

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Системы автоматического управления»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

_____/ С.Г. Воронин

« ____ » _____ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____/ В.И. Ширяев

« ____ » _____ 2018 г.

ПОВЫШЕНИЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫСТРОХОДНОЙ
ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ ПУТЁМ ИЗМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы
профессор кафедры КГМ, д.т.н.

_____/ С.В. Кондаков

« ____ » _____ 2018 г.

Автор работы
студент группы КЭ-534

_____/ С. О. Землянский

« ____ » _____ 2018 г.

Нормоконтролер
доцент кафедры САУ, к.т.н.

_____/ О.О. Павловская

« ____ » _____ 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Землянский С.О. Повышение тактико-технических характеристик быстроходной гусеничной машины путём изменения алгоритма управления электротрансмиссии: ЮУрГУ (НИУ), ВШ ЭКН; 2018, 48 с., 49 ил., библиогр. список – 30 наим., 9 листов слайдов презентации ф. А4.

В работе рассмотрен процесс управления электротрансмиссией быстроходного гусеничного объекта, смоделированного в графической среде имитационного моделирования – Simulink. Разработана система управления двигателем внутреннего сгорания (ДВС) и преобразователями силовыми (ПС), с целью минимизации расхода топлива, а также рассмотрено несколько способов торможения, в том числе введение рекуперативного торможения, и использования рекуперации мощности.

При выполнении работы использованы пакеты Mathcad, Microsoft Office, MatLab, Simulink, VisSim.

					24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	Землянский С.О.				<i>Повышение тактико-технических характеристик быстроходной гусеничной машины путём изменения алгоритма управления электротрансмиссии</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	Кондаков С. В.					Д	4	48
<i>Реценз.</i>	Воронин С.Г.					ЮУрГУ Кафедра САУ		
<i>Н. Контр.</i>	Павловская О.О.							
<i>Утверд.</i>	Щиряев В. И.							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЗОР ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.....	9
1.1 Общий обзор.....	9
1.2 Обзор электродвигателей.....	13
1.3 Обзор прототипа.....	17
1.4 Регулирование электротрансмиссии.....	18
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИЕЙ.....	22
3 РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	33
4 ИЗМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИЕЙ.....	36
4.1 Математическая модель	36
4.2 Результаты моделирования.....	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	45
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	46

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших направлений развития гусеничной техники, является: повышение уровня подвижности путём увеличения средних скоростей движения и запаса хода по топливу; повышение надёжности; возможность роботизации и автоматизации управления бронированными машинами; расширение возможности диагностирования и контроля систем.

Анализ конструкций перспективных зарубежных бронированных машин показывает, что для решения этих задач используются принципиально новые решения, в том числе наблюдается существенный рост интереса к разработке и испытанию различных образцов военных гусеничных и колесных машин, оснащенных электрической трансмиссией. Через электрическую трансмиссию реализуется энергия двигателя внутреннего сгорания и энергия накопителей. Создание накопителей энергии с высокими удельными мощностями дает возможность накапливать энергию торможения и использовать ее вторично.

Работы по внедрению ЭТ в гусеничных машинах (ГМ) проводились еще в начале XX столетия, но лишь с середины 60-х годов прошлого столетия наблюдается существенный рост интереса к разработке и испытанию различных образцов машин, оснащенных электрическими трансмиссиями (ЭТ).

Рост интереса обусловлен следующими основными факторами:

- возможностью существенного увеличения уровня автоматизации управления движением БГМ и улучшения показателей ее подвижности на основе бесступенчатого регулирования в широком диапазоне скоростей движения, силы тяги и радиусов поворота с одновременным повышением экономичности и запаса хода машины;

- значительным прогрессом в области конструирования и технологии производства традиционных и новых типов основных компонентов ЭТ, определяющих ее массо-габаритные и динамические характеристики, таких как высокомоментные, малогабаритные, надежные тяговые электродвигатели (ТЭД) переменного тока, унифицированные с ТЭД, встраиваемые в двигатели внутреннего сгорания (ДВС) генераторы, новая элементная база с высокими показателями плотности тока для силовых полупроводниковых преобразователей с цифровыми устройствами управления и, наконец, разработка и производство высокоемкостных молекулярных накопителей электрической энергии;

- возможностью создания полностью автоматизированных безэкипажных ГМ, управляемых на расстоянии по радиоканалу или автоматически программируемым устройством по заданной программе, что наиболее легко реализуется в машинах, оснащенных электрической трансмиссией;

										Лист
										6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР					

- возможностью использования в БГМ (вместо многочисленных вторичных источников питания) центральной единой силовой электрической шины питания.

Кроме того, по сравнению с бесступенчатыми гидромеханическими трансмиссиями ЭТ потенциально обладает более высокими показателями надежности, технологичности производства, эксплуатации, ремонта и контролепригодности.

Одним из направлений решения задачи оснащения современных ГМ электротрансмиссией и повышения на этой основе показателей ее тяговых свойств и энергообеспеченности является определение рациональной структуры ЭТ для заданного класса ГМ, состава, основных параметров и взаимодействия ее элементов между собой в процессе функционирования.

Решение этой задачи зависит от того, каковы конструкционные параметры самой машины как объекта управления, каково ее назначение и условия функционирования. Следовательно, возникла необходимость в разработке методического аппарата, позволяющего проводить анализ и оценку свойств бесступенчатой электрической трансмиссии, осуществлять выбор структуры, состава и параметров основных компонентов, обеспечивающих ее конкурентоспособность, необходимое качество процесса движения, повышение тяговых свойств и общей эффективности ГМ.

В связи с этим, **цель работы** – определение рациональной структуры, основных компонентов и системы управления ЭТ, обеспечивающей повышение ТТХ, в части топливной экономичности работы ДВС, увеличение средних скоростей движения и автоматизации управления движением БГМ.

Актуальность темы обусловлена тем, что:

1. Применение в БГМ бесступенчатых трансмиссий с автоматическим управлением обеспечивает существенное улучшение тягово-динамических характеристик и топливно-экономических показателей машины.

2. Автоматизация управления движением ГМ на основе применения ЭТ позволяет снизить требования к квалификации и психофизическому состоянию механиков-водителей.

3. Создание ГМ с бесступенчатыми ЭТ сопряжено с определенными трудностями, обусловленными недостаточной разработкой теоретических положений посвященных исследованию эффективности различных структур ЭТ, динамики гусеничных машин с электротрансмиссией переменного тока, методики выбора из ряда возможных вариантов и построения структурных схем трансмиссий такого типа.

					24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4. Необходимость разработки и исследования методов выбора типа, основных характеристик и рациональных режимов управления и взаимодействия основных компонентов ЭТ для заданного класса ГМ.

					24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 ОБЗОР ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

1.1 Общий обзор

«НПО «Электромашина» провело ряд НИР и ОКР в интересах министерства обороны, в ходе которых был создан опытный образец гусеничной машины с применением электротрансмиссии [1]. Схема компоновки электрической трансмиссии приведена на рисунке 1.1:

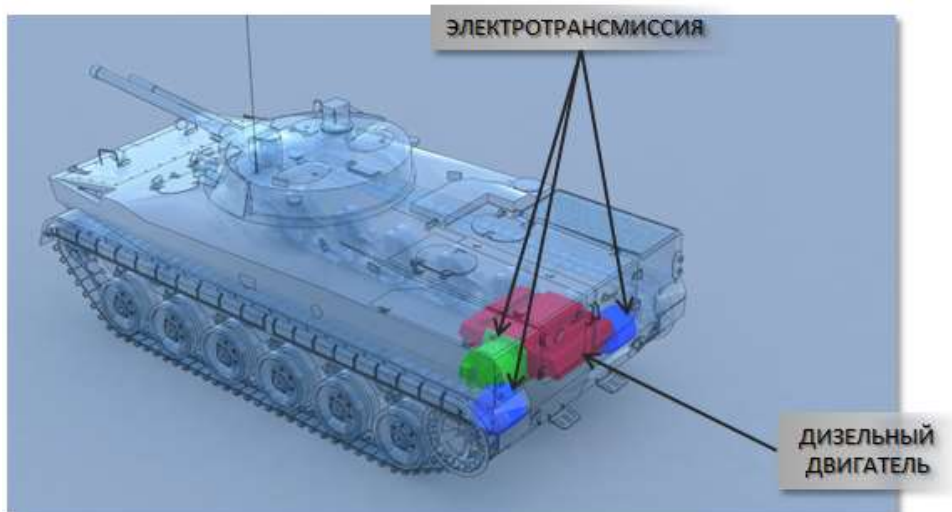


Рисунок 1.1 – Пример компоновки электротрансмиссии гусеничного шасси.

Полученные результаты стендовых и натурных испытаний макетных образцов подтверждают возможность обеспечения необходимых ходовых характеристик машины и оставляют перспективу их дальнейшего улучшения.

Таблица 1 – Основные преимущества применения ЭТ

Характеристика	Электрическая трансмиссия	Гидромеханическая трансмиссия	Гидрообъемная трансмиссия
Экономичность	КПД 90% и мало зависит от скорости движения и нагрузки	КПД около 80% и сильно зависит от скорости движения и нагрузки	КПД около 80% и мало зависит от скорости движения и нагрузки
Техническое обслуживание	Обслуживание минимально	Замена масла и фильтров. Опасно загрязнение масла	Замена масла и фильтров. Загрязнение масла критично
Чувствительность к окружающей температуре	Прогрев не требуется. Контроль за перегревом электрических машин и силовой электроники при повышении температуры	При качественном масле перегрев не опасен. Требуется прогрев, возможна аварийная ситуация	При качественном масле перегрев не опасен. Требуется прогрев, возможна аварийная ситуация

Ремонтопригодность	Ремонт только быстрой заменой блоков. Стоимость определяется стоимостью заменяемых блоков	Ремонт возможен с разборкой узлов	Ремонт только заменой блоков. Быстрый несколько дешевле, чем ремонт электромеханики
Оптимальность тяговой характеристики	Оптимальна для любых машин из-за реализации регулирования и стабилизации момента и скорости (автоматический режим)	Для сельскохозяйственных тракторов не оптимальна: скорость движения зависит от нагрузки	Оптимальна для любых машин, возможна работа в режиме «автомата» и с фиксированным передаточным числом
Компоновка	Свободная компоновка приводных машин даёт хорошую развесовку	Жёсткая связь между узлами ограничивает свободу компоновки	Свободная компоновка приводных машин даёт хорошую развесовку
Ориентировочная стоимость	Трансмиссия дороже гидромеханической на 10%. С уменьшением цен на силовую электронику цены сравниваются, а, возможно, будут меньше. Малые эксплуатационные затраты	Наиболее низкая в условиях крупносерийного производства. Значительные эксплуатационные затраты	Трансмиссия дороже гидромеханической на 20%

Применение электротрансмиссии и гибридной энергоустановки позволяет наиболее эффективно решить задачи развития бронетанкового вооружения и техники. Оснащение машины мощной энергетической установкой позволяет питать дополнительные потребители электрической энергии большой мощности: устройства электрического пуска ракет, электротермохимические или электромагнитные пушки и так называемую «электромагнитную броню».

Электрическая трансмиссия дает возможность оптимизировать режимы вращения каждого из колес, бесступенчато регулировать скорость движения и силу тяги в широком диапазоне, обеспечить создание антиблокировочных и антипробуксовочных систем [26]. Это позволяет снизить требования к квалификации водителей при повышении основных показателей подвижности.

Программное обеспечение управления машины с ЭТ позволяет обеспечить работу силовой (гибридной) установки в оптимальном режиме, т. е. с минимальным расходом топлива, в оптимальном температурном режиме с максимальным КПД. Через электрическую трансмиссию наиболее просто реализовать создание полностью автоматизированных безэкипажных машин,

											Лист
											10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР						

управляемых на расстоянии по радиоканалу или автоматически через программируемое устройство [24]. Электрические машины, и, в частности электротрансмиссии, имеют высокие показатели надежности, технологичности производства, эксплуатации, ремонта и возможности контроля по сравнению с другими типами трансмиссий. Отсутствие жестких потоков передачи крутящего момента увеличивает компоновочные возможности, что обеспечивает более рациональное использование внутреннего забронированного объема. Освободившийся от агрегатов механической трансмиссии объем на днище позволяет оптимальным образом решить вопрос размещения накопителей энергии [25].

При сравнении тягового электрического привода с традиционными механическими и гидромеханическими трансмиссиями необходимо отметить ряд неоспоримых преимуществ ЭТ, основными из которых являются [1]:

1. **Компоновочные преимущества.** Отсутствие жёстких кинематических связей элементов трансмиссии. Возможность располагать силовую установку (установки) и генератор в различных частях БГМ, обеспечивая тем самым наилучшую компоновку образца вооружения.

2. **Тягово-динамические свойства.** Повышение средних и максимальных скоростей движения и повышение проходимости в сложных дорожных условиях.

3. **Повышение живучести, бесшумность.** При повреждениях силовой установки машина всё ещё остаётся подвижной и может выполнить боевую задачу бесшумно двигаясь на накопителях энергии, тем самым избегая потери мобильности.

4. **Возможность роботизации.** Привод электротрансмиссии является полностью автоматическим. Все воздействия водителя преобразуются в электрические сигналы системы управления моторно-трансмиссионной установкой. Это, наряду с надёжностью, высокой точностью и чёткостью управления элементами БГМ, позволяет реализовать удалённый метод управления машиной, что важно в условиях боевых действий для сохранения личного состава подразделения.

5. **Режим «электростанция».** Наличие на борту БГМ энергетической установки мощностью более 100 кВт, которая может быть использована для длительного подключения внешних устройств в полевых условиях.

6. **Экономичность.** Малый расход топлива, экономичность до 30%. Увеличение запаса хода (пробег на одной заправке до 1000 км).

7. **Ремонтпригодность.** Простота и удобство обслуживания, увеличенный межсервисный интервал в сравнении с классическим автомобилем. Быстрая замена ключевых компонентов в полевых условиях возможна благодаря

					24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

модульной конструкции, которой обладает электропривод, и отсутствию механической связи энергетической установки и колёс.

Необходимость внешнего регулирования электромашин, работающих в составе трансмиссий транспортной техники, связана с изменением нагрузки на тяговых электродвигателях (ТЭД) вследствие переменности свойств грунта, условий движения (разгон, торможение, равномерное движение), рельефа местности [22].

Вопросами регулирования ЭТ для различных объектов занимались научно-исследовательские и инженерно-технические работники различных отечественных и зарубежных организаций, например, ЧТЗ [16] (при проектировании семейства дизель-электрических тракторов), кафедра колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана [20] (при проектировании многоосных колёсных машин), фирма «Магнет мотор» (ФРГ) (при проектировании колесных и гусеничных машин с электрической трансмиссией). Однако все перечисленные работы не касаются особенностей электрического привода.

Современная направленность работ ведущих мировых производителей гусеничной военной техники демонстрирует растущие тенденции применения электрических или электромеханических трансмиссий в конструкции военных гусеничных машин. Из открытых публикаций известно, что работы по созданию опытных образцов гусеничных машин с электроприводом ведётся в Германии, США, Польше, Испании, Бельгии и других странах [28, 29].

Наибольшие успехи в этом направлении достигнуты компанией BAE Systems, разработавшей по заказу Пентагона шасси с «гибридной силовой установкой» для перспективной аэромобильной САУ XM1203 NLOS-C (рис.1.2) [28]:



Рисунок 1.2 – САУ NLOS-C с гибридной силовой установкой

После закрытия программы NLOS дальнейшее развитие этого шасси идёт по пути создания совместного с корпорацией Northrop Grumman перспективной высокозащищённой боевой машины пехоты по программе Ground Combat Vehicle (рис. 1.3) [29].



Рисунок 1.3 – БМП Ground Combat Vehicle

Серийное производство БМП должно быть начато в 2018 году. На базе разработанной платформы планируется также создание широкой гаммы машин различного назначения.

Сегодняшний интерес к электроприводу со стороны разработчиков военной техники связан с известными преимуществами (в сравнении с другими типами существующих трансмиссий) и современными достижениями в технологиях разработки и производства электрических машин, элементной базы силовой электроники, цифровых систем управления, накопителей энергии, которые позволяют рассчитывать на преодоление основных недостатков, присущих ЭТ.

Известным плюсом ЭТ в прямолинейном движении является приближение тяговой характеристики быстроходной гусеничной машины (БГМ) к идеальной гиперболе при десятикратном диапазоне изменения сопротивлений и скоростей движения с помощью регулирования ЭТ.

1.2 Обзор электродвигателей

Развитие электромеханических трансмиссий тесно связано с развитием электроники и систем управления.

Для создания конкурентоспособных ЭТ гусеничных и колёсных машин высокой проходимости, по сравнению с традиционными, наиболее распространенными в настоящее время трансмиссиями, показатели удельной мощности электродвигателей должны быть обеспечены на уровне 2,5/5 кВт/кг [3].

					Лист
					13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР

При достижении указанных удельных показателей могут быть реализованы преимущества тяговых электроприводов:

- высокое быстродействие на уровне электромагнитных переходных процессов;
- управляемость, обеспечивающая создание транспортного средства с дистанционным или беспилотным управлением (роботизация);
- аккумулирование энергии торможения;
- наличие мощного бортового источника электрической энергии для питания новых видов вооружения, защиты, а так же для запуска теплового двигателя (режим стартера);
- отсутствие сложных многоступенчатых узлов (автоматической коробки передач), приводных механических или гидравлических систем от первичного двигателя к движителю;
- гибкая компоновка электромеханической и электрической трансмиссии благодаря передачи энергии по проводам.

Если сравнивать характеристики электродвигателей общепромышленного производства и ГОП, то первые проигрывают вторым практически по всем параметрам. Именно поэтому существуют электродвигатели специального назначения, которые имеют более выдающиеся показатели, даже чем ГОП.

