\Sigma}} \quad (27)$$

Расчетная номинальная скорость для минимальной массы:

$$V_{ном} = 14,5 \text{ м/с.}$$

Расчетная номинальная скорость для полной массы:

$$V_{ном} = 12,6 \text{ м/с.}$$

Далее будем рассматривать только полную массу, так как это больше соответствует реалиям движения. Рассчитаем вторую координату для точки С (рисунок 1.12), предельное тяговое усилие, для номинальной скорости в соответствии с (22):

$$F_{кном} = 5902 \text{ Н.}$$

Так как максимальная скорость задана (таблица 2.1), то предельное тяговое усилие при максимальной скорости и соответственно при отсутствии какого-либо уклона дороги:

$$F_{кгр} = 1466 \text{ Н.}$$

Точка А определяется максимальным усилием, усилие определяется сцеплением движителя (колеса) с грунтом. Определим максимальное усилие по формуле (28)

$$F_{k\max} = f \cdot m \cdot g = 0,8 \cdot 1600 \cdot 9,81 = 12556 \text{ Н.} \quad (28)$$

где f – коэффициент сцепления движителя с дорогой. Примем $f = 0,8$ для случая сцепления колеса с сухим асфальтом.

Зная максимальную мощность электромобиля определим координату скорости точки В по (25).

$$V_{гр} = \frac{P_{\max} \cdot \eta_{\Sigma}}{F_{k\max}} = \frac{60000 \cdot 0,84}{12556} = 4 \text{ м/с.}$$

Таким образом была получена предельная тяговая характеристика электромобиля, представленная на рисунке 2.2

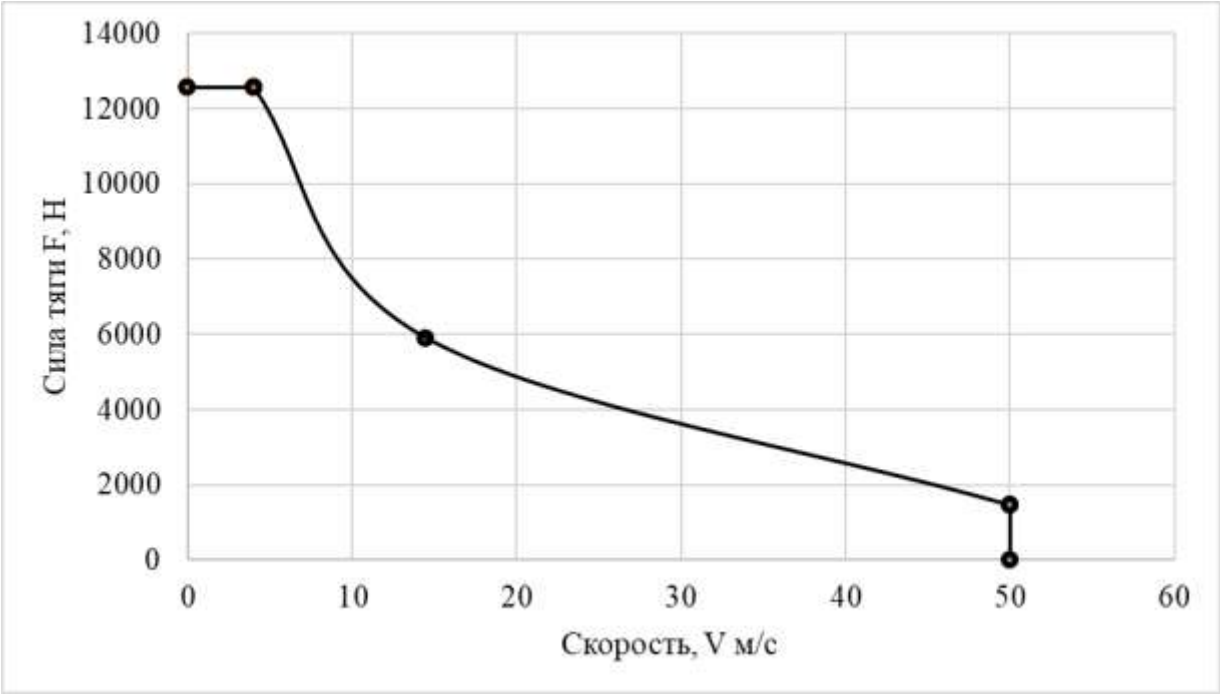

Рисунок 2.2 – Расчитанная предельная тяговая характеристика электромобиля

Расчет предельной тяговой характеристики осуществлен для электромобиля с параметрами, указанными в таблице 2.1. Тяговая характеристика было построена по 4-м характерным точка (рисунок 2.1). Обозначим ключевые точки: электромобиль развивает предельное тяговое усилие в F = 1466 *Н.* при заданной максимальной скорости в V = 50 *м/с* или V = 180 *км/ч*. Второй характерной точкой является точка с тяговым усилием F = 5902 *Н.*, которая определяется максимальным тяговым усилием при номинальном угле подъема 15 град и номинальной скорости V = 12.6 *м/с* (V = 45 *км/ч*). Теоретическое, максимально возможное тяговое усилие, которое может быть передано колесам электромобиля при максимальной массе электромобиля m = 1600 *кг*, составило $F_{k\max} = 12556$ *Н.* Граничной скоростью максимального тягового усилия является $V_{гр} = 4$ *м/с* или $V_{гр} = 14.4$ *км/ч*.

Выводы по главе 2.

1. В данной главе было произведено математического описание ВИД. Математически, момент развиваемый ВИД, был определен 2-мя способами: из уравнения баланса мощностей, через производную потокосцепления по углу поворота ротора и через уравнение магнитной коэнергии, согласно [12].

2. Была рассчитана предельная тяговая характеристика электромобиля. За основу был взят расчет [19], по мнению автора, наилучшим вариантом предельной тяговой характеристики является равноплечая гипербола, которая соответствует характеристике постоянства мощности. Для построения предельной тяговой характеристики согласно [19] были определены ключевые точки гиперболы, в соответствии с эксплуатационными показателями транспортного средства. Расчет был произведен в соответствии с техническим заданием для типового городского автомобиля С класса.

ГЛАВА 4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Процесс работы заключается в анализе методов и принципов управления вентильно-индукторным электроприводом (ВИП), построение имитационной модели управляемого вентильно-инукторного электропривода для исследования различных нагрузочных режимов работы (разгон, торможение, движение с постоянной скоростью). Результатом работы будет представление модели объекта исследования, анализ графиков на адекватную работоспособность, составление рекомендаций касательно работы.

Технологический процесс разработки и проверки системы управления вентильно-индукторными двигателями заключается в следующем:

- Ознакомление и анализ литературы (статьи, диссертации, учебные пособия и монографии) по данной тематике. На основании этого пункта создается и строится математическая модель вентильно-индукторного электропривода в наиболее применимой форме для дальнейших исследований.
- создание метода разработки системы управления для ВИП;
- компьютерное моделирование системы управления;
- анализ полученных результатов моделирования;
- анализ полученных результатов проверки.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства

Согласно ТК РФ, N 197 -ФЗ работник аудитории 126, 8 корпуса ТПУ имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;

- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочее место в аудитории 126, 8 корпуса ТПУ должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Оно должно занимать площадь не менее 4,5 м², высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м3 на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм.Оптимальные размеры поверхности стола 1600 х 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см. Так же рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Рабочий

стул должен иметь дизайн, исключающий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте.

Рабочее место сотрудника аудитории 126, 8 корпуса ТПУ соответствует требованиям ГОСТ 12.2.032-78.

5.2. Производственная безопасность

Разрабатываемая имитационная модель электропривода с ВИД подразумевает использование электронной вычислительной машины (ЭВМ), с точки зрения социальной ответственности целесообразно рассмотреть вредные и опасные факторы, которые могут возникать при разработке имитационной модели или работе с оборудованием, а также требования по организации рабочего места.

5.2.1. Анализ потенциально возможных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Для выбора факторов использовался ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [28]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в виде таблицы:

Таблица 4.1. Опасные и вредные факторы при выполнении работ по разработке программного модуля

Источник фактора, наименование вида работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1) Разработка имитационной модели электропривода с ВИД.	1. Повышенный уровень электромагнитных полей [2, 17]; 2. Неудовлетворительная освещенность рабочей	1. Электрический ток 2. Пожаровзрывоопасность	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 СанПиН 2.2.2.542-96

2) Работа с ЭВМ	зоны; [2,3, 17]; 3. Повышенный уровень шума на рабочем месте; [2, 17]; 4. Неудовлетворительный микроклимат [2, 17]; 5. Повышенный уровень напряженности электростатического поля [2, 17].		СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 СанПиН 2.2.4.1191-03 СП 52.13330.2011 СанПиН 2.2.4.548–96 СН 2.2.4/2.1.8.562–96 ГОСТ 30494-2011

5.2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов

При разработке имитационной модели электропривода с в аудитории 126, 8 корпуса ТПУ, основным источником потенциально вредных и опасных производственных факторов (ОВПФ) является ЭВМ, возможность поражения электрическим током. Использование ЭВМ может привести к наличию таких вредных факторов, как повышенный уровень статического электричества, повышенный уровень электромагнитных полей, повышенная напряженность электрического поля.

