

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Камышьян Альберт Михайлович



**СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ
БЕСКОНТАКТНЫМ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Козярук А.Е.

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОТКРЫТОГО СПОСОБА ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.....	10
1.1 Тенденции и проблемы развития открытого способа добычи полезных ископаемых	10
1.2 Карьерный автомобильный транспорт	15
1.2.1 Критерии выбора типа карьерного автотранспорта	16
1.2.2 Карьерные автосамосвалы с шарнирно-сочлененной рамой.....	17
1.2.3 Карьерные автосамосвалы с жесткой рамой	18
1.3 Варианты трансмиссий автосамосвалов	19
1.3.1 Гидромеханическая трансмиссия	21
1.3.2 Электромеханическая трансмиссия.....	24
1.4 Выводы по Главе 1.....	31
ГЛАВА 2 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ТРАНСМИССИИ. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ.....	33
2.1 Состав электромеханических трансмиссий	33
2.1.1 Дизельный двигатель	35
2.1.2 Тяговый генератор	37
2.1.3 Тяговый двигатель	40
2.1.4 Преобразователь частоты	44
2.2 Математическая модель электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала.....	50
2.2.1 Математическая модель генератора.....	50
2.2.2 Математическая модель диодного выпрямителя.....	54
2.2.3 Математическая модель асинхронного электропривода с векторной системой управления.....	58
2.2.4 Имитационная модель электромеханической трансмиссии	61
2.3 Выводы по Главе 2.....	68
ГЛАВА 3 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ	70
3.1 Методы повышения показателей энергетической эффективности за счет модернизации силовой части электромеханической трансмиссии	71
3.1.1 Математическая модель мостовой трехфазной схемы выпрямителя на основе полностью управляемых полупроводниковых ключей	73

3.1.2 Ограничения при работе выпрямителя	80
3.1.3 Определение параметров схемы	82
3.1.4 Система управления активным выпрямителем.....	83
3.2 Методы повышения показателей энергетической эффективности за счет установки фильтров	90
3.2.1 Последовательная и гибридная схемы подключения активного фильтра	92
3.2.2 Параллельный активный фильтр	92
3.2.3 Система управления активным фильтром	94
3.3 Математическое моделирование возможных вариантов модернизации электромеханической трансмиссии	97
3.4 Выводы по Главе 3.....	103
ГЛАВА 4 РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ	104
4.1 Модернизация электрической части.....	104
4.2 Модернизация вспомогательных систем	109
4.2.1 Модернизация системы диагностики.....	109
4.2.2 Модернизация бортовой системы	113
4.3 Выводы по Главе 4.....	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120
ПРИЛОЖЕНИЕ А Структурная схема заводского стенда для испытаний электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Параметры электрических двигателей заводского стенда для испытаний электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ В Тексты программ функциональных блоков системы прямого управления мощностью активного выпрямителя	137
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Патенты на изобретения.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт внедрения результатов работы в учебный процесс.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Справка о внедрении результатов работы.....	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Эффективность горнодобывающего предприятия напрямую зависит от эффективности работы горнодобывающих машин. Современный этап развития предприятий горной промышленности характеризуется ухудшением условий добычи с одновременным ростом доли автомобильного транспорта при транспортировке горной массы, а также тенденцией к увеличению суммарной грузоподъемности парка карьерных самосвалов. При этом от 60 % до 70 % в себестоимости продукции горных предприятий приходится на транспортные расходы, поэтому актуальной проблемой развития большегрузных карьерных самосвалов является повышение эффективности работы.

Карьерный автомобильный транспорт в России также является основным средством доставки горной массы со дна карьера до пункта приема. При этом значительная часть большегрузных автосамосвалов, выпущенных после 2000-го года, комплектуется электромеханическими трансмиссиями отечественного производства с использованием тяговых асинхронных двигателей, пришедших на смену тяговым двигателям постоянного тока и имеющих на сегодняшний день большую положительную практику промышленной эксплуатации.

В связи с ухудшающимися условиями добычи и значительными затратами горнодобывающих предприятий актуальной проблемой является повышение эффективности работы систем электромеханических трансмиссий, устанавливаемых на большегрузные карьерные автосамосвалы.

Степень проработанности темы исследования

Компания Siemens, являющаяся одним из лидеров рынка, успешно поставляет комплекты электромеханических трансмиссий на основе тягового асинхронного привода для большегрузных автосамосвалов производства Komatsu Mining Systems, Euclid, Liebherr, БелАЗ. Однако на российский

рынок преимущественно поставляются модели автосамосвалов производства БелАЗ, укомплектованные электромеханическими трансмиссиями российского производства.

Ведущим производителем приводов в России для горнодобывающей отрасли является компания ПАО «Силовые машины» («Электросила»), работающая в партнерстве с БелАЗом, «Уралмашем», «Ижорскими заводами». Грузоподъемность автосамосвалов с асинхронным приводом, спроектированным и изготовленным на отечественном предприятии, варьируется от 90 до 450 тонн.

Исследования бесконтактной электромеханической трансмиссии большегрузных карьерных автосамосвалов проводились российскими учеными Прониным М.В., Безносенко Д.М., Виноградовым А.Б., Siemens и другими.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных повышению электромагнитной и электромеханической совместимости и надежности системы бесконтактной электромеханической трансмиссии, до настоящего времени не были рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением энергетической эффективности электромеханической трансмиссии в части системы синхронный тяговый генератор – выпрямитель.

Цель работы

Целью работы является повышение эффективности и надежности системы электромеханической трансмиссии путем модернизации структуры и синтеза энергоэффективных технических решений и алгоритмов управления.

Идея работы

Создание методик и алгоритмов синтеза структуры САУ электромеханической трансмиссии переменного тока карьерных автосамосвалов с учетом использования современной полупроводниковой базы в совокупности с энергоэффективными алгоритмами управления,

повышающими технико-энергетические показатели системы в части синхронный тяговый генератор – выпрямитель, в частности, коэффициент мощности.

Основные задачи исследования:

1. Обзор и анализ массо-габаритных и структурных характеристик существующих систем бесконтактных электромеханических трансмиссий большегрузных карьерных автосамосвалов.

2. Создание имитационной модели существующей системы электромеханической трансмиссии, позволяющей адекватно оценить показатели энергетической эффективности.

3. Оценка влияния выпрямителя на показатели энергетической эффективности системы электромеханической трансмиссии в части системы синхронный тяговый генератор – выпрямитель.

4. Обоснование рациональных параметров структуры и алгоритмов управления электромеханической трансмиссии.

5. Разработка рекомендаций по повышению энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов.

Научная новизна работы

Научная новизна заключается в синтезе структуры и алгоритмов управления, обеспечивающих повышение уровня энергетической эффективности системы электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов в части синхронный тяговый генератор – выпрямитель, а именно коэффициента мощности, в использовании высокоэффективной системы регулирования напряжения звена постоянного тока без необходимости регулирования выходного напряжения тягового синхронного генератора.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании и модернизации систем бесконтактной тяговой электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов.

Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе при реализации специальных образовательных программ.

Методология и методы исследований

Теоретические исследования осуществлялись с применением физических основ электроники, теории электропривода, теории систем управления электроприводами, методов математического моделирования.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием имитационной модели электромеханической трансмиссии, макета тягового электропривода, а также с использованием результатов заводских стендовых испытаний.

Соответствие паспорту специальности

Работа соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки) – п. 2 Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем и п. 3 Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Положения, выносимые на защиту:

1. Объективная оценка показателей энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала в части системы синхронный тяговый генератор – неуправляемый выпрямитель и синтез энергоэффективных алгоритмов управления обеспечиваются созданной имитационной моделью бесконтактной тяговой

электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала с автономным источником и преобразователем частоты с неуправляемым выпрямителем, строящейся на основании стандартных функциональных блоков пакета прикладных программ Matlab-Simulink.

2. Использование активного выпрямителя напряжения с векторной системой управления с ориентацией по вектору напряжения тягового синхронного генератора в системах бесконтактных тяговых электромеханических трансмиссий с автономным источником большегрузных карьерных автосамосвалов повышает энергетическую эффективность, обеспечивая коэффициент мощности, близкий к единице, в части системы синхронный тяговый генератор – выпрямитель.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Научные положения, выводы и рекомендации подтверждаются известными теориями преобразовательной техники, методами математического моделирования, а также сходимостью теоретических и экспериментальных исследований с погрешностью не более 10%.

Основные положения обсуждались на заседаниях кафедры электроэнергетики и электромеханики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», докладывались и получили положительную оценку на конференциях и семинаре:

1. IV Международная научно-практическая конференция «Инновации на транспорте и в машиностроении», Санкт-Петербург, Россия, 2016.
2. X Международная юбилейная конференция «Динамика систем, механизмов и машин», Омск, Россия, 2016.
3. Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017», Санкт-Петербург, Россия, 2017.
4. Международный семинар «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2019», Санкт-Петербург, Россия, 2019.

Личный вклад автора

Включённое участие во всех этапах процесса, непосредственное участие в получении исходных данных и в научных экспериментах, проведение анализа существующих систем электромеханических трансмиссий, устанавливаемых на большегрузные карьерные автосамосвалы. Сформулированы цели, задачи исследований, основные научные положения.

Созданы имитационные модели электромеханической трансмиссии большегрузного карьерного автосамосвала, позволяющие адекватно оценить энергетические и электромеханические процессы и синтезировать алгоритмы управления, обеспечивающие требуемые статические и динамические режимы работы.

Разработаны рекомендации по модернизации существующих систем электромеханических трансмиссий большегрузных карьерных автосамосвалов.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 5 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus, Web of Science, из них 1 статья – в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК); получено 2 патента.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, шести приложений, изложенных на 141 странице машинописного текста, содержит 83 рисунка, 10 таблиц, список литературы из 127 наименований.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОТКРЫТОГО СПОСОБА ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

1.1 Тенденции и проблемы развития открытого способа добычи полезных ископаемых

На сегодняшний день во всем мире, по различным данным, на долю полезных ископаемых, добытых открытым способом приходится порядка 73% от общего объема (в США - 83%, в странах СНГ - около 70%). В России на сегодняшний день открытым способом добывается 91% железных руд, 70% цветных металлов и 60% угля (рисунок 1.1). По существующим прогнозам в среднесрочной перспективе сохранится тенденция к увеличению доли полезных ископаемых, добытых открытым способом [4, 24, 56, 61, 69, 76, 95, 121, 126].

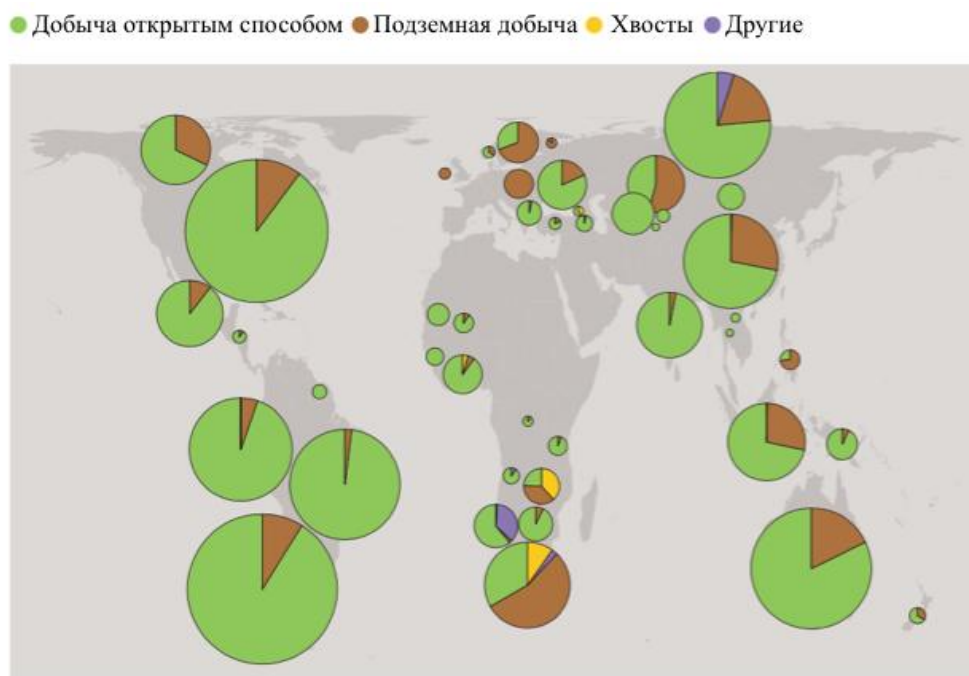


Рисунок 1.1 – Способы добычи полезных ископаемых

Добыча полезных ископаемых открытым способом получила столь широкое распространение благодаря следующим основным достоинствам [26, 75, 103, 127]:

– меньшие в 2 – 4 раза капитальные затраты на строительство горнодобывающего предприятия;

– возможность обеспечения большей степени автоматизации и механизации работ;

– производительность труда выше в 5 – 8 раз;

– меньшая себестоимость продукции;

– более высокая безопасность труда;

– меньшие потери полезного ископаемого.

Стоит отметить, что добыче полезных ископаемых открытым способом присущи и некоторые недостатки. К недостаткам относятся:

– необходимость отчуждения больших земельных территорий;

– снижение уровня грунтовых вод на прилегающих территориях;

– зависимость от погодных и климатических условий.

Сегодняшний этап развития открытого способа добычи полезных ископаемых также характеризуется ухудшением горнотехнических условий добычи полезных ископаемых [70, 77], увеличением глубины открытых выработок (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Динамика изменения условий транспортирования горной массы

Динамика изменения условий транспортирования горной массы				
Открытая горная выработка, год отработки		Параметры		
		Глубина, м	Средневзвешенная высота подъема, м	Расстояние перевозок, км
«Удачная»	1995	390	370	5,4
	2000	490	460	7,2
	2005	535	510	11,3
	2009	610	600	12,7

Продолжение таблицы 1.1

«Юбилейная»	1995	90	85	2,4
	2000	270	107	3,1
	2005	235	150	4,1
	2010	355	290	5,7
«Зарница»	2000	10	5	8,9
	2005	50	40	19,4
	2010	110	55	21
«Комсомольская»	2000	-	-	-
	2005	125	120	4,1
	2010	215	230	11,2
«Нюрбинская»	2000	-	-	-
	2005	90	75	2,3
	2010	165	120	3,3
«Катока»	2000	55	50	1,5
	2005	120	80	2,4
	2010	160	85	3,0

Увеличение глубины карьеров приводит к ухудшению условий добычи, увеличению расходов на транспортировку горной массы, что, в свою очередь, сказывается на конечной себестоимости продукции, где доля затрат на автомобильный транспорт может достигать 60 %.

Профили скоростей ветра на различных стадиях отработки карьера представлены на рисунке 1.2. Как видно из рисунка 1.2, с увеличением глубины карьера скорость ветра снижается до минимальных значений, а затем меняет свое направление на противоположное и, увеличиваясь до 0,3 от значения скорости на поверхности, вновь снижается до нулевых значений у подошвы карьера [5].

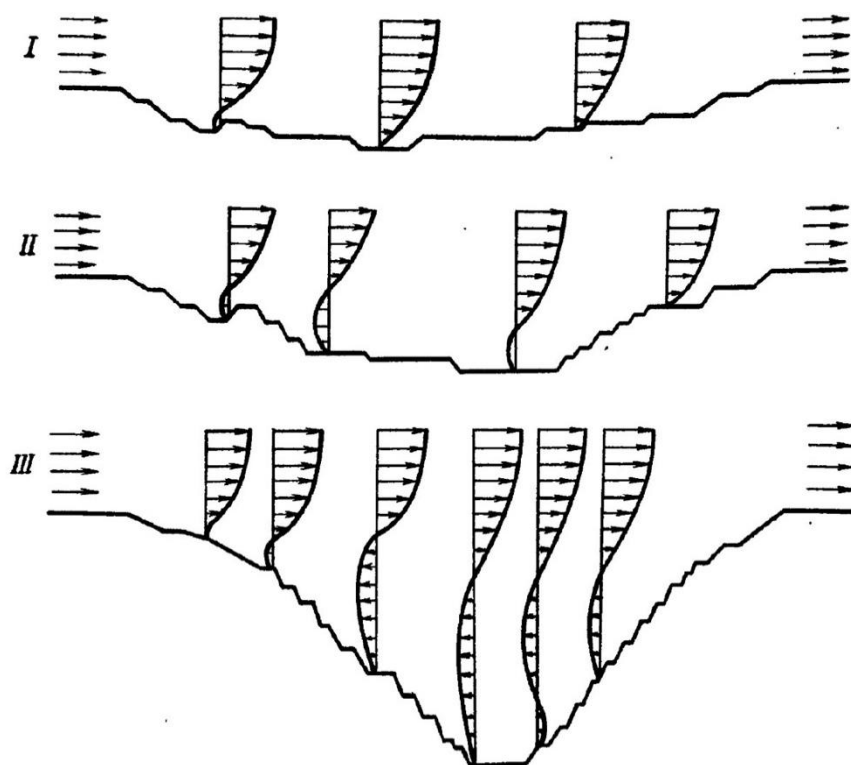


Рисунок 1.2 – Зависимости профилей скорости ветра от стадии отработки Гайского карьера, где I, II, III – стадии отработки карьера, → – направление скорости ветра

Особенность аэрологии карьеров, связанная со снижением скорости ветра вблизи подошвы карьера в совокупности с тенденциями к увеличению средней глубины карьеров, приводит к увеличению загрязненности воздуха на дне карьера, а также снижению концентрации кислорода [10, 62, 71].

Наиболее распространенным типом двигателей, используемых в карьерной технике, являются двигатели внутреннего сгорания, в частности, дизельные двигатели, преобразующие тепловую энергию, выделяющуюся при сгорании топлива, в механическую. Вследствие недостаточного количества воздуха, необходимого для окисления топлива, не происходит полного сгорания горючего, что вызывает повышение концентрации токсичных веществ в твердой, жидкой и газообразной формах, содержащихся в отработанных выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания. Помимо недостаточного количества воздуха на увеличение вредных выбросов также оказывает влияние быстрое охлаждение стенок камеры сгорания, характерное для карьеров, расположенных в районах Крайнего Севера.

Количество вредных газов, выделяемых дизельными двигателями, также зависит от двигателя, его настроек и режимов работы (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Содержание вредных веществ в отработанных газах дизельных двигателей в зависимости от мощности

Мощность двигателя, кВт	Интенсивность выделений, мг/с	
	Оксид углерода	Диоксид азота
265	700	1352
368	972	1877
772,8	2040	3941
956,8	2526	4880
1692,8	4469	8633

В среднем выхлоп дизельных двигателей в процентном соотношении содержит до 50 % оксидов азота, до 25 % – оксида углерода, до 20 % – альдегидов, при этом оксид азота по воздействию на организм человека в 6-9 раз токсичнее углекислого газа. Помимо вредных веществ в выхлопных газах содержится и сажа, концентрация которой увеличивается при возрастающей нагрузке на двигатель. Так при концентрации сажи от 600 мг/м³ выхлопные газы приобретают темный цвет, что ведет, при недостаточном поступлении воздуха в рабочую зону карьера, к появлению смога и густого тумана.

Высокая загазованность на дне карьеров приводит к простоям горнодобывающих предприятий, вызванных необходимостью проветривания для снижения концентрации вредных веществ в воздухе в рабочей зоне карьера. Простои на карьерах группы компаний «Алроса» могут достигать 1500 часов в год [72], при этом переход от добычи открытым способом к подземной выработке не всегда является экономически обоснованным и легким в технической реализации.