В таблице 2 показаны сравнительные характеристики показателей удельной мощности электродвигателей общепромышленного и специального назначения [1]:

Таблица 2 – Показатели удельной мощности

Наименование	Величина		Ед. измерения
	специальное	общепромышленное	
назначение			
мощность	15		кВт
КПД	94	85	%
частота вращения	24000	1500	об/мин
масса активного ядра	4,0	73	кг
габаритная длина	150	480	мм
габаритный вес	110	320	мм
удельная мощность	3,75	0,205	кВт/кг

Высокие показатели удельной мощности электродвигателей достигнуты за счёт больших частот вращения.

В электромеханической трансмиссии в качестве тягового электропривода могут применяться различные виды электрических машин и приводов на их основе: асинхронный с частотным управлением, синхронный с постоянными

магнитами (вентильный), вентильно-индукторный с независимым возбуждением, вентильно-индукторный с самовозбуждением и др. [21].

Каждый из указанных двигателей имеет свои достоинства и недостатки.

Выбор типа электрической машины и, соответственно типа электротрансмиссии, полностью зависит от назначения объекта и условий его эксплуатации.

1. Асинхронный с частотным управлением

Плюсы: простота конструкции; надежность, отлаженная технология изготовления, отработанные структура и алгоритмы управления.

Минусы: не самые высокие удельные показатели по мощности, относительно низкий КПД, необходимость источника реактивной мощности.

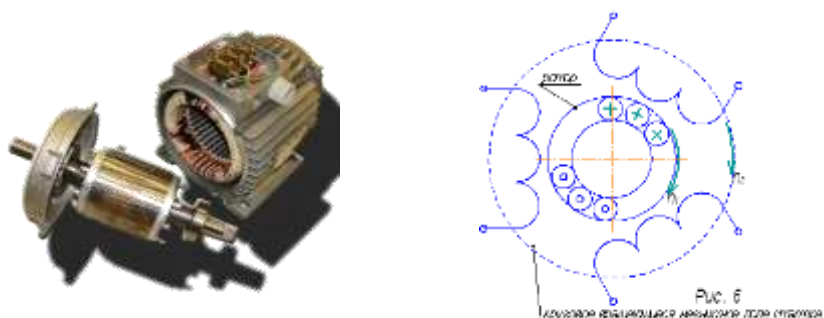


Рисунок 1.4 – Внешний вид и электромагнитная схема асинхронного электродвигателя

2. Синхронный с постоянными магнитами (вентильный)

Плюсы: Минимальная масса, максимальный КПД из сравниваемых типов ТЭД, высокая надежность, используется типовая схема полупроводникового коммутатора, хорошие регулировочные свойства, возможна реализация всех тормозных режимов.

Минусы: Более сложная технология изготовления, чем у других типов ТЭД, ограничения по температуре нагрева постоянных магнитов. Отсутствие возможности ослабления поля для расширения диапазона регулирования скорости.

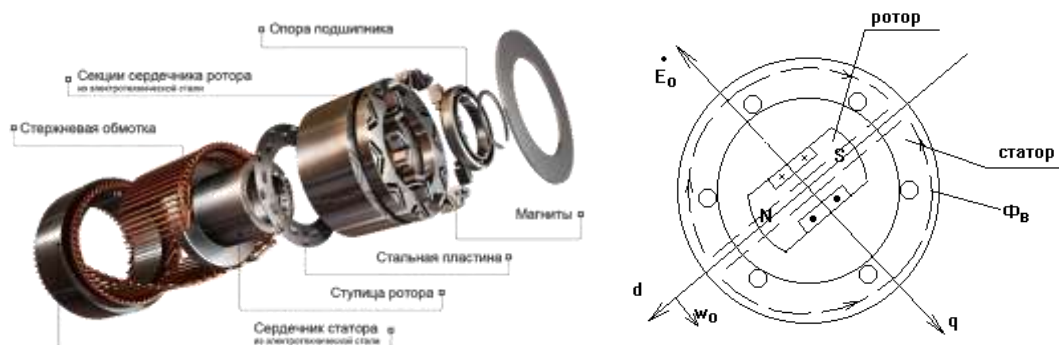


Рисунок 1.5 – Конструкция вентильного электродвигателя с постоянными магнитами

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР

Лист

15

3. Вентильно-индукторный с независимым возбуждением

Плюсы: Высокая надежность. Имеет высокие регулировочные свойства, используется типовая схема силового преобразователя.

Минусы: Более сложная конструкция (обмотка на роторе), требуется регулируемый источник постоянного тока возбуждения. Как все индукторные двигатели, имеет повышенные вибрации и шумы. Невысокие удельные показатели по мощности.

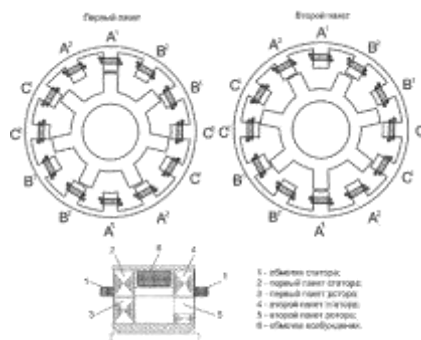


Рисунок 1.6 – Вентильно-индукторный с независимым возбуждением

4. Вентильно-индукторный с самовозбуждением

Плюсы: Простота конструкции, высокая надежность, отсутствие обмотки на роторе и связанных с нею потерь. Схема управления силового преобразователя проще, чем у других типов. Достаточно высокий КПД и перегрузочная способность.

Минусы: Повышенные вибрации и шумы по сравнению с ТЭД других типов. Для их компенсации необходима отработка специальных алгоритмов управления. Невысокие удельные показатели по мощности.

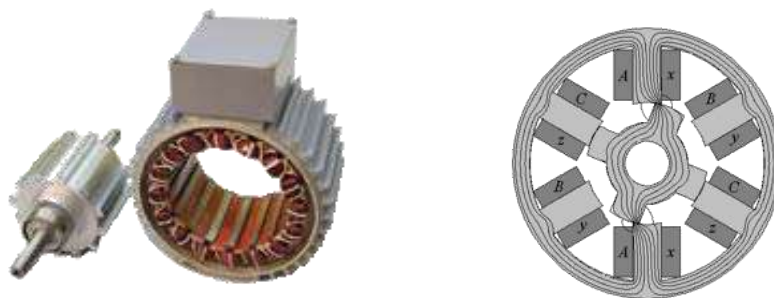


Рисунок 1.7 – Вентильно-индукторный с самовозбуждением

Для объектов военной техники: наиболее подходящим типом тягового привода, по мнению «НПО «Электромашина», будет являться привод на основе синхронной машины с постоянными магнитами. Этот тип привода обеспечит получение наилучших массогабаритных характеристик, высокого КПД, а также позволит обеспечить все требуемые функциональные параметры подвижности, управляемости, показатели надёжности и т.д. [8].

Ещё раз стоит подчеркнуть, что эти машины не имеют коллектора, обладают регулировочными свойствами и динамическими показателями, не уступающими характеристикам электромашин постоянного тока (МПТ). В качестве электрических машин предлагается использовать вентильные электродвигатели (ВЭД) с постоянными магнитами. Примеры вентильных машин с постоянными магнитами, разработанные и произведенные АО «НПО «Электромашина» в рамках ОКР «Платформа» для комплектования ВМП 12х12 приведены на рисунке 1.8:

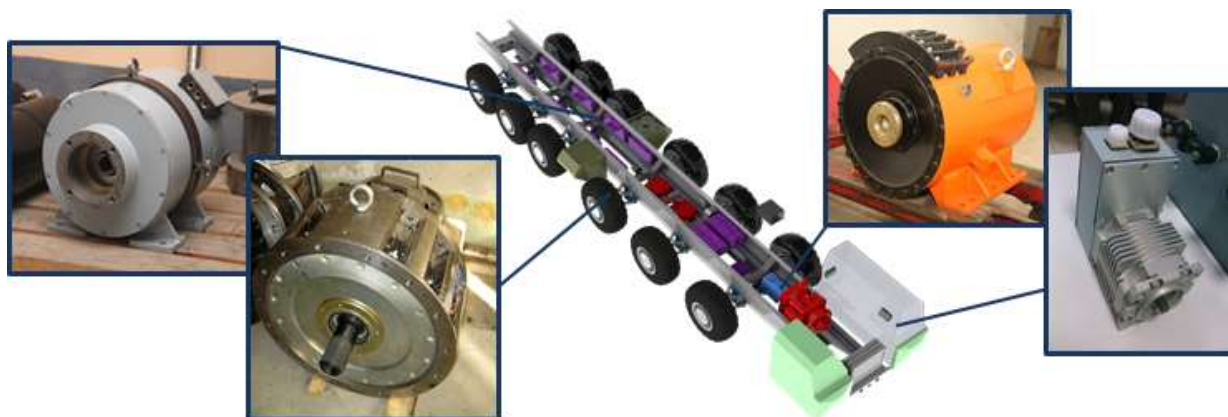


Рисунок 1.8 – Вентильные машины с постоянными магнитами, разработанные и произведенные АО «НПО «Электромашина» в рамках ОКР «Платформа» для комплектования ВМП 12х12.

На основе проведенных исследований определились направления оптимизации тягового электропривода, что позволит получить привод с улучшенными весогабаритными параметрами и высокой эффективностью.

1.3 Обзор прототипа

В данной ВКР объектом исследования является БГМ с ЭТ, в которой комплект тягового электрооборудования состоит из одного общего генератора, который через силовые преобразователи питает два ВД, связанные с ведущими колёсами через бортовые редукторы. Источником механической энергии для генератора является ДВС мощностью 750 кВт.

ДВС образует в паре с генератором дизель-генераторную установку (ДГУ) мощностью 350 кВт, которая при полном нажатии на педаль подачи топлива (ППТ) обеспечивает постоянную частоту вращения вала ДВС на уровне 190 рад/с. При этом всережимный регулятор топливного насоса высокого давления автоматически регулирует подачу топлива при изменении сопротивления на коленчатом валу. Механическая нагрузка на коленчатый вал ДВС определяется

электрической нагрузкой генератора ДГУ, которая в свою очередь определяется суммой токов в силовых (якорных) цепях 2-х ТЭД. Таким образом, мощность в 110 кВт реализуется только при приведенной к ДВС нагрузке в 2100 Н·м, во всех остальных случаях потенциальная мощность ДВС реализуется частично. Добиться работы ДГУ на полную мощность (110 кВт) при полном нажатии на ППТ и любых внешних нагрузках можно только с помощью дополнительного регулирования ЭТ. При неполном нажатии на ППТ дополнительное регулирование ЭТ позволит минимизировать удельный расход топлива ДВС [9].

Таким образом, режим работы ДВС определяется с одной стороны внешней нагрузкой, а с другой – человеком, т.е. в какой-то степени режим работы ДВС является отчасти случайным. Регулируя напряжение генератора или ТЭД можно изменять передаточное число трансмиссии (отношение крутящего момента на ведущем колесе к крутящему моменту на коленчатом валу ДВС) так, чтобы режим работы ДВС перестал быть величиной случайной, а всегда соответствовал экономической характеристике (кривая АВ на рис. 1.9) [12]:

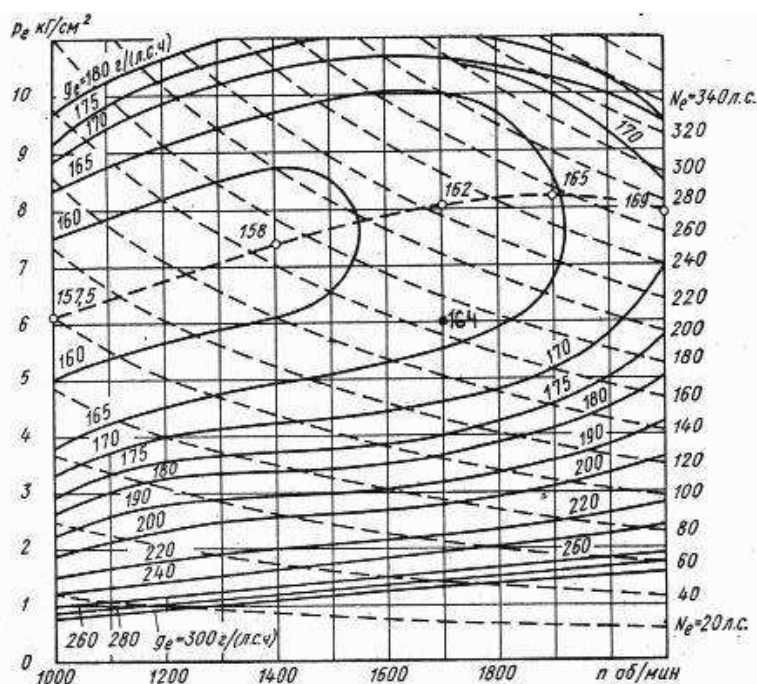


Рисунок 1.9 – Характеристика автомобильного дизеля 8ЧН 13/14 (ЯМЗ-238Н) при различных удельных расходах топлива и экономичная характеристика АВ

1.4 Регулирование электротрансмиссии

Как известно, идеальная тяговая характеристика при постоянной мощности имеет форму гиперболы. В самоходных машинах, использующих в качестве источника энергии ДВС, приближение к идеальной характеристике, чаще всего, осуществляется путём использования многоступенчатой КПП, или бесступенчато-регулируемой передачи. На рисунке 1.10 изображена близкая к

идеальной тяговой характеристикой электродвигателя, которая, однако, не может быть обеспечена полностью, поскольку при стремлении скорости к 0, момент будет стремиться к ∞ .

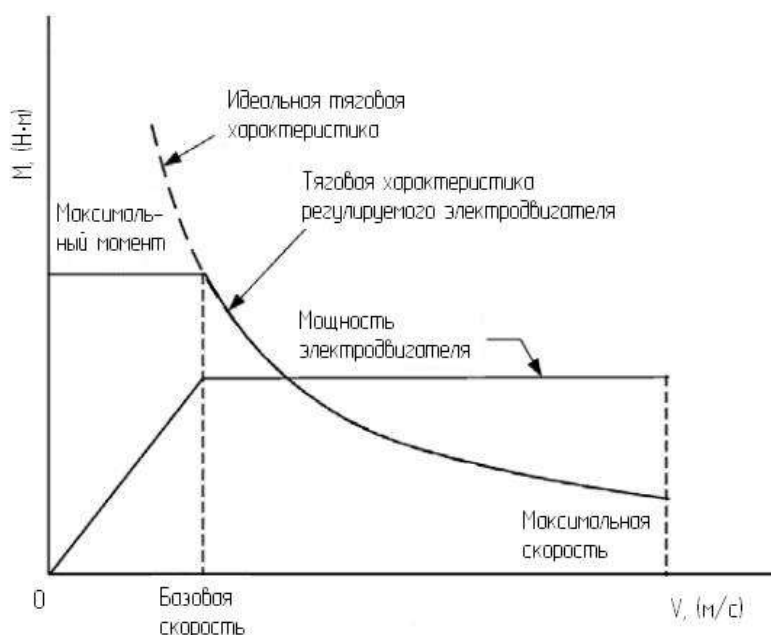


Рисунок 1.10 – Тяговая характеристика хорошо регулируемого электродвигателя и идеальная тяговая характеристика

Область от нулевой до базовой скорости называют областью постоянного момента. В этой области находится максимально достижимый крутящий момент. Область правее базовой скорости является областью постоянной мощности, в которой тяговая характеристика изменяется гиперболически, снижаясь до минимального момента при максимальной скорости.

Важным параметром тягового электродвигателя является его кинематический диапазон, также называемый кинематическим диапазоном при постоянной мощности:

$$q_{эд} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{ном}}. \quad (1.1)$$

Для увеличения максимальной скорости работы, как правило, используются различные методы регулирования, однако, при превышении определённой скорости наблюдается снижение выходной мощности.

Современные тяговые электродвигатели в настоящее время не в состоянии обеспечить достаточно широкий кинематический диапазон. Это подразумевает либо использование электромашин более высокой мощности, либо многоскоростной трансмиссии. Таким образом, повышение $q_{эд}$ является одной из основных областей исследований, поскольку это влияет на конструкцию трансмиссии и общую конструкцию самоходной машины.

В данном прототипе для обеспечения необходимого диапазона регулирования частоты вращения тягового электродвигателя каждая фаза состоит из двух частей (рис. 1.11):

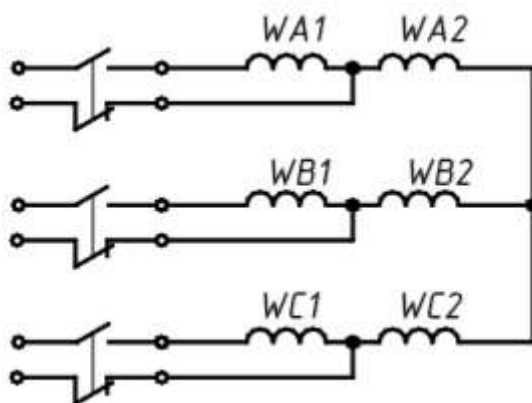


Рисунок 1.11 – Принципиальная схема соединения фаз обмотки якоря

Как мы видим, дополнительные ключи дают возможность регулировать количество витков в фазах, что позволяет нам получить два режима работы:

1. Режим № 1 – число витков в фазе $W_{\phi}=56$ (максимальный момент);
2. Режим № 2 – число витков в фазе $W_{\phi}=28$ (максимальная скорость).