К основной документации, которая регламентирует вышеперечисленные вредные факторы относится СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к электронно-вычислительным машинам и организации работы":

ЭВМ должны соответствовать требованиям настоящих санитарных правил и каждый их тип подлежит санитарно-эпидемиологической

экспертизе с оценкой в испытательных лабораториях, аккредитованных в установленном порядке [30].

Допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП)в аудитории 126, 8 корпуса ТПУ [31], создаваемых ЭВМ, не должны превышать значений [32], представленных в таблице 4.2:

Таблица 4.2: Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ЭВМ

Наименование параметров	**Диапазон**	**ДУ ЭМП**
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Уровни ЭМП, ЭСП в аудитории 126, 8 корпуса ТПУ, перечисленные в таблице 5.2. соответствуют нормам.

Электробезопасность:

Для предотвращения поражения электрическим током, где размещаются рабочее место с ЭВМ в аудитории 126, 8 корпуса ТПУ, оборудование должно быть оснащено защитным заземлением, занулением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации [ЗЗ]. Для предупреждения электротравматизма необходимо проводить соответствующие организационные и технические мероприятия: 1) оформление работы нарядом или устным распоряжением; 2) проведение инструктажей и допуск к работе; 3) надзор во время работы. Уровень напряжения для питания ЭВМ в данной аудитории 220 В. По опасности поражения электрическим током помещение 126, 8 корпуса ТПУ относится к первому классу – помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с

токонепроводящими полами, с температурой 18-20°, с влажностью 40-50%) [33].

Основными непосредственными причинами электротравматизма, являются: 1) прикосновение к токоведущим частям электроустановки, находящейся под напряжением; 2) прикосновение к металлическим конструкциям электроустановок, находящимся под напряжением; 3) ошибочное включение электроустановки или несогласованных действий обслуживающего персонала; 4) поражение шаговым напряжением и др.

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ, являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Наличие таких средств защиты предусмотрено в рабочей зоне. В целях профилактики периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности.

Не следует размещать рабочие места с ЭВМ вблизи силовых кабелей, технологического оборудования, создающего помехи в работе ЭВМ [32].

Освещение:

В аудитории 126, 8 корпуса ТПУ имеется естественное (боковое двухстороннее) и искусственное освещение. Рабочие столы размещены таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ЭВМ осуществляется системой общего равномерного освещения. В аудитории 126, 8 корпуса, в случаях работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов).

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк [35]. Освещение не должно создавать

бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк [35].

В качестве источников света применяются светодиодные светильники или металлогалогенные лампы (используются в качестве местного освещения) [35].

Таблица 4.4. Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения помещений жилых зданий [35]

Помещение	Рабочая поверхность и плоскость плоскость нормирования КЕО и освещенности и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение		
		КЕО $e_н$, %		КЕО $e_н$, %				
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	Освещенность рабочих поверхностей, лк	Показатель дискомфорта М, не более	Коэффициент пульсации $К_П$, %, не более
Кабинеты	Г-0,0	3,0	1,0	1,8	0,6	300	-	≤5%(работа с ЭВМ) ≤20%(при работе с документацией)

Согласно [37] освещение в аудитории 126, 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

Шум

При работе с ЭВМ в аудитории 126, 8 корпуса ТПУ характер шума – широкополосный с непрерывным спектром более 1 октавы.

Таблица 4.5. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест [8]

N пп.	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (дБА)
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Творческая деятельность, руководящая работа с повышенными требованиями, научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение, врачебная деятельность. Рабочие места в помещениях дирекции, проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, приема больных в здравпунктах	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Согласно [37] уровень шума в аудитории 126, 8 корпуса ТПУ не более 80 дБА и соответствует нормам.

Микроклимат

Для создания и автоматического поддержания в аудитории 126, 8 корпуса ТПУ независимо от наружных условий оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное

время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха. Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического регулирования поддерживает в помещении заданные параметры воздушной среды.

Аудитория 126, 8 корпуса ТПУ является помещением I б категории. Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.) [37]

Таблица 4.6. Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	**Катег. работ по уровню энер-гозатрат**	**Температура воздуха, °С**	**Температура поверхностей, °С**	**Относ. влажность воздуха, %**	**Скорость движения воздуха, м/с**
Холодный	Iб	21-23	20-24	40-60	0,1
Теплый	Iб	22-24	21-25	40-60	0,1

Таблица 4.7. Допустимые величины интенсивности теплового облучения

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, $Вт/м^2$, не более
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

В аудитории проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ЭВМ.

Согласно [37] микроклимат аудитории 126, 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

5.3. Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются

предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.

5.3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Имитационная модель электропривода с ВИД – является программным алгоритмом и не наносит вреда окружающей среде. С точки зрения влияния на окружающую среду можно рассмотреть влияние ЭВМ при его утилизации.

Большинство компьютерной техники содержит бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы. Это очень вредные вещества, которые не должны попадать на свалку после истечения срока использования, а должны правильно утилизироваться.

Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:

1. На первом этапе необходимо создать комиссию, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники, каждый образец рассматривается с технической точки зрения.
2. Разрабатывается приказ о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.
3. Составляется акт утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.
4. Формируется приказ на утилизацию. Все сопутствующие расходы должны отображаться в бухгалтерии.
5. Утилизацию оргтехники обязательно должна осуществлять специализированная фирма.

6. Получается специальная официальной формы, которая подтвердит успешность уничтожения электронного мусора.

После оформления всех необходимых документов, компьютерная техника вывозится со склада на перерабатывающую фабрику. Все полученные в ходе переработки материалы вторично используются в различных производственных процессах. [35]

5.3.2. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Процесс исследования представляет из себя работу с информацией, такой как технологическая литература, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также разработка математической модели с помощью различных программных комплексов. Таким образом процесс исследования не имеет влияния негативных факторов на окружающую среду.

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

Согласно ГОСТ Р 22.0.02-94 ЧС - это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, эпизоотией (болезнь животных), эпифитотией (поражение растений), применением возможным противником современных средств поражения и приведшее или могущее привести к людским или материальным потерям".

С точки зрения выполнения проекта характерны следующие виды ЧС:

1. Пожары, взрывы;
2. Внезапное обрушение зданий, сооружений;
3. Геофизические опасные явления (землетрясения);
4. Метеорологические и агрометеорологические опасные явления;

Так как объект исследований представляет из себя имитационную модель, работающий в программном приложении, то наиболее вероятной ЧС в данном случае можно назвать пожар в аудитории с ЭВМ

Согласно Федеральному закону № 123-ФЗ от 22.07.2008 года «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [11] степень огнестойкости зданий принимается в зависимости от их назначения, категории по взрывопожарной и пожарной опасности, этажности, площади этажа в пределах пожарного отсека.

Причинами возникновения пожара могут быть:

– неисправности электропроводки, розеток и выключателей, которые могут привести к короткому замыканию или пробою изоляции;

– использование поврежденных (неисправных) электроприборов;

– использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;

– возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;

– возгорание здания вследствие внешних воздействий;

– неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

Согласно СП 5.13130.2009 в системах воздуховодов общеобменной вентиляции, воздушного отопления и кондиционирования воздуха защищаемых помещений следует предусматривать автоматически закрывающиеся при обнаружении пожара воздушные затворы (заслонки или противопожарные клапаны).

5.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

При проведении исследований наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в помещении 126, 8 корпуса ТПУ. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и

противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Основные источники возникновения пожара:

1) Неработоспособное электрооборудование, неисправности в проводке, розетках и выключателях. Для исключения возникновения пожара по этим причинам необходимо вовремя выявлять и устранять неполадки, а также проводить плановый осмотр электрооборудования.
2) Электрические приборы с дефектами. Профилактика пожара включает в себя своевременный и качественный ремонт электроприборов.
3) Перегрузка в электроэнергетической системе (ЭЭС) и короткое замыкание в электроустановке.

Под пожарной профилактикой понимается обучение пожарной технике безопасности и комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожаров.

Пожарная безопасность обеспечивается комплексом мероприятий:

- обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);
- пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;
- обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

В соответствии с ТР «О требованиях пожарной безопасности» для административного жилого здания требуется устройство внутреннего противопожарного водопровода.