Обозначенные выше тенденции и проблемы приводят к увеличению требований, предъявляемых к карьерной технике, в плане увеличения

грузоподъемности автомобильного транспорта, повышению надежности, эффективности работы и экологичности.

1.2 Карьерный автомобильный транспорт

Автомобильный транспорт является основным средством транспортировки горной массы со дна рудника до места переработки. При этом в последнее время наблюдается тенденция к увеличению общей доли горной массы, перевезенной автомобильным транспортом [80] (рисунок 1.3).

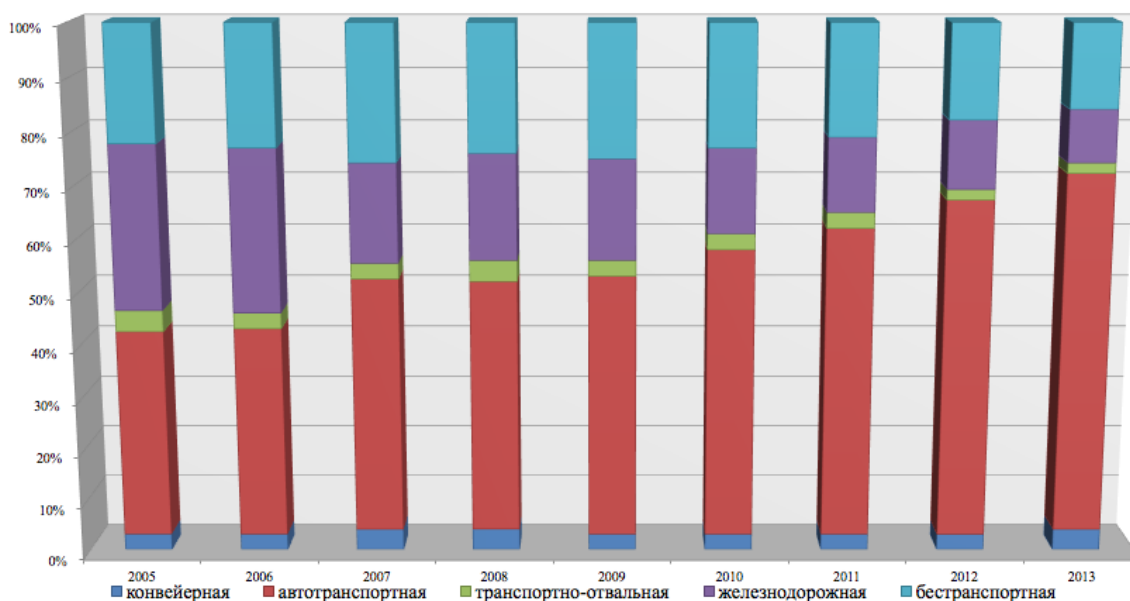


Рисунок 1.3 – Доля автомобильных перевозок в общем объеме перемещаемой горной массы

Широкое распространение при транспортировке горной массы в условиях открытых горных выработок автомобильный транспорт получил благодаря определенным преимуществам, по сравнению с конвейерным и железнодорожным транспортом, таким как:

- высокая маневренность автомобилей;
- возможность строительства относительно крутых уклонов дорог, что позволяет сократить длину транспортных коммуникаций;
- меньшая трудоемкость процесса отвалообразования;
- высокая оперативность управления.

Карьерные автосамосвалы по строению рамы можно разделить на два основных вида: карьерные автосамосвалы с шарнирно-сочлененной рамой и карьерные автосамосвалы с жесткой рамой (рисунок 1.4).

а)



б)



Рисунок 1.4 – Карьерный автосамосвал с шарнирно сочлененной рамой (а) и карьерный автосамосвал с жесткой рамой (б)

1.2.1 Критерии выбора типа карьерного автотранспорта

Выбор оптимального типа карьерного автосамосвала осуществляется на основании эксплуатационного расчета, учитывающего конкретные горнотехнические условия.

Эксплуатационный расчет решает следующие основные задачи:

- выбор погрузочных средств по типу и объему ковша;
- выбор подходящего по грузоподъемности автосамосвала, исходя из выбранного погрузочного средства, по весовому или объемному модулю;
- выполнение тяговых расчетов;
- выполнение эксплуатационных расчетов.

Результатом решения вышеперечисленных задач будут являться данные о численности рабочего и инвентарного парка автосамосвалов, об условиях безопасной работы автотранспорта, о необходимом количестве расходных материалов для обеспечения работы парка автосамосвалов.

Достоверность расчета во многом зависит от достоверности исходных данных, таких как:

- данные по климатическим условиям района в различные сезоны года (количество осадков, скорость ветра, влажность);

– данные по горнотехническим условиям (среднее расстояние транспортировки, высота подъема груза, плотность, коэффициент разрыхления, влажность, склонность к слеживанию и прилипанию к днищу и стенкам кузова транспортных средств, крепость, абразивность перевозимых полезных ископаемых и вскрышных пород);

– данные по дорожным условиям на разных участках пути (типы дорожных покрытий, величина продольных и поперечных уклонов, радиусы поворотов);

– данные о режиме работы карьера (количество рабочих смен в году, количество часов в смене, количество часов простоя транспорта в связи с неблагоприятными погодными и экологическими условиями);

– экономические данные (стоимость оборудования, его содержание и ремонт, заработная плата персонала, стоимость расходных и горюче-смазочных материалов).

Достаточная объективность исходных данных является основным требованием при проектировании систем автомобильного транспорта, так как от подготовки базы исходных данных зависят показатели расхождения проектных и фактических показателей работы транспортной системы.

1.2.2 Карьерные автосамосвалы с шарнирно-сочлененной рамой.

Грузоподъемность данных автосамосвалов составляет от 20 до 60 тонн при массе автомобиля от 40 до 100 тонн. Как правило, конструкция самосвала предполагает наличие трех осей и шести колес. Серийно выпускаемые шарнирно-сочлененные автосамосвалы имеют следующие габариты: высота — от 2 до 3 метров, при опрокинутом кузове от 5 до 6 метров; ширина — от 2,5 до 3,5 метров; длина — от 9 до 11 метров.

Шарнирное соединение рамы располагается непосредственно за кабиной и двигателем и позволяет вращаться двум частям рамы друг относительно друга в трех плоскостях. Такое соединение позволяет обеспечить грузовикам радиус разворота от 7 до 10 метров и улучшает

внедорожные свойства автомобиля, обеспечивая возможность работы в условиях местности со сложным рельефом. Основным недостатком автомобиля является то, что шарнирное соединение в этой конструкции является наиболее слабым местом, так как во время движения груженого автосамосвала является точкой сосредоточения наибольших нагрузок, поэтому серийно выпускаемые машины, как правило, обладают малой грузоподъемностью до 60 тонн.

1.2.3 Карьерные автосамосвалы с жесткой рамой

Карьерные автосамосвалы с жесткой рамой, в силу отсутствия подвижных элементов в конструкции рамы, обладают большей грузоподъемностью от 30 до 450 тонн, в результате чего общая масса транспортных средств составляет от 60 тонн до 390,5 тонн. В основном, у данных машин нагрузка распределяется на 2 оси или 6 колес: 4 — на задней оси и 2 — на передней. Высота автосамосвала может достигать 8 метров, а максимальная высота при опрокидывании кузова — 16 метров при ширине 10 метров и 15 метров в длину. По сравнению с их высотой, машины имеют относительно короткую колесную базу, что позволяет обеспечить радиус разворота около 20 метров для крупнейших грузовиков. К недостаткам автосамосвалов данной конструкции можно отнести то, что автосамосвалы с жесткой рамой требуют, по сравнению с шарнирно-сочлененными автосамосвалами, более ровных и широких дорог. Однако серийно выпускаемые машины могут обладать сверхвысокой грузоподъемностью, достигающей до 450 тонн.

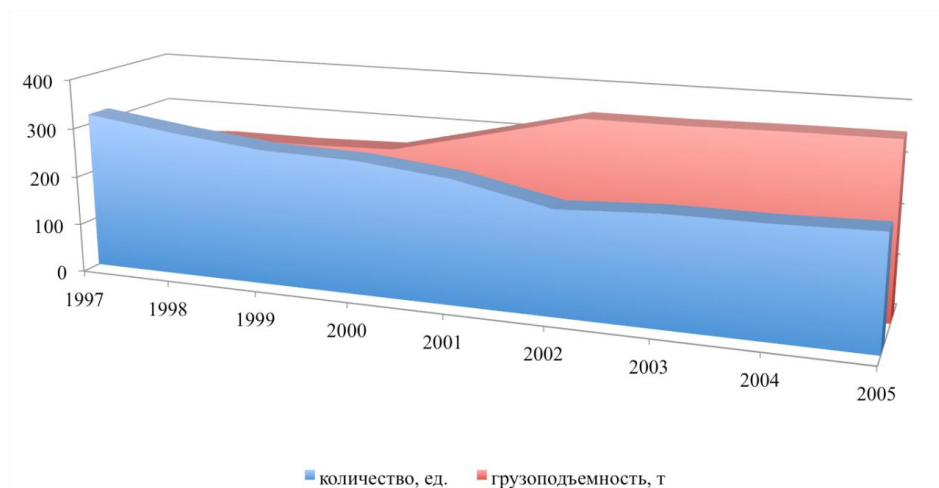


Рисунок 1.5 – Фактические изменения мирового парка автосамосвалов

Как показывает практика, эксплуатация одного большегрузного автосамосвала значительно дешевле, чем эксплуатация двух автосамосвалов равной грузоподъемности, что позволяет обеспечить снижение затрат на транспортировку на 35-40 %. В связи с этим в горнодобывающей отрасли наблюдается тенденция по увеличению грузоподъемности карьерных автосамосвалов с одновременным сокращением количества техники, работающей на одном карьере (рисунок 1.5) [47, 49].

1.3 Варианты трансмиссий автосамосвалов

Вне зависимости от типа карьерного автосамосвала для преобразования энергии топлива в крутящий момент на ведущих колесах в карьерном автомобильном транспорте используется трансмиссия. По способу преобразования энергии топлива в крутящий момент различают следующие основные типы трансмиссий (рисунок 1.6):



Рисунок 1.6 – Типы трансмиссий

На сегодняшний день на рынке России представлены карьерные автосамосвалы следующих производителей: БелАЗ, Caterpillar, Komatsu, Hitachi, Terex, Liebherr.

К трансмиссии карьерных автосамосвалов предъявляются следующие требования:

- развивать максимальное тяговое усилие при нулевой скорости и сохранять его в некотором диапазоне скоростей;
- развивать максимальную скорость автомобиля;
- развивать максимальную мощность в одной или нескольких точках или определённой зоне;
- обеспечивать длительное движение самосвала на уклоне до 10 % с отдельными участками до 12 % с грузом как при движении вверх, так и вниз;
- обеспечивать эксплуатацию автосамосвала во всех климатических зонах России.

При этом одним из основных параметров трансмиссий автомобильной техники для открытых горных работ, определяемых габаритами и массой узлов трансмиссии, является показатель габаритной мощности, определяемый как отношение удельной массы трансмиссии к единице мощности.

В таблице 1.3 представлены сводные данные о модельном ряде ведущих производителей автомобильной техники для открытых горных работ с указанием грузоподъемности и типе устанавливаемой трансмиссии [17, 38, 39, 40, 43, 74].

Таблица 1.3 – Распределение моделей карьерных автосамосвалов основных производителей по типу трансмиссий и грузоподъемности

Параметр	Производители					
	БелАЗ	Caterpillar	Komatsu	Hitachi	Terex	Liebherr
Грузоподъемность модельного ряда, т	30 - 450	40 - 400	30 - 400	181-286	41-65	100-363

Продолжение таблицы 1.3

Тип используемых трансмиссий		ЭМТ, ГМТ	ЭМТ, ГМТ	ЭМТ, ГМТ	ЭМТ	ГМТ	ЭМТ
Количество выпускаемых моделей по грузоподъемности, т	<30	2	-	1	-	1	-
	30-40	4	2	2	-	1	-
	40-50	3	2	1	-	1	-
	50-70	1	2	2	-	2	-
	70-90	2	1	-	-	-	-
	90-130	1	-	1	-	-	1
	130-160	1	2	1	-	-	-
	160-200	1	1	1	1	-	-
	200-250	2	2	1	1	-	1
	250-300	-	1	3	1	-	-
	>300	2	2	3	-	-	1

Как видно из данных, представленных в таблице 1.2, среди производителей техники для открытых горных работ наибольшее распространение получило применение двух типов трансмиссий – гидромеханической (ГМТ) и электромеханической (ЭМТ).

1.3.1 Гидромеханическая трансмиссия

Гидромеханическая трансмиссия является комбинированной трансмиссией, совмещающей в себе гидравлический преобразователь крутящего момента и механическую трансмиссию.

В состав трансмиссии входят (рисунок 1.7): двигатель (Д), гидромеханическая коробка передач (ГМК), состоящая из гидротрансформатора и механической коробки передач, карданная передача (К), дифференциал (Д) и полуоси (П1, П2).

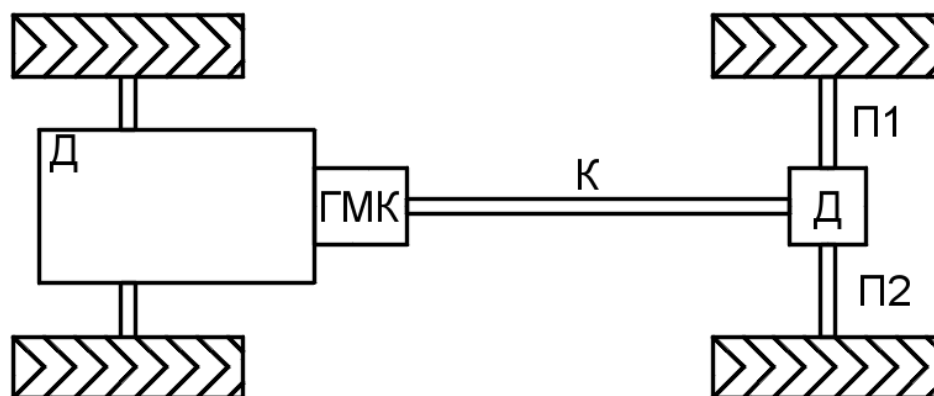


Рисунок 1.7 – Функциональная схема гидромеханической трансмиссии

Трансмиссия работает следующим образом: момент, создаваемый на валу двигателя, преобразуется посредством гидромеханической коробки передач и передается карданной передачей на дифференциал, который распределяет его между ведущими полуосями.

Гидротрансформатор, входящий в состав гидромеханической коробки передач, состоит из насосного колеса, соединенного с валом двигателя, реактора и турбинного колеса, соединенного с механической коробкой передач. Во время начала движения момент, создаваемый на валу двигателя, передается на вал турбинного колеса, приводящего во вращение масло в гидротрансформаторе, которое под действием центробежной силы приводит во вращение турбинное колесо. Реактор обеспечивает увеличение момента, передаваемого турбинному колесу за счет изменения направления движения жидкости и передачи турбинному колесу реактивного момента от корпуса гидротрансформатора. Гидротрансформатор имеет узкий диапазон силового регулирования, что приводит к необходимости использования механической коробки передач для получения необходимой тяговой характеристики гидромеханической трансмиссии [78].

Механическая коробка передач, соединенная последовательно или параллельно с гидротрансформатором, увеличивает диапазон регулирования передаточных чисел гидромеханической трансмиссии и позволяет реализовать режим заднего хода автосамосвала.

На рисунке 1.8 представлена тяговая характеристика гидромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала Caterpillar, где 1С – передача момента от двигателя через гидротрансформатор без подключения механической коробки передач, а 1D-7D – передача момента посредством переключения передач механической трансмиссии.

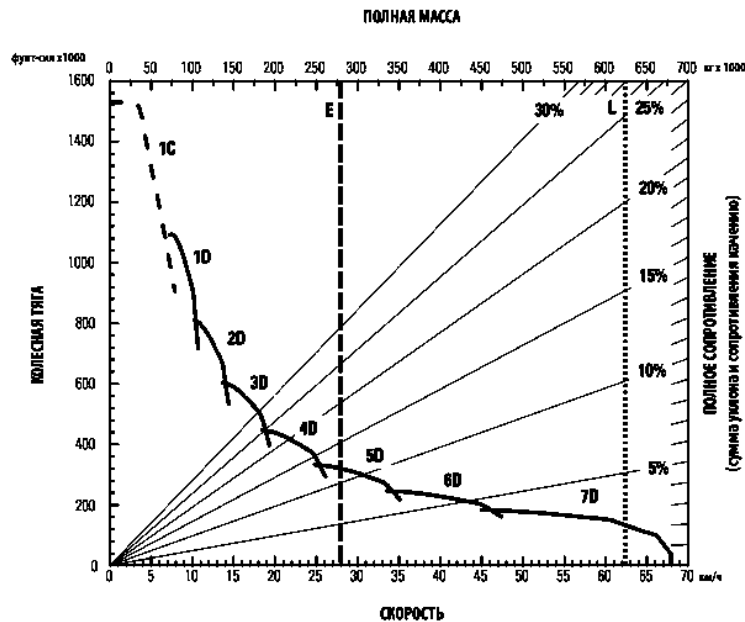


Рисунок 1.8 – Тяговая характеристика карьерного автосамосвала Caterpillar 797f грузоподъемностью 393 тонны, оснащенного гидромеханической трансмиссией

К достоинствам гидромеханической трансмиссии относятся:

- Бесступенчатое изменение крутящего момента на ведущих колесах в зависимости от нагрузки в момент начала движения;

- Демпфирование динамических нагрузок гидротрансформатором;
- Защита первичного двигателя от перегрузок.

Из недостатков данного вида трансмиссии следует отметить:

- КПД трансмиссии сильно зависит от скорости движения и нагрузки;

- Масло в гидротрансформаторе и масляные фильтры требует периодической замены;

- При низких температурах требуется прогрев;

- Жесткая связь узлов трансмиссии снижает гибкость компоновки.

Гидромеханические трансмиссии, как правило, устанавливаются на самосвалы малой и средней грузоподъемности. До недавнего времени компания Caterpillar устанавливала исключительно гидромеханические трансмиссии на весь модельный ряд выпускаемых карьерных автосамосвалов грузоподъемностью до 363 тонн, но на сегодняшний день в модельном ряду компании представлено уже две модели автосамосвалов грузоподъемностью 221 и 313 тонн с электромеханической трансмиссией, что свидетельствует об эффективности применения электромеханической трансмиссии на большегрузных автосамосвалах.

1.3.2 Электромеханическая трансмиссия

Электромеханическая трансмиссия с помощью тягового генератора преобразует механическую энергию на выходном валу первичного двигателя (дизельного двигателя) в электрическую, которая затем преобразуется до требуемых значений и поступает на входные выводы тяговых электрических двигателей, преобразующих ее обратно в механическую, передаваемую через редукторы ведущим колесам.

Электромеханические трансмиссии по типу электрических машин, используемых в качестве тяговых двигателей, разделяются на два вида переменного-постоянного (тяговые электродвигатели постоянного тока) и переменного-переменного тока (тяговые двигатели переменного тока). Активное развитие полупроводниковой техники в последние десятилетия привело, в совокупности с возросшими требованиями по надежности, предъявляемыми к промышленным электроприводам с автономным источником, к вытеснению трансмиссий переменного-постоянного тока трансмиссиями переменного-переменного тока.

Различают следующие виды электромеханических трансмиссий переменного-переменного тока, построенных на преобразователях частоты двух типов:

- Непосредственные преобразователи частоты;
- Двухзвенные преобразователи частоты.