Каждый ТЭД снабжен преобразователем силовым (ПС), который может изменять напряжение на ТЭД в том числе и по гиперболе постоянной мощности (рис. 1.12):

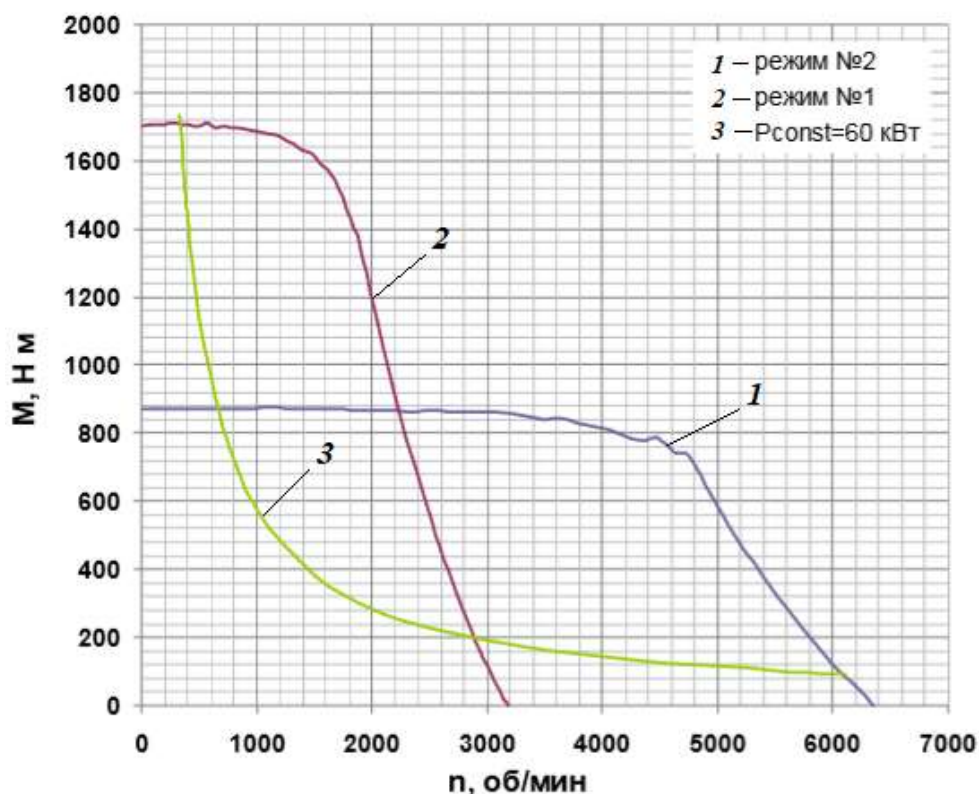


Рисунок 1.12 – Механическая характеристика ТЭД, состоящая из 2 режимов и кривой постоянной мощности

Вообще то ТЭД может работать в любой точке в области ограниченными 1, 2, 3 и осями координат, которые являются конструктивными ограничениями.

График 1 соответствует подключённым обмоткам $WA1$, $WA2$, $WB1$, $WB2$, $WC1$, $WC2$.

График 2 соответствует подключённым обмоткам $WA2$, $WB2$, $WC2$.

График 3 соответствует максимальному моменту ДВС.

В область на графике между кривыми 1 и 2 с одной стороны (характеристики ТЭД) и кривой 3 (характеристика ДВС) можно попасть в переходных режимах ускорения/замедления.

					24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИЕЙ

Для исследования управляемости БГМ необходима математическая модель, основанная на описании движения БГМ и работы электротрансмиссии, в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений. Эта модель позволит с имитировать реальный физический процесс.

Расчётная схема плоскопараллельного движения БГМ в декартовых координатах приведена на рисунке 2.1:

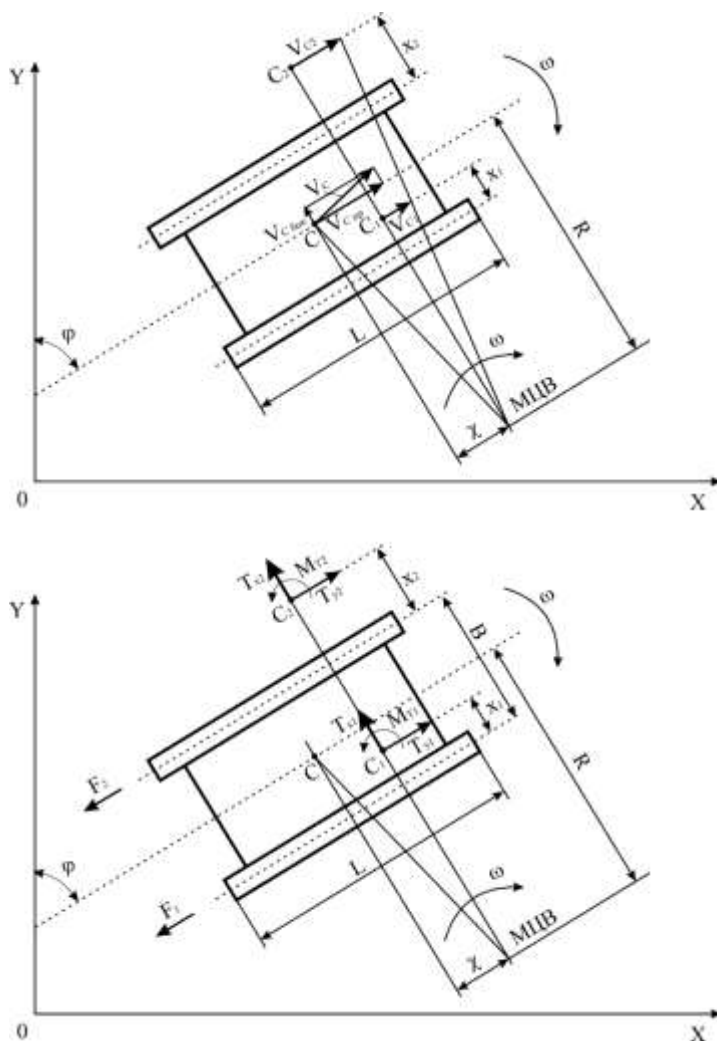


Рисунок 2.1 – Расчетная схема: X, Y – декартовы координаты, φ – курсовой угол, МЦВ – мгновенный центр вращения, F_1, F_2 – силы сопротивления на отстающем и забегающем борту, V_c – линейная скорость центра тяжести, χ – продольное смещение полюса поворота, L – продольная база машины, B – поперечная база машины, x_1 – поперечное смещение полюса поворота отстающей гусеницы, x_2 – поперечное смещение полюса поворота забегающей гусеницы, $V_{c \text{ бок}}$ – составляющая V_c , направленная перпендикулярно оси корпуса машины, $V_{c \text{ пр}}$ – составляющая V_c , направленная вдоль оси корпуса машины, T_{x1}, T_{y1} – составляющие результирующей силы трения отстающей гусеницы о грунт, T_{x2}, T_{y2} – составляющие результирующей силы трения забегающей гусеницы о грунт, $\omega = d\varphi/dt$ – угловая скорость поворота корпуса, V_{c1}, V_{c2} – скорости полюсов поворота отстающей и забегающей гусениц соответственно.

Согласно расчётной схеме положение машины на плоскости задано двумя линейными координатами центра тяжести X_c, Y_c и курсовым углом φ , показывающим отклонение оси машины от оси координат Y .

Основные уравнения связей, характеризующие взаимодействие гусениц с грунтом, перераспределение веса машины при повороте по бортам, формирование тяговых усилий на гусеницах, сопротивление прямолинейному движению и повороту БГМ взяты из работ [5,11,17,18].

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР

Лист

22

Математическая модель движения БГМ с электрической трансмиссией получена на основе работ [10,18,19], где учтены основные потери в электрических машинах – механические, магнитные и электрические:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2 X_c}{dt^2} &= [(P_2 + P_1 - Pf_1 - Pf_2) \sin \varphi + R_\delta \cos \varphi] \frac{g}{G}; \end{aligned} \right. \quad (2.1)$$

$$\frac{d^2 Y_c}{dt^2} = [(P_2 + P_1 - Pf_1 - Pf_2) \cos \varphi - R_\delta \sin \varphi] \frac{g}{G}; \quad (2.2)$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \left[(P_2 - P_1 + Pf_1 - Pf_2) \frac{B}{2} - \text{sign} \frac{d\varphi}{dt} M_c \right] \frac{1}{J_c}; \quad (2.3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\omega_{\text{гн}}}{dt} &= [M_\delta - M_{\text{гн}}] \frac{1}{J_1}; \end{aligned} \right. \quad (2.4)$$

$$\frac{d\omega_{\text{мэод1}}}{dt} = \left[M_{\text{эод1}} - \frac{P_1 R_{\text{вк}}}{i_{\text{бн}}} \right] \frac{1}{J_2}; \quad (2.5)$$

$$\frac{d\omega_{\text{мэод2}}}{dt} = \left[M_{\text{эод2}} - \frac{P_2 R_{\text{вк}}}{i_{\text{бн}}} \right] \frac{1}{J_3}. \quad (2.6)$$

В системе уравнений (2.1) – (2.6) использованы следующие обозначения: t – текущее время, с; X_c , Y_c – координаты центра тяжести машины, м; φ – курсовой угол, рад; $\omega_{\text{гн}}$, $\omega_{\text{эод1}}$, $\omega_{\text{эод2}}$ – частоты вращения генератора и электродвигателей, рад/с; G – вес машины, Н; g – ускорение силы тяжести, м/с²; P_1 , P_2 – силы тяги на ведущих колесах, Н; Pf_1 , Pf_2 – сопротивление передвижению колес, Н; R_δ – сила сопротивления боковому перемещению всех колес, определяемая как сумма поперечных составляющих сил трения колес о грунт; J_c , J_1 , J_2 , J_3 – момент инерции корпуса относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести, моменты инерции двигателя и генератора, бортовых электродвигателей с присоединенными к ним массами, кг·м²; M_c , M_δ , $M_{\text{гн}}$, $M_{\text{эод1}}$, $M_{\text{эод2}}$ – моменты сопротивления повороту БГМ, двигателя внутреннего сгорания, генератора, электродвигателей соответственно, Н·м; $R_{\text{вк}}$ – радиус ведущего колеса, м; $i_{\text{бн}}$ – передаточное число бортовой передачи.

В уравнениях (2.1) – (2.3) участвует сила тяги P , которая определяется по формуле:

$$P_{1,2} = \kappa \sigma_{1,2}; \quad (2.7)$$

где

κ – коэффициент характеризующий сцепные свойства грунта (=5);

σ – буксование гусениц, которое определяется по формуле:

$$\sigma_1 = 1 - \frac{V - \Delta V}{O \cdot R_{\text{вк}}}; \quad (2.8.1)$$

					Лист
					23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР

$$\sigma_2 = 1 - \frac{V + \Delta V}{O \cdot R_{VK}} \quad (2.8.2)$$

где

V – скорость машины:

$$V = \dot{X}_c \cdot \sin Fi + \dot{Y}_c \cdot \cos Fi; \quad (2.9)$$

ΔV – прирост/уменьшение скорости на забегающей/отстающей гусенице относительно центра тяжести (рис. 2.2):

$$\Delta V = \omega \cdot \frac{B}{2}; \quad (2.10)$$

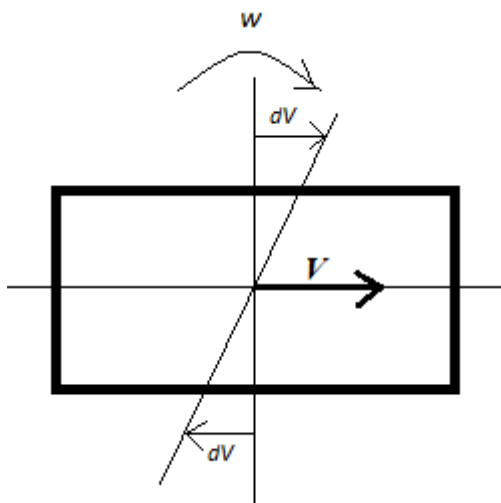


Рисунок 2.2 – Кинематика поворота БГМ

$O_{1,2}$ – обороты ведущих колёс:

$$O_{1,2} = \frac{\omega_{ТВД}}{K_{BR}}; \quad (2.11)$$

где K_{BR} – передаточное число борт-редуктора (=5.464).

В уравнениях (2.1) – (2.2) участвует сила сопротивления боковому перемещению гусениц:

$$R_{\sigma} = 2 \cdot XI \cdot \mu_{\max} \frac{1}{L} \cdot G; \quad (2.12)$$

где

L – продольная база машины, м (=3.08);

μ_{\max} – коэффициент сопротивления повороту на месте (=0.7);

XI – Смещение полюса поворота от центра тяжести, м:

$$XI = \frac{V \cdot |\omega| \cdot L}{2 \cdot g \cdot \mu_{\max}}; \quad (2.13)$$

В уравнении (2.3) участвует момент сопротивления повороту M_c , который находится по формуле:

$$M_c = \frac{\mu \cdot l \cdot G}{4} \cdot \left[1 - \left(\frac{V \cdot \omega}{\mu_{\max} \cdot g} \right)^2 \right]; \quad (2.14)$$

где $\mu_{\max} = 0,7$, а μ :

$$\mu = \frac{\mu_{\max}}{0,85 + 0,15 \cdot \frac{r}{B}}; \quad (2.15)$$

где

r – расстояние от центра поворота до центра тяжести, м:

$$r = \sqrt{Xl^2 + R0^2}; \quad (2.16)$$

$R0$ – расстояние от центра поворота до продольной оси машины, м:

$$R0 = \frac{(\dot{X}_c^2 + \dot{Y}_c^2)^2}{\dot{Y}_c \cdot \ddot{X}_c - \dot{Y}_c \cdot \dot{X}_c}; \quad (2.17)$$

В уравнении (2.4) участвует момент ДВС M_{δ} , статическая характеристика которого приведена на рисунке 2.3:

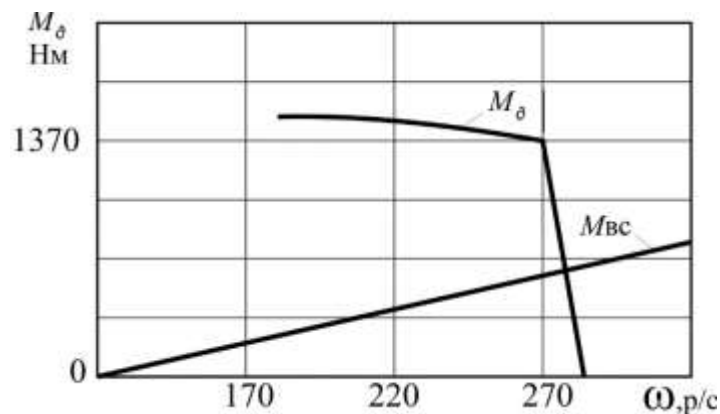


Рисунок 2.3 – Статические характеристики двигателя: зависимость момента двигателя от газовых сил M_{δ} и момента внутреннего сопротивления $M_{вс}$ от частоты вращения

Моторно-трансмиссионная установка состоит из дизельного ДВС мощностью 750 кВт, генератора переменного тока с номинальным напряжением 600 В, выпрямителя, двух ТЭД снабжённых ПС (рис. 2.4).

Согласно [15] ТЭД описывается системой нелинейных уравнений седьмого порядка и алгебраических уравнений. Для решения поставленной прикладной задачи нет необходимости в использовании полной модели, упомянутой выше. Поэтому при составлении математического описания ТЭД по примеру некоторых исследователей [7,15] приняли ряд упрощающих допущений, позволяющих построить математическую модель на базе непрерывных динамических уравнений Парка-Горева и при этом представить момент вращения, ток и напряжение их средними значениями.

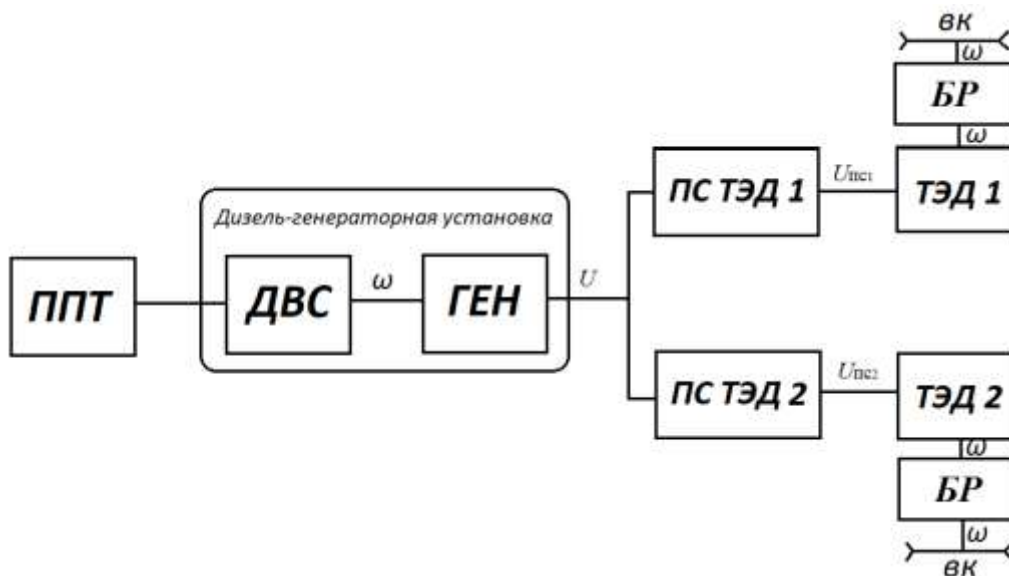


Рисунок 2.4 – Функциональная схема электротрансмиссии

Эти допущения в основном сводятся к следующему: 1) предполагается «гладкость» подводимых напряжений и отсутствие коммутационных процессов, связанных с отключением фаз, по которым проходят токи; 2) принимается, «что углы опережения, коммутации и запаса изменяются настолько быстро по сравнению с другими параметрами, что могут рассматриваться как непрерывные величины по средним значениям». При таких допущениях, в особенности при угле опережения $\delta=0$, механические характеристики ТЭД практически полностью аналогичны соответствующим характеристикам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

В связи с вышеизложенным, по мнению авторов поставленная в исследовании задача может быть достаточно корректно решена без учета особенностей характеристик ТЭД, на базе известных уравнений для двигателя постоянного тока.