Согласно ФЗ-123, НПБ 104-03 «Проектирование систем оповещения людей о пожаре в зданиях и сооружениях» для оповещения о возникновении пожара в каждом помещении должны быть установлены дымовые оптико-электронные автономные пожарные извещатели, а оповещение о пожаре должно осуществляться подачей звуковых и световых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей.

Аудитория 126, 8 корпуса ТПУ оснащена первичными средствами пожаротушения: огнетушителями ОУ-3 1шт., ОП-3, 1шт. (предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники, класс пожаров А, Е.).

Таблица 4.8 – Типы используемых огнетушителей при пожаре в электроустановках

Напряжение, кВ	Тип огнетушителя (марка)
До 1,0	порошковый (серии ОП)
До 10,0	углекислотный (серии ОУ)

Согласно НПБ 105-03 помещение, предназначенное для проектирования и использования результатов проекта, относится к типу П-2а.

Таблица 4.9. Категории помещений по пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
П-2а	Зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества в количестве, при котором удельная пожарная нагрузка составляет не менее 1 мегаджоуля на квадратный метр.

В 8-м корпусе ТПУ имеется пожарная автоматика, сигнализация. В случае возникновения загорания необходимо обесточить электрооборудование, отключить систему вентиляции, принять меры тушения (на начальной стадии) и обеспечить срочную эвакуацию студентов и сотрудников в соответствие с планом эвакуации.

Рисунок 4.1. План эвакуации людей на случай пожара.

ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В рамках данной главы исследовательской работы рассматривается экономическая целесообразность исследования вентильного электропривода электромобиля. Определяется перспективность и успешность научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе проектирования. Построение таких электроприводов невозможно без проведения экспериментальных исследований, разрабатываемых установок. В связи с этим и возникает задача разработки автоматизированных систем управления технологическим процессом проведения эксперимента. Электрический транспорт является перспективным направлением, который в обозримом будущем будет являться основным видом транспорта.

5.1. Анализ и оценка научно-технического уровня проекта

Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности проекта необходимо: рассчитать коэффициент научно-технического уровня. Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок, в котором каждому из признаков НТУ присваивается определенное число баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме балов по всем показателям с учетом весовых характеристик. Общая оценка рассчитывается по ниже приведенной формуле.

$$НТУ = \sum_{i=1}^{n} k_i \cdot П_i$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;
$П_i$ – количественная оценка i – го признака.

Таблица 5.1 – Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0.7

Теоретический уровень	0.5
Возможность реализации	0.3

Таблица 5.2 – Шкала оценки новизны

Баллы	**Уровень**
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
8-10	Сравнительно высокий НТУ
11-14	**Высокий НТУ**

Таблица 5.3 – Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	**Баллы**
Установка законов, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами	8
Разработка способа (алгоритм, вещество, устройство, программы)	**6**
Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации)	2
Описание отдельных факторов (вещества, свойств, опыта, результатов)	0.5

Таблица 5.4 – Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации	**Баллы**
В течение первых лет	**10**
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
Масштабы реализации	**Баллы**
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль	4
Народное хозяйство	**10**

$$k_1=0.7,\ П_1=6,\ k_2=0.5,\ П_2=6,$$
$$k_3=0.3,\ П_3=10,\ k_4=0.3,\ П_4=10,$$
$$НТУ = 0.7 \cdot 6 + 0.5 \cdot 6 + 0.3 \cdot 10 + 0.3 \cdot 10 = 13.2$$

По полученным результатам расчета можно сделать вывод, что данный проект имеет высокий коэффициент научно-технического уровня, при этом имеет сравнительно высокие возможности реализации так как может быть использован во многих отраслях за короткое время реализации.

5.2. Планирование научно-исследовательских работы

Планирование проекта – это составление планов выполнения комплексов работ, определение денежных средств, необходимых для их

реализации, а также трудовых и материальных ресурсов. Составим перечень проводимых работ, определив их исполнителей, а также определим количество дней, потраченных на выполнение этих работ.

Для выполнения перечисленных работ требуются следующие специалисты:

- студент (С);
- научный руководитель (НР).

Основные задачи:

1. Взаимная увязка этапов работ проекта;
2. Согласование выполнения отдельных этапов работ во времени, определение их трудоемкости и обеспечение их выполнения в установленные сроки;
3. Определение общего объема работ и необходимых для его выполнения денежных, материальных и трудовых ресурсов.

Таблица 5.5 – Перечень работ по реализации проекта

№	**Наименование работы**
1	Постановка целей и задач
2	Знакомство с литературой по теме, обзор схемотехники существующих испытательных стендов
3	Составление технического задания
4	Изучение технологического процесса
5	Изучение оборудования, методов расчета, программного обеспечения
6	Выбор и обоснование силовой части
7	Расчет силовой части
8	Разработка схемы и алгоритма работы испытательного стенда, патентование разработанной схемы
9	Формирование имитационной модели, проведение экспериментов
10	Публикация результатов исследований
11	Оформление пояснительной записки
12	Проверка готовой пояснительной записки руководителем

5.3. Определение трудоемкости работ

Трудоемкость выполняемых при разработке проекта работ определяется по сумме трудоемкостей этапов и видов работ, оцениваемых экспертным путем в человеко-днях, и носит вероятностный характер. Одной из основных целей планирования научно – исследовательской работы является определение общей продолжительности ее проведения. В настоящее время для определения ожидаемого значения продолжительности работы $t_{ОЖ}$ применяются несколько вариантов использования вероятностных оценок продолжительности. Рассмотрим один из них:

$$t_{ОЖ} = \frac{3 \cdot t_{MIN} + 2 \cdot t_{MAX}}{5},$$

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

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

Для определения трудоемкости выполнения проекта воспользуемся формулой: $T = n \times t_{ОЖ(ij)}$,

где T – трудоемкость, чел.×дн.;

n – количество исполнителей, человек;

$t_{ож(ij)}$ – продолжительность работ, дней.

Результаты сведем в таблицу 5.6.

Таблица 5.6 – Данные по трудоемкости работ

№ этапа	Кол-во исполнителей	Кол-во дней	Продолжительность работ			Т, чел/дн	% от всего времени выполнения НИР
			t_{MIN}	t_{MAX}	$t_{ОЖ}$		
1	Руководитель Студент	5	4	7	5	10	1,359
2	Студент	21	14	30	21	21	5,707
3	Руководитель	7	7	14	10	10	1,9
4	Студент	21	14	21	18	21	5,707
5	Студент	14	10	14	14	14	3,804

6	Руководитель Студент	7	4	7	7	14	2
7	Студент	3	2	4	3	3	0,815
8	Руководитель Студент	30	18	30	25	50	8,152
9	Студент	186	120	200	180	180	50,543
10	Руководитель Студент	60	48	100	60	120	16,304
11	Студент	7	5	14	10	10	1,8
12	Руководитель Студент	7	7	14	12	24	1,9

На следующем этапе осуществим построение линейного графика работ (рисунок 1), который является простым и наглядным, отражающий этапы и продолжительность выполнения каждого вида работ в сравнении между ожидаемым временем и затраченным.

Общая продолжительность НИР составила 368 рабочих дней ($t_{раб}$), при этом не учитывались выходные и праздничные дни. Для учета выходных и праздников переведем рабочие дни в календарные, для перевода воспользуемся формулой:

$$t_{кал} = t_{раб} / k_{пер} = 368 / 0.66 = 558 \text{ дней},$$

$t_{кал}$ - общая продолжительность НИР в календарных днях;

$t_{раб}$ - общая продолжительность НИР в рабочих днях;

$к_{пер}$ – переводной коэффициент равный 0,66.