Основное различие преобразователей частоты заключается в наличии звена постоянного напряжения, характерного для двухзвенного преобразователя. Несмотря на то, что непосредственный преобразователь частоты обладает более высоким КПД за счет однократного преобразования энергии, он обладает и существенными недостатками – низкая предельная частота (25 Гц в схемах на основе трехфазных мостов при питании от сети с частотой 50 Гц), и низкий коэффициент мощности. В связи с вышеперечисленными особенностями на автосамосвалах получила распространение электромеханическая трансмиссия на основе двухзвенного преобразователя частоты.

Комплект тяговой электромеханической трансмиссии, устанавливаемый на карьерные автосамосвалы, включает в себя первичный дизельный двигатель, тяговый генератор с системой возбуждения, предназначенный для преобразования и передачи энергии от первичного двигателя к преобразователям частоты, питающие тяговые двигатели, предназначенные для создания тягового усилия и преобразования кинетической энергии автосамосвала и передачи ее в тормозные резисторы в режимах электродинамического торможения автосамосвала. Управление тяговым электроприводом ручное. Управление осуществляется из кабины автосамосвала посредством командоаппаратов.



Рисунок 1.9 – Функциональная схема электромеханической трансмиссии с двумя ведущими мотор-колесами

Электромеханическая трансмиссия позволяет реализовать схему привода как с двумя, так и с четырьмя ведущими колесами. Упрощенная функциональная схема электромеханической трансмиссии с двумя ведущими колесами представлена на рисунке 1.9.

Известно, что у гидромеханической трансмиссии КПД несколько выше, чем у электромеханической, но благодаря меньшим массогабаритным показателям, более высоким тяговым свойствам привода (большей скорости при движении на подъем), гибкости компоновки, защите первичного двигателя от перегрузок электромеханическая трансмиссия получила большее распространение на большегрузных карьерных автосамосвалах. Автосамосвалы с электромеханической трансмиссией надежно работают на дорогах с твердым покрытием с уклоном до 18 градусов и выдерживают нагрузку до 101,6 тонн на каждое колесо.

На российском рынке большегрузных карьерных автосамосвалов благодаря своим достоинствам также получило наибольшее распространение применение электромеханической трансмиссии [34], устанавливаемой на все автосамосвалы Белорусского автомобильного завода, поставляющего на российские карьеры большую долю карьерной автомобильной техники грузоподъемностью от 90 до 450 тонн.

Тяговый расчет карьерного автосамосвала с электромеханической трансмиссией

Проведение тягового расчета производится после выбора типа автосамосвала, определяемого исходя из расчетной массы полезного груза и целого числа ковшей выбранной погрузочной машины.

Основными задачами тягового расчета, выполняемого для карьерного автосамосвала с электромеханической трансмиссией, являются:

- вычисление силы тяги на ведущих колесах автосамосвала;
- проверка силы тяги по условиям движения автосамосвала без проскальзывания ведущих колес;
- определение сопротивлений движению автосамосвала;

- определение скоростей движения автосамосвала по тяговым возможностям и по условиям безопасности;
- проверка тяговых электродвигателей на нагрев;
- определение тормозного пути автосамосвала.

Тяговый расчет учитывает все силы, действующие на автосамосвал в процессе движения (рисунок 1.10).

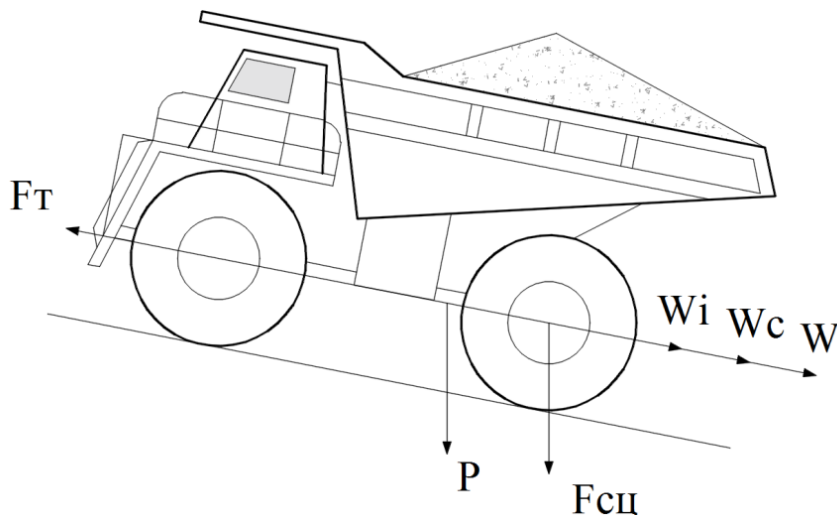


Рисунок 1.10 – Движение автосамосвала с грузом, F_T – сила тяги, P – вес автосамосвала, W_i ; $W_с$; W – сопротивления движению

Для начала движения автосамосвала сила тяги F_T , развиваемая тяговыми двигателями, должна быть больше суммарного сопротивления движению W (1.1, 1.2) [48]:

$$F_T > \sum W, \quad (1.1)$$

$$\sum W = W_0 \pm W_i + W_R + W_B \pm W_j, \quad (1.2)$$

где W_0 – основное сопротивление движению автомобиля; W_i – сопротивление от уклона; W_R – сопротивление движению автомобиля на криволинейном участке дороги; W_B – сопротивление движению, вызванное воздушной средой; W_j – сопротивление движению, вызываемое инерцией вращающихся масс автомобиля, определяемые как (1.3-1.7):

$$W_0 = \omega_0 P, \quad (1.3)$$

$$W_i = iP, \quad (1.4)$$

$$W_R = \omega_R P, \quad (1.5)$$

$$W_B = \lambda_{\Pi} F (v_a \pm v_b)^2, \quad (1.6)$$

$$W_j = 1000P(1 + \gamma_u) \frac{dv}{dt}, \quad (1.7)$$

где ω_0 – удельное сопротивление качению автомобиля по карьерной дороге; P – вес автомобиля с грузом, кН; i – удельное сопротивление от уклона, численно равное величине уклона, Н/кН; ω_R – удельное сопротивление; λ_{Π} – коэффициент обтекаемости автомобиля; F – площадь лобовой поверхности автосамосвала; v_a – скорость движения автосамосвала, км/ч; v_b – скорость ветра, параллельная направлению движения автосамосвала, км/ч; γ_u – коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс автосамосвала.

Как видно из (1.2), суммарное сопротивление зависит от участка трассы, как правило это значение вычисляется для наиболее тяжелого участка трассы, например, участка трассы при движении груженого автосамосвала на подъем.

При движении автосамосвала на руководящем уклоне сила тяги рассчитывается по формуле (1.8):

$$F_T = \frac{3600 \cdot N_{\text{дв}}}{v} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ом}}, \quad (1.8)$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность первичного двигателя (дизельного двигателя), кВт; v – скорость движения автосамосвала вверх по руководящему уклону, км/ч; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии; $\eta_{\text{к}}$ – КПД колеса ($\eta_{\text{к}} = 0,8 - 0,9$); $\eta_{\text{ом}}$ – коэффициент, учитывающий величину отбора мощности от главной передачи для питания вспомогательных систем автосамосвала – вентиляторов, компрессоров, освещения, отопления и пр. ($\eta_{\text{ом}} = 0,9 - 0,95$).

КПД электромеханической трансмиссии, состоящей из тягового синхронного генератора, шкафа преобразователей и двух мотор-колес, каждое из которых включает в себя тяговый асинхронный электродвигатель и редуктор, составляет: $\eta_{\text{тр}} = 0,75 - 0,8$.

Процесс преобразования энергии топлива в силу тяги автомобиля для карьерных автосамосвалов, оснащенных электромеханической трансмиссией, описывается выражением (1.9):

$$\frac{dA_t}{dt} \rightarrow P_{св}(t) \rightarrow U_{Г}(t)I_{Г}(t) \rightarrow \sum_{i=1}^m U_{Ди}(t)I_{Ди}(t) \rightarrow \sum_{i=1}^m M_{Ди}(t)\omega_{Ди} \leftrightarrow \leftrightarrow F_{к}(t)v(t), (1.9)$$

где $P_{св}$ – свободная мощность ДВС (с учетом коэффициента отбора мощности); $U_{Г}$, $I_{Г}$ – напряжение и ток тягового генератора; $U_{Ди}$, $I_{Ди}$ – напряжение и ток тяговых двигателей; m – число тяговых двигателей; $M_{Ди}$ – момент тягового двигателя; $\omega_{Ди}$ – угловая скорость тягового двигателя; $F_{к}$ – касательная сила тяги автосамосвала; v – скорость движения автосамосвала.

Для автосамосвала с электромеханической трансмиссией скорость движения на подъем с уклоном 8⁰ составляет 13 - 14 км/ч, с уклоном 7⁰ – 15 - 16 км/ч.

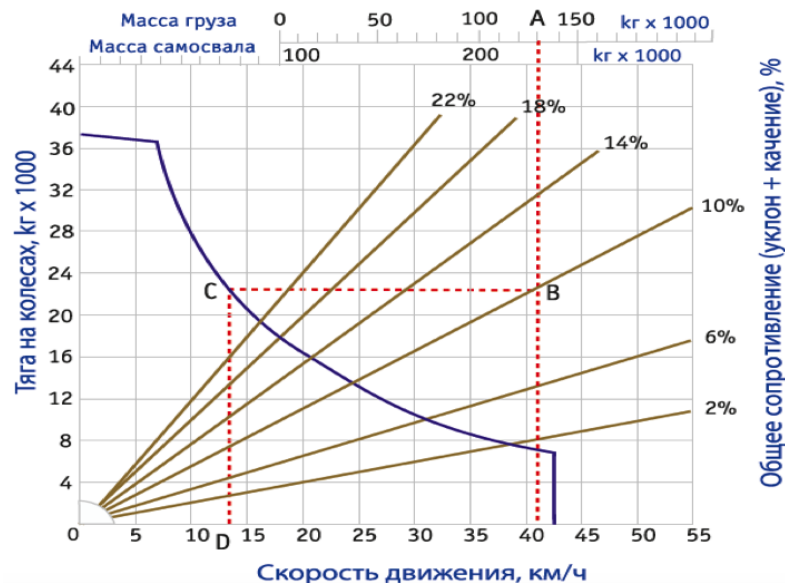


Рисунок 1.11 – Тяговая характеристика автосамосвала БелАЗ-75710 грузоподъемностью 130 тонн

При выполнении тягового расчета и формирования тяговой характеристики (рисунок 1.11) тяговых асинхронных двигателей для обеспечения безопасности движения груженых автосамосвалов по транспортным уступам карьеров должны приниматься в расчет условия

работы, характерные для конкретного карьера, на котором будет эксплуатироваться карьерный автосамосвал.

Условием движения автосамосвала без буксования является выполнение неравенства (1.10):

$$F_T \leq 1000 \cdot P_{\text{сц}} \cdot \phi \cdot \cos \alpha, \quad (1.10)$$

где F_T – сила тяги автосамосвала, рассчитываемая по формуле (1.8); $P_{\text{сц}}$ – сцепной вес автосамосвала, кН; ϕ – коэффициент сцепления ведущих колес с дорожным покрытием; α – угол продольного крена автосамосвала.

Сцепной вес автосамосвала определяется из выражения (1.11):

$$P_{\text{сц}} = \xi(m_a + q_a)q, \quad (1.11)$$

где m_a – собственная масса автомобиля, т; q_a – расчетная масса груза в кузове, т; ξ – коэффициент, учитывающий часть веса автосамосвала с грузом, приходящуюся на ведущую ось (для загруженного автосамосвала с колесной формулой 4х2 $\xi = 0,65$).

Коэффициент сцепления ϕ зависит от состояния и типа дорожного покрытия:

Таблица 1.4 – Зависимость коэффициента сцепления от типа дорожного покрытия

Вид дороги	ϕ	
	Состояние покрытия	
Постоянная:	сухое	мокрое
щебеночная с поверхностной обработкой	0,75	0,5
щебеночная укатанная	0,7	0,45
асфальтовая	0,7	0,4
асфальтобетонная	0,7	0,45
Временная:	сухое	мокрое
забойная укатанная	0,6	0,4-0,5
отвальная укатанная	0,4-0,5	0,2-0,3
покрытая снегом	0,2-0,3	0,12-0,18

При гололеде коэффициент сцепления значительно снижается и составляет $\phi = 0,10 - 0,15$, кроме того, снижение коэффициента происходит при увеличении уклона дороги и скорости движения автосамосвала. Наиболее аварийноопасными интервалами движения являются подъем и спуск с уклона, так как колеса автосамосвала могут начать неконтролируемое проскальзывание вследствие неблагоприятных дорожных условий (снижение коэффициента сцепления).

Несмотря на все необходимые расчеты при формировании тяговых характеристик карьерных автосамосвалов и опыт использования карьерной автомобильной техники, на практике не представляется возможным учесть абсолютно все факторы, влияющие на карьерную автомобильную технику во время движения, особенно в условиях резко изменяющихся погодных условий. Опыт эксплуатации карьерной автомобильной техники является этому подтверждением, так на аварии, вызванные неблагоприятными погодными условиями, приходится примерно 40 % от общего числа происшествий [79].

1.4 Выводы по Главе 1

В современном мире наиболее перспективным и востребованным методом добычи ископаемых, обеспечивающим наиболее безопасное и эффективное извлечение полезных ископаемых из недр земли, является добыча полезных ископаемых открытым способом. Однако сокращение легкодоступных для разработки месторождений приводит к увеличению глубины открытых выработок, что, в свою очередь, ужесточает требования, предъявляемые к эффективности и экологичности карьерной техники.

Карьерный автомобильный транспорт является наиболее востребованным способом доставки горной массы со дна карьера до места приемки. Большие затраты на стоимость транспортировки в общей себестоимости продукции горных предприятий обуславливают существующие тенденции сокращения автомобильного парка с

одновременным увеличением средней грузоподъемности используемых автосамосвалов.

Основным и наиболее перспективным типом трансмиссии, используемым на большегрузных карьерных автосамосвалах, является электромеханическая трансмиссия, о чем свидетельствует факт разработки и начала производства карьерных автосамосвалов, оборудованных трансмиссией данного вида, всеми ведущими компаниями, и, что особенно показательно, компаниями до недавнего времени выпускавшими исключительно карьерные автосамосвалы с гидромеханической трансмиссией.

Таким образом, на ближайшую обозримую перспективу основным средством доставки горной массы со дна карьера будут являться большегрузные карьерные автосамосвалы, оснащенные электромеханической трансмиссией. При этом актуальными задачами являются повышение эффективности работы, надежности, экологичности.

ГЛАВА 2 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ТРАНСМИССИИ. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

В России ведущим производителем комплектов электромеханических трансмиссий для карьерных автосамосвалов является ПАО «Силовые машины» (филиал «Электросила»). Компанией разработаны комплекты трансмиссий переменного-переменного тока, устанавливаемые на серийные большегрузные карьерные автосамосвалы грузоподъемностью от 90 до 450 тонн производства ОАО «БелАЗ», составляющие до 90 % парка горнодобывающих предприятий [18].

2.1 Состав электромеханических трансмиссий

До двухтысячных годов основным типом электромеханической трансмиссии, используемой в большегрузных карьерных автосамосвалах, являлась электромеханическая трансмиссия переменного-постоянного тока. Однако растущая потребность горнодобывающих предприятий в автосамосвалах большей грузоподъемности, обладающих большей стоимостью, привела к увеличению требований к их надежности, энерговооруженности и эффективности, что привело к вытеснению электромеханических трансмиссий переменного-постоянного тока электромеханическими трансмиссиями переменного-переменного тока.

На сегодняшний день, как показал опыт эксплуатации, трансмиссия переменного-переменного тока с частотно регулируемые асинхронными тяговыми двигателями, получающими питание от автономных инверторов напряжения на основе IGBT транзисторов, является наиболее эффективным решением [33, 35-37].

В настоящее время электромеханические трансмиссии карьерных автосамосвалов переменного-переменного тока производства ПАО «Силовые машины», ВПО «НИУ МЭИ», концерна «Русэлпром» выпускаются по схеме, выполненной на основе двухзвенных преобразователей частоты [7, 31, 59].

Пример структурной схемы электромеханической трансмиссии представлен на рисунке 2.1, электромеханическая трансмиссия включает в себя: первичный дизельный двигатель (Д), синхронный тяговый генератор (СГ) с системой самовозбуждения (В), два неуправляемых выпрямителя на основе диодов (ДВ 1, ДВ 2), два параллельно включенных инвертора (ИН 1, ИН 2) на основе полностью управляемых полупроводниковых ключей IGBT, соединенные с тяговыми асинхронными двигателями (АД 1, АД 2), каждый из которых, в свою очередь, соединен через планетарный редуктор (Ред.) с ведущим колесом (Кол.). Электрическое торможение осуществляется цепями динамического торможения (ТР1, ТР2) в звене постоянного тока.

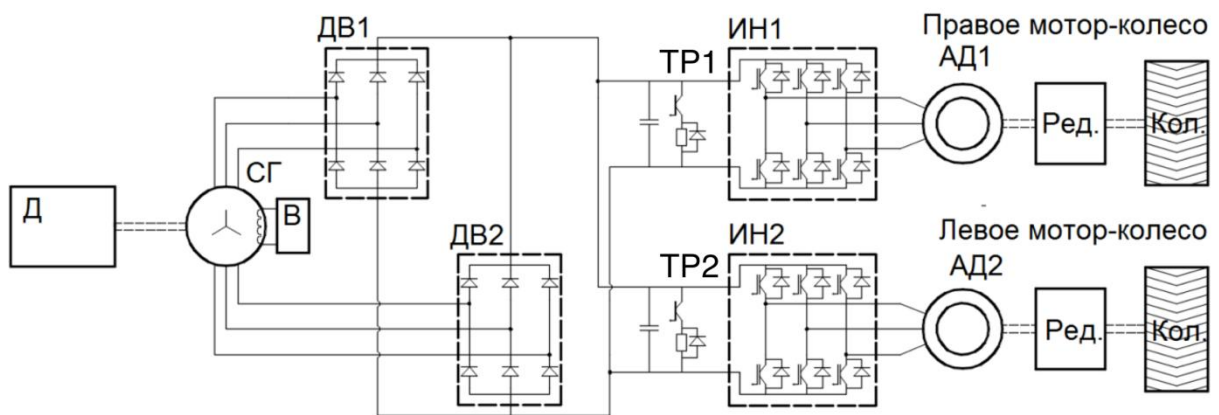


Рисунок 2.1 – Структурная схема электромеханической трансмиссии автосамосвала

Дополнительно, для обеспечения требуемого уровня безопасности, надежности и эффективности погрузочно-разгрузочных работ, комплекты электромеханических трансмиссий содержат следующие вспомогательные системы:

- система комбинированного пожаротушения с дистанционным включением и подсистемой на заднем мосту;
- предпусковой подогреватель (за исключением самосвалов тропической комплектации) (ПЖД);
- централизованная система смазки (ЦСС);
- система диагностики;
- отопительно-кондиционерный блок;

- система контроля загрузки и топлива (СКЗиТ);
- система контроля давления в шинах (СКТ);
- устройство сигнализации приближения к высоковольтной линии передач (УСПВЛ);
- система видеобзора.

В качестве примера рассмотрено электромеханическое оборудование, входящее в состав электромеханической трансмиссии, устанавливаемой на карьерные автосамосвалы БелАЗ грузоподъемностью 130 тонн.

2.1.1 Дизельный двигатель

На карьерных автосамосвалах в качестве первичного источника энергии в большинстве выпускаемых моделей устанавливается один дизельный двигатель, однако модель автосамосвала БелАЗ 75710 грузоподъемностью 450 тонн комплектуется двумя дизельными двигателями.