Для генератора:

$$U_{гн} = E_{гн} - r_{гн} I_{гн}; \quad (2.18)$$

где $r_{гн}$ – сопротивление силовой цепи генератора, Ом; $U_{гн}$ – напряжение, выдаваемое генератором в сеть, В; $E_{гн}$ – ЭДС генератора, В.

$$M_{гн} = C_e \Phi_{гн} I_{гн}; \quad (2.19)$$

где $M_{гн}$ – момент на валу генератора, Н·м; C_e – постоянная для данной машины величина; $\Phi_{гн}$ – магнитный поток, Вб; $I_{гн}$ – ток, А.

$$E_{гн} = \Phi_{гн} C_e \omega_{гн}; \quad (2.20)$$

где $\omega_{гн}$ – угловая скорость вращения вала генератора.

С учётом всех допущений применена схема замещения электропривода, представленная на рисунке 2.5:

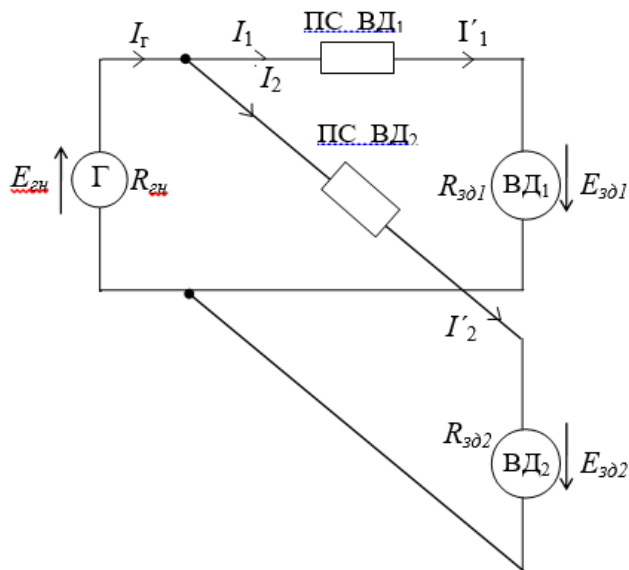


Рисунок 2.5 – Схема замещения электропривода БГМ

Основные соотношения между токами в ветвях определены на основании законов Кирхгофа:

$$I_{\Gamma} = I_1' + I_2' \quad (2.21)$$

Для ТЭД:

$$E_{ТЭД} = U_{гн} - r_{ТЭД} I_{ТЭД} \quad (2.22)$$

где

$r_{ТЭД}$ – сопротивление силовой цепи ТЭД, Ом;

$U_{гн}$ – напряжение, выдаваемое генератором в сеть, В;

$E_{ТЭД}$ – ЭДС ТЭД, В.

$$M_{ТЭД} = C_{ТЭД} \Phi_{ТЭД} I_{ТЭД} \quad (2.23)$$

где

$M_{ТЭД}$ – момент на валу ТЭД, Н·м;

$C_{ТЭД}$ – постоянная для ТЭД величина;

$\Phi_{ТЭД}$ – магнитный поток ТЭД, Вб;

$I_{ТЭД}$ – ток в силовой цепи ТЭД, А.

$$E_{ТЭД} = \Phi_{ТЭД} C_{ТЭД} \omega_{ТЭД} \quad (2.24)$$

где $\omega_{ТЭД}$ – угловая скорость вращения вала ТЭД.

Для упрощения:

$$K_{\Gamma} = C_e \Phi_{гн} \quad (2.25)$$

$$K_{ВД} = C_{ВД} \Phi_{ВД} \quad (2.26)$$

Далее представлены уравнения (2.1-2.26) реализованные в среде математического моделирования Simulink (рис. 2.6-2.17):