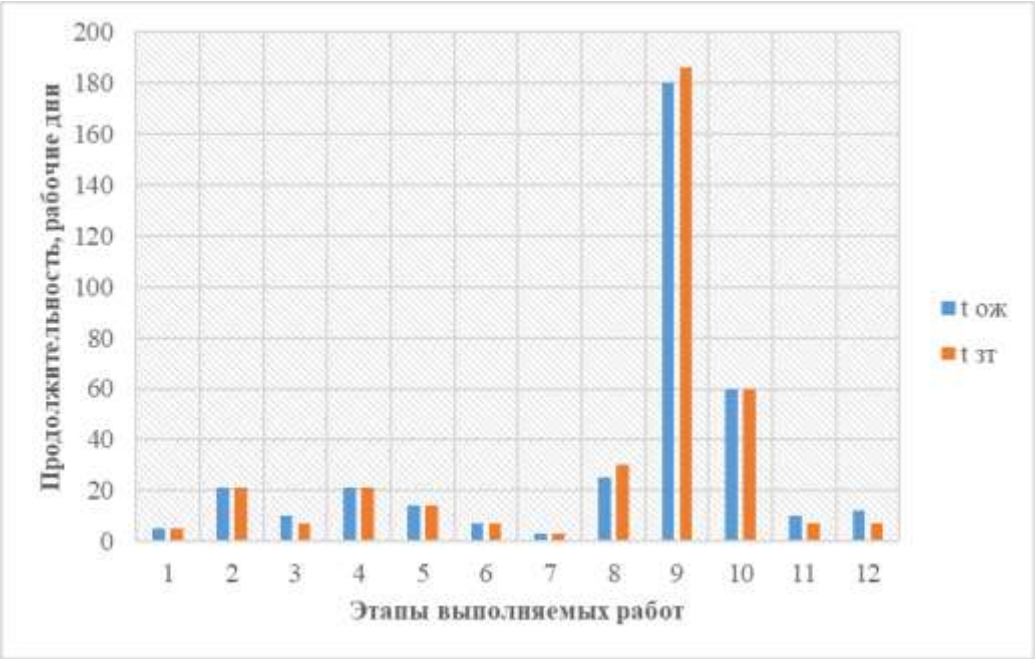

Рисунок 5.1 – Линейный график работ

Ожидаемое время работы $T_{ож} = 365$ дней.

Затраченное время работы $T_{зт} = 368$ дней.

Результаты планирования показали, что время, затраченное на проектирование для: студента (С) – 361 дня, научного руководителя проекта НР - 116 дней.

5.4. Календарный план

Календарное планирование в управлении проектами – это ключевой и важный процесс, результатом которого является утвержденный руководством календарный план проекта (часто его называют еще планом-графиком, календарным графиком, планом управления проектом).

Составление календарного плана-графика проекта включает в себя несколько аспектов. Должны спланировать сроки и длительности работ, определить их последовательность и взаимосвязи, подумать о необходимых ресурсах. В дальнейшем, когда проект перейдет на стадию исполнения, то есть практической реализации запланированных действий, именно по этому плану-графику мы отслеживаем ход выполнения работ. И, если что-то в проекте пойдет не так, можно, сверив с первоначальным планом проекта,

внести соответствующие изменения. Ниже приведем перечень работ, представленных в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Список работ на 2017-2018

Календарный план на 2017-2018 годы										
Вид работы	2017год				2018 год					
	сен.17	окт.17	ноя.17	дек.17	янв.18	фев.18	мар.18	апр.18	май.18	июн.18
Постановка целей и задач										
Знакомство с литературой по теме, обзор схемотехники существующих испытательных стендов										
Составление технического задания										
Изучение технологического процесса										
Изучение оборудования, методов расчета, программного обеспечения										
Выбор и обоснование силовой части										
Расчет силовой части										
Разработка схемы и алгоритма работы испытательного стенда, патентование разработанной схемы										
Формирование имитационной модели, проведение экспериментов										
Публикация результатов исследований										
Оформление пояснительной записки										
Проверка готовой пояснительной записки руководителем										

5.5. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включены расходы на приобретение оргтехники и расходы на оформление документации (в том числе канцелярские принадлежности). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 5.8.

Таблица 5.8 – Материальные затраты

Материалы и оборудование	Ед. изм	Срок службы, год	Кол–во ед	Цена за ед, руб	Затраты, руб
Компьютер	шт	7	1	27000	27 000
Принтер лазерный цветной	шт	5	1	5500	5 500
Бумага формата А4	лист	-	500	0,2	300
Картридж ч/б	шт	-	1	400	700
Брошюровка документов			1	70	70
Всего за материалы:					33 570
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)					19502.4
Итого по статье $C_м$					53 072.4

5.6 Бюджет затрат на разработку проекта

При составлении бюджета затрат на разработку проекта должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям [31]. На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости разработки данного проекта, приведенной в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Калькуляция плановой себестоимости разработки проекта

Статьи затрат	Сумма затрат, руб.
Материальные затраты	53072,4

Затраты на оплату труда	122317
Отчисления на социальные нужды	32121
Накладные расходы	30900
Прочие затраты	12231,72
Себестоимость проекта	250642,12
Плановые накопления (прибыль 15,5%)	37596,31
Бюджет проекта	538880,24

5.7. Полная заработная плата исполнителей темы

Полная заработная плата включает основную и дополнительную заработную плату и определяется как:

$$З_{полн} = З_{осн} + З_{доп},$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата; $З_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Заработная плата инженера главного специалиста определяется как:

$$З_{П} = З_{осн} + З_{доп};$$

где $З_{доп}$ – дополнительная заработная плата, составляет $0{,}15 \cdot З_{осн}$;

$З_{осн}$ – основная заработная плата.

Размер основной заработной платы определяется по формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot Т_{р};$$

где $З_{дн}$ – среднедневная заработная плата; $Т_{р}$ – суммарная продолжительность работ, выполняемая научно-техническим работником.

Размер среднедневной заработной платы рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_{М} \cdot М}{F_{Д}};$$

где $З_{М}$ – месячный оклад научно-технического работника;

M – количество месяцев работы без отпуска ($M = 10$ для пятидневной рабочей недели и отпуске в 48 календарных дней);

$F_Д$ – действительный годовой фонд научно технического персонала (определяется за вычетом выходных, праздничных и больничных дней).

Месячный оклад научно-технического работника определяется по формуле:

$$З_М = З_{ТС} \cdot \left(1 + k_{пр}\right) \cdot k_р;$$

где $З_{ТС}$ – заработная плата по тарифной ставке;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, 0,15;

$k_р$ – районный коэффициент, для наших исследуемых зон возьмем усредненный 1,28.

Размер заработной платы по тарифной ставке определяется по формуле:

$$З_{ТС} = Т_{сi} \cdot k_Т;$$

где $Т_{сi}$ – тарифная ставка работника; $k_Т$ – тарифный коэффициент в зависимости от ставки.

С помощью представленных выше формул находим основную заработную плату руководителя НТИ:

$$З_{ТС} = Т_{сi} \cdot k_Т = 26300 \cdot 1,407 = 37004\ руб;$$

$$З_М = З_{ТС} \cdot \left(1 + k_{пр} + k_Д\right) \cdot k_р = 37004 \cdot \left(1 + 0,3\right) \cdot 1,28 = 62536,76\ руб;$$

$$З_{дн} = \frac{З_М \cdot M}{F_Д} = \frac{62536,76 \cdot 10}{365 - 126} = 2616,6\ руб$$

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot Т_р = 2616,6 \cdot \frac{30}{8} = 9812,25\ руб;$$

$$З_П = З_{осн} + З_{доп} = З_{осн} + 0,15 \cdot З_{осн} = 9812,25 + 0,15 \cdot 9812,25 = 11284,08\ руб.$$

По аналогии рассчитаем заработную плату студента за данную исследовательскую работу:

$$З_{ТС} = T_{сі} \cdot k_T = 17000 \cdot 1 = 17000\,руб;$$

$$З_М = З_{ТС} \cdot \left(1 + k_{пр} + k_Д\right) \cdot k_р = 17000 \cdot \left(1 + 0,3\right) \cdot 1,28 = 28730\,руб;$$

$$З_{дн} = \frac{З_М \cdot М}{F_Д} = \frac{28730 \cdot 10}{365 - 126} = 1202,09\,руб$$

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_р = 1202,09 \cdot \frac{576}{8} = 96550,62\,руб;$$

$$З_П = З_{осн} + З_{доп} = З_{осн} + 0,15 \cdot З_{осн} = 96550,62 + 0,15 \cdot 96550,62 = 111033,213\,руб.$$

5.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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

На основании пункта 6 части 1 ст.58 Федерального закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2019 году вводится пониженная ставка – 28%.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$З_{внеб1} = 0,302 \cdot (9812,25) = 2963,299\,руб.$$

$$З_{внеб2} = 0,302 \cdot (96550,62) = 29158,287\,руб.$$

Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование

материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = З_{проч.} \cdot k_{нр} = \left(З_{спец} + З_{осн} + З_{доп} + З_{внеб} \right) \cdot 0{,}16 =$$

$$= (39000 + 106362{,}87 + 15954{,}4 + 32121{,}586) \cdot 0{,}16 = 30950{,}2\, руб$$

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

Величина коэффициента накладных расходов принимается в размере 16%.

5.9. Расчет прочих затрат

В эту статью расходов в данном проекте включены расходы по командировкам исполнителей, связанных с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от затрат на оплату труда всего персонала, занятого на выполнении данного проекта. Расчет прочих затрат сведем в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Прочие затраты

Затраты на оплату труда, руб.	Прочие затраты (расходы по командировкам 10%), руб.
122317,29	12231,72

На рисунке 5.2 с помощью диаграммы отобразим структуру затрат, составляющих себестоимость в общем бюджете проекта.