Рисунок 2.2 – Дизельный двигатель Cummins с синхронным тяговым генератором, устанавливаемый на автосамосвалы БелАЗ

На автосамосвалах грузоподъемностью 130 тонн устанавливаются два типа дизельных двигателей Cummins QSK 50-C и MTU 12V4000, обладающих следующими характеристиками [74]:

Таблица 2.1 – Параметры дизельных двигателей, устанавливаемых на автосамосвалы грузоподъемностью 240 тонн

Параметр	Cummins QSK 50-C	MTU 12V4000
Общая номинальная мощность при 1900 об/мин, кВт (л.с)	1194 (1600)	1193 (1600)
Количество цилиндров	16	12
Рабочий объем цилиндров, л	50,3	48,8
Диаметр цилиндра, мм	159	165
Ход поршня, мм	159	190
Максимальный крутящий момент при 1500 об/мин, Нм	6292	7612
Общий удельный расход топлива, г/кВт·ч	208	201
Частота вращения дизеля: – в тяговом режиме, об/мин – в тормозном режиме, об/мин – при стоянке, об/мин	1900 1300 1000	

При проектировании электромеханических трансмиссий в первую очередь исходят из возможности обеспечения оптимального использования дизеля. С этой целью на автосамосвалах мощность дизеля и генератора контролируется пневмогидравлическим регулятором, который обеспечивает требуемую мощность дизеля в зависимости от дорожных условий на всем интервале рабочей скорости, предупреждая его перегрузку. Регулятор работает на принципе ограничения впрыскиваемого горючего.

Основным недостатком дизельного двигателя в качестве первичного источника энергии являются значительные выбросы отработанных газов в атмосферу, так в отработанных газах дизельных двигателей автосамосвалов мощностью 1800 кВт содержатся 300 – 600 г СО и 70 – 140 г СО₂ [5], выбрасываемых в окружающую среду за 1 минуту.

Несмотря на использование специализированных присадок к топливу, нейтрализаторов и фильтров для снижения выбросов вредных веществ в атмосферу, дизельные двигатели вносят значительный вклад в уровень загазованности на дне карьера.

2.1.2 Тяговый генератор

В качестве тягового генератора на автосамосвалы БелАЗ, поставляемые на российский рынок, устанавливаются синхронные генераторы с системой самовозбуждения, изготавливаемые ООО «Силовые машины».

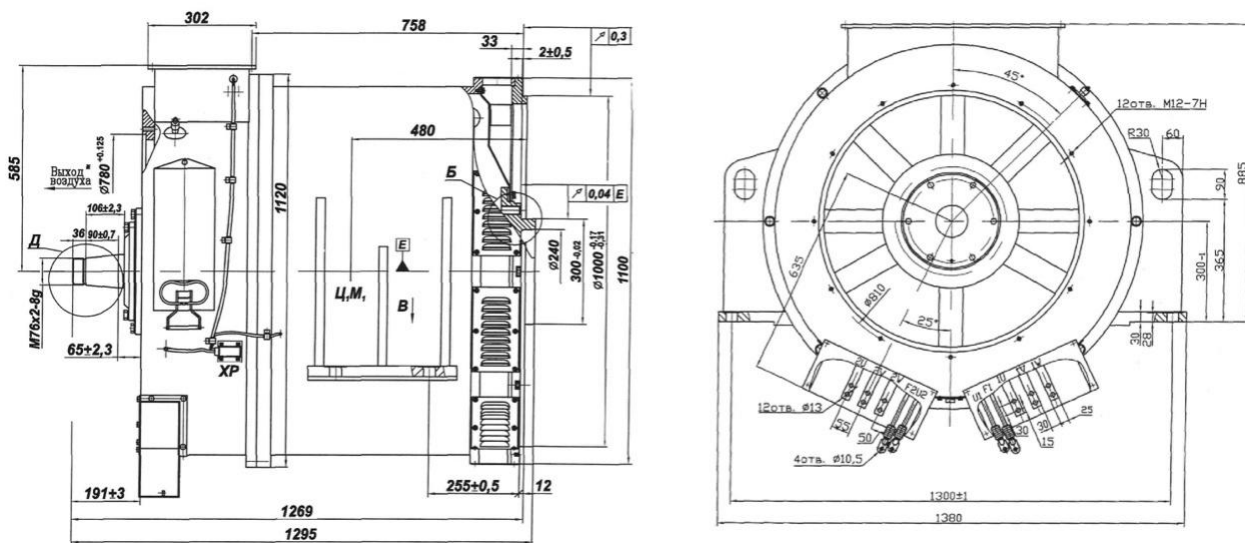


Рисунок 2.3 – Тяговый генератор ГСТ800/1-8 УХЛ2

Тяговый генератор российского производства ГСТ800/1-8 УХЛ2 (рисунок 2.3), устанавливаемый на автосамосвалы БелАЗ грузоподъемностью 240 тонн, предназначен для питания через преобразователь частоты тяговых асинхронных электродвигателей карьерных автосамосвалов. Основные параметры тягового генератора приведены в таблице 2.2 [23].

Таблица 2.2 – Основные параметры тягового генератора

Параметр	ГСТ800/1-8 УХЛ2
Номинальная мощность, кВт	800
Номинальное напряжение, В	
наименьшее	490
наибольшее	700
Номинальная частота вращения, об/мин	1900
Номинальный фазный ток статора, А	330
Номинальная частота электрического тока, Гц	126,67
Наибольший ток возбуждения, соответствующий точке продолжительного режима, А	100
Коэффициент полезного действия, %	95
Момент инерции, кг·м ²	57
Габариты, мм	1150x1539x980
Масса, кг	2775

Выходные параметры тягового генератора определяются в том числе и способом возбуждения генератора. Меняя схему возбуждения генератора можно регулировать его характеристики в широких пределах, что позволяет без изменения конструкции электромеханической трансмиссии приспособлять его для различных условий эксплуатации.

Продолжительность включения синхронного генератора в соответствии с ГОСТ Р 52776 составляет 60%, что в номинальном режиме работы соответствует режимам S1 (продолжительный) и S6 (повторно-кратковременный). Генератор выполнен на одном подшипнике качения. Охлаждение генератора – самовентиляция по разомкнутому циклу.

Система управления возбуждением генератора ГСТ800/1-8 УХЛ2 построена по принципу самовозбуждения с регулированием, направленным на поддержание напряжения в звене постоянного тока на уровне 1000 В.

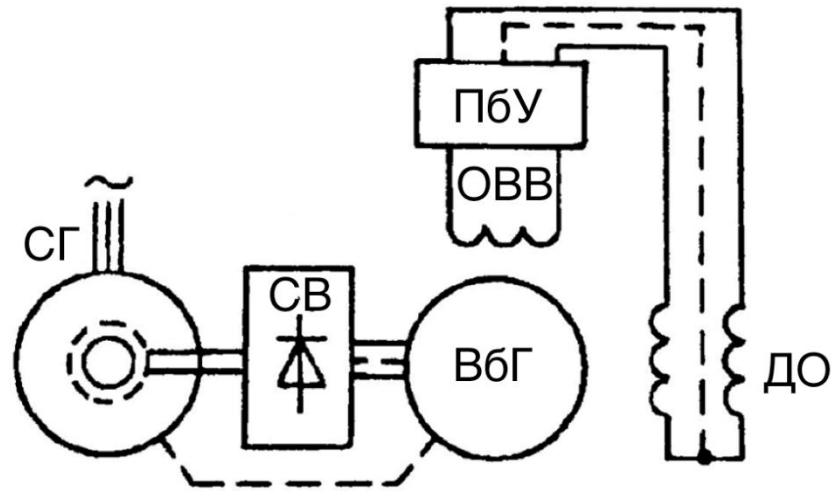


Рисунок 2.4 – Система гармонического возбуждения синхронного генератора, где СГ – синхронный генератор, СВ – система возбуждения, ВБГ – гармонический возбудитель, ПБУ – преобразователь управления, ОВВ – обмотка возбуждения возбудителя, ДО – дополнительная обмотка

Возбуждение генератора осуществляется от обмотки третьей гармоники, расположенной в пазах статора. Обмотки в пазах статора генератора выполняются таким образом, чтобы они «культивировали» высшие гармоники магнитодвижущей силы. Пример системы гармонического возбуждения приведен на рисунке 2.4 [1].

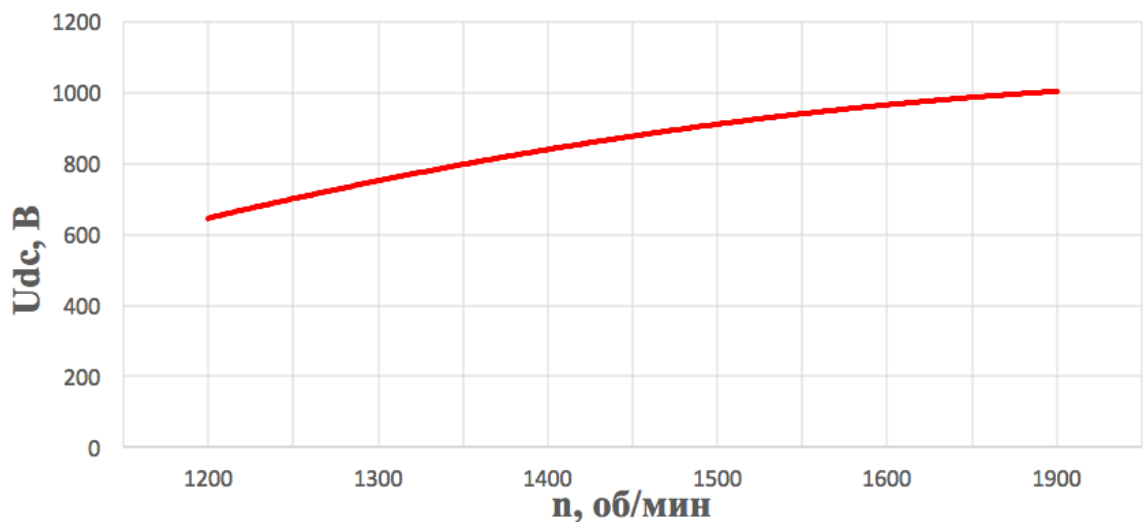


Рисунок 2.5 – Зависимость напряжения генератора от частоты вращения дизельного двигателя после отключения системы начального возбуждения

Система возбуждения синхронного тягового генератора работает следующим образом. В момент старта дизельного двигателя начальное

возбуждение осуществляется посредством подключения аккумуляторной батареи в цепь обмотки возбуждения. При достижении номинальных выходных параметров происходит отключение аккумуляторной батареи и переход генератора в режим самовозбуждения. Зависимость напряжения генератора от частоты вращения дизельного двигателя после отключения системы начального возбуждения, питаемой аккумуляторными батареями, представлена на рисунке 2.5.

2.1.3 Тяговый двигатель

До начала 90-х годов основной электрической машиной, используемой в качестве тяговых двигателей карьерных автосамосвалов, являлся тяговый двигатель постоянного тока. Одним из основных достоинств тяговых двигателей постоянного тока является возможность формирования тяговой механической характеристики привода, идеально подходящей для тяговых целей. В то же самое время основным недостатком тяговых двигателей постоянного тока является использование в конструкции данных машин щеточно-коллекторного узла, требующего периодического обслуживания.

Ужесточение требований, предъявляемых к тяговому электроприводу, привело к поиску альтернативных тяговых электрических двигателей, позволяющих повысить эксплуатационные характеристики системы привода.

Толчком к внедрению тяговых асинхронных двигателей послужило развитие силовых полупроводниковых приборов и микропроцессорной техники, что позволило создать тяговый асинхронный электропривод для карьерных автосамосвалов, лишенный основного недостатка систем электропривода на основе машин постоянного тока.

На сегодняшний день основным типом электрических машин, используемых в составе тягового электропривода карьерных автосамосвалов, являются тяговые асинхронные двигатели.

Весь модельный ряд карьерных автосамосвалов БелАЗ, оснащенных электромеханической трансмиссией, комплектуется тяговыми асинхронными двигателями. На автосамосвалах грузоподъемностью 130 тонн в качестве

тяговых двигателей переменного тока применяются трехфазные асинхронные двигатели модели ТАД-5 УХЛ2 (рисунок 2.6), входящие в состав частотно регулируемых приводов, выполненные на двух подшипниках качения, охлаждаемые вспомогательной системой охлаждения [23].

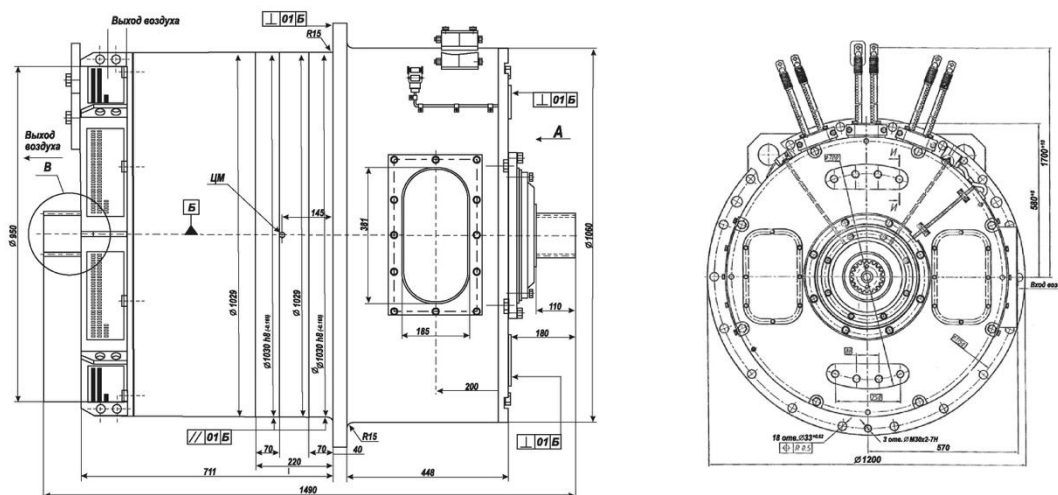


Рисунок 2.6 – Тяговый трехфазный асинхронный двигатель ТАД-5 УХЛ2

Основные параметры тягового двигателя:

Таблица 2.3 – Основные параметры тягового двигателя

Параметр	ТАД-5 УХЛ2
Мощность, кВт	610
Напряжение, В	660
Номинальный ток, А	668
Номинальная частота, Гц	116
КПД, %	94
Номинальная частота вращения, об/мин	3480
Ток холостого хода, А	115
Габариты, мм	1100x1460x910
Масса, кг	3500

Относительно длительная и успешная эксплуатация асинхронных двигателей, пришедших на замену тяговым двигателям постоянного тока, подтверждает обоснованность выбора данных электрических машин в

качестве тяговых двигателей карьерного автосамосвала. К достоинствам данных двигателей относятся простота конструкции, что положительно влияет на себестоимость электрической машины, надежность и низкие эксплуатационные затраты. Применение асинхронных двигателей совместно с современными частотными преобразователями, выполненными на основе IGBT ключей, обеспечивает высокий уровень электромагнитной совместимости оборудования в части системы электромеханической трансмиссии инвертор – тяговый двигатель [33, 35-37].

Стоит отметить, что разработки альтернативных комплектов электромеханических трансмиссий также проводятся концерном «Русэлпром» (ПАО «НИПТИЭМ») и ВПО «НИУ МЭИ». Альтернативные комплекты электромеханических трансмиссий обладают схожей конструкцией, за исключением того, что в качестве тяговых электродвигателей используются вентильные индукторно-реактивные двигатели (ВИРД).

Применение вентильных индукторно-реактивных двигателей в качестве тяговых двигателей карьерных автосамосвалов осложняется некоторыми недостатками, обусловленными конструктивными особенностями.

Наибольшее распространение в системах электропривода получили вентильные индукторно-реактивные двигатели с самовозбуждением и вентильные индукторно-реактивные двигатели с независимым возбуждением.

К достоинствам вентильно индукторно-реактивных двигателей с самовозбуждением, с одной стороны, относятся проста в производстве, низкие массогабаритные показатели и большая зона постоянства мощности, с другой стороны – необходимость применения специализированных силовых преобразователей, наличие существенных пульсаций момента на валу (рисунок 2.7 а) [32].

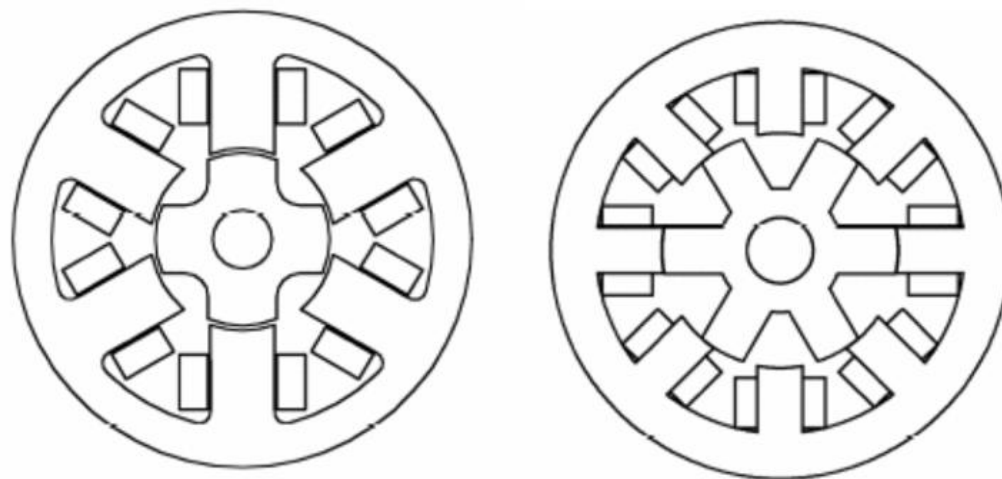


Рисунок 2.6 – Конструкция вентильного индукторно-реактивного двигателя с 6-ю и 8-ю полюсами статора

Вентильные индукторно-реактивные двигатели с независимым возбуждением, благодаря отсутствию необходимости в дополнительном источнике питания, а также отсутствию «хрупких» постоянных магнитов в конструкции являются наиболее подходящими для применения в качестве тяговых электродвигателей карьерных автосамосвалов (рисунок 2.6), что подтверждается испытаниями опытных образцов электромеханических трансмиссий, оснащенных тяговыми вентильными индукторно-реактивными двигателями с самовозбуждением в условиях открытых горных выработок Кузбасса. Машины данной конструкции обладают следующими достоинствами: достаточная простота в изготовлении, низкие массогабаритные показатели, большая зона постоянства мощности, относительно небольшие пульсации момента на валу [60]. Однако в то же самое время вентильные индукторно-реактивные двигатели с независимым возбуждением подвержены замыканиям магнитного потока возбуждения через подшипниковые узлы в обход магнитопровода статора, во избежание чего требуется принятие специальных мер, усложняющих конструкцию. Но этим машинам присуща проблема, связанная с перегревом обмоток возбуждения из-за их недостаточного контакта со статором.

Общей проблемой всех машин данного типа является гармонический состав питающего тока, содержащий значительное количество высших гармоник, что снижает электромагнитную совместимость систем электропривода.

Несмотря на все вышеперечисленные недостатки вентильные индукторно-реактивные двигатели имеют большой потенциал для дальнейшего развития при условии решения всех присущих им недостатков.