					Лист
					27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР

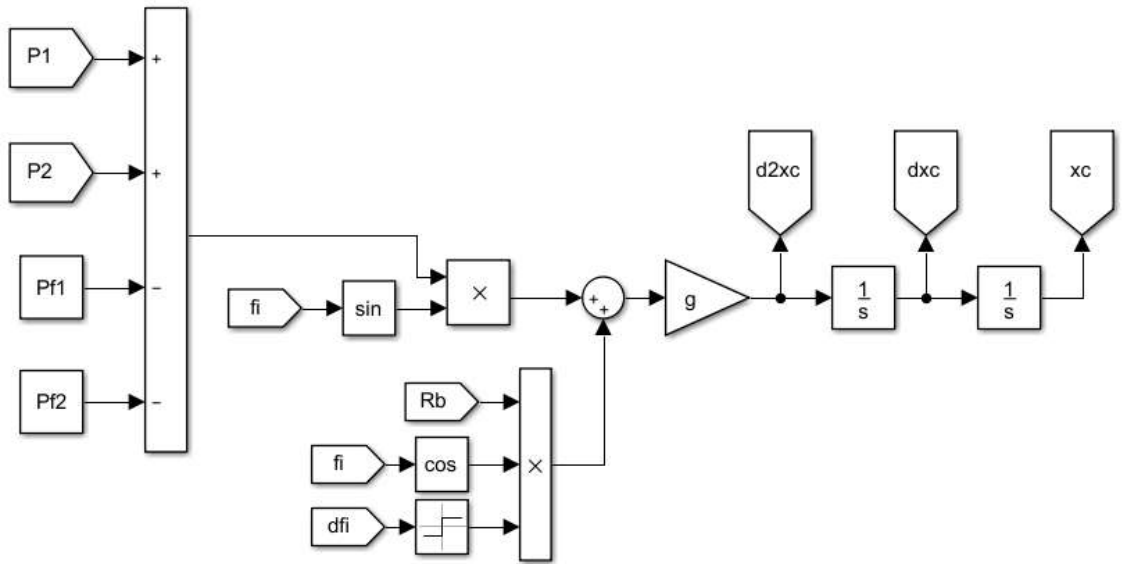


Рисунок 2.6 – Уравнение 2.1

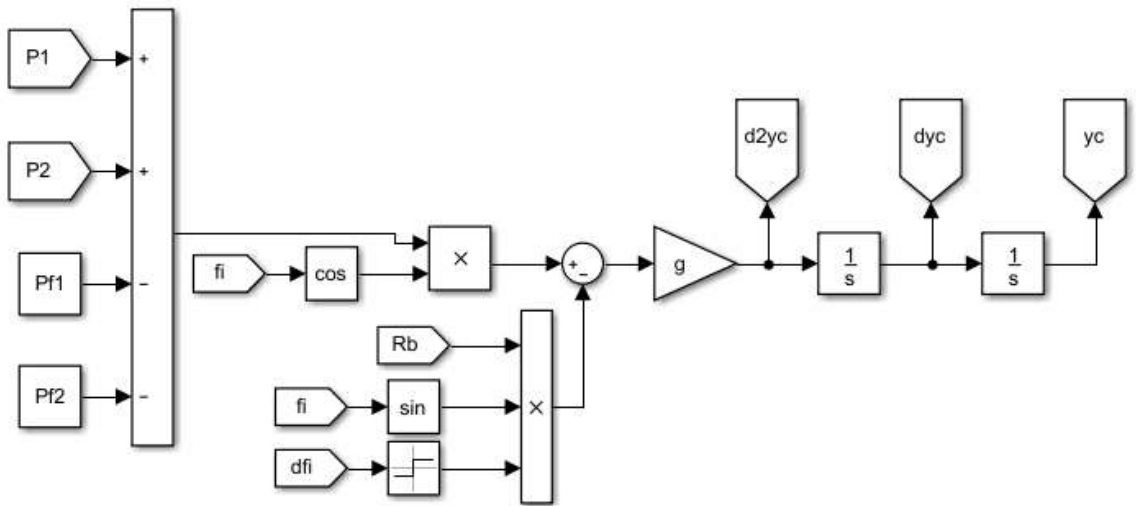


Рисунок 2.7 – Уравнение 2.2

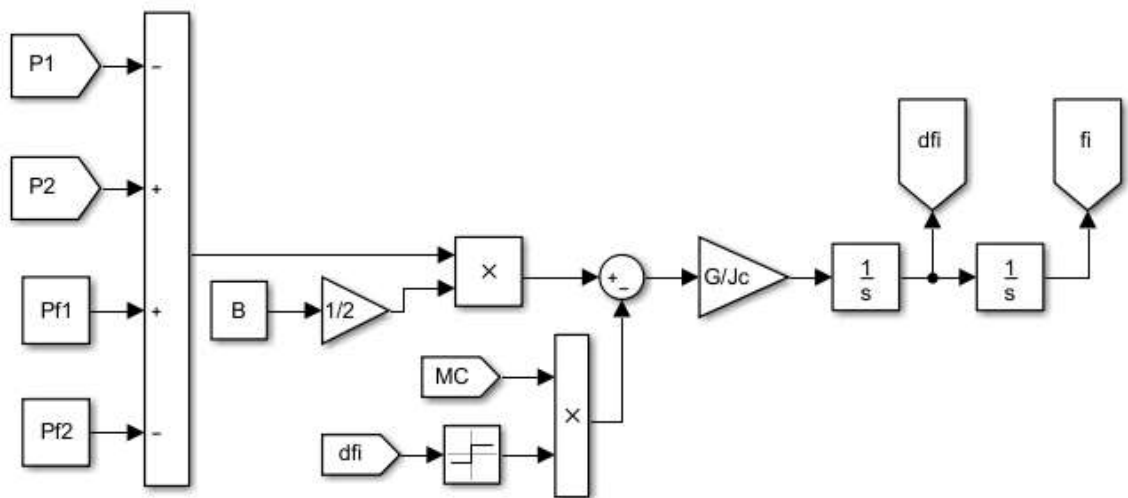


Рисунок 2.8 – Уравнение 2.3

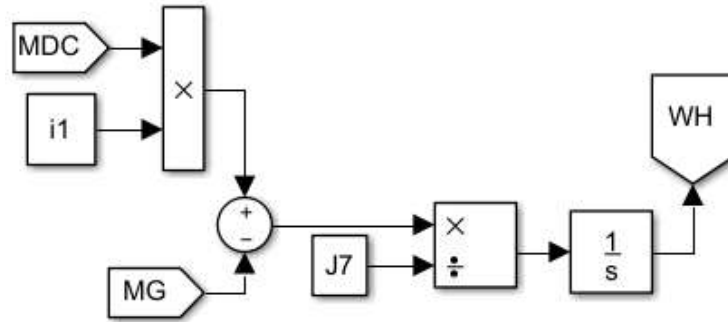


Рисунок 2.9 – Уравнение 2.4

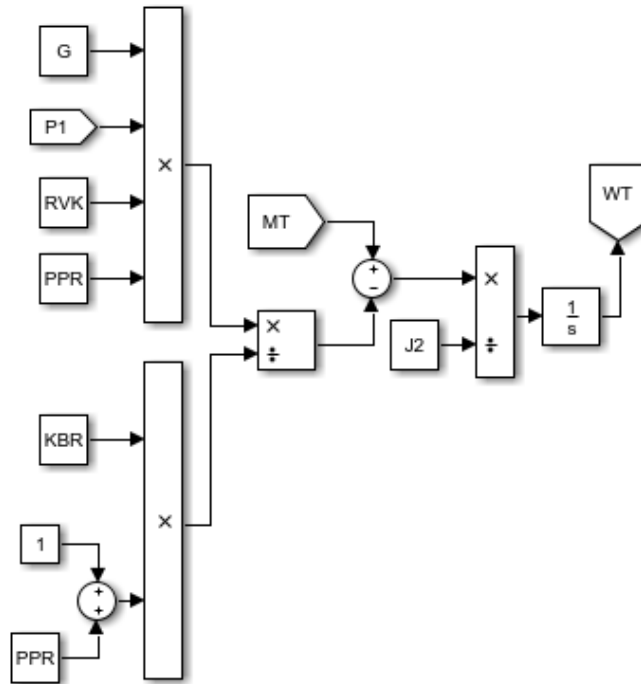


Рисунок 2.10 – Уравнение 2.5

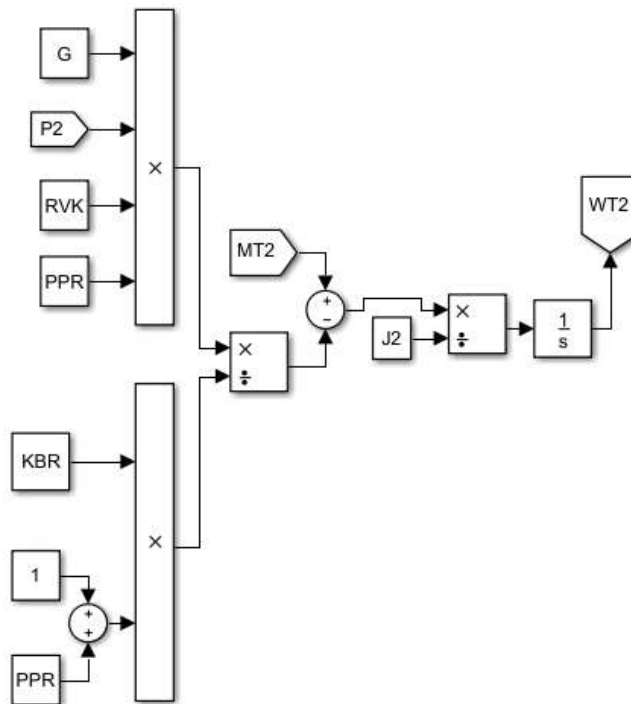


Рисунок 2.11 – Уравнение 2.6

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

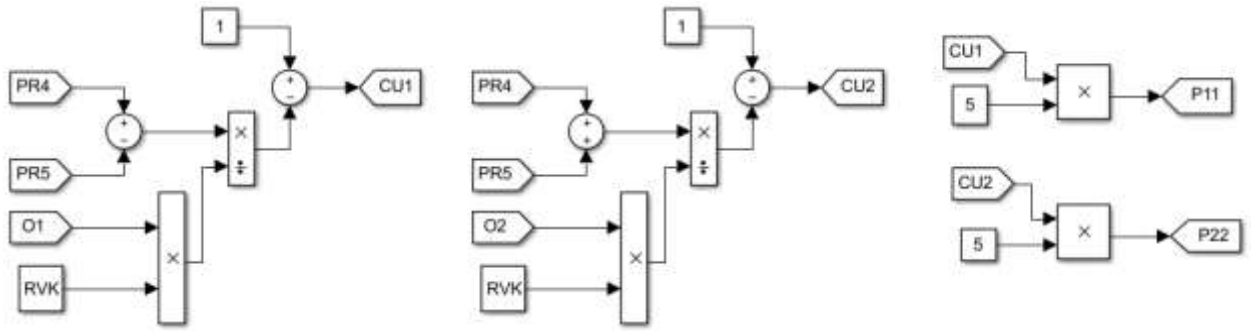


Рисунок 2.12 – Уравнения 2.7 и 2.8

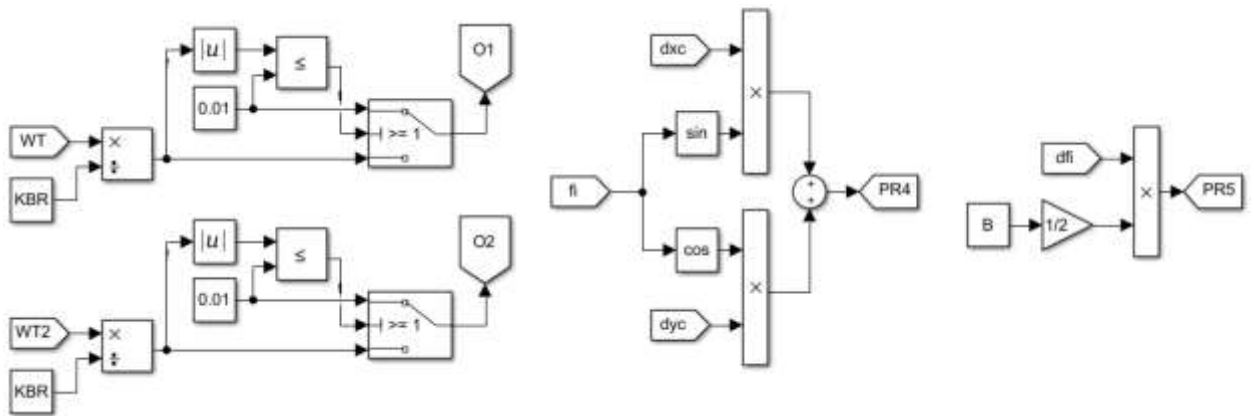


Рисунок 2.13 – Уравнения 2.9, 2.10, 2.11

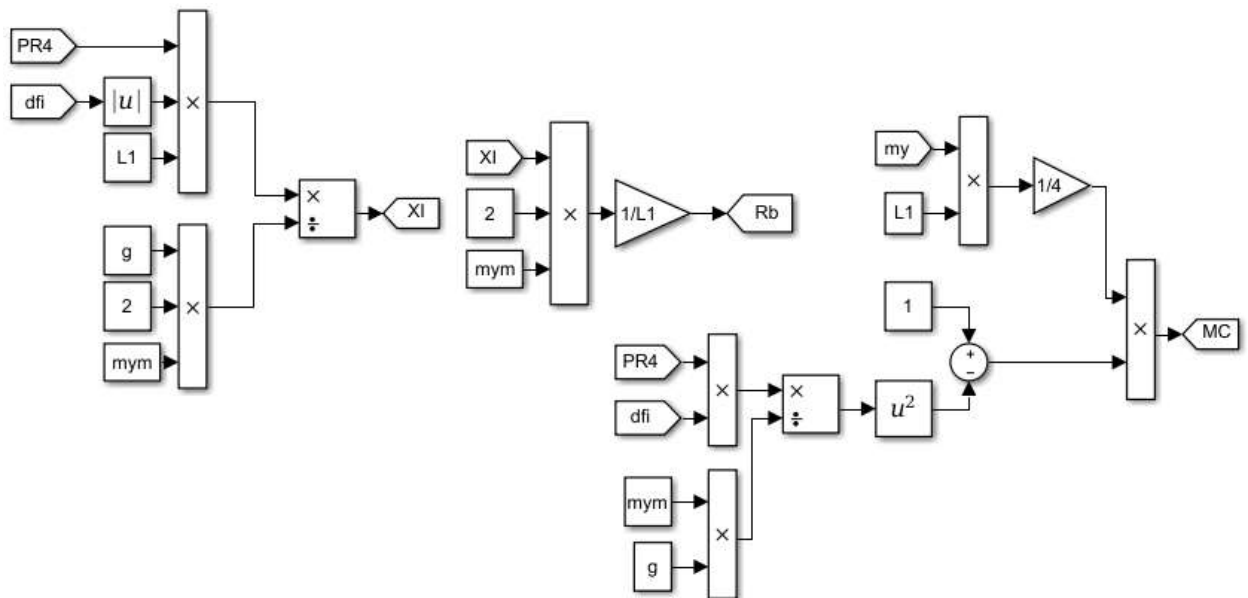


Рисунок 2.14 – Уравнения 2.12, 2.13, 2.14

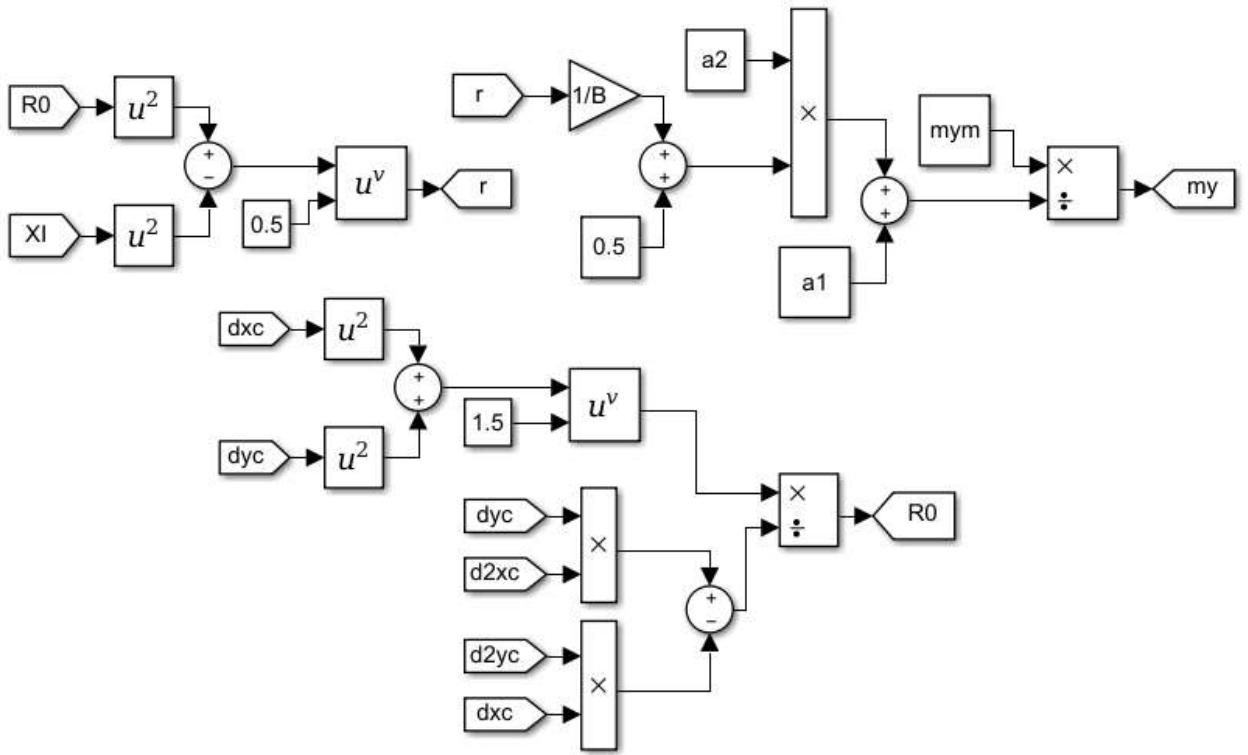


Рисунок 2.15 – Уравнения 2.15, 2.16, 2.17

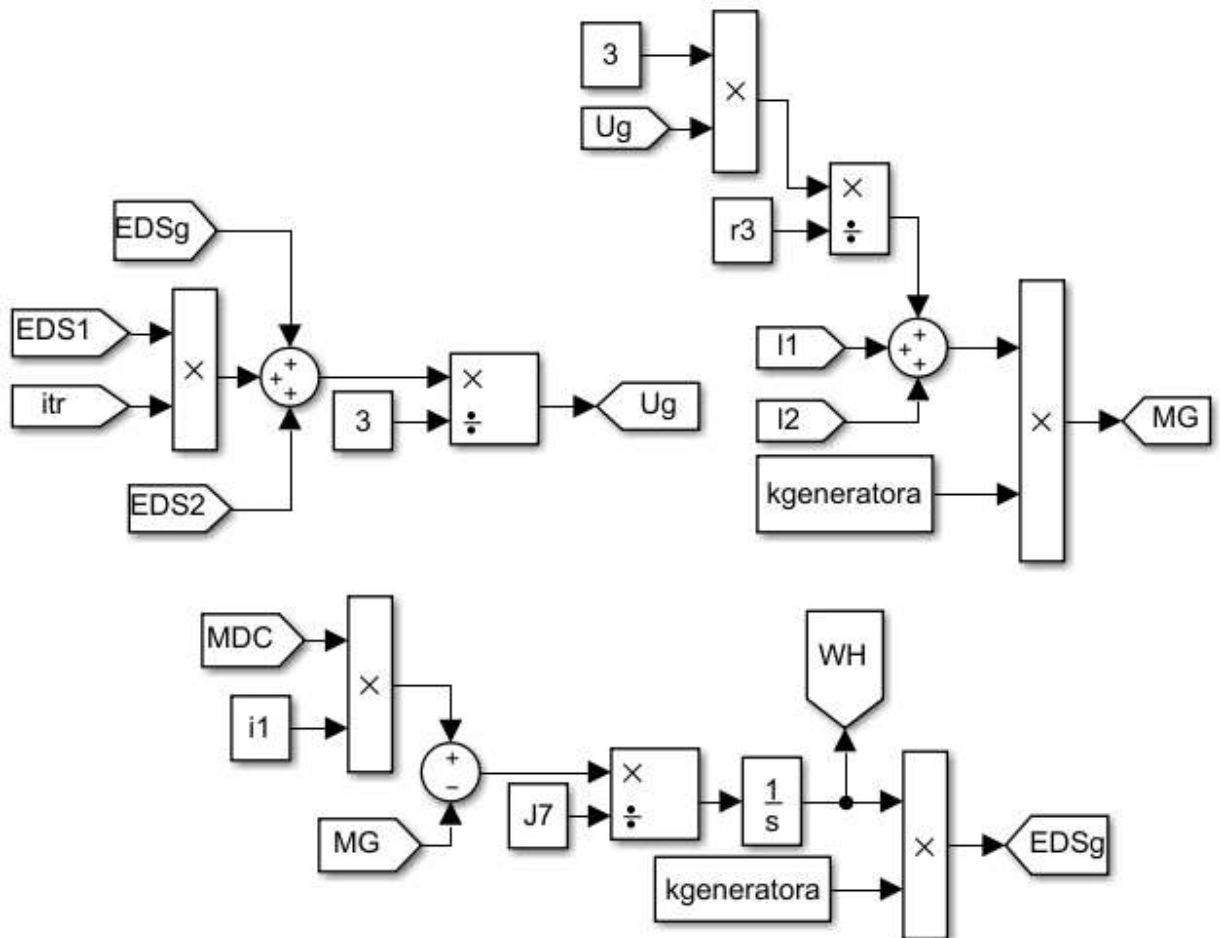


Рисунок 2.16 – Уравнения 2.18, 2.19, 2.20

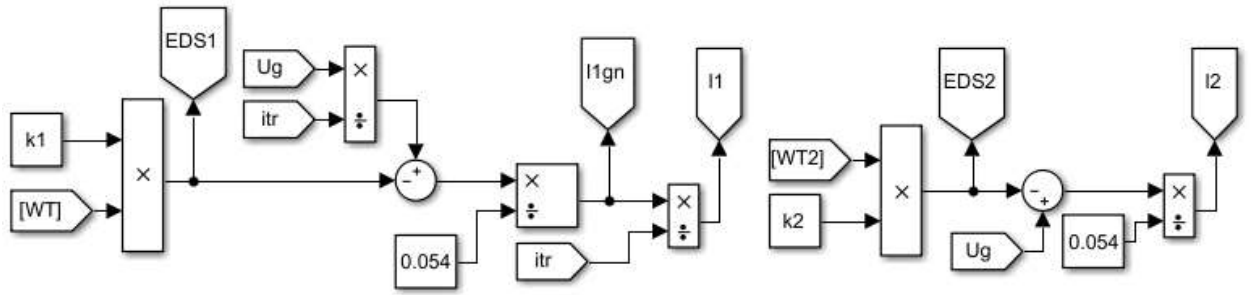


Рисунок 2.17 – Уравнения 2.22-2.26

Представим структурную схему системы регулирования магнитного потока ТЭД на рисунке 2.18:

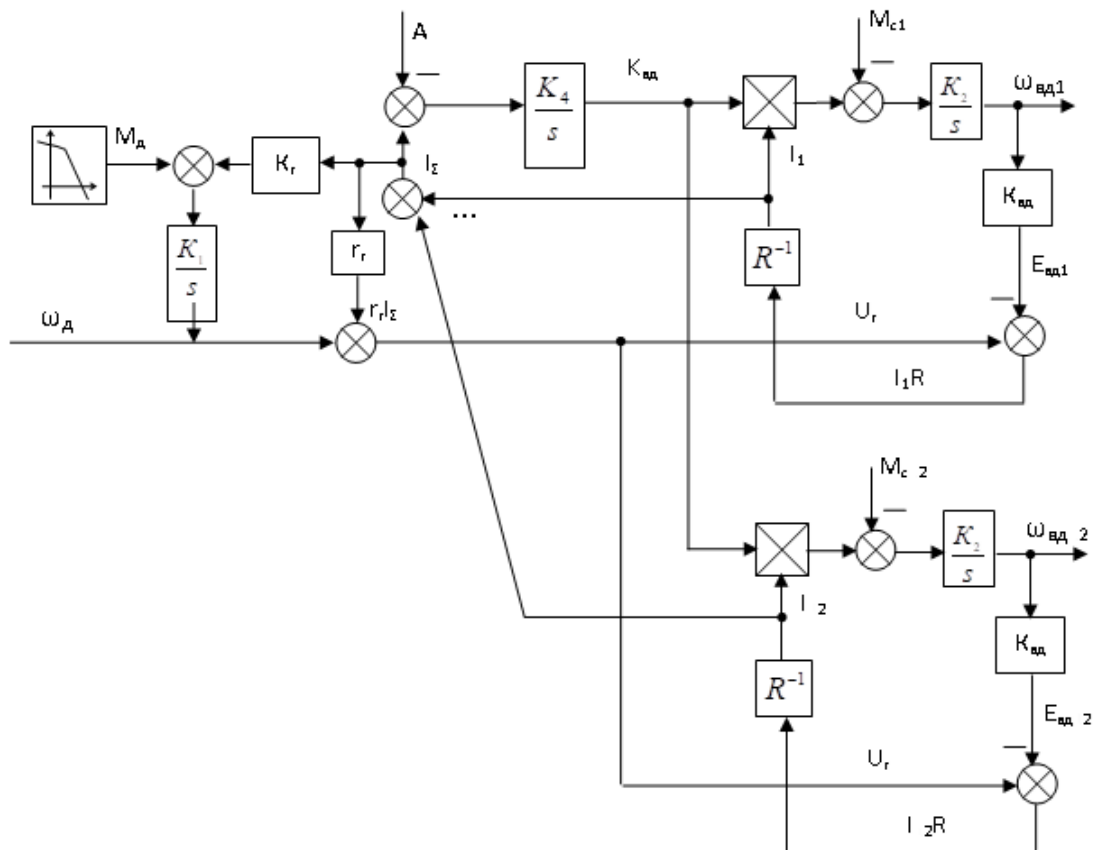


Рисунок 2.18 – Структурная схема ЭТ с синхронным регулированием магнитного потока ТЭД

Использование схемы замещения позволило установить параметры статического равновесия внутри электрической системы Г–2ТЭД (генератор – два параллельно соединенных ТЭД) и использовать эти параметры при моделировании движения БГМ с электрической трансмиссией в среде математического моделирования Simulink и VisSim.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведено имитационное моделирование движения БГМ при работе ТЭД в двух режимах работы. Торможении ТЭД отстающего борта осуществлено уменьшением напряжения соответствующим ПС через коэффициент трансформации $i_{тр}$, характеризующий кратность уменьшения напряжения после ПС отстающего борта, на входе в ТЭД. При этом различие в способе управления ТЭД (динамическое или рекуперативное торможение) задано по направлению тока ТЭД отстающего борта: при положительном токе I_2 ТЭД в обоих случаях питается от генератора, а при отрицательном I_2 – при динамическом торможении подключается активное сопротивление и превращает электрическую мощность ТЭД, который в этих условиях стал «бортовым генератором», в тепло; – а при рекуперативном торможении возвращает энергию в сеть. Возвращённая таким образом энергия может использоваться ТЭД забегающего борта, вместо энергии ранее поступавшей от ДГУ. ДГУ в свою очередь переходит на режим меньшего расхода топлива, руководствуясь указаниями центробежного регулятора топливного насоса высокого давления (неотъемлемой части ДВС).

Проведено имитационное моделирование движения при малых скоростях. Вход в поворот на скорости до 4 м/с. Торможение ТЭД отстающего борта осуществлено за счет перевода электродвигателя отстающего борта в режим динамического торможения, то есть отключением ТЭД отстающего борта от сети и замыкание его на активное сопротивление. Траектория движения представлена на рисунке 3.1:

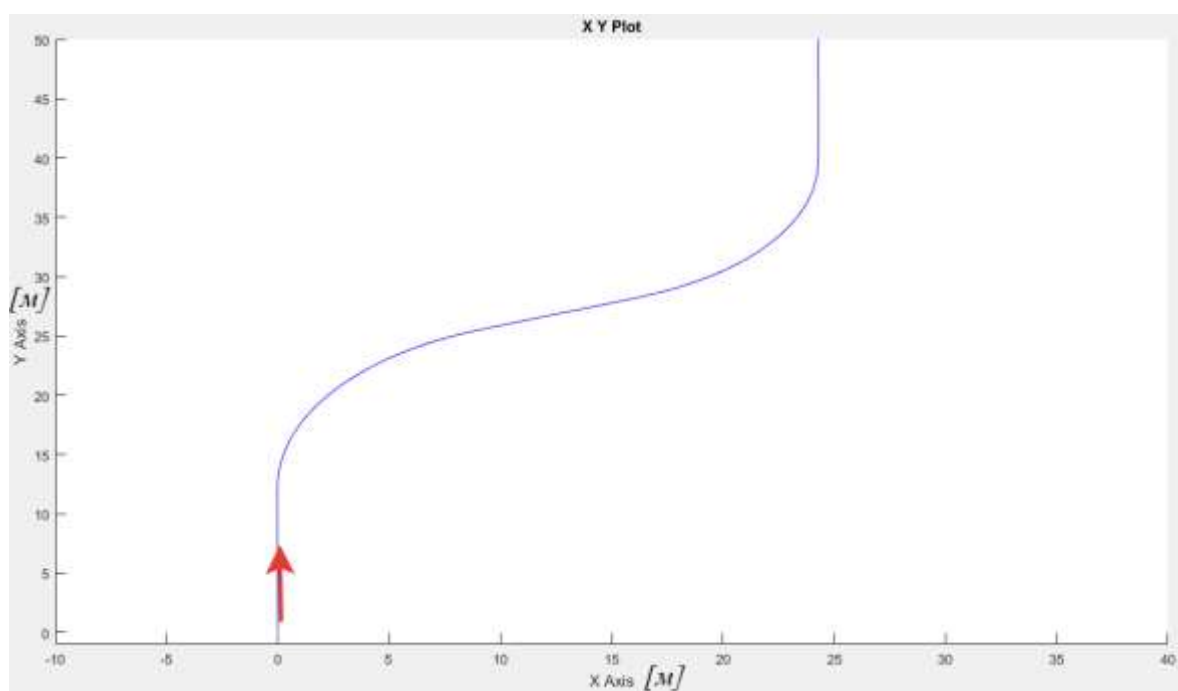


Рисунок 3.1 – Траектория движения БГМ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР

Лист

33

Изменение величин токов I_1 и I_2 при данной траектории движения приведены на рисунке 3.2:

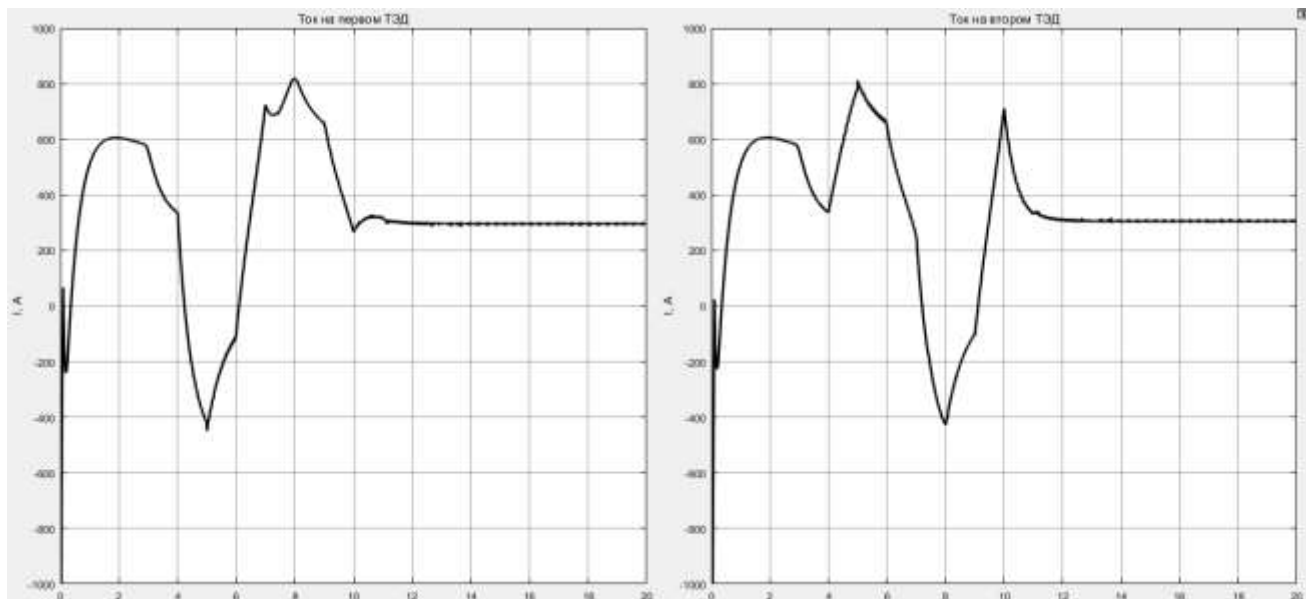


Рисунок 3.2 – Изменение величин токов I_1 и I_2

Из рисунка видно, что при движении прямо установившееся значение токов $I_1 = I_2 = 300\text{A}$, а при поворотах пиковые значения токов на забегающем борту 800 А, а на отстающем -400А. Различие, весьма существенное, что связано с формированием тяговых усилий при входе в поворот. Интерес для электропривода представляют именно пиковые нагрузки по току, поскольку именно они приводят к срабатыванию предохранителей, выводящих всю трансмиссию из работы, что совершенно недопустимо для БГМ.