Рисунок 5.2 – Структура затрат себестоимости проекта

Выводы по главе 5.

В данной главе произведен расчет стоимости ресурсов научно-технического исследования (НТИ), оценки инновационного потенциала НТИ, а также произведено составление плана выполнения работ.

В разделе были рассчитаны различные виды затрат, проанализирован бюджет затрат на научно-исследовательскую работу, по итогам всего проекта хотелось бы отметить, что данный проект является весьма стабильным и устойчивым, имеет минимальное количество угроз. Так же на основе исследований хотелось бы отметить, что коммерческий и инновационный потенциал данного проекта высок. Проект обладает высокой степенью новизны и перспективностью. Для реализации данного проекта затраты минимальны, а практическая значимость весьма высока, у данного проекта сравнительно высокий уровень новизны, возможности реализации по времени и масштабам применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был выполнен обзор отечественных и зарубежных источников литературы по тематике тягового вентильно-индукторного электропривода и проведен анализ устройства ВИД и принципов его работы. В результате проделанной работы можно сказать, что ВИД обеспечивает высокие показатели надежности и способен продолжать работу в аварийных неполнофазных режимах.

В работе приведено математическое описание трехфазного ВИД, рассчитана предельная тяговая характеристика электромобиля, соответствующая равноплечей гиперболе. Электромобиль развивает предельное тяговое усилие в F = 1466 *Н*. при заданной максимальной скорости в V = 180 *км/ч*. Граничная скорость максимального тягового усилия F = 12556 *Н*м*, составляет V = 14.4 *км/ч*.

Разработана имитационная модель вентильно-индукторного электропривода электромобиля, позволяющая выполнять моделирование при нормальных и неполнофазных режимах работы электродвигателя, Моделирование неполнофазных режимов производилось без внесения изменений в структуру модели ВИД, поскольку модель не требует доработок.

Моделирование производилось для минимальной m = 1100 *кг* и полной m = 1600 *кг* масс. Пуск электромобиля производился на 3-х фазах с последовательным отключением сначала 1-й, затем 2-й фаз. Результатами моделирования являются временные диаграммы токов статора, момента, развиваемого двигателем, усилия на валу двигателя, скорости вращения вала, скорости движения электромобиля и его перемещения. По полученным данным можно заключить следующие ключевые сведения: максимальная скорость электромобиля V = 180 *км/ч*, была достигнута за t = 15 *с*, при минимальной массе m = 1100 *кг*. Электромобиль обеспечивает заданный момент M = 110 *Н*м*, как для полной m = 1600 *кг*, так и для минимальной m = 1100 *кг*, массы. Электромобиль способен продолжать движение при отказе 1-

й фазы, со снижением скорости на $\delta = \frac{125-68}{125} \cdot 100\% = 45\%$ до V = 68 *км/ч*, Электромобиль способен продолжать движение при отказе 1-й фазы при минимальной массе со скоростью V = 150 *км/ч*, со снижением скорости на $\delta = \frac{180-150}{180} \cdot 100\% = 20\%$. В обоих случаях происходит снижение момента на $\delta = \frac{110-80}{110} \cdot 100\% = 27\%$ до M = 80 *Н*. Также электромобиль способен продолжать движение, при отказе 2-х фаз, но только, при минимальной массе со скоростью V = 65 *км/ч*. Электромобиль способен стартовать на 2-х фазах, как при минимальной, так и при полной массе и достигать указанных выше скоростей, характерных для заданной массы.

ассмотрены различные вредные факторы, влияющие на работу проектировщика. Рассчитаны различные виды затрат, проанализирован бюджет затрат на научно-исследовательскую работу, по итогам всего проекта хотелось бы отметить, что данный проект является весьма стабильным и устойчивым, имеет минимальное количество угроз. Так же на основе исследований хотелось бы отметить, что коммерческий и инновационный потенциал данного проекта высок. Проект обладает высокой степенью новизны и перспективностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бычков М. Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода: Дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. -М., 1999. -354 с.

2. Дроздов П. А. Разработка новых алгоритмов управления вентильно индукторных электроприводов: Дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук. - М., 2003. - 120 с.

3. Miller, T.J.E., Switched Reluctance Motors and Their Control, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, ISBN 0-19-859387-2, 1993

4. Козаченко В.Ф., Остриров В.Н., Лашкевич М.М. «Электротрансмиссия на базе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением» // «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» №2 – 2014 – С. 54-60

5. Алямкин Д.И. Разработка и исследование двухфазного вентильно-индукторного электропривода насосов горячего водоснабжения: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Д.И. Алямкин. М., 2011.

6. Visinka R. 3-Phase Switched Reluctance (SR) Sensorless Motor Control Using a 56F80x, 56F8100 or 56F8300 Device. AN1932. Rev. 2, 2 2005.

7. Королев В.В. Вентильно-индукторные электромеханические преобразователи в современном автомобиле // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: Междунар. научно-техн. Конф. ААИ. посв. 145-летию МГТУ «МАМИ».– Тольяти, 2010. – С. 3. – 54 с.

8. Siavash Sadeghi, Mojtaba Mirsalim. Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series Hybrid Electric Vehicle/ Acta Polytechnica Hungarica. №1, 2010.

9. Интернет-ресурс - http://rmzborodino.ru. Дата обращения 13.11.17.

10. Лашкевич М.М. Разработка системы управления для электотрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными двигателями: Автореферат Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / М.М. Лашкевич. М., 2013. – 175 с.

11. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. BocaRaton: CRCPress, 2001.
12. Krishnan R., Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications, The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering Fellow, Center for Organizational and Technological Advancement (COTA) Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, TK2787 .R35 2001, ISBN 0 - 8493-0838-0
13. Радионов, А.А. Математическая модель движения автомобиля // А.А.Радионов, А.Д. Чернышев // Инновационный транспорт. – 2015. – № 4 (18). – С. 69–73.
14. Сташинов, Ю.П. Об оптимальной тяговой характеристике привода рудничного электровоза и путях ее реализации / Ю.П. Сташинов, А.С. Семенчук, Д.В. Волков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 7. – С. 354–358.
15. Строганов В.И., Козловский В.Н., Сорокин А.Г., Мифтахова Л.Н. Аналитическое моделирование тяговой характеристики электромобилей и автомобилей с комбинированной энергетической установкой // Вестник Казанского технол. ун-та. – 2014. – № 7. – С. 107–112.
16. Чернышев, А.Д. Сравнительный анализ различных типов электрических двигателей в составе тягового привода электрической трансмиссии / А.Д. Чернышев // Электротехника: сетевой электрон. науч. журн. – 2016. – № 3. – С. 47–52.
17. Радионов, А.А. Формирование технических требований к трансмиссии автомобиля / А.А. Радионов, А.Д. Чернышев // Наука и производство Урала. – 2015. – № 11. – С. 85–89.
18. Антипов, С.И. Современные испытательные циклы и их актуальность при создании алгоритма работы системы управления автомобиля с КЭУ / С.И. Антипов, Ю.В. Дементьев // Энерго и ресурсосбережение: промсть и транспорт. – 2013. – № 10 (113). – С. 8–11.

19. Чернышев А.Д. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электрической трансмиссии транспортного средства / А.Д. Чернышев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2018. Т. 18, № 1. С. 5–16.

20. Odnokopylov G. I., Rozaev I. A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive (Article number 012035) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2014 - Vol. 66 - №. 1. - p. 1-7

21. Однокопылов Г.И., Образцов К.В., Однокопылов И.Г. Принципы обеспечения «живучести» электроприводов переменного тока. //Электричество. – 2009. – №12. – с. 51-57.

22. Irimia N.D., Simon A., Livadaru L., Vlasceanu S., Dabija O., Mihai A.M., Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, 2011.

23. Розаев И.А, Однокопылов Г.И, «Моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы» // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 323 -№. 4. - С. 138-143

24. Рябов Е.С. Моделирование тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин, Д.Ю. Зюзин. // Вісник Національного технічного університету " Харківський політехнічний інститут". – 2010. – № 57. – С. 243–251.

25. Любарский Б. Г., Рябов Е.С. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MatLab Simulink. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

26. Хусаинов, А. Ш. Х Теория автомобиля. Конспект лекций / А.Ш. Хусаинов, В.В. Селифонов – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 121 с.

27. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра,

специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ, Томск 2019

28. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, 2015

29. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий, 2003

30. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы, 2003

31. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях, 2003

32. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение, 2011

33. СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклиматупроизводственных помещений, 1996

34. СН 2.2.4/2.1.8.562–96, Шум на рабочих местах, в помещениях жилых,общественных зданий и на территории жилой застройки, 1996

35. ГОСТ 30494-2011,Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях, 2011

36. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования, 1984

37. Системы противопожарной защиты УСТАНОВКИ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И ПОЖАРОТУШЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИЕ, 2009

38. НПБ 105-03, Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, 2003

39. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.

40. Попова С.Н. Управление проектами. Часть I: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 121 с.

41. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
42. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Introduction

For traction, various AC motors are currently used along with the corresponding power converters. Classic DC motors also still have their niche, but for the most part for historical reasons, and not because of technical expediency. Comparing the various AC motors from the point of view of application in electric drive, it is possible to distinguish the following advantages and disadvantages of each type of engine [1]:

Asynchronous motor is relatively simple, reliable, cheap, very well researched and mastered in production. It has problems with heat removal from the rotor. It has the worst weight and size parameters in comparison with other electric motors.

The synchronous motor with permanent magnets has the best weight and size parameters, efficiency. Synchronous motor well researched. It is expensive and difficult to manufacture, there is the problem of reliable attachment of magnets at high speeds. It has small zone of constancy of power, there is a risk of overvoltage when turning off the converter in the zone of artificial field weakening.

Switched reluctance motor (SRM) is the simplest, cheapest and most technologically advanced to manufacture. It has good weight and dimensions, a large area of constancy of power, is well studied. Since it has unipolar power, it requires a specialized power converter. It has noticeable ripple moment and vibrations with which engineers struggle with various methods.

Switched reluctance motor with independent excitation is cheap, it has good weight and dimensions, a large area of constancy of power, small ripple moment. The motor is relatively difficult to assemble (using the so-called reduced field winding [2]).

Target Motor Theory

The basis of the SRM principle of action is a physical phenomenon, manifested in the fact that a mechanical force of attraction acts on a ferromagnetic body in a magnetic field, which tends to move this body to the region with the highest intensity of the field. This force is called electromagnetic force.

The nature of the formation of the electromagnetic moment in inductor machines is determined by the interaction of ferromagnetic bodies, which change their position in a magnetic field so that the flow of the external magnetic field passing through them takes the maximum value. Therefore, when the phase winding is excited, the rotor of the machine rotates in the direction of increasing the inductance to L_{MAX}, while performing positive work (motor mode). If the movement continues in the direction of decreasing inductance, then the sign of the moment changes (braking mode).

The aligned position of the rotor is a position of stable equilibrium, and the unaligned is the position of unstable equilibrium.

As a rule, SRM operates in the local saturation mode in the overlap zone of the interacting poles. Therefore, it is characterized by the dependence of electromagnetic parameters, both on the angular position of the rotor, and on the phase current.

SRM with the number of phases $m \geq 3$ has a magnetic system, designed in such way that at any position of the rotor there will be a group of coils, at the excitation of which the rotor will move. This implies the absence of so-called “dead zones” in which none of the coils have the ability to create torque, which is most undesirable when starting the engine. Therefore, it is necessary that the number of poles of the stator Z_S is not equal to the number of poles of the rotor Z_R.

Figure 1 shows the picture of the magnetic field in the cross section of a 6/4-VIEW configuration with the inclusion (excitation) of the phase A-x. In this case, the rotor under the action of electromagnetic forces will rotate in the counterclockwise direction.

The unidirectional rotation of the rotor will roam under certain conditions. It is necessary to achieve switching of the frequency converter before reaching the agreed position of phase A-x. Phase A-x should be turn off from the power source, and the phase, the moment of which tends to continue the rotation of the rotor in the same direction, is turn on to the power source. In this case, this is the B-y phase.

The mutual position of the stator and rotor poles, close to the aligned position for phase A-x, is close to the unaligned position for phase B-y, which means that when voltage is applied to phase B-y and a current flowing through its coils, which will tend to rotate the rotor counterclockwise.

The rotor will rotate at an average angular velocity proportional to the switching frequency, with sequential periodic switching phases.

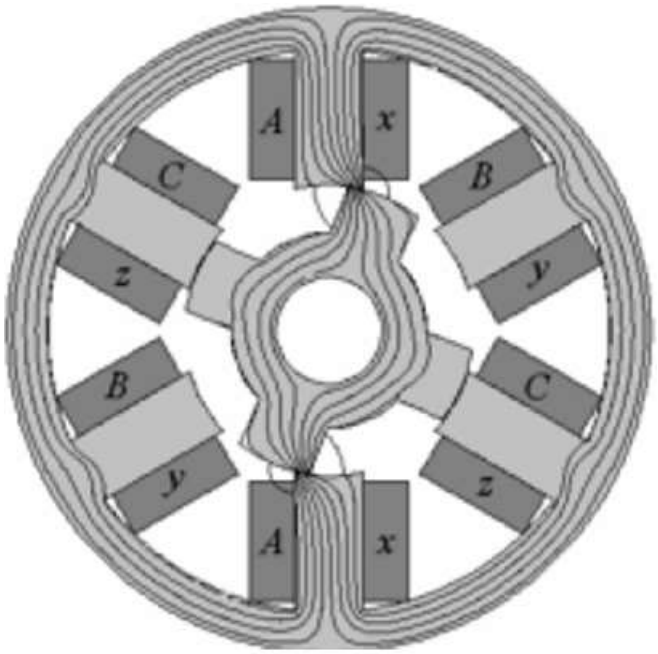

Figure 1 - Magnetic field in SRM 6/4

Phases must be switched before even the aligned position of the poles is reached. This is necessary in order to get the lowest possible current value in the disconnected phase when it reaches its aligned position. The magnetic field energy accumulated in the phase cannot disappear instantly. It is spent on maintaining the constancy of the phase flux linkage, which is why self-induced EMF occurs in the phase, and phase current remains non-zero for some time after its switching. The

current flows through the oppositely connected diode D2, IGBT SV2 of the frequency converter and the power supply (Figure 2 b). Eventually, the current will reach zero (the energy of the magnetic field will be released in the form of electrical losses on the active resistances of the phase, the counter diode D2 and the IGBT SV2). However, if the current is different from zero in aligned phase position, then with further rotor rotation, the created magnetic field will create an electromagnetic braking moment. Voltage of reverse polarity is applied to the phase for faster field quenching in the SRM after phase is turned off (Figure 2 c).

Phase B-y will be energized until the rotor reaches close to an aligned position. When this position is reached, a corresponding signal will be received from the rotor position sensor (RPS) to the control system, the processing of which will lead to the issuance of a control action to the frequency converter and the switching of phases B – y and C – z. The cycle will repeat.

Thus, it is possible to carry out the unidirectional rotation of the rotor of the SRM, by carrying out the sequential switching of the phases. The sequence of phase switching is determined by the algorithm incorporated in the control system. The initial data for its operation are signals on the position of the rotor, coming from the RPS, which excludes the possibility of incorrect switching of phases.

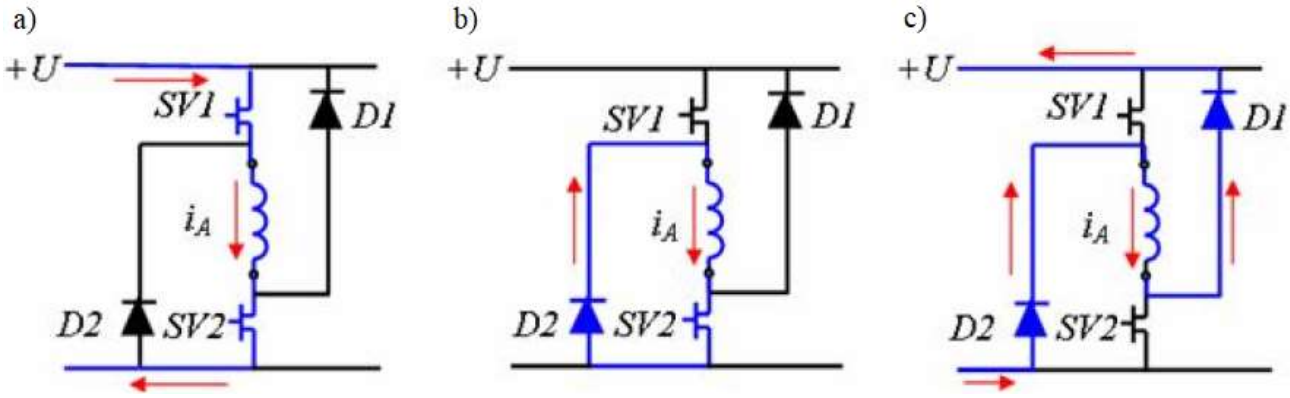

Figure 2 - Circuit current loops in the SRM phase in the switching interval: a) IGBT SV1, SV2 are closed; b) IGBT SV1 is open, SV2 is closed; c) IGBT SV1, SV2 are open; a reverse voltage is applied to the phase;

Mathematical Description of an SR Motor

Switched reluctance motor is an electromechanical energy converter. The electrical energy received from the network is converted into mechanical energy. Energy is given to the load. The description of this is based on Kirchhoff's second law for an electrical circuit. It is described by the balance of energy and power. The phase of the inductor machine is endowed with inductive resistance, which varies over a wide range.