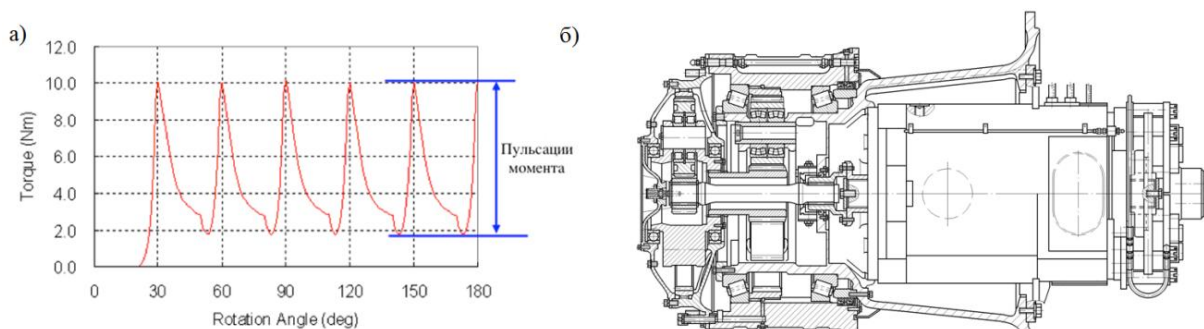


Рисунок 2.7 а – пульсации момента на валу двигателя, б – конструкция мотор-колеса автосамосвала БелАЗ

На сегодняшний день и ближайшую перспективу асинхронные двигатели будут являться основным типом электрических машин, используемых в качестве тяговых двигателей в составе серийно выпускаемых комплектов электромеханических трансмиссий, благодаря высокой степени освоения в производстве, изученности и значительно меньшим пульсациям момента на валу, обеспечивающим повышение ходимости редукторов мотор-колес (рисунок 2.7 б) [20, 81, 119].

2.1.4 Преобразователь частоты

Трехфазные напряжения от двух статорных обмоток генератора поступают на вход двухзвенного преобразователя частоты. В состав преобразователя входят неуправляемые диодные выпрямители, автономные инверторы, выполненные на основе IGBT ключей, общее звено постоянного тока, содержащее емкостные фильтры, тормозные резисторы. Остановка автосамосвала в штатных режимах работы осуществляется переводом

тяговых асинхронных двигателей в режим электродинамического торможения, энергия, вырабатываемая в процессе торможения, рассеивается в тормозных резисторах.

Все компоненты преобразователя частоты размещаются в едином шкафу преобразователя, который располагается под козырьком безопасности рядом с кабиной автосамосвала (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Шкаф преобразователя частоты автосамосвала БелАЗ

На рисунке 2.9 представлены напряжения и токи в системе преобразователя с диодным выпрямителем и автономным инвертором напряжения, где u_{sn} – трехфазная система напряжений сети, i_{s1} – ток одной фазы сети, i_d – выпрямленный ток диодного моста, u_{rc} – напряжение конденсатора, i_c – ток конденсатора, u_1 – напряжение одной фазы нагрузки, i_n – трехфазная система токов нагрузки, $u_{оп}$ – опорное напряжение, u_{yn} – трехфазная система напряжений управления [57].

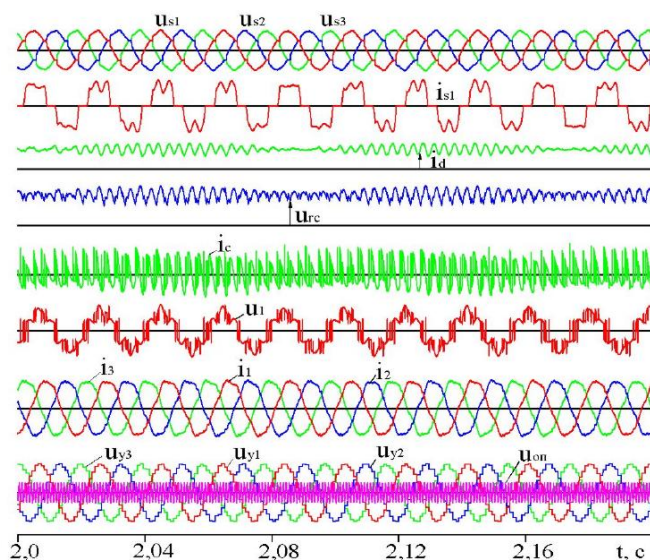


Рисунок 2.9 – Напряжения и токи в системе преобразователя с диодным выпрямителем и автономным инвертором напряжения [57]

Кроме компонентов, упомянутых выше и входящих в состав силовой схемы, шкаф преобразователя содержит систему управления возбуждением тягового синхронного генератора и микропроцессорную систему управления тяговым электроприводом.

Система управления электроприводом воспринимает и анализирует сигналы от датчиков тока, напряжения, температуры, скорости. При работе электропривода система управления считывает массив значений контролируемых параметров, которые с непрерывным обновлением сохраняются в оперативном запоминающем устройстве. При аварийном режиме работы или по команде оператора запись прекращается и сохраненный массив в виде таблицы выводится на дисплей в кабине. При нормальном режиме работы система управления передает на дисплей все основные параметры, характеризующие режим работы и состояние электропривода. В случае приближения любого из контролируемых параметров к критическому значению система управления дает команду для вывода на дисплее именно этого параметра.

Несмотря на широкое распространение электромеханической трансмиссии данной конструкции ей присущ недостаток, вытекающий из конструктивных особенностей, обусловленных работой части системы тяговый синхронный генератор – неуправляемый диодный выпрямитель, входящий в состав двухзвенного преобразователя частоты, на нелинейную нагрузку (асинхронные тяговые двигатели).

В качестве примера на рисунке 2.10 приведена форма кривых напряжений и токов, потребляемых диодным выпрямителем из сети, при питании от звена постоянного тока потребителя с нелинейной характеристикой [16, 73]:

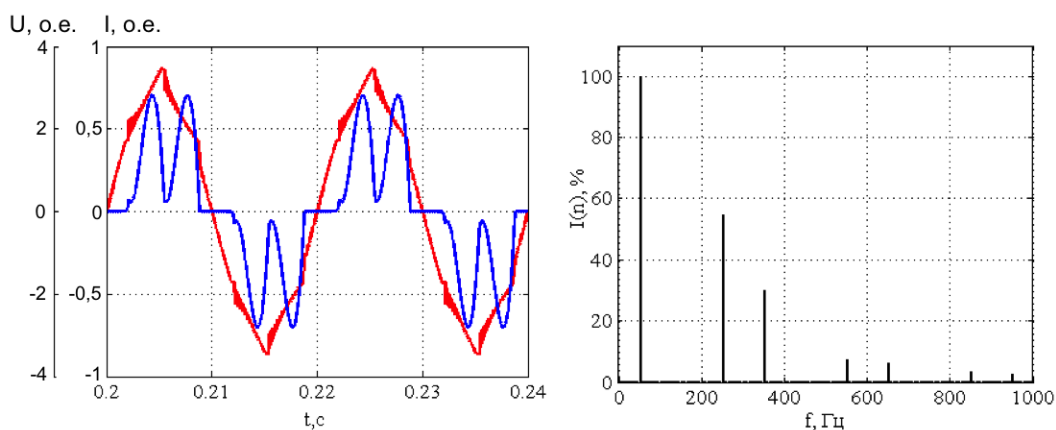


Рисунок 2.10 – Форма кривых напряжений и токов, потребляемых диодным выпрямителем

Из рисунка 2.10 очевидно наличие сдвига фаз между кривыми тока и напряжения, а также искажение формы напряжения сети. Кроме того, ток, потребляемый диодным выпрямителем из сети, помимо основной гармоники содержит ряд высших гармоник.

Коэффициент мощности определяется как отношение активной мощности к полной (2.1):

$$K_M = \frac{P}{S}, \quad (2.1)$$

где P – активная мощность, S – полная мощность.

Активная мощность, потребляемая диодным выпрямителем, идет на совершение полезной работы и определяется как произведение действующего значения напряжения сети U_m , действующего значения тока первой гармоники I_{m1} и косинуса угла φ_1 , равного углу сдвига первой гармоники тока по отношению к напряжению сети (2.2):

$$P = U_m \cdot I_{m1} \cdot \cos \varphi_1. \quad (2.2)$$

Учитывая несинусоидальность токов, потребляемых диодным выпрямителем из сети, полная мощность будет равна (2.3):

$$S = I_m \cdot U_m = U_m \cdot \sqrt{I_{m1}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{mn}^2}, \quad (2.3)$$

где I_m – действующее значение несинусоидального тока сети, I_{mn} – действующее значение n гармоники тока сети.

Порядок гармоник, вносимых трехфазным диодным выпрямителем в питающую сеть, может быть определен из выражения (2.4) [3]:

$$n = p \cdot k \pm 1, \quad (2.4)$$

где p – кратность пульсаций напряжения в звене постоянного тока, k – целые натуральные числа.

Для трехфазного диодного выпрямителя гармоники, определяемые выражением (2.5), имеют порядковые номера 5, 7, 11, 13, 19 и т.д. и называются каноническими.

Учитывая выражения (2.3), коэффициент мощности части системы синхронный тяговый генератор – неуправляемый выпрямитель может быть определен из следующего выражения (2.5):

$$K_M = \frac{P}{S} = \frac{I_{m1} \cdot \cos \varphi_1}{\sqrt{I_{m1}^2 + \sum_{n=5}^{\infty} I_{mn}^2}}. \quad (2.5)$$

Снижение коэффициента мощности (0,6÷0,84) части системы синхронный тяговый генератор – неуправляемый выпрямитель при работе на нелинейную нагрузку возникает вследствие неуправляемой коммутации диодных ключей и отсутствия возможности коррекции сдвига фаз [67].

Так, например, при работе синхронного генератора ГСТ 800/1-8 мощностью 800 кВт в паре с диодным выпрямителем на индуктивную нагрузку «полезная» мощность системы будет равна (2.6):

$$P_{Г-В} = P_{Г} \cdot K_{Г} \cdot K_{В} = 800 \cdot 0,95 \cdot 0,84 = 638,4 \text{ кВт}, \quad (2.6)$$

где $P_{Г-В}$ – мощность системы генератор – выпрямитель, $P_{Г}$ – мощность генератора, $K_{Г}$ – коэффициент мощности генератора, $K_{В}$ – коэффициент мощности части системы синхронный тяговый генератор – неуправляемый выпрямитель.

Снижение «полезной» мощности, системы синхронный тяговый генератор – неуправляемый выпрямитель приводит завышению массогабаритных показателей генератора.

Связь габаритов электрической машины переменного тока с мощностью, числом оборотов в минуту, длиной и диаметром ротора осуществляется машинной постоянной Арнольда, определяемой как (2.7):

$$C_A = \frac{D^2 \cdot l \cdot n_1}{P}, \quad (2.7)$$

где C_A – машинная постоянная Арнольда, D – диаметр ротора, l – длина ротора, n_1 – синхронная скорость вращения ротора в об/мин, P – мощность электрической машины в кВт.

Из выражения (2.7) видно, что снижение активной мощности приводит к увеличению машинной постоянной, а следовательно, и габаритов электрической машины, что снижает показатель габаритной мощности электромеханической трансмиссии.

Кроме того, использование неуправляемого диодного выпрямителя в составе электромеханической трансмиссии приводит, как отмечалось ранее, к искажению токов и напряжений питающей сети. Искажения напряжения в питающей сети регламентируется ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [15].

Нормы данного ГОСТа распространяется как на системы электроснабжения общего назначения, так и на изолированные системы электроснабжения, к которым относятся системы электромеханических трансмиссий автономных транспортных средств. Согласно ГОСТу значение суммарного коэффициента гармонических искажений (2.8) определяется как отношение суммы всех гармонических составляющих напряжения до 40-ого порядка к среднеквадратичному значению основной гармоники напряжения (2.8) и не может превышать 8% в течение 95% времени за неделю и 12% в течение 100% времени за неделю. В системах электромеханических трансмиссий с автономным источником отсутствует возможность влияния низкого значения коэффициента гармонических искажений на качество электрической энергии, питающей других потребителей, поэтому основным

недостатком является завышение массогабаритных показателей источника электрической энергии, генератора.

$$\text{КГИ} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_1}, \quad (2.8)$$

где КГИ – коэффициент гармонических искажений, $U_{(n)i}$ – высшие гармоники напряжения, U_1 – первая гармоника напряжения.

ГОСТ 32144-2013 не регламентирует предельные значения коэффициента гармонических искажений по току, однако присутствие высших гармоник оказывает негативное влияние на срок службы синхронного генератора, обусловленный ускоренным старением изоляции обмоток, вызывает дополнительные потери мощности.

2.2 Математическая модель электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала

Электромеханическая трансмиссия карьерного автосамосвала представляет собой сложную систему, состоящую из множества взаимодействующих между собой элементов, вследствие чего для оценки энергетических процессов были выбраны методы математического и имитационного моделирования.

2.2.1 Математическая модель генератора

Дизель-генератор представляет собой дизельный двигатель, соединенный валом с валом ротора синхронного генератора.

Поскольку целью исследований является повышение энергетической эффективности электротехнического комплекса, то в связи с относительно большим значением постоянной времени дизельного двигателя в сравнении с временем переходных процессов в электрической части электромеханической трансмиссии, математическая модель дизельного двигателя может быть выполнена в упрощенном виде. Упрощенная математическая модель может быть получена на основании зависимостей выходных параметров тягового синхронного генератора от частоты

вращения вала дизельного двигателя, полученных в ходе испытаний на заводском стенде (рисунок 2.11) [53]. Структурная схема заводского стенда для испытаний электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов представлена в приложении А.

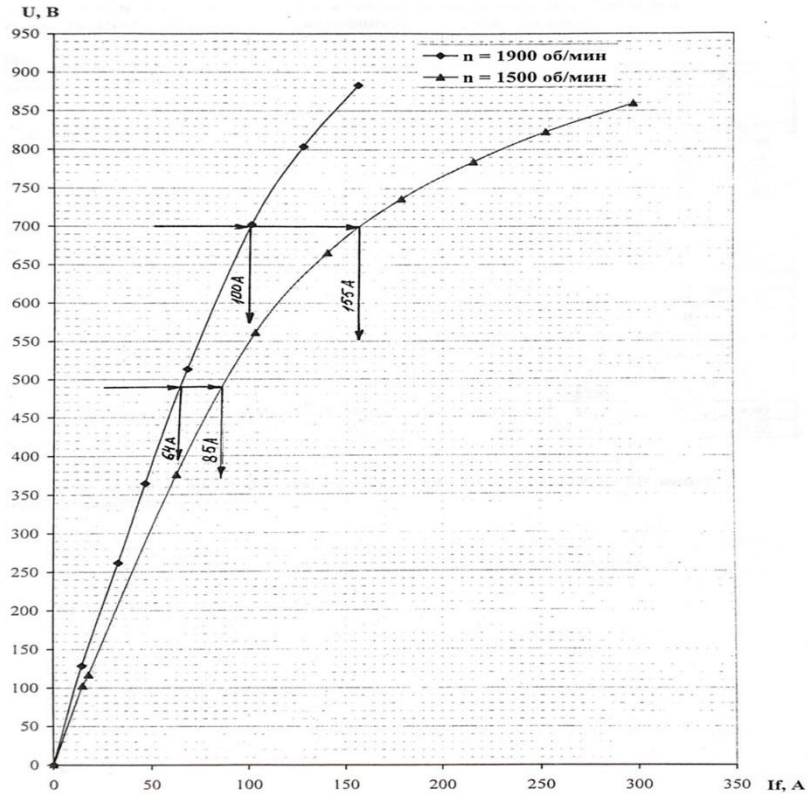
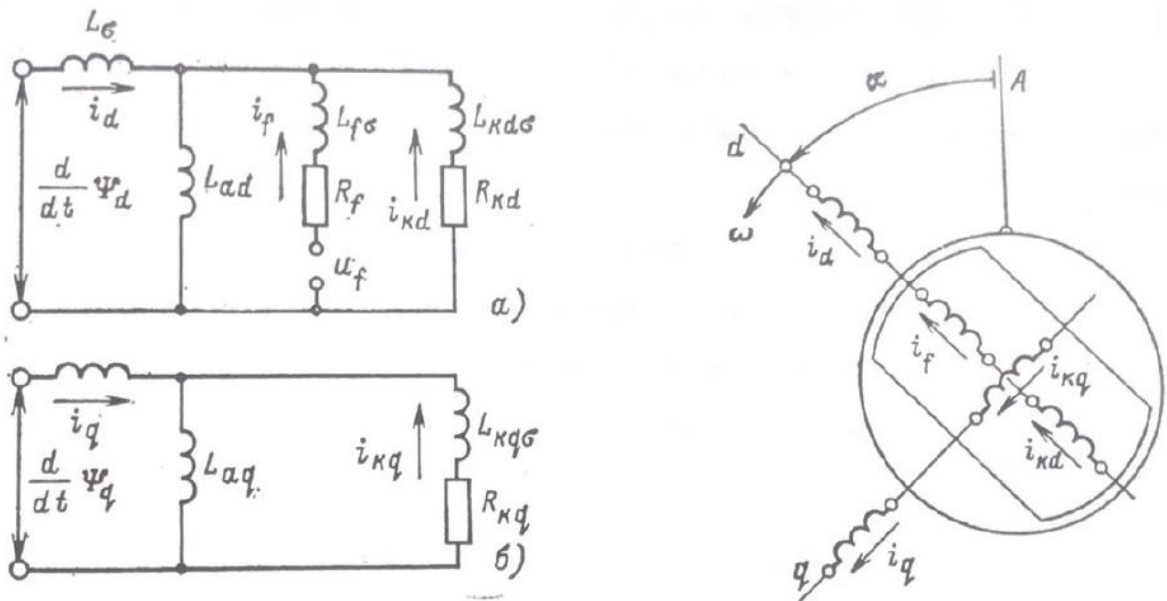


Рисунок 2.11 – Зависимость выходного напряжения и тока возбуждения тягового синхронного генератора от частоты вращения вала дизельного двигателя

На основании имеющихся зависимостей (рисунок 2.11) были получены коэффициенты, связывающие изменение частоты вращения вала дизельного двигателя и выходное напряжения тягового генератора при условии поддержания постоянного значения напряжения в звене постоянного тока.

Наиболее сложной частью в математическом описании данной части системы является математическая модель синхронного генератора. Известно множество различных исследований, направленных на создание математических моделей синхронных машин, учитывающих различные конструкции, методики расчета, задачи [2, 6, 9, 12-14, 22, 27, 42, 45, 86, 117].

Большое распространение при расчетах процессов, протекающих в синхронных машинах, получили модели, описанные в [25], выполненные на основании преобразования Парка (рисунок 2.12).



2.12 – Принцип преобразования Парка

Производители электрических машин, как правило, используют уточненные математические модели, учитывающие изменения активных сопротивлений от частоты тока, насыщение стали, вытеснение токов, механические потери и прочие [59]. Однако такие модели не всегда подходят для исследования электромеханических процессов, протекающих в синхронных машинах, так как требуют как большого количества исходных данных о конструкции машин и использованных материалах, так и больших вычислительных ресурсов. Оценка электромагнитных процессов, протекающих в полупроводниковых преобразователях и системе управления, возможна при использовании упрощенных моделей синхронных машин, что также дополнительно экономит вычислительные ресурсы.