При моделировании движения входа машины в установившейся поворот, токи определяются скоростью поворота руля (изменением коэффициента $i_{тр}$), в случае когда поворот руля происходит за 1 с, пиковый ток на отстающем борту составляет -270 А, а в установившемся -50 А. (рис. 3.3):

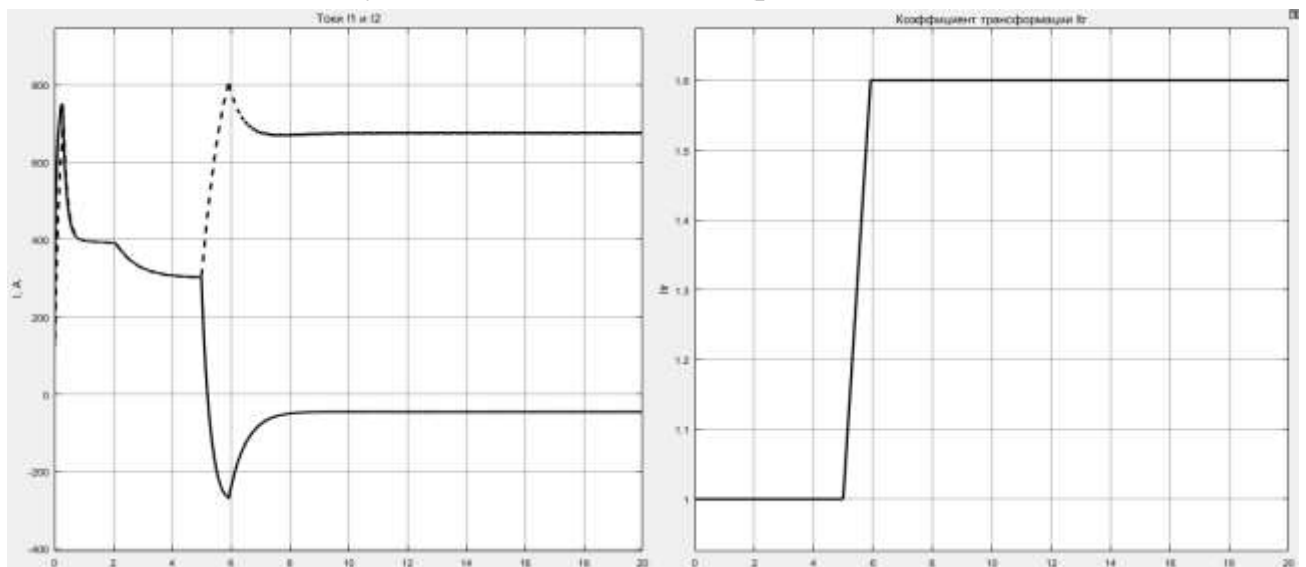


Рисунок 3.3 – Изменение токов и коэффициента трансформации во времени

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Траектория и относительные силы тяги по бортам на рисунке 3.4:

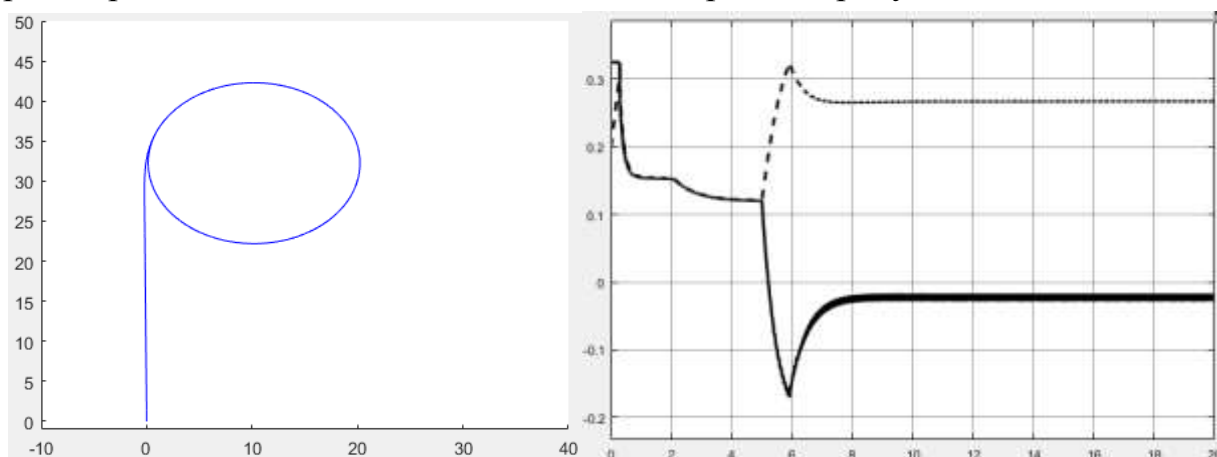


Рисунок 3.4 – Траектория движения и относительные силы тяги по бортам

Приведём скорость машины и напряжение генератора (рис. 3.5):

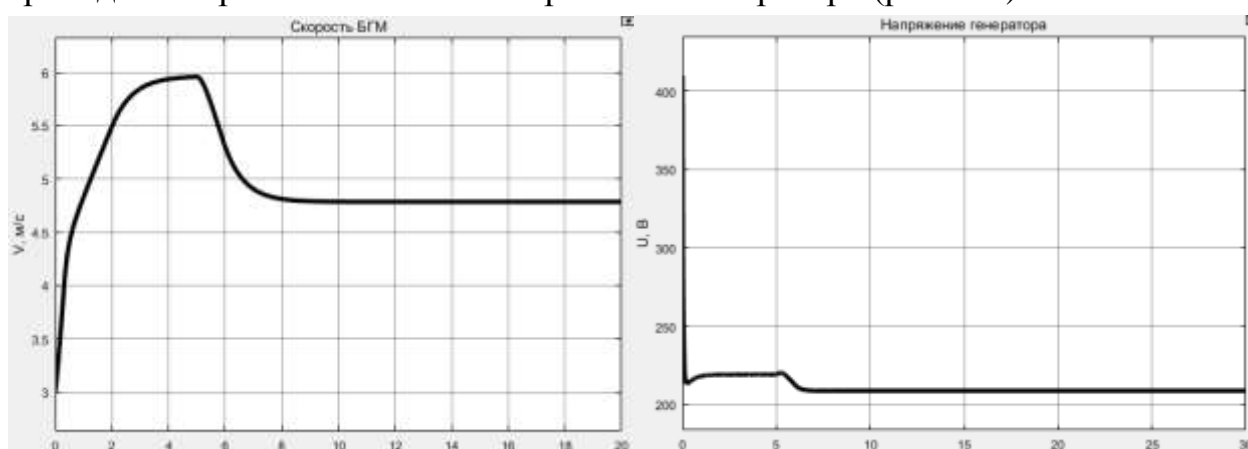


Рисунок 3.5 – Скорость движения БГМ и напряжение генератора

Проанализировав полученные результаты, были сделаны выводы, что вход в поворот осуществляется не за счет дополнительной нагрузки ДВС, а за счет перераспределения мощности между ТЭД забегающего и отстающего бортов. Забегающий борт нагружается всей мощностью ДВС, а отстающий борт работает в режиме генератора и вся энергия, которая могла бы быть накоплена и использована вторично, расходуется в тепло. Отсюда, складывается вывод, что введении рекуперации мощности при повороте может повысить экономичность работы ДВС.

Так же, недостатками обзорной модели служит допущение в виде отсутствия индуктивности в математической модели генератора и ТЭД, а так же отсутствие накопителя энергии, для реализации всех плюсов рекуперативного торможения.

В дальнейшем система управления поворотом исследуемого объекта модернизирована с целью реализации рекуперативного торможения.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

4 ИЗМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИЕЙ

4.1 Математическая модель

В процессе прохождения преддипломной практики на предприятии «АО«Электромашина», была определена уточнённая рациональная структура электрической трансмиссии (рис. 4.1) и новая математическая модель, в которой учтены индуктивности генератора и двух ТЭД, что не сделано в предыдущем варианте ЭТ.

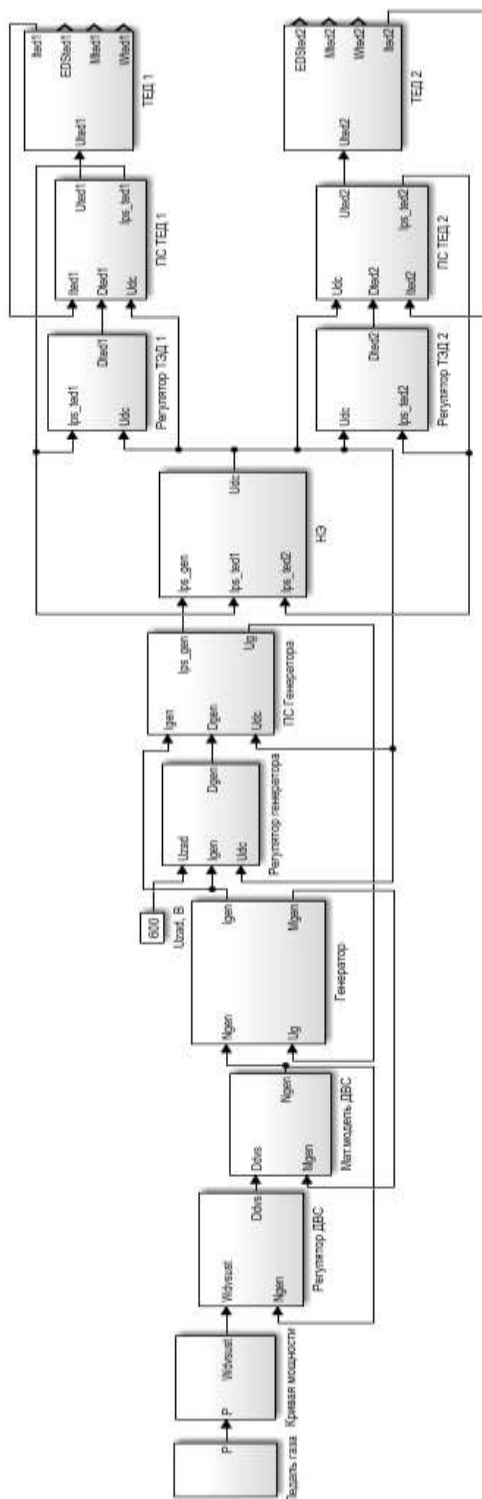


Рисунок 4.1 – Функциональная схема ЭТ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Одним из новых элементов ЭТ является накопитель энергии (НЭ), который заряжается от силового преобразователя генератора и выдаёт в сеть напряжение номиналом в 600 В. Для поддержания в схеме постоянного напряжения и регулирования силы тока заряда НЭ, необходим преобразователь силовой генератора, управление которым осуществляется за счёт регулятора.

Изменения в математической модели электротрансмиссии:

$$M_{\text{ген}} = K_{M\text{ген}} \cdot I_{\text{ген}} \cdot \sin(\alpha_{\text{ген}}) \cdot Zp_{\text{ген}} ; \quad (4.1)$$

$$U_{\text{ген}} = I_{\text{ген}} \cdot R_{\text{ген}} + \varepsilon_{\text{ген}} + I_{\text{ген}} \cdot L_{\text{ген}} \cdot \omega_{\text{ген}} \cdot \sin(\varphi_{\text{ген}}) + L_{\text{ген}} \cdot \frac{dI_{\text{ген}}}{dt} ; \quad (4.2)$$

$$\sin(\varphi_{\text{ген}}) = \sin\left(\arcsin\left(I_{\text{ген}} \cdot L_{\text{ген}} \cdot \frac{\omega_{\text{ген}}}{U_{\text{ген}}}\right)\right); \quad (4.3)$$

$$U_{dc} = \int \frac{(I_{\text{пс_ген}} - I_{\text{пс_тэд1}} - I_{\text{пс_тэд2}})}{C_{dc}} \cdot dt; \quad (4.4)$$

$$I_{\text{пс_ген}} = I_{\text{ген}} \cdot D_{\text{ген}} \cdot \frac{Z_{\text{ген}}}{2}; \quad (4.5)$$

$$I_{\text{пс_тэд}} = I_{\text{тэд}} \cdot D_{\text{тэд}} \cdot \frac{Z_{\text{тэд}}}{2}; \quad (4.6)$$

$$U_{\text{тэд}} = U_{dc} \cdot D_{\text{тэд}}; \quad (4.7)$$

$$U_{\text{тэд}} = I_{\text{тэд}} \cdot R_{\text{тэд}} + \varepsilon_{\text{тэд}} + I_{\text{тэд}} \cdot L_{\text{тэд}} \cdot \omega_{\text{тэд}} \cdot \sin(\varphi_{\text{тэд}}) + L_{\text{тэд}} \cdot \frac{dI_{\text{тэд}}}{dt}; \quad (4.8)$$

$$\sin(\varphi_{\text{тэд}}) = \sin\left(\arcsin\left(I_{\text{тэд}} \cdot L_{\text{тэд}} \cdot \frac{\omega_{\text{тэд}}}{U_{\text{тэд}}}\right)\right). \quad (4.9)$$

В системе уравнений (4.1) – (4.9) использованы следующие обозначения: $K_{M\text{ген}}$ – токомомментный коэффициент генератора [Нм]; $\alpha_{\text{ген}}$ – угол нагрузки генератора [рад]; $Zp_{\text{ген}}$ – число пар полюсов генератора; $R_{\text{ген}}$ – сопротивление статора генератора [Ом]; $\varphi_{\text{ген}}$ – угол между векторами тока и напряжения статора генератора [рад]; $L_{\text{ген}}$ – индуктивность статора генератора [Гн]; C_{dc} – суммарная ёмкость силовой шины [Ф]; $I_{\text{пс_ген}}$ – ток на выходе преобразователя генератора [А]; $D_{\text{ген}}$ – регулировочный коэффициент (0..1); $Z_{\text{ген}}$ – число фаз генератора; $D_{\text{тэд}}$ – регулировочный коэффициент (0..1); $Z_{\text{тэд}}$ – число фаз ТЭД; U_{dc} – напряжение силовой шины [В]; $\varphi_{\text{тэд}}$ – угол между векторами тока и напряжения статора ТЭД [рад]; $L_{\text{тэд}}$ – индуктивность статора ТЭД [Гн]; $R_{\text{тэд}}$ – сопротивление статора ТЭД [Ом].