Kirchhoff's law looks like:

$$u + e = iR \qquad \text{EQ.1}$$

Where:

u – The applied phase voltage

i – The phase current

e – The EMF

Since $e = -\frac{d\psi}{dt}$, phase voltage:

$$u = iR + \frac{d\psi}{dt} \qquad \text{EQ.2}$$

Where:

ψ – flux linkage.

Flux linkage is a function of 2 variables: phase current and rotor angle:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial\psi}{\partial y} \cdot \frac{d\gamma}{dt} = L\frac{di}{dt} + \Omega\frac{d\psi}{d\gamma} \qquad \text{EQ.3}$$

Where:

$L\frac{di}{dt}$ – The transformer EMF

$L = \frac{\partial\psi}{\partial i}$ – The phase differential inductance

$\Omega = \frac{d\gamma}{dt}$ – The angular rotor speed

$\Omega \frac{\partial \psi}{\partial \gamma}$ – The EMF of rotation

Based on equalities 2 and 3, we obtain:

$$u = iR + L\frac{di}{dt} + \Omega \frac{d\psi}{d\gamma} \quad \text{EQ.4}$$

We multiply the current by the right and left side of equality 4 to obtain the power balance equations

$$p = p_e + p_m + p_w \quad \text{EQ.5}$$

Where:

$p = ui$ – The instant power received from the power supply

$p_e = i^2 R$ – The instant power emitted in the form of heat

$p_m = i\Omega \frac{\partial \psi}{\partial \gamma}$ – The instant mechanical power

$p_w = iL\frac{di}{dt}$ – The instant power per increment of energy accumulated in a magnetic field

The instant power entering the power balance equation (5) is defined by the following expression:

$$p_m = i\Omega \frac{\partial \psi}{\partial \gamma} \quad \text{EQ.6}$$

Mechanical power is determined by the product of the rotor speed and the electromagnetic moment:

$$p_m = \Omega M \quad \text{EQ.7}$$

The expression for the instant electromagnetic moment is obtained from equalities 6 and 7 from the derivative of the flux linkage in the rotation angle of the rotor

$$M = i\frac{\partial \psi}{\partial \gamma} \quad \text{EQ.8}$$

Traction calculation of an electric vehicle

When designing a vehicle, regardless of the type of drive that drives it, it is always given by certain technical and operational indicators. The task of the power units is to ensure their implementation. The main performance indicators affecting the choice of power units are: the total weight of the vehicle *G*; vehicle geometry; the number of driving wheels *n*; rated speed *Vn*; rated climbable *i*; nominal traction force F_{nom}; maximum speed of movement V_{max}; limitable climb i_{pr}; maximum traction force F_{max}; power of the power plant *P* [3].

It should be borne in mind that these performance indicators should be provided with an acceptable heating of the power units of the traction system, given the specific energy consumption and energy efficiency.

Based on the operating parameters, you can determine the energy and power characteristics of the drive. It is worth mentioning that due to mobility, any autonomous vehicle has certain power limitations. So the maximum power of the internal combustion engine, generator, battery of the vehicle is always a certain value. For this reason, the limit traction characteristic of the vehicle should correspond to the constancy of power [4]. Realized vehicle power is equal to the product of the thrust force and the speed, respectively, the tractive characteristic of the vehicle ideally corresponds to the law of equal arms of hyperbola [5].

An important advantage of a switched reluctance motor is that it has a mechanical traction characteristic, a characteristic of constant power [6]. Undoubtedly, other types of engines, for example, an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor, a permanent magnet synchronous motor, can realize a given characteristic. But in their application, you will most likely have to use an overpowering electric car, as is done in Tesla cars, which use an asynchronous motor. This will undoubtedly lead to a deterioration of the mass and size parameters of the electric drive system [7].

By virtue of the foregoing, one of the primary tasks is to determine the power of the SRM and the limiting tractive characteristics of the vehicle. To

determine the power of the SRM let's consider the equation of traction balance. Traction balance of the vehicle can be represented by the expression:

$$F_k = F_\Sigma = F_f + F_\alpha + F_w + F_J$$

Where:

F_f – The rolling resistance force

F_α – The slope resistance force

F_w – The air resistance force

F_J – The force of inertia

$$F_f = f \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha\,, \qquad \text{EQ.9}$$

Where:

m – The vehicle weight

g = 9,81 m/s^2 – The acceleration of gravity.

f – The rolling resistance coefficient

α – The angle of inclination of the roadway

$$F_f = \pm m \cdot g \cdot \sin\alpha \qquad \text{EQ.10}$$

$$F_w = 0{,}5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \qquad \text{EQ.11}$$

Where:

C_x – The drag coefficient

ρ = 1,2 km/m^3 – The air density

S – The midship area

$$F_J = m \cdot \frac{dv}{dt}\,, \qquad \text{EQ.12}$$

Where:

dv/dt – The vehicle acceleration

If we accept that

$$\psi = f(\cos\alpha + \sin\alpha)\,, \qquad \text{EQ.13}$$

$$K_w = \frac{0{,}5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S}{m \cdot g}\,, \qquad \text{EQ.14}$$

$$K_J = \frac{1}{g}, \qquad \text{EQ.15}$$

$$G = m \cdot g, \qquad \text{EQ.16}$$

then the equation of traction balance takes the form

$$F_K = F_\Sigma = G \cdot (\psi + K_w \cdot v^2 + K_j \frac{dv}{dt}). \qquad \text{EQ.17}$$

In this case, the power balance equation can be represented as

$$P_K = F_K \cdot v = G \cdot (\psi + K_w \cdot v^2 + K_j \frac{dv}{dt}) \cdot v, \qquad \text{EQ.18}$$

Where:

P_K – The total traction power supplied to the drive wheels.

On the basis of equality 17, it is possible to construct a limit traction characteristic. To do this, it is necessary to identify key points that are defined in three characteristic sections (Figure 3). The AB segment characterizes the maximum tractive effort. Point B defines the boundary speed of maximum tractive effort. Point D determines the highest tractive force at maximum speed. The BD segment is determined by the selected standalone capacity. Point C is determined by the maximum pulling force at the rated angle of gradient and the rated speed. Point C predetermines the energy efficiency of the system. At this point, the drive system should realize maximum efficiency. Therefore, the rated speed should correspond to the speed prevailing under the specified operating conditions [8].

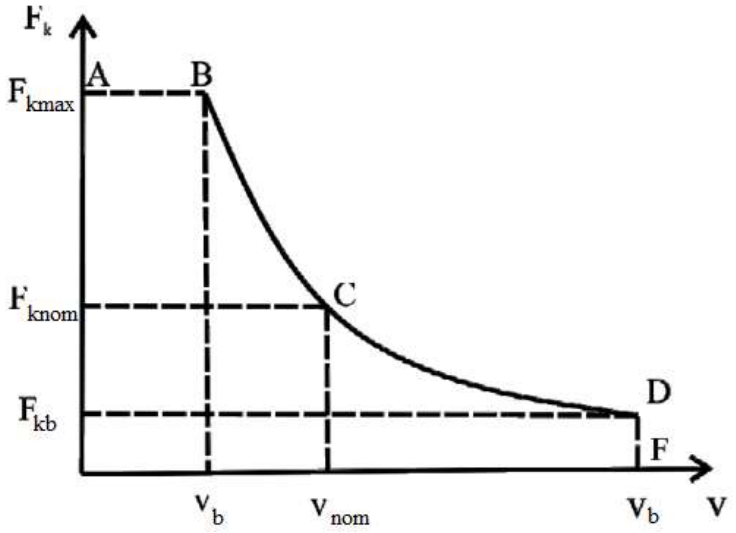

Figure 3 – Limit traction characteristics of the vehicle

Let us set the parameters for a typical C class car and reduce them to table 1.

Table 1 – Electric Vehicle Parameters

Maximum vehicle speed, [m/s]	50 (180 km/h)
Minimal vehicle weight, [kg]	1100
Full vehicle weight [kg]	1600
Drag coefficient	0,3
Rolling resistance coefficient	0,01
Midship area, [m^2]	2
Nominal angle of gradient [degrees]	10
power, kWt[kWt]	60

The basis of the calculation was taken [8]. According to [7,15], the maximum power is defined as:

$$P_{макс} = \frac{G \cdot (f + K_w \cdot V_{макс}^2) \cdot V_{макс}}{\eta_\Sigma}, \qquad \text{EQ.19}$$

Where:

f and K_w – motion resistance factors

η_Σ – The total efficiency of the system, I assume η_Σ = 0,84.