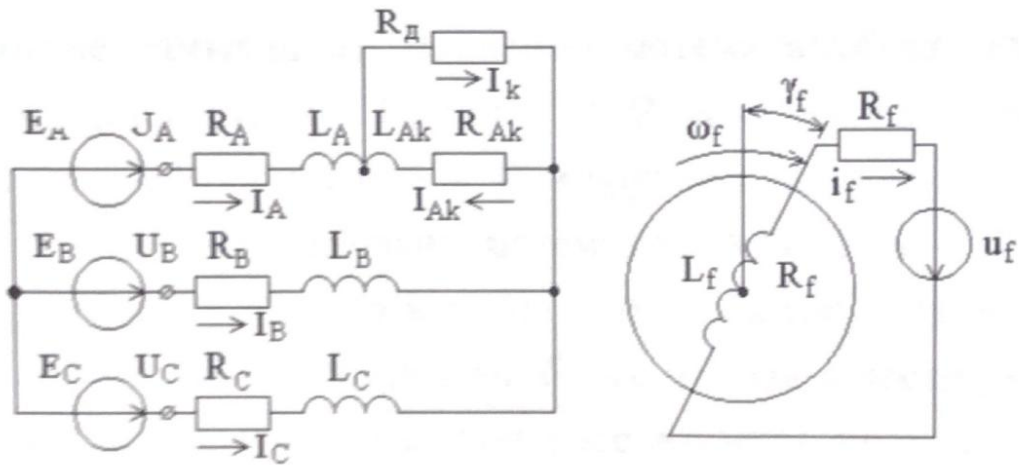


Рисунок 2.13 – Упрощенная модель синхронного генератора

В качестве математической модели синхронного генератора, являющегося частью дизель генератора системы электромеханической трансмиссии, в диссертации была использована модель, выполненная на основании моделей, представленных в [51, 52] (рисунок 2.13). В данной модели произведена замена сложной и разветвленной системы индуктивных сопротивлений на индуктивные сопротивления, установленные в каждой из фаз. Данная модель основана на известной зависимости индуктивности катушки от квадрата числа витков.

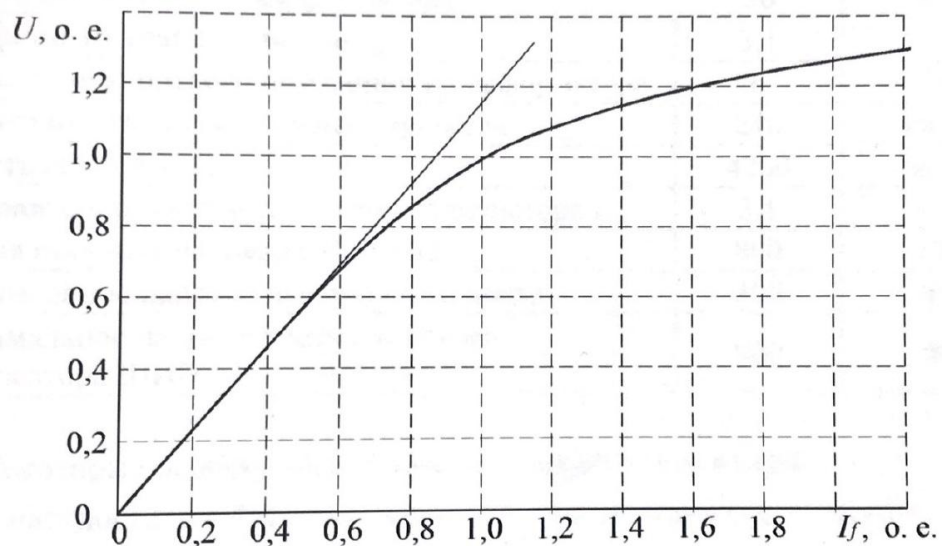


Рисунок 2.14 – Характеристика холостого хода тягового синхронного генератора

Тяговый синхронный генератор в составе электромеханической трансмиссии автосамосвала БелАЗ оснащается системой электромагнитного

самовозбуждения (рисунок 2.4). Характеристика холостого хода синхронного генератора, оснащённого данной системой, представлена на рисунке 2.14 [19]. Как видно из представленного графика, система самовозбуждения в первом приближении может быть описана апериодическим звеном второго порядка.

На основании полученных коэффициентов, связывающих выходные электрические параметры генератора с частотой вращения вала дизельного двигателя, и упрощенной математической модели синхронного генератора была синтезирована структурная схема имитационной модели дизель-генератора, имеющая следующую структуру:

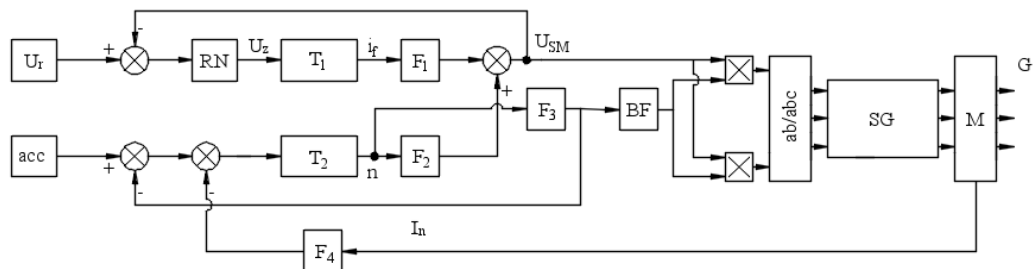


Рисунок 2.15 – Структурная схема имитационной модели дизель генератора

Структурная схема, представленная на рисунке 2.15, включает в себя: U_r , acc – блоки задания начальных значений напряжения и скорости вращения вала дизельного двигателя; F_1 , F_2 , F_3 , F_4 – математические коэффициенты, учитывающие взаимосвязь динамических параметров дизельного двигателя и выходные электрические параметры синхронного генератора; RN – регулятор напряжения; T_1 – функция, описывающая динамику системы самовозбуждения; T_2 – функция, описывающая механические постоянные времени дизельного двигателя; BF – блок задания частоты; ab/abc – блок преобразователя координат; SG – упрощенная модель синхронного генератора; M – измерительный блок; G – трехфазная сеть.

2.2.2 Математическая модель диодного выпрямителя

Система электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов изготавливается по схеме двухзвенного преобразователя частоты на основе

диодного выпрямителя и автономного инвертора, получившая широкое распространение в электроприводах различных промышленных установок [58].

На рисунке 2.16 приведена функциональная схема двухзвенного преобразователя частоты с использованием неуправляемого диодного выпрямителя.

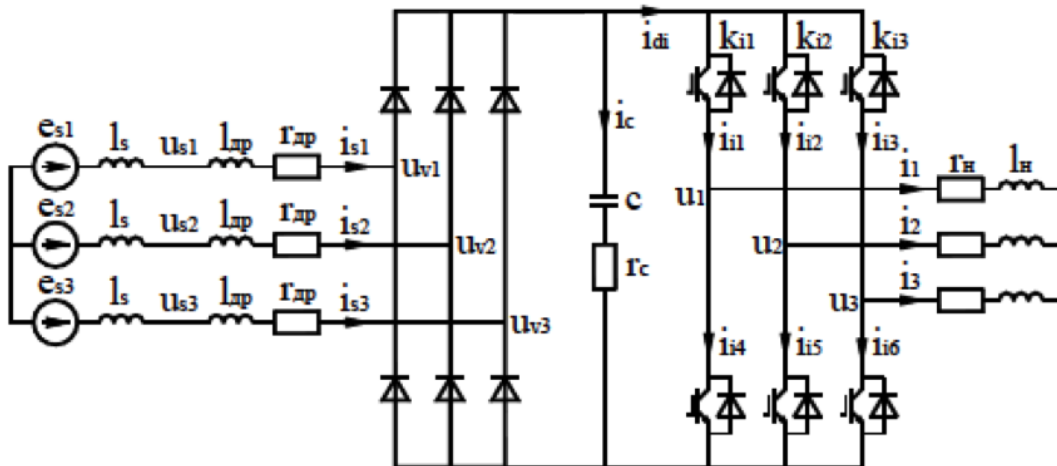


Рисунок 2.16 – Структурная схема двухзвенного преобразователя частоты на основе неуправляемого диодного выпрямителя и автономного инвертора напряжения

Преобразователь работает следующим образом. Питание от трехфазного источника поступает через дроссель на вход диодного выпрямителя и далее на конденсатор звена постоянного тока. Регулировка уровня выпрямленного напряжения осуществляется путем изменения величины трехфазного напряжения источника. Выпрямленное напряжение поступает на вход автономного инвертора напряжения, где, в соответствии с заданием, поступающим от системы управления, формируется необходимое напряжение питания нагрузки.

Дроссель на входе диодного выпрямителя, в приведенной схеме, выполняет двойную функцию: защитную, ограничивая токи короткого замыкания, и фильтрующую, сглаживая искажения на входе выпрямителя. С другой стороны, присутствует падение напряжения на дросселе, что, в свою

очередь, снижает значение напряжения в звене постоянного тока, а следовательно, и напряжения нагрузки.

Известны различные математические модели трехфазных диодных неуправляемых выпрямителей [108, 109, 118, 120], но модель, представленная в [107], является наиболее простой в реализации, обеспечивающей относительно быстрый и точный процесс моделирования. Кроме того, к достоинствам данной модели можно отнести возможность моделирования при соединении трехфазного источника как в звезду, так и в треугольник, независимость данной модели от параметров управления.

При построении математической модели принято допущение, предполагающее замену полупроводниковых элементов двухзвенного преобразователя идеальными ключами, принимающими значение единицы в открытом состоянии, и нуля в закрытом, при этом суммарные потери в мостовой схеме могут быть учтены добавлением эквивалентного сопротивления в звено постоянного тока.

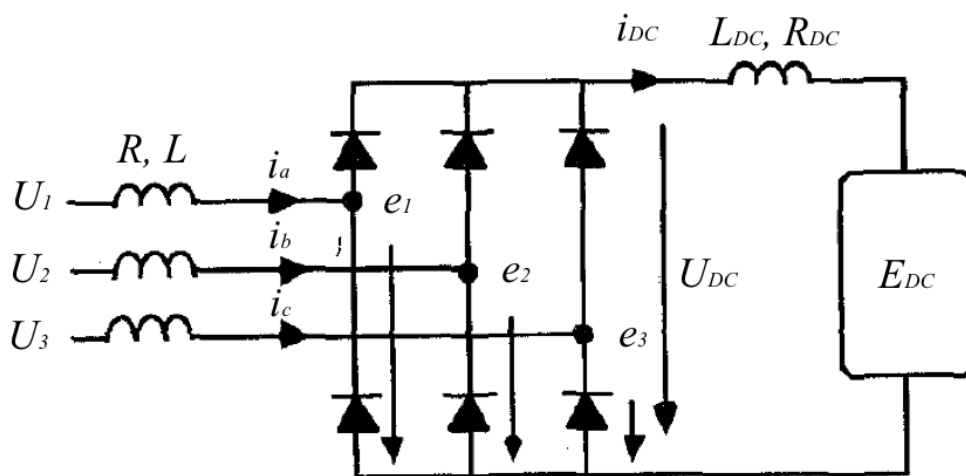


Рисунок 2.17 – Структурная схема трехфазного диодного выпрямителя

На рисунке 2.17 представлена структурная схема трехфазного диодного выпрямителя. Математическая модель диода выполнена в виде идеального ключа, переключающегося в функции тока. Зависимость проводимости ключа от тока приведена на рисунке 2.18 и представляет собой единичную функцию Хэвисайда. Данная функция осуществляет определение состояния диода как открытое ($g=1$) или закрытое ($g=0$).

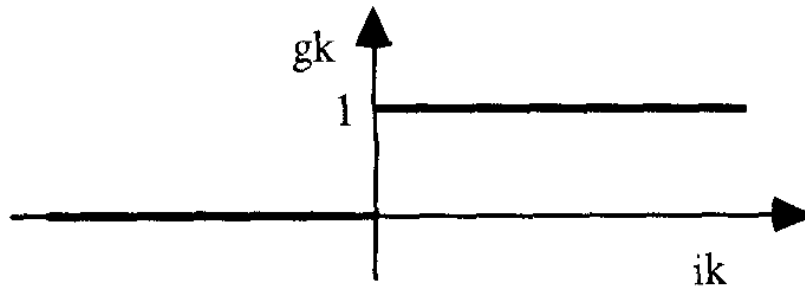


Рисунок 2.18 – Функция Хэвисайда, где g_k – состояния ключа, i_k – ток, протекающий через диод ($k=1, 2, 3$)

Переменное напряжение на плечах моста может быть определено как (2.9):

$$\begin{aligned} e_1 &= R_f i_a + L_f \frac{di_a}{dt} + u_1 \\ e_2 &= R_f i_b + L_f \frac{di_b}{dt} + u_2 . \\ e_3 &= R_f i_c + L_f \frac{di_c}{dt} + u_3 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Тогда фазные значение напряжения определяется следующими выражениями (2.10):

$$\begin{aligned} u_1 &= f_1 U_{DC} \\ u_2 &= f_2 U_{DC}, \\ u_3 &= f_3 U_{DC} \end{aligned} \quad (2.10)$$

где напряжение звена постоянного напряжения U_{DC} и функция состояния f определяются как (2.10, 2.11):

$$U_{DC} = R_{DC} I_{DC} + L_{DC} \frac{dI_{DC}}{dt} + E_{DC} . \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{2g_1 - g_2 - g_3}{3} \\ f_2 &= \frac{2g_2 - g_3 - g_1}{3} . \\ f_3 &= \frac{2g_3 - g_1 - g_2}{3} \end{aligned} \quad (2.10)$$

При этом ток в звене постоянного напряжения будет равен (2.12):

$$I_{DC} = g_1 i_1 + g_2 i_2 + g_3 i_3 , \quad (2.12)$$

а его производная по времени, с учетом того, что производная функции Хэвисайда будет являться дельта функцией, будет равна (2.13):

$$\frac{dI_{DC}}{dt} = g_1 \frac{di_1}{dt} + g_2 \frac{di_2}{dt} + g_3 \frac{di_3}{dt} . \quad (2.13)$$

Объединяя выражения (2.9 - 2.11, 2.13), получим математическое выражение, описывающее трехфазный неуправляемый диодный выпрямитель (2.14):

$$\begin{bmatrix} u_1 f_1 (R_{DC} I_{DC} + E_{DC}) \\ u_2 f_2 (R_{DC} I_{DC} + E_{DC}) \\ u_3 f_3 (R_{DC} I_{DC} + E_{DC}) \end{bmatrix} = L_{DC} \begin{bmatrix} f_1 g_1 & f_1 g_2 & f_1 g_3 \\ f_2 g_1 & f_2 g_2 & f_2 g_3 \\ f_3 g_1 & f_3 g_2 & f_3 g_3 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Применяя преобразование Кларк к (2.14) для перехода из трехфазной системы координат в двухфазную, получим (2.15):

$$U = R I + L \dot{I}, \quad (2.15)$$

где U, R, L определяются как (2.16-2.18):

$$U = \begin{bmatrix} u_\alpha f_\alpha (R_{DC} I_{DC} + E_{DC}) \\ u_\beta f_\beta (R_{DC} I_{DC} + E_{DC}) \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

$$R = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

$$L = \begin{bmatrix} L + L_{DC} f_\alpha g_\alpha & L_{DC} f_\alpha g_\beta \\ L_{DC} f_\beta g_\alpha & L + L_{DC} f_\beta g_\beta \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

Выражения (2.15-2.18) описывают динамические процессы, протекающие в трехфазном неуправляемом диодном выпрямителе.

2.2.3 Математическая модель асинхронного электропривода с векторной системой управления

Использование тяговых асинхронных двигателей в составе электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов в совокупности с векторной системой управления (рисунок 2.19) [21], обеспечивающей возможность независимого регулирования потокосцепления и момента двигателя, позволяет формировать требуемые механические характеристики при обеспечении высоких показателей энергетической эффективности части системы инвертор – тяговый двигатель.

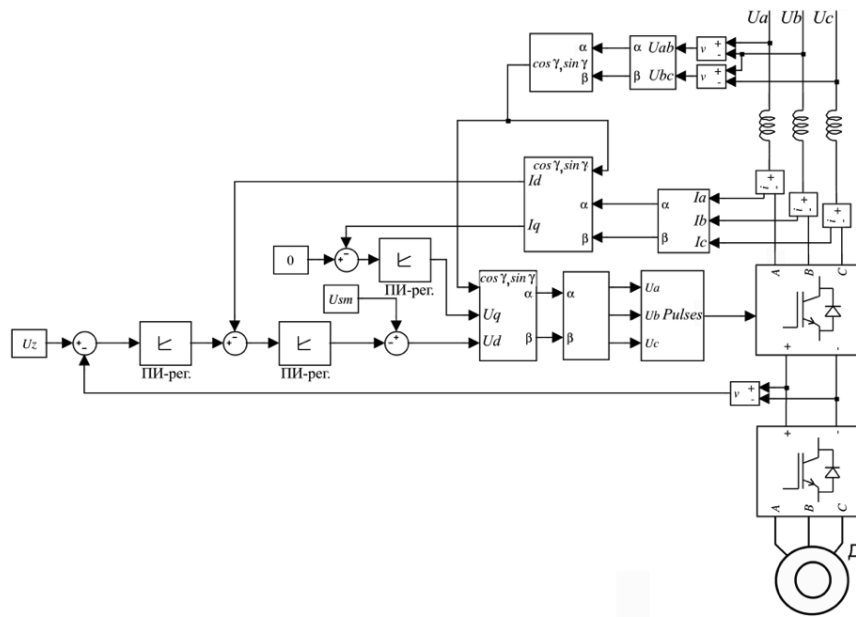


Рисунок 2.19 – Структурная схема векторной системы управления инвертором асинхронного двигателя

Впервые векторная система управления асинхронными двигателями с ориентацией вращающейся системы координат по потокосцеплению ротора была предложена компанией Siemens в 1971 году [63]. Широкое внедрение векторной системы управления в промышленные электропривода переменного тока потребовало как увеличения производительности процессоров, входящих в структуру системы управления, так и углубленного понимания переходных процессов в электроприводе, а, следовательно, создания математического аппарата, позволяющего синтезировать алгоритмы управления.

Математические модели асинхронных двигателей, по аналогии с математическими моделями синхронных машин, выполняются во вращающейся системе координат. В общем виде система уравнений, описывающая процессы в асинхронном короткозамкнутом электродвигателе, выполненная в проекциях обобщающих векторов на оси координат и вращающаяся со скоростью ω_k , будет иметь вид (2.19) [21]:

$$\begin{cases} U_{s1} = \frac{d\psi_{s1}}{dt} - \psi_{s2}\omega_k + R_s I_{s1} \\ U_{s2} = \frac{d\psi_{s2}}{dt} + \psi_{s1}\omega_k + R_s I_{s2} \\ 0 = \frac{d\psi_{r1}}{dt} - (\omega_k - p\omega)\psi_{r2} + R_r I_{r1} \\ 0 = \frac{d\psi_{r2}}{dt} + (\omega_k - p\omega)\psi_{r1} + R_r I_{r2} \end{cases}, \quad (2.19)$$

Учитывая число фаз двигателя m и число пар полюсов p , уравнение электромагнитного момента будет равно (2.20):

$$M = \frac{mp}{2} |\bar{\psi}_s \times \bar{I}_s| \quad (2.20)$$

Приведение числа неизвестных в системе уравнений (2.19, 2.20) к числу уравнений осуществляется с помощью уравнений связи. После данных преобразований и ориентации системы координат по полю ротора система уравнений примет следующий вид (2.21):

$$\begin{cases} U_{s1} = \frac{dI_{s1}}{dt} L'_s + K_r \frac{d\psi_{rm}}{dt} - I_{s2} L'_s \omega_{\psi r} + R_s L_{s1} \\ U_{s2} = \frac{dI_{s2}}{dt} L'_s + K_r \psi_{rm} \omega_{\psi r} + I_{s1} L'_s \omega_{\psi r} + R_s L_{s2} \\ 0 = \frac{d\psi_{rm}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \psi_{rm} - I_{s1} \frac{L_m R_r}{L_r} \\ 0 = \beta \psi_{rm} - I_{s2} \frac{L_m R_r}{L_r} \\ M = \frac{mpK_r}{2} \psi_{rm} I_{s2} \end{cases}, \quad (2.21)$$

где $\beta = \omega_{\psi r} - p\omega$.