Представим реализованные уравнение в среде Simulink (рис. 4.2-4.5):

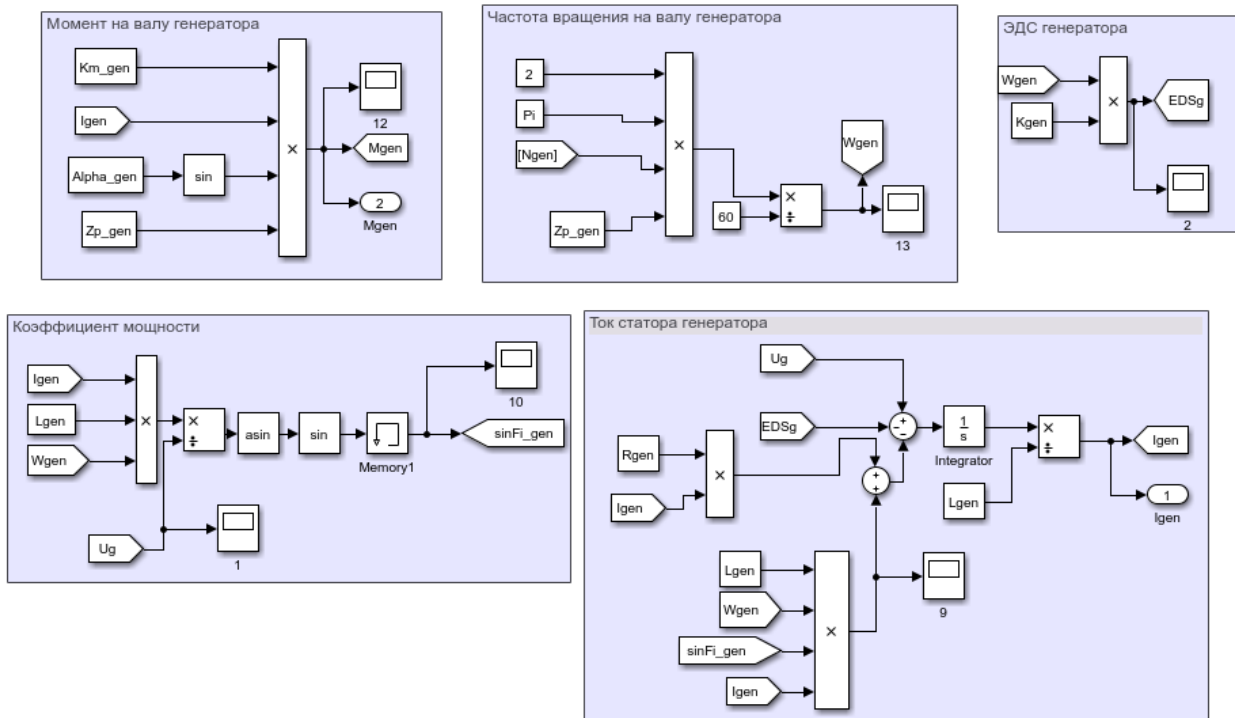


Рисунок 4.2 – Уравнения блока генератора

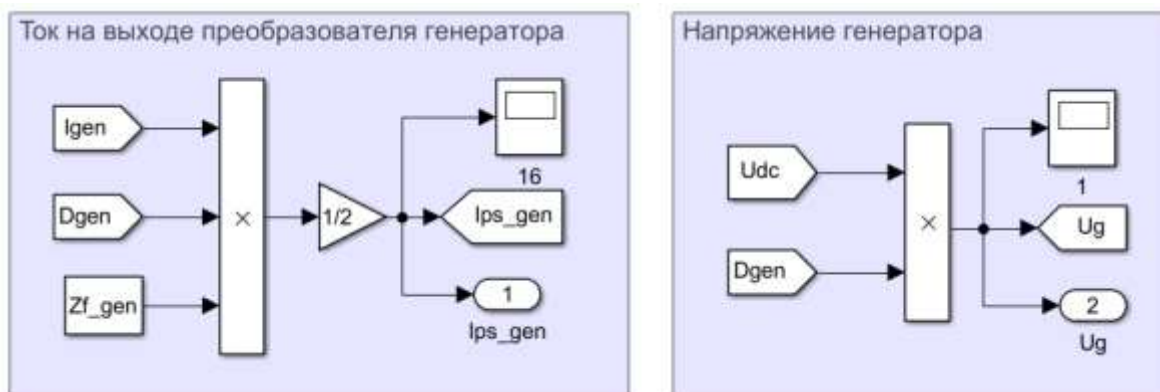


Рисунок 4.3 – Уравнения блока ПС генератора

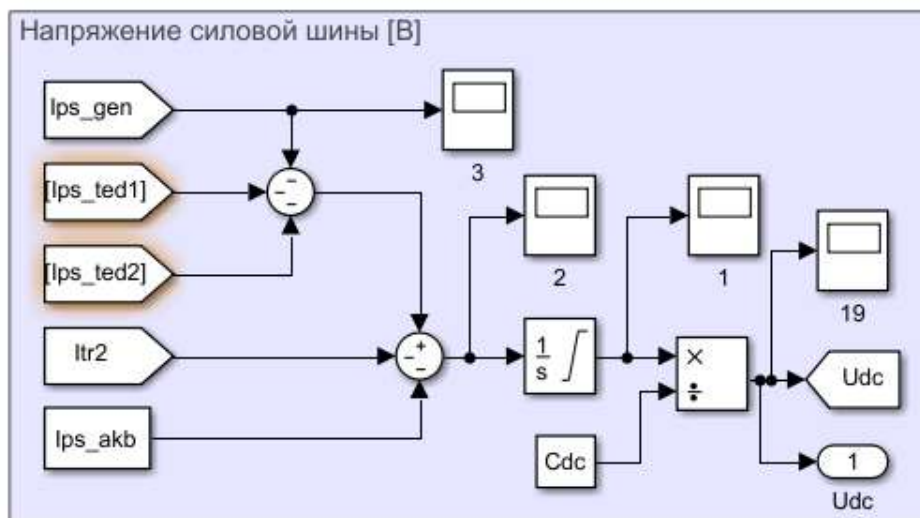


Рисунок 4.4 – Блок накопителя энергии

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

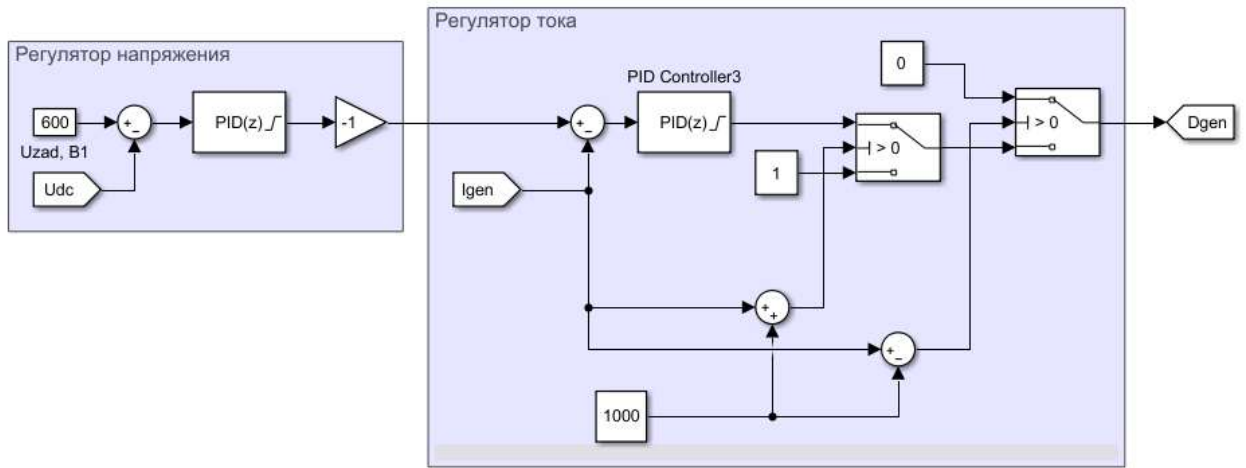


Рисунок 4.5 – Блок регулятора генератора

Регулятор генератора состоит из двух ПИ регуляторов: регулятор по напряжению и регулятор по току. Для настройки регуляторов, главными критериями были показателями качества: перерегулирование и время регулирования, подобранные коэффициенты для регуляторов удовлетворяющие заданные качества представлены на рисунке 4.6 [4, 23]:

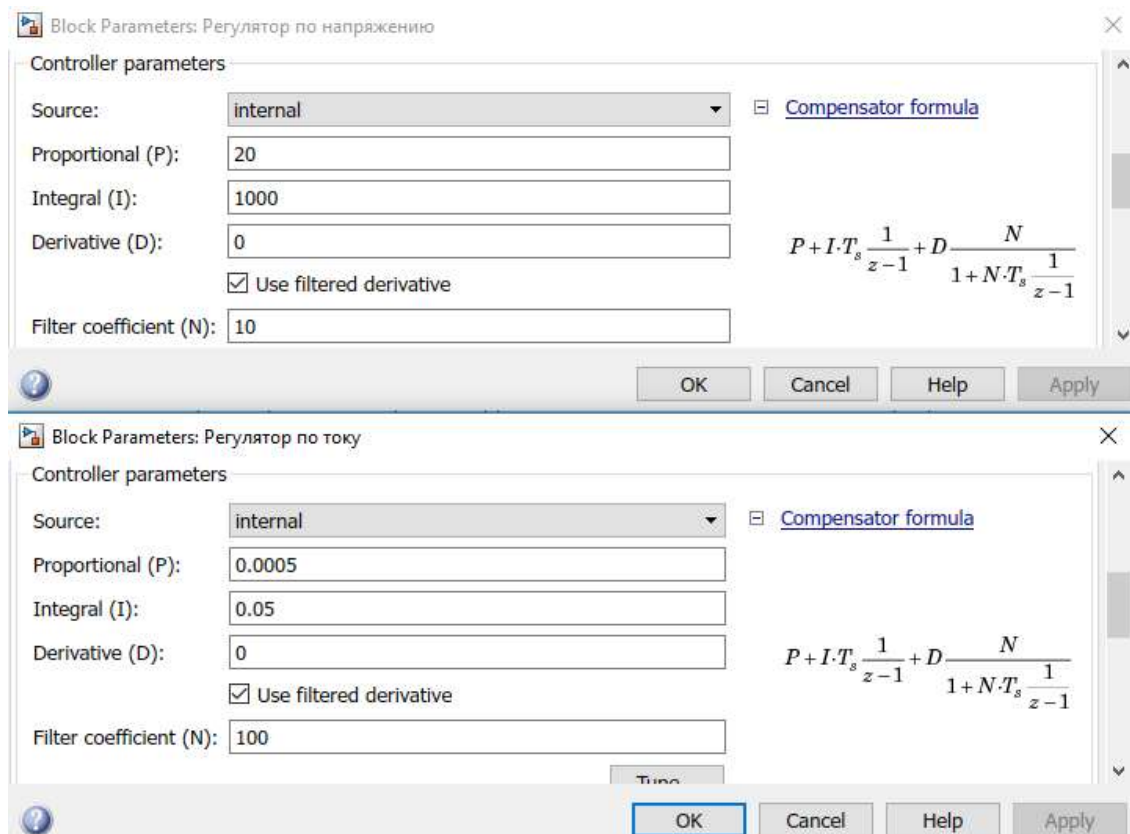


Рисунок 4.6 – Коэффициенты регуляторов

4.2 Результаты моделирования

Проведено имитационное моделирование работы дизель – генераторной установки и накопителя энергии под нагрузкой (рис. 4.7):

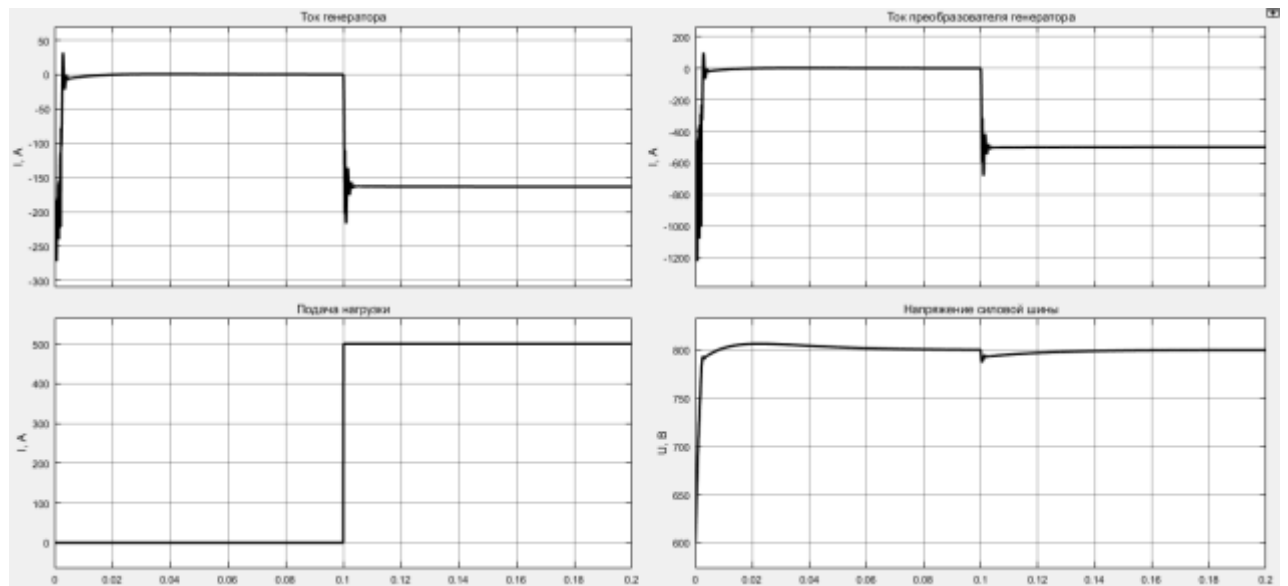


Рисунок 4.7 – Результаты моделирования

Из полученных результатов видно, что напряжение в силовой шине поддерживается на постоянном уровне 600 В. Когда накопитель энергии заряжен до установленного значения, генератор перестаёт генерировать ток. При подаче нагрузки, преобразователь генератора выдаёт такой ток, чтобы восстановить просадку заряда на накопителе энергии и обрабатывать внешнюю нагрузку.

Далее, продемонстрируем ожидаемые преимущества рекуперативного торможения в имитационном моделировании поворота.

Графики на рисунках 3.3, 3.4 справедливы как для динамического торможения, так и для рекуперативного. По энергетическим же показателям, то есть по затратам момента и мощности на поворот, динамическое торможение характеризуется графиками (а), а рекуперативное – графиками (б) на рис. 4.8 и 4.9 соответственно:

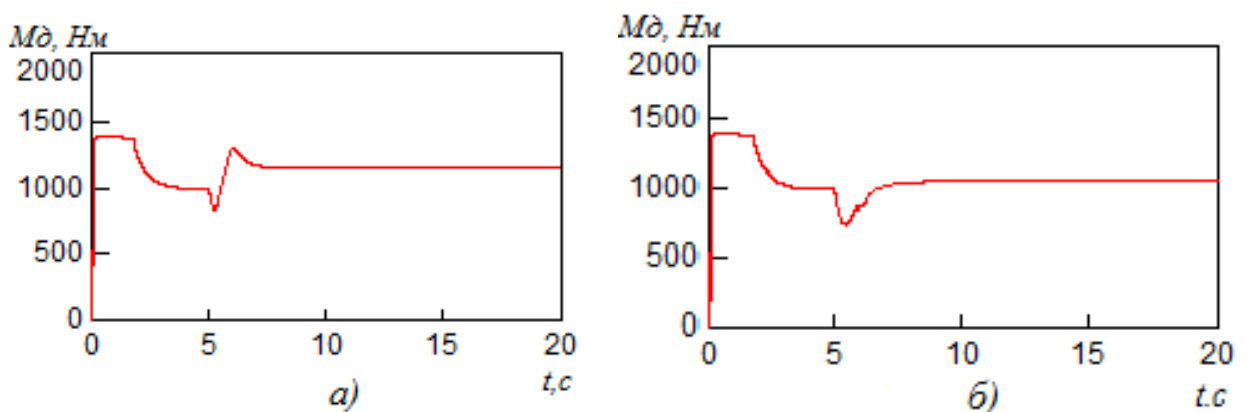


Рисунок 4.8 – Момент ДВС при динамическом (а) и рекуперативном (б) торможении

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

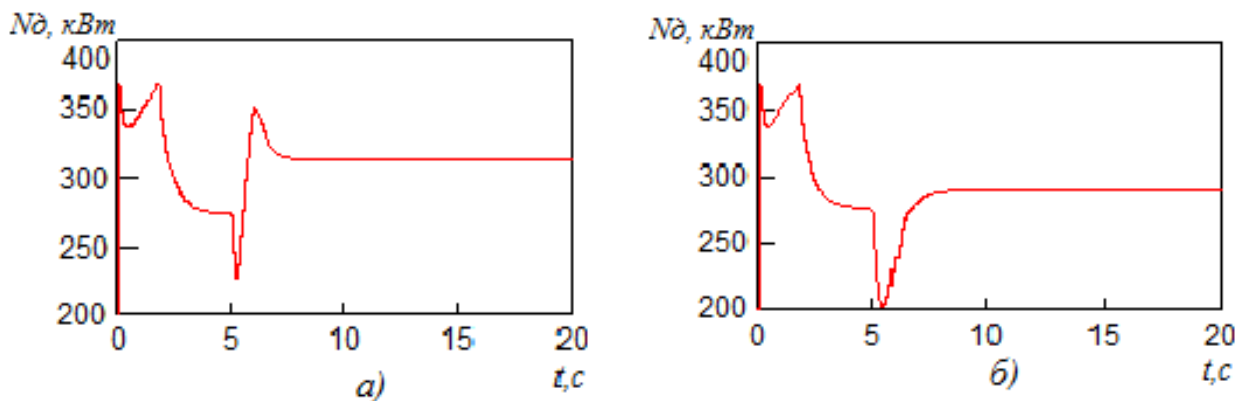


Рисунок 4.9 – Мощность ДВС при динамическом (а) и рекуперативном (б) торможении, Вт

На рисунке 4.10 приведены мощности рекуперации при различных скоростях движения. Пиковая мощность рекуперации больше при движении БГМ с большой скоростью и малой кривизной (минимальный радиус 104 м, скорость в прямолинейном участке 18 м/с, в повороте 17,4 м/с), и работе ТЭД во втором режиме (больших скоростей) (при $k=0,98$; $r=0,018$ Ом). Поворот руля в пределах управляемого движения без заноса ограничен всего 1,06 от 1, которой соответствует прямолинейное движение.

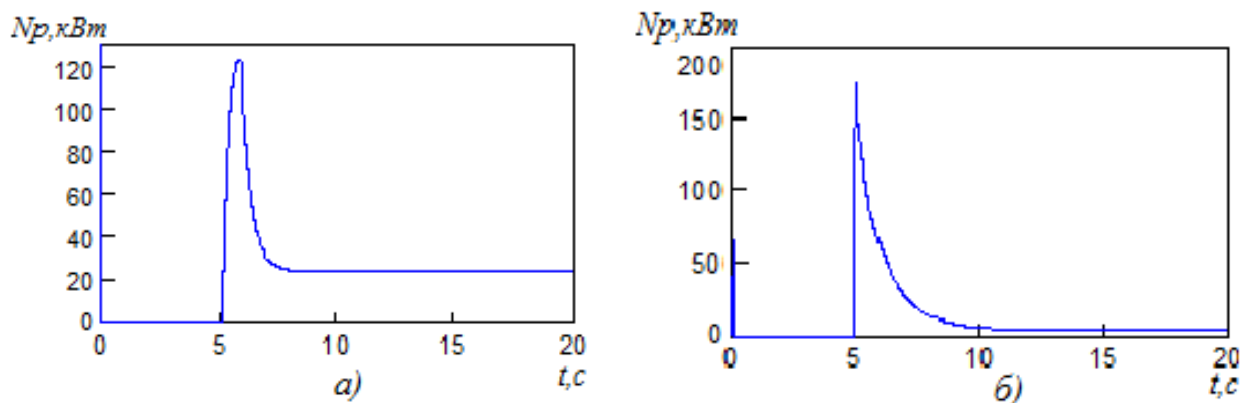


Рисунок 4.10 – Мощность рекуперации при движении со скоростью 5 м/с (а) и 18 м/с (б)

Мощность, передаваемая ТЭД забегавшего борта при скорости БГМ 17,4 м/с и установившемся радиусе поворота $R=104$ м, составляет 206 кВт. А в процессе входа в поворот рекуперативная мощность (см. рис 4.10б), составляет 150 кВт, а в установившемся повороте 5 кВт.