Traction characteristic of the vehicle F (v) is defined as:

$$F(v) = \frac{P_{\max} \cdot \eta_\Sigma}{v}. \qquad \text{EQ.20}$$

The maximum speed of an electric vehicle with minimal weight is determined from the equality 19

$$V_{\max 0} = 50 \text{ m/s}.$$

At full vehicle weight:

$$V_{\max} = 43,7 \text{ m/s}.$$

Let's define the key points of traction characteristics for an electric vehicle. Using equations 17-20 you can also find the nominal speed of an electric vehicle.

To begin, we define the parameters for the movement without any slope of the road surface. Then, solving equation 21, we find the nominal speed of motion.

$$\frac{P_{\max} \cdot \eta_{\Sigma}}{v_{nom}} = \frac{G \cdot (f + K_w \cdot V_{nom}^2) \cdot V_{nom}}{\eta_{\Sigma}} \quad \text{EQ.21}$$

Rated speed with minimum mass:

$$V_{nom} = 15 \text{ m/s.}$$

Rated speed for full weight:

$$V_{nom} = 13 \text{ m/s.}$$

Next, we calculate the nominal speed for the nominal angle of gradient. Then the average speed for the nominal angle of gradient will be found from equality 22.

$$\frac{P_{nom} \cdot \eta_{\Sigma}}{v_{nom}} = \frac{G \cdot (f(\cos\alpha + \sin\alpha) + K_w \cdot V_{nom}^2) \cdot V_{nom}}{\eta_{\Sigma}} \quad \text{EQ.22}$$

Rated speed for minimal weight:

$$V_{nom} = 14,5 \text{ m/s.}$$

Rated speed for full weight:

$$V_{nom} = 12,6 \text{ m/s.}$$

Next, we will consider only the full mass, since this is more consistent with the realities of the movement. Let's calculate the second coordinate for point C (figure 3), the ultimate traction force for the nominal speed in accordance with 17:

$$F_{knom} = 5902 \text{ N.}$$

Since the maximum speed is set (table 1), the ultimate traction force at maximum speed and, accordingly, in the absence of any slope of the road:

$$F_{kb} = 1466 \text{ N.}$$

Point A is determined by the maximum force, the force is determined by the adhesion of the wheel to the ground. The maximum force is determined by the equality 23

$$F_{k\max} = f \cdot m \cdot g = 0,8 \cdot 1600 \cdot 9,81 = 12556 \text{ N.} \quad \text{EQ.23}$$

Where:

f – the coefficient of adhesion of the wheel with the road. Let's take $f = 0{,}8$ for the case of the clutch wheels with dry asphalt.

The coordinate of the speed of point B is determined by the equality 20

$$V_b = \frac{P_{\max} \cdot \eta_\Sigma}{F_{k\max}} = \frac{60000 \cdot 0{,}84}{12556} = 4 \text{ м/с.}$$

The ultimate traction characteristic of the electric vehicle is presented in figure 4.

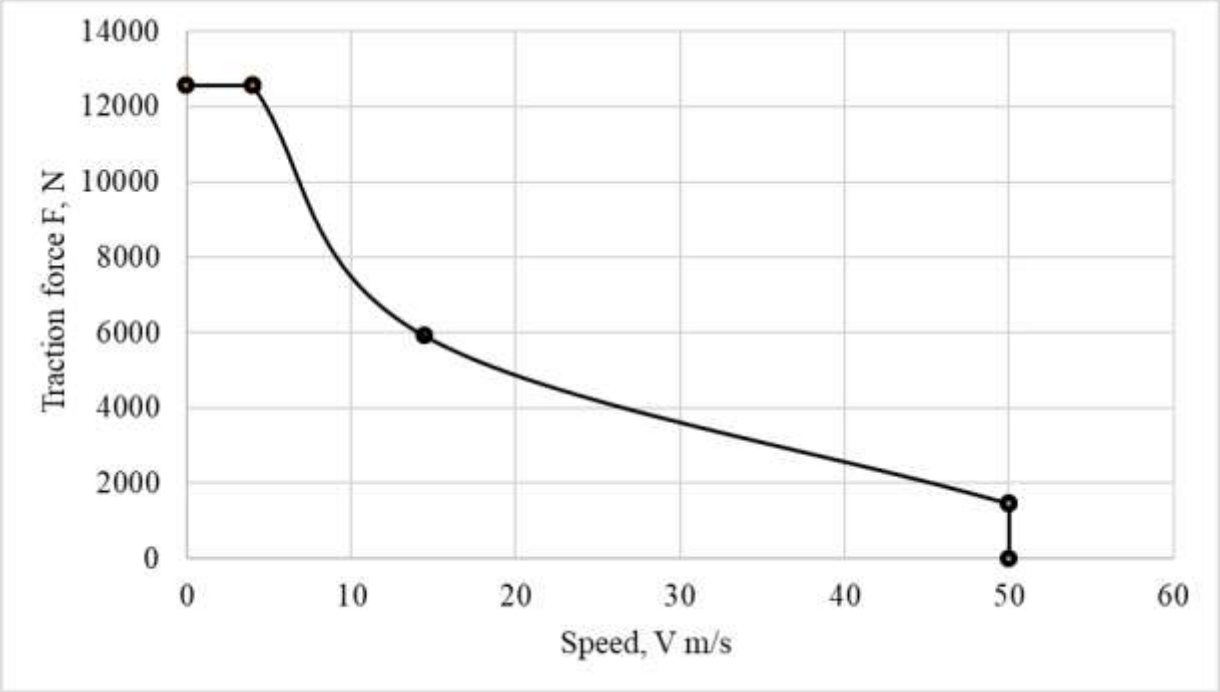

Figure 4 – The ultimate traction characteristic of the electric vehicle

The ultimate tractive characteristic of the electric vehicle was built. Also characteristic points of the ultimate traction characteristics were calculated. The calculation was carried out for a typical C class city car.

References

[1] Kozachenko V.F., Ostrirov V.N., Lashkevich M.M. “Electric transmission on the basis of a switched reluctance motor with independent excitation” // “ELECTRICAL ENGINEERING” №2 - 2014 - P. 54-60

[2] Alyamkin D.I. Development and research of two-phase valve-inductor electric drive of hot water supply pumps: Dis. ... Cand. tech. Sciences: 05.09.03 / D.I. Alyamkin. M., 2011.

[3] Radionov, A.A. Mathematical model of the movement of the car // AA Radionov, A.D. Chernyshev // Innovative transport. - 2015. - № 4 (18). - pp. 69–73.

[4] Stashinov, Yu.P. On the optimal traction characteristic of the mine locomotive drive and the ways of its implementation / Yu.P. Stashinov, A.S. Semenchuk, D.V. Volkov // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). - 2008. - № 7. - p. 354–358.

[5] Stroganov V.I., Kozlovsky V.N., Sorokin A.G., Miftakhova L.N. Analytical modeling of traction characteristics of electric vehicles and vehicles with a combined power plant // Kazan Bulletin Tehnol. un-that. - 2014. - № 7. - P. 107–112.

[6] Chernyshev, A.D. Comparative analysis of various types of electric motors as part of the electric drivetrain drive / A.D. Chernyshev // Electrical Engineering: a network electron. scientific journals - 2016. - № 3. - P. 47–52.

[7] Radionov, A.A. Formation of technical requirements for vehicle transmission / A.A. Radionov, A.D. Chernyshev // Science and Production of the Urals. - 2015. - № 11. - P. 85–89.

[8] Antipov, S.I. Modern test cycles and their relevance when creating an algorithm for operating a vehicle control system with a KEU / S.I. Antipov, Yu.V. Dementiev // Energy and Resource Saving: Industrial and Transport. - 2013. - № 10 (113). - p. 8–11.

[9] Chernyshev A.D. Calculation of the mechanical characteristics of the traction motor electric transmission of the vehicle / A.D. Chernyshev // Bulletin of SUSU.

Series "Engineering". 2018. Vol. 18, No. 1. P. 5–16. Mathematical modeling of the main processes of electric vehicles and vehicles with a combined power plant, Analytical modeling of the traction system of electric vehicles and vehicles with a combined power plant / V.I. Stroganov, V.N. Kozlovsky, A.G. Sorokin, L.Kh. Miftakhova // Bulletin of Kazan Tekhnol. un-that. - 2014. - № 7. - P. 129–132.