В графическом представлении координатам I_s , ψ_{rm} , $\omega_{\psi r}$ соответствует векторная диаграмма, представленная на рисунке 2.20.

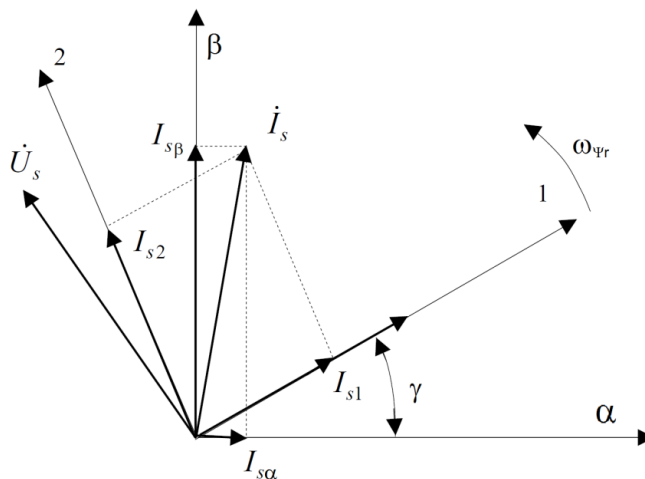


Рисунок 2.20 – Векторная диаграмма токов и напряжения

Оси системы координат α , β неподвижны и «привязаны» к статору асинхронного двигателя, тогда как оси 1 и 2 вращаются со скоростью вращения вектора потокосцепления. Проекции тока статора I_{s1} и I_{s2} на оси 1 и 2, вращающиеся со скоростью ротора, ортогональны друг относительно друга, и определяют величину потокосцепления и момент, соответственно.

Векторная система управления, измеряя фазные токи по известным проекциям обобщающего вектора тока статора на оси α , β , вычисляет проекции на оси 1 и 2. Управление работой двигателя осуществляется за счет стабилизации потока ротора ψ_{rm} и регулированием момента посредством изменения модуля проекции тока статора I_{s2} по средствам формирования широтно-импульсным модулятором требуемого сигнала скважности, поступающего на управляющие выходы мостового инвертора.

2.2.4 Имитационная модель электромеханической трансмиссии

Приведенные ранее математические модели электротехнических устройств, входящих в состав электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала, описываются математическими уравнениями, учитывающими только токи и напряжения основной гармоники, поэтому для синтеза адекватной модели был применен метод имитационного моделирования, позволяющий учесть несинусоидальность питающих токов и напряжений.

Система электромеханической трансмиссии представляет собой сложную систему, состоящую из множества взаимодействующих между собой элементов, в связи с этим имитационная модель для оценки энергетической эффективности системы в части тяговой генератор – выпрямитель была реализована в пакете прикладных программ Matlab, использующий одноименный язык программирования для решения различных технических задач, требующих сложных вычислений. Создание имитационной модели осуществлялось в пакете расширения Simulink, предоставляющий широкие возможности для создания сложных

математических моделей посредством графического программирования на основании стандартных функциональных блоков.

Для упрощения и без того ресурсоемких вычислений, а также с целью сокращения времени моделирования структура электромеханической трансмиссии была условно разделена на две части (рисунок 2.21) таким образом, что математическая и имитационная модели включали в себя дизель-генератор с одной из двух трехфазных обмоток, диодный выпрямитель и автономный инвертор с асинхронным двигателем.

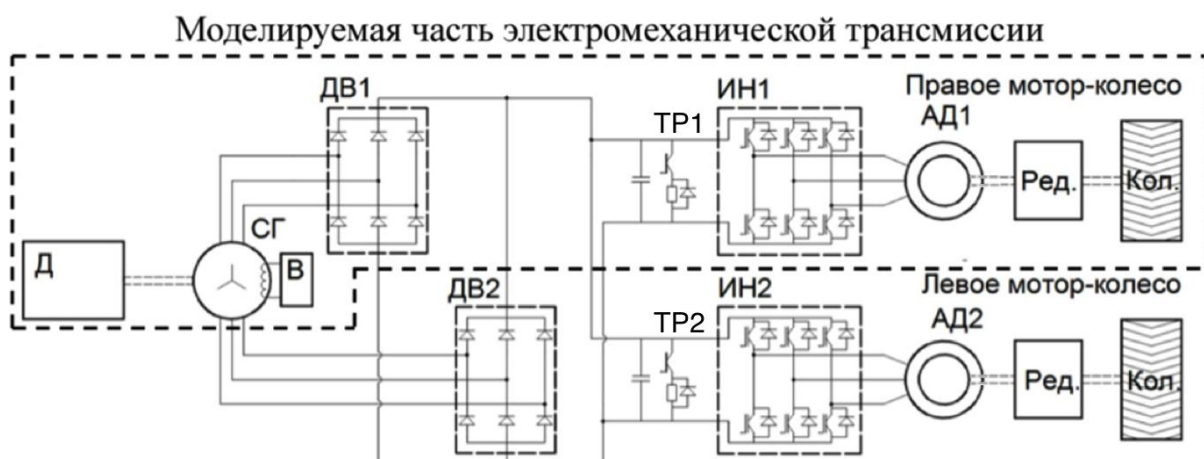


Рисунок 2.21 – Моделируемая часть электромеханической трансмиссии

На основе типовых функциональных блоков с использованием данных отчета [53], параметров электрических двигателей заводского стенда (Приложение Б) была реализована имитационная модель электромеханической трансмиссии (рисунок 2.22).

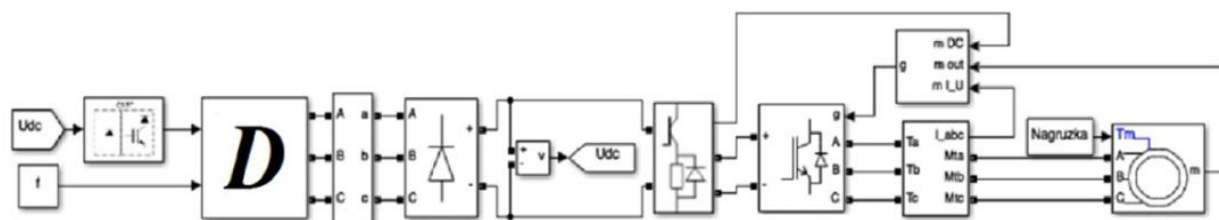


Рисунок 2.22 – Структурная схема имитационной модели моделируемой части электромеханической трансмиссии

Имитационная модель моделируемой части электромеханической трансмиссии включает в себя (слева направо) блок, имитирующий работу системы возбуждения, и блок задания скорости вращения дизельного

двигателя, блок дизель-генератора (D), выполненный в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 2.15, измерительный блок, имитационную модель трехфазного мостового диодного выпрямителя, блок измерения значений напряжения звена постоянного тока, блок, содержащий тормозные резисторы с системой управления, а также конденсаторную батарею, автономный инвертор напряжения с системой управления, подключенный через измерительный блок к блоку математической модели асинхронного двигателя с подключенным нагрузочным блоком.

Проверка адекватности модели выполнялась посредством сравнения данных имитационного моделирования и данных отчета «О результатах испытаний опытного образца электропривода асинхронного для самосвала «БелАЗ» грузоподъемностью 136 т» [53] при пуске тягового асинхронного двигателя под нагрузкой. Сравнение результатов испытаний и эксперимента приведены ниже:

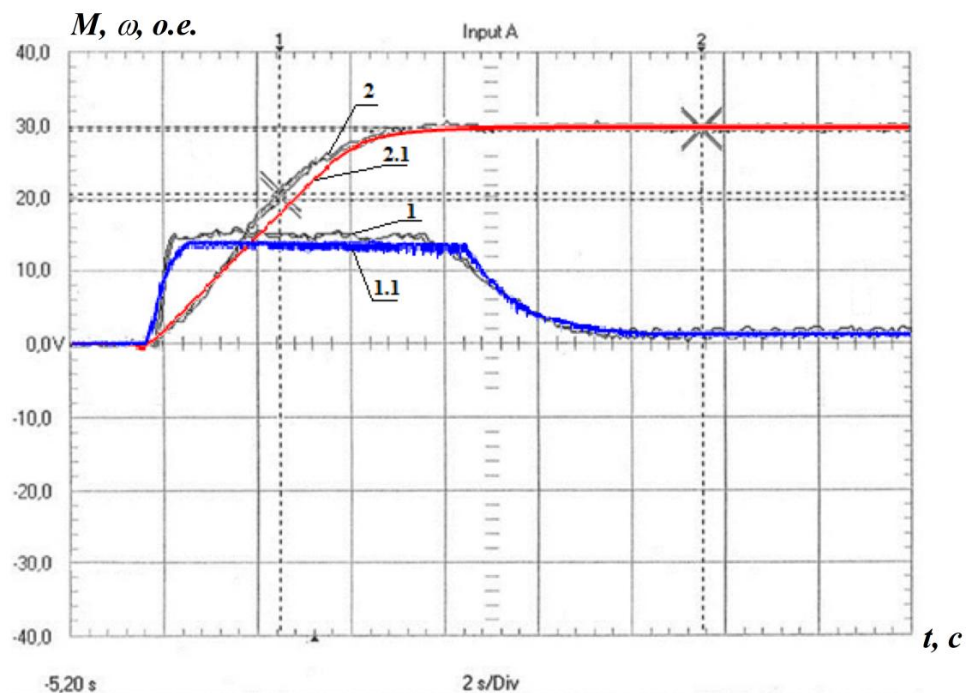


Рисунок 2.23 – Результаты моделирования пуска тягового асинхронного двигателя под нагрузкой, где 1, 2 – электромагнитный момент двигателя и скорость, полученные экспериментальным путем, 1.1, 1.2 – электромагнитный момент двигателя и скорость, полученные в результате имитационного моделирования

Графики зависимости тока фазы асинхронного двигателя от времени в режиме тяги, полученные в результате испытаний и имитационного моделирования, представлены на рисунке 2.24.

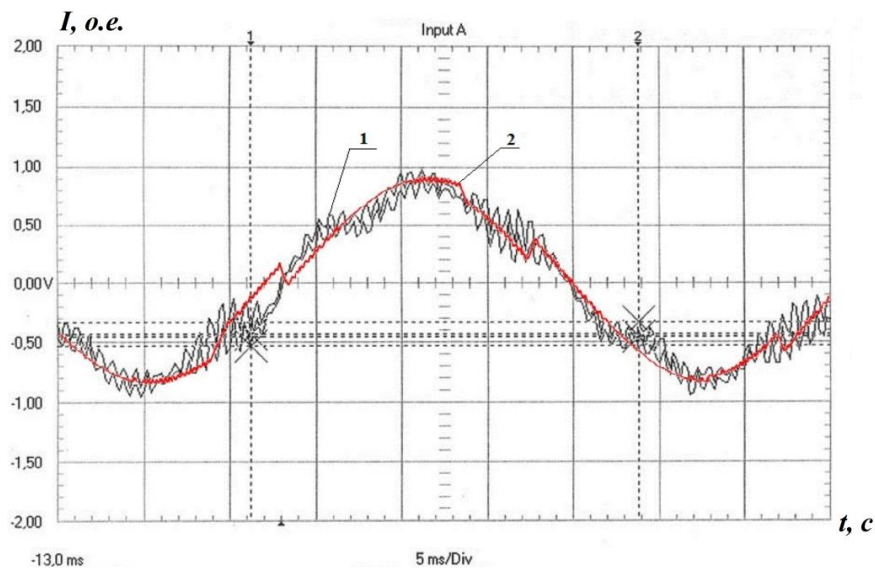


Рисунок 2.24 – Ток фазы тягового асинхронного двигателя в тяговом режиме, 1 – результаты испытаний, 2 – результаты имитационного моделирования

На рисунке 2.25 представлены графики тока фазы синхронного генератора от времени:

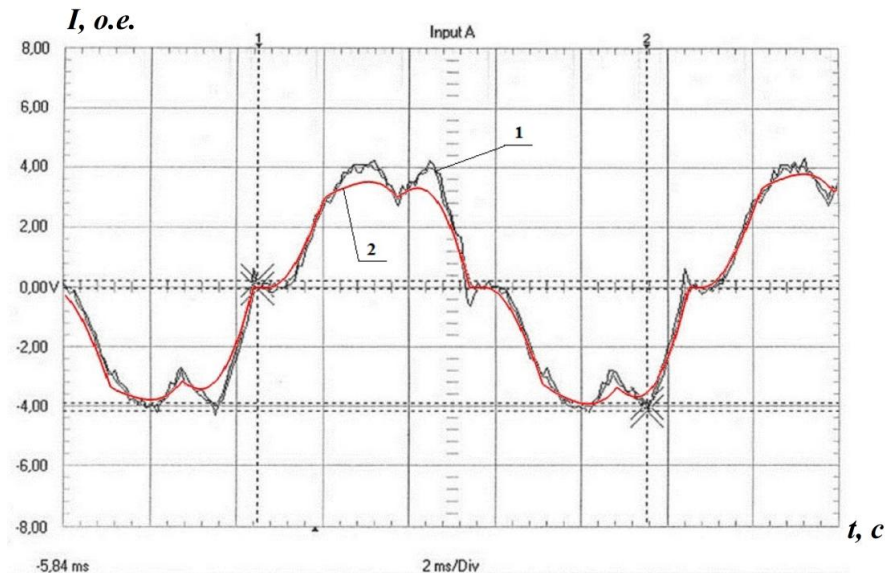


Рисунок 2.25 – Ток фазы тягового синхронного генератора, 1 – результаты испытаний, 2 – результаты имитационного моделирования

Проверка адекватности модели осуществлялась путем оценки сходимости экспериментальных данных (I_3, U_3), полученных на заводском

стенде, и данных имитационного моделирования (I_M, U_M), на основании известной формулы (2.22) [64]:

$$S = 100\% - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_э - x_м)^2}{n}} \cdot 100\%, \quad (2.22)$$

где $x_э$ – значение, полученное экспериментально, $x_м$ – значение, полученное в ходе имитационного моделирования, n – количество замеров.

Значения кривых тока и напряжения фазы тягового синхронного генератора приведены в таблице 2.4:

Таблица 2.4 – Значения кривых тока и напряжения

n	Ток фазы тягового генератора			Напряжение фазы тягового генератора		
	$I_э$, о.е.	$I_м$, о.е.	$(I_э - I_м)^2$, о.е.	$U_э$, о.е.	$U_м$, о.е.	$(U_э - U_м)^2$, о.е.
1	-0,418	-0,550	0,01742	-0,712	-0,7565	0,00198
2	-0,484	-0,704	0,04840	-1,958	-2,0025	0,00198
3	-0,77	-0,792	0,00048	-3,115	-3,738	0,38813
4	-0,792	-0,858	0,00436	-4,005	-4,005	0
5	-0,814	-0,924	0,01210	-4,361	-4,272	0,00792
6	-0,924	-0,946	0,00048	-4,094	-4,094	0
7	-0,748	-0,858	0,01210	-3,026	-3,471	0,19803
8	-0,572	-0,814	0,05856	-3,738	-3,738	0
9	-0,396	-0,638	0,05856	-4,539	-3,56	0,95844
10	-0,44	-0,352	0,00774	-2,403	-2,314	0,00792
11	-0,418	-0,176	0,05856	0	0	0
12	-0,352	0	0,12390	0	0	0
13	0,044	0,198	0,02372	0,178	0,2225	0,00198
14	0,242	0,110	0,01742	1,335	1,335	0
15	0,484	0,286	0,03920	3,204	3,204	0
16	0,638	0,462	0,03098	3,827	3,649	0,03168
17	0,572	0,594	0,00048	4,272	3,827	0,19803
18	0,704	0,726	0,00048	4,539	3,916	0,38813
19	0,726	0,858	0,01742	3,649	3,56	0,00792

Продолжение таблицы 2.4

20	0,858	0,924	0,00436	3,649	3,649	0
21	0,968	0,968	0	4,183	3,649	0,28516
22	0,902	0,979	0,00593	3,471	2,848	0,38813
23	0,814	0,946	0,01742	1,424	1,424	0
24	0,748	0,748	0	0	0	0
25	0,792	0,594	0,03920	0	-0,089	0,00792
26	0,616	0,440	0,03098	-0,534	-0,623	0,00792
27	0,572	0,352	0,04840	-1,958	-1,958	0
28	0,396	0,374	0,00048	-3,204	-3,204	0
29	0,22	0,198	0,00048	-4,094	-4,094	0
30	0	0,000	0	-4,361	-4,361	0
31	-0,22	-0,176	0,00194	-4,272	-4,272	0
32	-0,374	-0,352	0,00048	-3,293	-3,649	0,12674
33	-0,484	-0,484	0	-3,827	-3,916	0,00792
34	-0,462	-0,616	0,02372	-4,183	-3,827	0,12674
35	-0,55	-0,770	0,04840	-2,67	-2,67	0
36	-0,638	-0,836	0,03920	0,534	0	0,28516
37	-0,77	-0,880	0,01210	0	0	0
38	-0,792	-0,858	0,00436	0	0	0
39	-0,88	-0,836	0,00194	1,513	1,513	0
40	-0,66	-0,748	0,00774	2,848	2,848	0
41	-0,484	-0,616	0,01742	4,539	4,005	0,28516
42	-0,44	-0,484	0,00194	4,361	4,094	0,07129
43	-0,242	-0,528	0,08180	4,717	4,183	0,28516
44	-0,55	-0,396	0,02372	3,916	4,005	0,00792
45	-0,198	-0,176	0,00048	3,649	3,649	0

Вычисленные на основании формулы (2.22) показатели сходимости результатов составили 97,8 % и 90,9 % для сигналов тока и напряжения

соответственно. Таким образом, погрешность результатов имитационного моделирования не превышает 10 %, что подтверждает адекватность синтезированной модели.

Оценка энергетической эффективности части системы синхронный генератор – неуправляемый выпрямитель в составе электромеханической трансмиссии производилась в наиболее энергоемком режиме работы, в режиме движения карьерного автосамосвала на подъем, так как в режиме электродинамического торможения вся энергия, вырабатываемая тяговыми двигателями, переведенными в генераторный режим, рассеивается тормозными резисторами звена постоянного тока.

Был смоделирован пуск дизельного двигателя, по достижению напряжения звеном постоянного тока установившегося значения выполнен запуск частотно-регулируемого тягового асинхронного двигателя под номинальной нагрузкой (M_n) с дальнейшим полторакратным набросом нагрузки ($1,5 M_n$) (рисунок 2.26).