Интересно оценить вклад рекуперативной мощности при движении с полным использованием мощности ДВС. Известно, что наиболее опасными режимами по нагрузке и по рекуперации мощности является движение со скоростью до 10 м/с. Например, при движении с той же скоростью 5 м/с, сопротивлении передвижению $\psi=0,08$, $\mu=1$ мощность рекуперации в установившемся повороте достигает 110 кВт. Соответственно меньше мощности требуется от ДВС (рис. 4.11). Скорости

движения БГМ приведены на рис. 4.12. При этом радиусы установившегося поворота разные: при динамическом торможении 15,6 м, а при рекуперативном – 11,7 м.

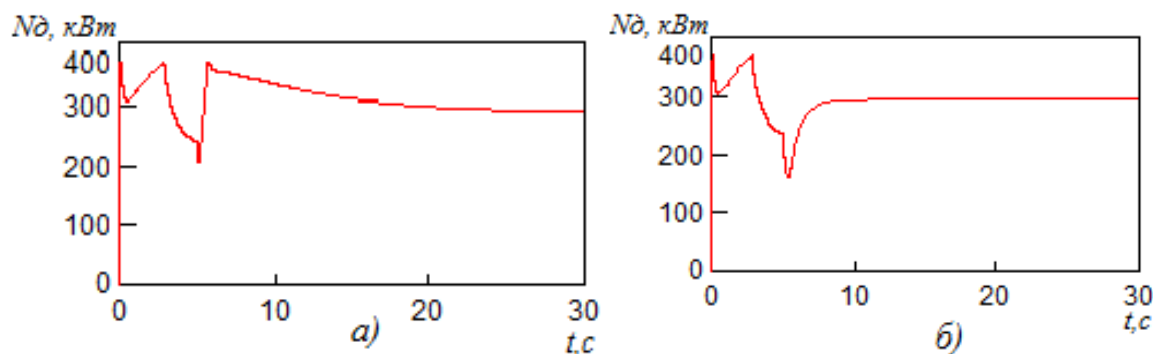


Рисунок 4.11 – Мощность ДВС при динамическом (а) и рекуперативном (б) торможении ТЭД отстающего борта

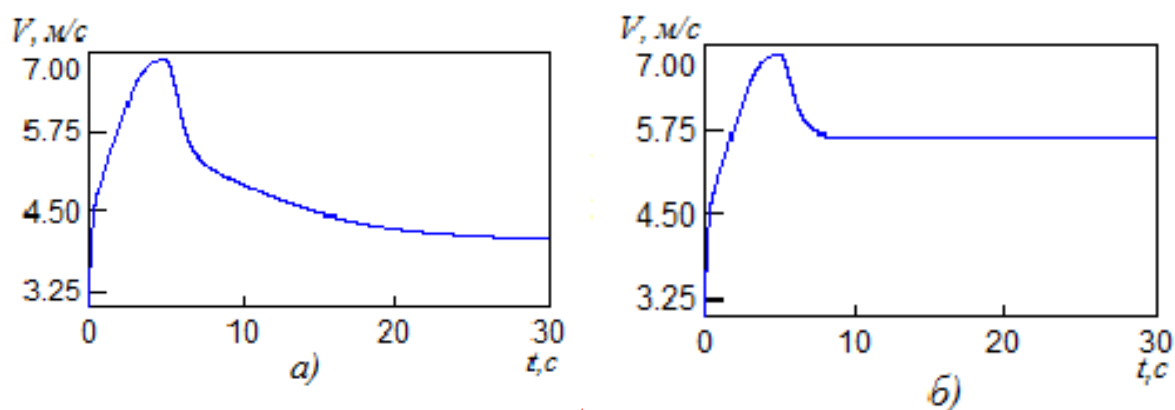


Рисунок 4.12 – Скорость БГМ при динамическом (а) и рекуперативном (б) торможении ТЭД отстающего борта

Таким образом, наибольших величин рекуперативная мощность достигает при переходных режимах изменения траектории движения, в эти периоды она сопоставима с мощностью ТЭД забегающего борта при установившемся повороте. В некоторых условиях маневрирования не хватает мощности ДВС для совершения манёвра при динамическом торможении отстающего борта, но вполне хватает при рекуперативном торможении.

Использование генераторного режима ТЭД целесообразно не только при повороте БГМ, но также и при торможении. Традиционные механические тормоза превращают кинетическую энергию движущейся машины в тепло и рассеивают в окружающей среде. Величина этой энергии особенно впечатляет, когда сравнишь её с энергией, нарабатываемой ДВС для последующего восстановления скоростного режима. Так при торможении машины со скорости 72 км/час (20 м/с) до нуля рассеивается $mv^2/2$ Дж кинетической энергии. Для машины массой 18 т – это 3,6 МДж, которые двигатель мощностью 360 кВт нарабатывает за 10 с.

Воспринять и сохранять такое количество энергии должен накопитель энергии, так как при торможении, в отличие от поворота, нет потребителей электрической энергии. Ёмкость аккумуляторной батареи составляет для тяжёлой гусеничной техники 7,3 МДж. Совместная работа конденсаторов и АКБ позволяет аккумулировать энергию быстро и эффективно.

Проведено исследование торможения БГМ со скорости 18 м/с до 9 м/с синхронным регулирование силовых преобразователей обоих бортов. Основные математические зависимости, характеризующие заряд АКБ взяты из работы [2, 6].

Баланс мощности при рекуперативном торможении БГМ.

На рисунке 4.13 представлена скорость БГМ и работа по преодолению внешних сопротивлений:

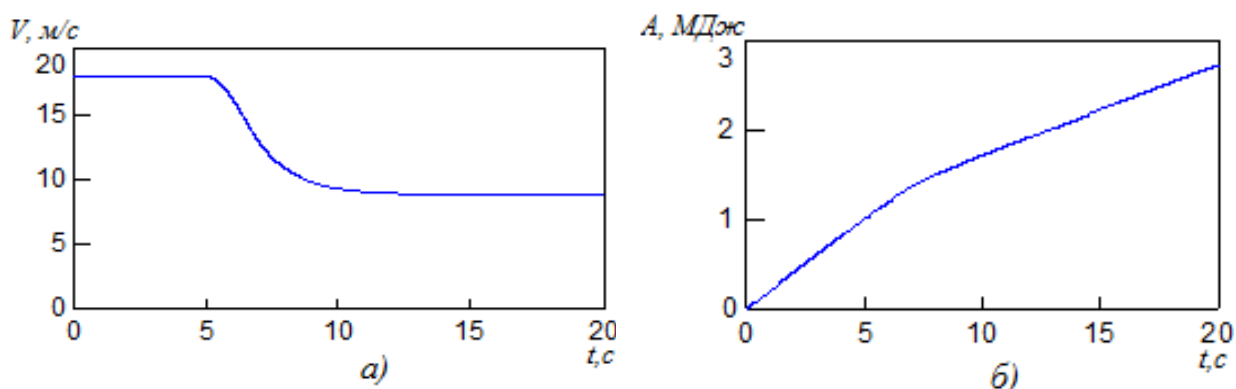


Рисунок 4.13 – Скорость БГМ при рекуперативном торможении обоих бортов (а) и работа по преодолению внешних сопротивлений (МДж) (б)

На рисунке 4.14 представлена мощность заряда и накопленная энергия АКБ:

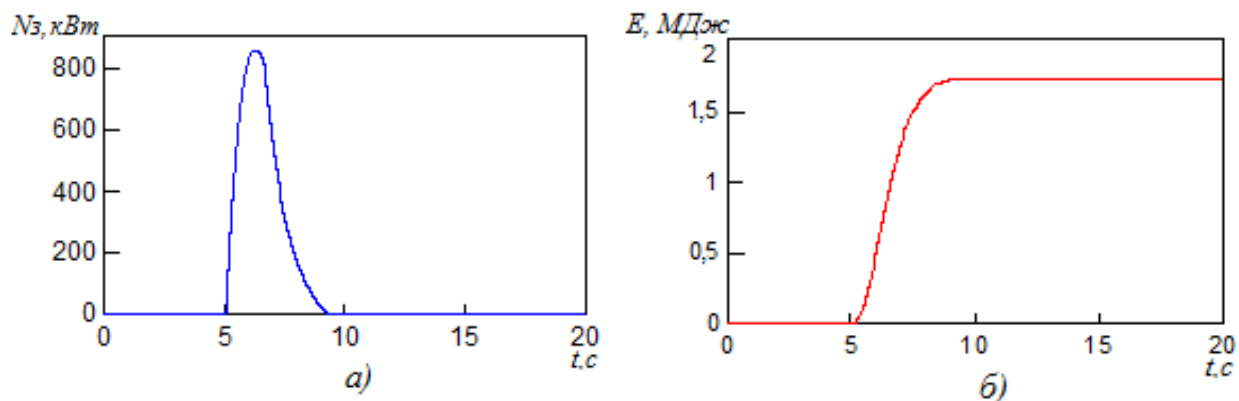


Рисунок 4.14 – Мощность заряда АКБ при рекуперативном торможении БГМ (кВт) (а) и накопленная при этом энергия (МДж) (б)

Высвобождаемая кинетическая энергия корпуса БГМ составляет 2,28 МДж, работа по преодолению внешних сопротивлений за период торможения между 5 и 9 сек – 0,58 МДж, а запасённая в аккумуляторе – 1,72 МДж. С допустимой в моделировании точностью баланс энергии сходится, что свидетельствует о

корректности получаемых результатов исследования свойств электрической трансмиссии, обеспечивающей рекуперацию мощности с отстающего борта на забегающий при повороте и рекуперацию механической энергии в электрическую при торможении всей машины. Это создает предпосылки для дальнейшего использования данной математической модели БГМ с интеллектуальным электрическим приводом для исследования свойств гибридной трансмиссии.

					24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена математическая модель движения БГМ, имеющая вид системы дифференциальных уравнений, описывающих движение машины в декартовых координатах, а также уравнений статического равновесия электротрансмиссионной установки, полученных с использованием схемы замещения электропривода.

2. Проведено имитационное моделирование движения БГМ в характерных режимах поворота с помощью перевода ТЭД отстающего борта в режим динамического торможения на малой скорости (4 м/с) с радиусом 10 м. Продемонстрирована нагрузка ТЭД забегающего борта по току до 800 А, и работа отстающего ТЭД в режиме генератора на протяжении всего поворота.

3. Проанализировав полученные результаты, были сделаны выводы, что вход в поворот осуществляется не за счет дополнительной нагрузки ДВС, а за счет перераспределения мощности между ТЭД забегающего и отстающего бортов. Забегающий борт нагружается всей мощностью ДВС, а отстающий полностью разгружается.

4. Представлена уточнённая функциональная схема и математическая модель ЭТ с целью реализации рекуперативного торможения.

5. Проведено сравнение динамического и рекуперативного торможения отстающего борта в повороте БГМ. Выяснено, что при рекуперативном торможении требуется меньше мощности от ДВС. При этом радиусы и скорости установившегося поворота разные: при динамическом торможении 15,6 м и 4 м/с, а при рекуперативном – 11,7 м и 5,5 м/с.

6. Проведено имитационное моделирование рекуперативного торможения БГМ со скорости 18 м/с до 9 м/с, высвобождаемая кинетическая энергия корпуса БГМ составляет 2,28 МДж, работа по преодолению внешних сопротивлений за период торможения между 5 и 9 сек – 0,58 МДж, а запасённая энергия в аккумуляторе составила 1,72 МДж.

7. Из проделанной работы можно сделать вывод, что благодаря введению рекуперативного торможения можно увеличить среднюю скорость движения машины в повороте, при этом уменьшив радиус поворота. Так же, ДВС будет работать в щадящем режиме, что будет способствовать экономии топлива.

					24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов С.А. Создание электрических трансмиссий для колёсных и гусеничных машин //Материалы научно-практической конференции. – Спб: Изд-во «Любавич», 2016. – С. 61-75.
2. Акимов, С.В. Электрооборудование автомобилей // С.В. Акимов, Ю.П. Чижов. – М.:ЗАО «КЖИ «За рулём», 2004. – 384 с.
3. Бекетов, С.А. Повышение средней скорости движения танка за счет улучшения управляемости: диссертация, канд. техн. наук/С.А. Бекетов. -М.: В А БТВ, 1992. - 139 с.
4. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования. – 3- е изд., испр. / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 768 с
5. Болдырев Р.Н. Спецглавы теории поворота быстроходных гусеничных машин: учебное пособие / Р.Н. Болдырев, С.В. Кондаков. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1998. – 95 с.
6. Варламов Д.О. Особенности построения системы управления тяговой батареей гибридного автомобиля / Журнал “Автомобильных Инженеров”, Часть1) № 5, 2007г.
7. Воронин, С.Г. Электропривод летательных аппаратов: Учебно-методический комплекс. – Offline версия 1.0. – Челябинск, 1995-2011. – файлов 516, ил.
8. Ганджа, С.А. Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком. Анализ, синтез, внедрение в производство: автореф. дис. док. техн. наук: специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты / С.А. Ганджа; науч. рук. С.Г. Воронин; Юж.-Урал. гос. ун-т: ЮУрГУ. – 2012.
9. Генератор гибридной силовой установки бульдозера / С.Г. Воронин, А.И. Согрин, Е.С. Швалёв, В.И. Кислицин // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 2. – С. 8-11.
10. Гомберг, Б.Н. Имитационное моделирование движения быстроходной гусеничной машины с электрической трансмиссией / Б.Н. Гомберг, С.В. Кондаков, Л.С. Носенко, О.О. Павловская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37 (296). – Челябинск: Изд. ЮУрГУ. – С. 73–81.
11. Гуськов В.В., Опейко А.Ф. Теория поворота гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1984. – 332 с.
12. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых двигателей/ под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

					24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

13. Держанский, В.Б. Критерии управляемости гусеничной машины и синтез оптимального управления: диссертация ... д-ра техн. наук/В.Б. Держанский. -Курган, 1997. - 350 с.

14. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1968. – 396 с.

15. Закладной А.Н. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями: монография / А.Н. Закладной, О.А. Закладной. – Киев: Изд-во «Либра», 2012. – 190 с.

16. Исаков, П.П. Электро-механические трансмиссии гусеничных тракторов / П.П. Исаков, П.Н. Иванченко, А.Д. Егоров. – Л.: Машиностроение, 1981. – 302с.

17. Кондаков, С.В. Обеспечение управляемости быстроходных гусеничных машин на переходных режимах криволинейного движения: монография. – 2-е изд., испр. и доп. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2007. – 102 с.

18. Кондаков С.В., Павловская О.О. Автоматизированное управление движением быстроходной гусеничной машины: Монография Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2013. – 105 с.

19. Кондаков, С.В. Повышение подвижности быстроходной гусеничной машины путем автоматизации системы управления криволинейным движением: монография / С.В. Кондаков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 108 с.

20. Котиев, Г.О. Синтез системы управления тяговыми электродвигателями для индивидуального привода ведущих колёс автомобиля / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2011. – № 12. – М: Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана. – С. 1–20.

21. Овчинников, И.Е. Вентильные электрические двигатели и приводы на их основе: курс лекций. – СПб.: Корона-век, 2006. – 336 с.

22. Петров, В.А. Автоматическое управление бесступенчатых передач самоходных машин / В.А. Петров. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.

23. Петровский В.С. Теория автоматического управления: Учебное пособие / В.С. Петровский. – Воронеж: ВГЛТА, 2010. – 247 с.

24. Погосов Д. Б. Методы энергоэффективного управления движением робототехнических внедорожных транспортных систем: Диссертация/ Д.Б. Погосов. – Таганрог: 2015. – 190 с.

25. Разработка макета шасси с электрической трансмиссией и цифровой системой управления шасси для перспективной гусеничной машины легкой весовой категории / Отчет о НИР ОАО НПО «Электромашина». Исп. Харин С.А., Носенко Л.С., Абрамов С.А., Благоев С.А. – Челябинск, 2010. – 56 с.

26. Филичкин Н.В., Кондаков С.В. Трансмиссии военных гусеничных машин: уч. пособие. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2000. – 136 с.

					24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

27. Шапкин, А.Н. Методика управляемости гусеничных машин / А.Н. Шапкин // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовки кадров: материалы 77-й междунар. науч.-техн. конф. ААИ, 27–28 марта 2012 г. – М.: МГТУ «МАМИ», 2012. – С. 243–252.

28. Future Combat Systems: Non-Line-of-Sight Cannon (FCS: NLOS-C). // URL: <http://www.globalsecurity.org/military/library/budget/fy2008/dote/army/2008fcsnlosc.pdf>.

29. Paolo Valpolini. Infantry Fighting Vehicles and Armoured Personnel Carriers. // URL: http://armadainternational.com/assets/images/pdf/5-Armada_Oct_Nov_2013_-_Compendium_IFV.pdf.

30. «НПО «Электромашина» // URL: <http://www.npoelm.ru/> (дата обращения: 20.02.2018).

					24.05.06.2018.281.00 ПЗ ВКР	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		