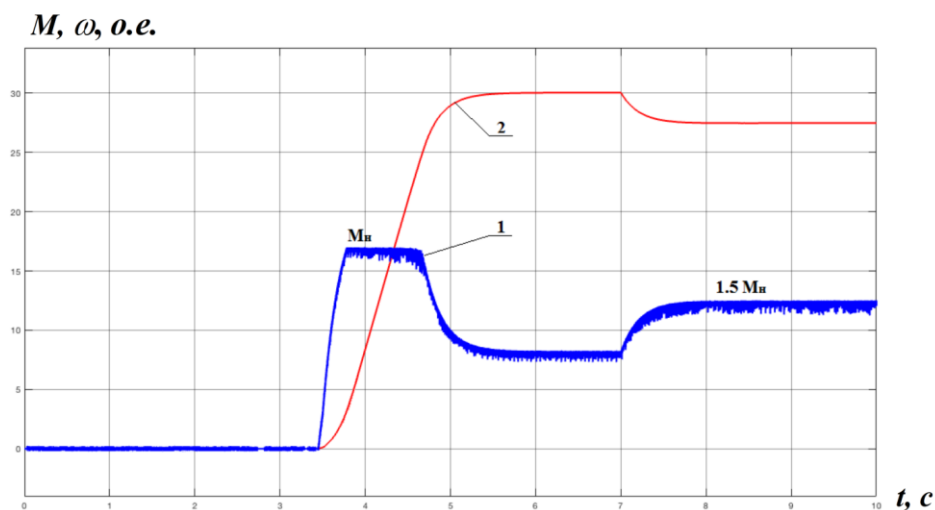


Рисунок 2.26 – Моделирование пуска тягового асинхронного двигателя под нагрузкой (M_n , о.е.) с последующим полторакратным набросом нагрузки ($1,5 M_n$, о.е.), где 1 – электромагнитный момент, 2 – скорость

Во время моделирования пуска тягового асинхронного двигателя было произведено измерение коэффициента мощности системы синхронный генератор – неуправляемый выпрямитель, график изменения которого представлен ниже:

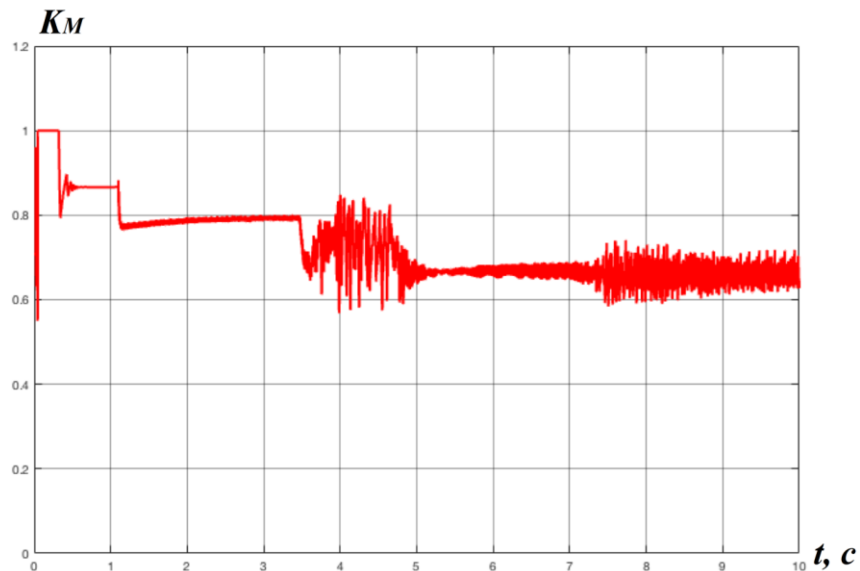


Рисунок 2.27 – Коэффициент мощности системы синхронный генератор – неуправляемый выпрямитель при пуске тягового асинхронного двигателя

Из графика, приведенного на рисунке 2.27, видно, что при работе тягового асинхронного двигателя при номинальной нагрузке коэффициент мощности составляет 0,8, а с полуторакратным увеличением нагрузки опускается до 0,7. Кроме того, посредством Фурье анализа сигналов была выполнена декомпозиция сигналов тока и напряжения. Коэффициенты нелинейных искажений тока и напряжения составили 14,35 % и 13,94 % соответственно.

Низкие значения коэффициента мощности в тяговом режиме работы системы электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала в части синхронный тяговый генератор – неуправляемый диодный выпрямитель приводят к снижению энергетической эффективности системы, а высокие значения коэффициентов нелинейных гармонических искажений негативно влияют на срок службы изоляции обмоток тягового генератора, что, в свою очередь, снижает общую надежность системы.

2.3 Выводы по Главе 2

Во второй главе выполнен анализ структуры и принципа действия современной электромеханической трансмиссии, устанавливаемой на большегрузные карьерные автосамосвалы.

Приведены математические уравнения, описывающие энергетические процессы, протекающие в электрических компонентах, входящих в состав электромеханической трансмиссии. На основании приведенного математического аппарата синтезирована имитационная модель бесконтактной тяговой электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала с автономным источником и преобразователем частоты с неуправляемым выпрямителем, устанавливаемая на серийно выпускаемые карьерные автосамосвалы, строящаяся на основании стандартных функциональных блоков пакета прикладных программ Matlab-Simulink и позволяющая адекватно оценить показатели энергетической эффективности системы электромеханической трансмиссии в части системы синхронный тяговый генератор – неуправляемый выпрямитель. Адекватность модели подтверждена сходимостью данных экспериментов, полученных на заводском стенде, и результатами имитационного моделирования, с погрешностью не превышающей 10 %.

Результаты моделирования, полученные в ходе экспериментов, проведенных на синтезированной имитационной модели электромеханической трансмиссии, подтвердили низкие значения коэффициента мощности (0,7 – 0,8) системы в части синхронный тяговый генератор – неуправляемый выпрямитель в режиме тяги, а также высокие значения коэффициентов нелинейных гармонических искажений тока (14,35 %) и напряжения (13,94 %) на выходе тягового синхронного генератора.

Низкие значения коэффициента мощности и коэффициентов нелинейных гармонических искажений системы электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала подтверждают необходимость модернизации с целью повышения энергетической эффективности системы.

ГЛАВА 3 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ

Проблема электромагнитной совместимости в электромеханических системах значительно усугубилась с ростом числа потребителей электрической энергии, обладающих нелинейной характеристикой нагрузки (частотно-регулируемые электроприводы). Потребители электрической энергии, обладающие нелинейной характеристикой нагрузки, в серийно выпускаемых системах электромеханических трансмиссий карьерных автосамосвалов снижают энергетическую эффективность, увеличивая реактивную мощность, вырабатываемую тяговым генератором, что, в свою очередь, снижает коэффициент мощности части системы синхронный тяговый генератор – выпрямитель, являются источником высших гармоник в выходных токах и напряжениях генератора, оказывающих негативное влияние на срок службы изоляции, снижают надежность систем управления и автоматизации.

В настоящее время широко известны различные методы, позволяющие повысить энергетическую эффективность систем, обеспечить коэффициент мощности системы близким к единице, снизить или устранить высшие гармоники питающих токов и напряжений [82, 92, 93, 101].

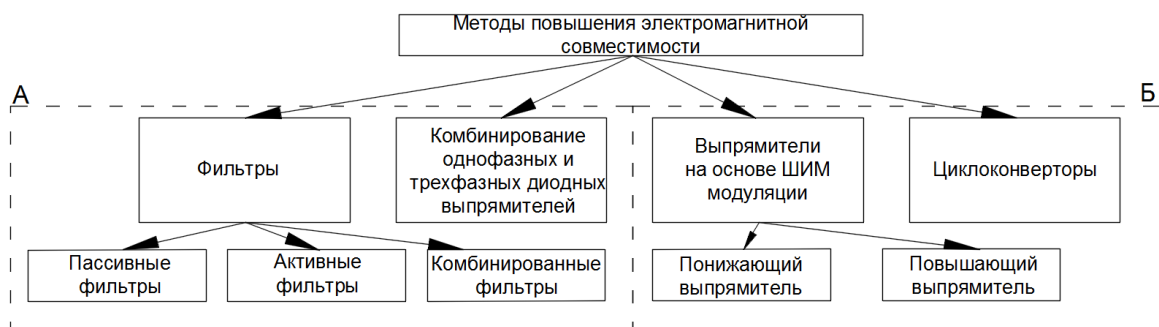


Рисунок 3.1 – Методы повышения электромагнитной совместимости

Способы повышения электромагнитной совместимости можно условно разделить на две группы: методы повышения электромагнитной совместимости за счет установки дополнительного оборудования (рисунок

3.1 а) и методы повышения электромагнитной совместимости за счет модернизации силовой части электромеханической трансмиссии (рисунок 3.1 б).

Высокий уровень высших гармонических искажений и низкий коэффициент мощности приводят к проблемам в распределительных сетях. Качество электрической энергии в России регламентируется ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [15], работы по обеспечению потребностей в электроэнергии на принципах энергосбережения и энергоэффективности проводятся в соответствии с государственной программой «Развитие энергетики» [50].

3.1 Методы повышения показателей энергетической эффективности за счет модернизации силовой части электромеханической трансмиссии

Одним из способов, позволяющих повысить коэффициент мощности электромеханической трансмиссии в части синхронный тяговый генератор – выпрямитель, является модернизация электромеханической трансмиссии путем внедрения в структуру силовой полупроводниковой части системы выпрямителя, обладающего возможностью коррекции коэффициента мощности.

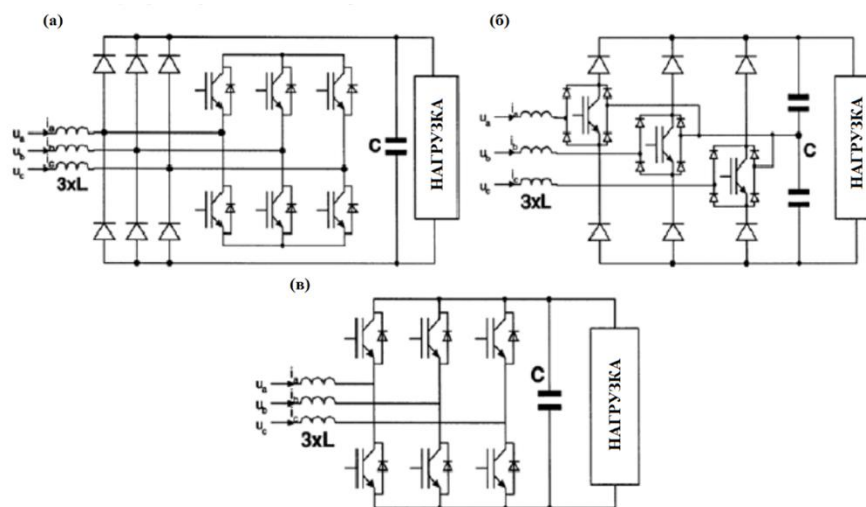


Рисунок 3.2 – Схемы выпрямителей, обеспечивающих коррекцию коэффициента мощности

Наибольшее распространение получили следующие схемы выпрямителей, позволяющих обеспечить коррекцию коэффициента мощности (рисунок 3.2) [96, 106]:

а) Схема ШИМ выпрямителя. Отличительной особенностью данной схемы является низкое значение тока, протекающего через полупроводниковые ключи.

б) Виенна выпрямитель. Основным достоинством является низкое напряжение при переключении.

в) Активный выпрямитель напряжения. Представляет собой наиболее распространенную схему, позволяющую обеспечить двунаправленное движение энергии и коэффициент мощности близкий к единице.

Таблица 3.1 – Сравнение схем выпрямителей

Свойства	Топология схемы			
	Диодный выпрямитель	а	б	в
Регулирование постоянного напряжения	-	-	+	+
Низкие гармонические искажения тока сети	-	+	+	+
Низкая несинусоидальность тока	-	+	+	+
Коррекция коэффициента мощности	-	+	+	+
Возможность рекуперации	-	-	-	+
Обеспечение коэффициента мощности близкого к единице	-	+	+	+

Схемы выпрямителей, представленные на рисунке 3.2 а и рисунке 3.2 б, позволяют обеспечить коэффициент мощности близкий к единице, но за счет большего количества полупроводниковых элементов, по сравнению со схемой активного выпрямителя напряжения, согласно теории надежности, могут снизить общую надежность системы электромеханической трансмиссии, кроме того, Виенна выпрямитель требует использования полупроводниковых ключей специальной конструкции.

В настоящее время стоимость силовых модулей с использованием IGBT транзисторов относительно невелика, по сравнению с остальным электромеханическим оборудованием, входящим в состав электромеханической трансмиссии автосамосвалов, что делает схему рисунок 3.2 в выполненную на основании стандартных полупроводниковых модулей наиболее перспективным техническим решением в сравнении со схемами рисунок 3.2 а и рисунок 3.2 б.

3.1.1 Математическая модель мостовой трехфазной схемы выпрямителя на основе полностью управляемых полупроводниковых ключей

В качестве наиболее перспективной схемы для модернизации электромеханической трансмиссии автосамосвала была выбрана мостовая трехфазная схема активного выпрямителя [28].

На основании выбранной схемы была разработана функциональная схема модернизированной электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала, представленная на рисунке 3.3 [54].

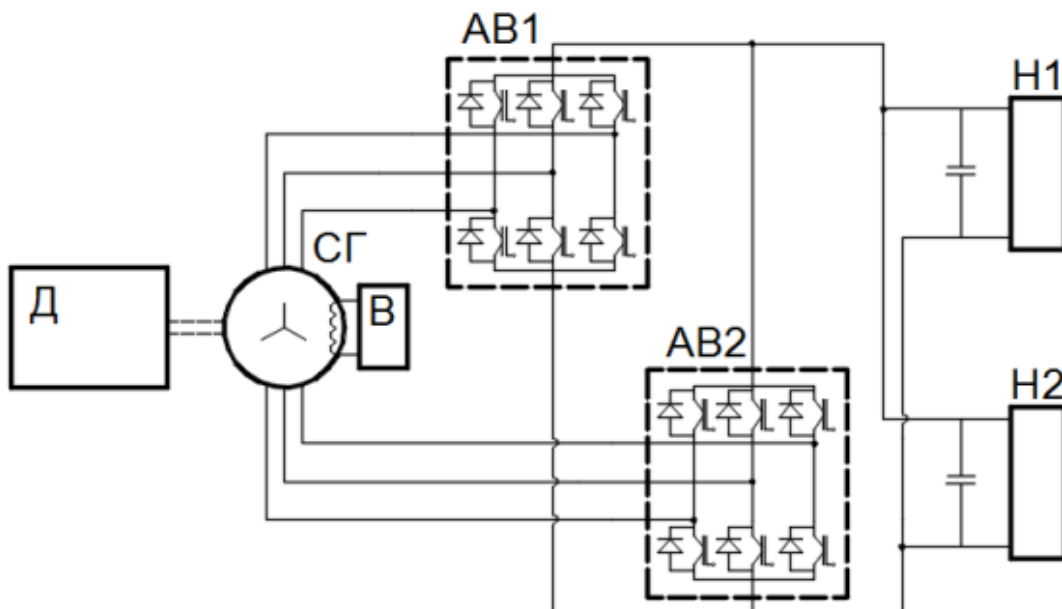


Рисунок 3.3 – Вариант модернизации электромеханической трансмиссии за счет модернизации силовой части, где Д – первичный двигатель, СГ – синхронный тяговый генератор, В – возбуждатель тягового синхронного генератора, АВ1 и АВ2 – активные выпрямители напряжения, Н1 и Н2 – нелинейная нагрузка (тяговые двигатели)

С учетом небольшого значения постоянной времени переключения ключей по отношению к постоянным времени входных цепей активного выпрямителя и постоянной времени накопительного конденсатора звена постоянного тока при построении математической модели возможно использование метода линеаризации [96].

Примем допущение согласно которому все полупроводниковые ключи являются идеальными, тогда эквивалентная структурная схема примет следующий вид:

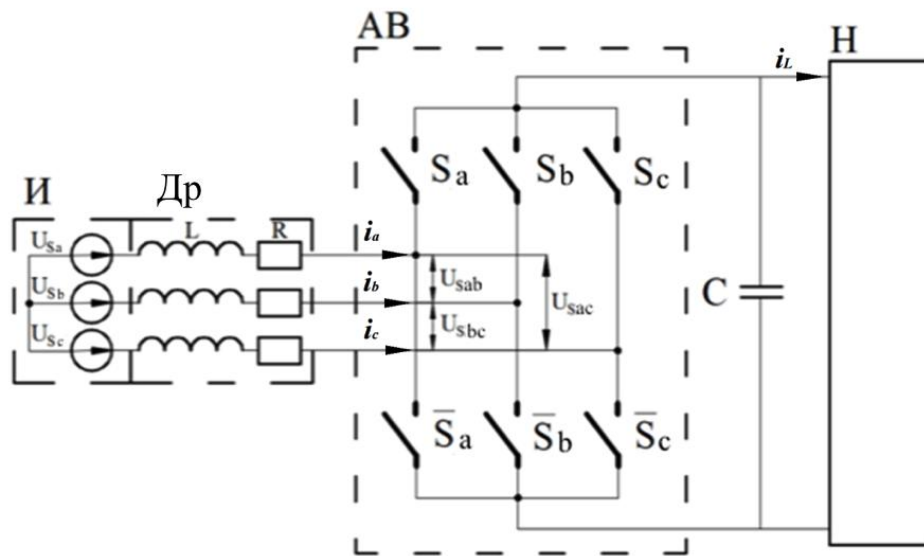


Рисунок 3.4 – Эквивалентная схема активного выпрямителя, где И – источник напряжения, Др – входной дроссель, АВ – активный выпрямитель, С – конденсатор, Н – активно-индуктивная нагрузка

Тогда однофазная схема замещения электрической цепи выпрямителя будет иметь вид:

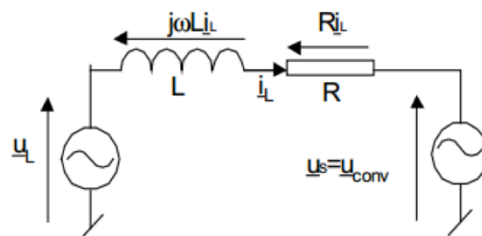


Рисунок 3.5 – Однофазная схема замещения

Индуктивность, подключенная между выходом генератора и входом активного выпрямителя выполняет функцию повышения выпрямленного

напряжения и придает источнику на входе выпрямителя характер источника тока. Работа выпрямителя в общем виде может быть представлена следующими векторными диаграммами:

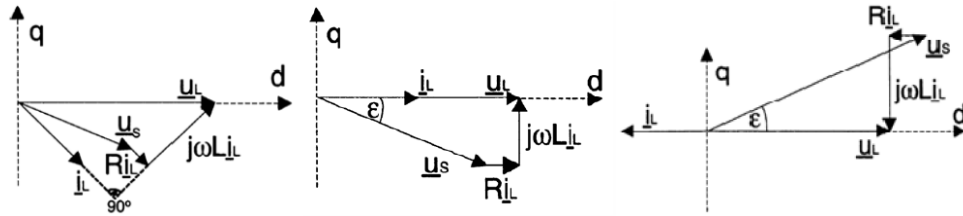


Рисунок 3.6 – Векторные диаграммы, описывающие работу активного выпрямителя

Значение линейного тока i_L регулируется путём изменения напряжения на индуктивности L , которая включена между генератором и активным выпрямителем. При регулировании угла ϵ и амплитуды напряжения на ключах выпрямителя U_s происходит изменение фазы и амплитуды сети. При этом среднее значение постоянного тока пропорционально активной мощности, проходящей через выпрямитель. Регулирование реактивной мощности осуществляется путём сдвига по фазе основной гармоники тока i_L , с учетом напряжения U_L .

Трёхфазные токи и напряжения сети могут быть представлены выражениями (3.1, 3.2):

$$\begin{cases} U_a = E_m \cos(\omega t) \\ U_b = E_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \\ U_c = E_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}, \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos(\omega t + \varphi) \\ i_b = I_m \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \\ i_c = I_m \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}, \quad (3.2)$$

где E_m , I_m , ω амплитуда напряжения, тока и угловая частота, при условии что токи будут равны (3.3):

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (3.3)$$

Трёхфазная система может быть математически описана пространственным вектором напряжения, содержащим вещественную и мнимую части (3.4) [94, 105]:

$$U^s(t) = U_\alpha(t) + jU_\beta(t) = \frac{2}{3}K \left(U_a(t) + U_b(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + U_c(t)e^{j\frac{4\pi}{3}} \right), \quad (3.4)$$

где K – масштабирующий коэффициент, принимающий значения $K = 1$ при неизменной амплитуде, $K = \frac{1}{\sqrt{2}}$ при неизменном среднеквадратичном значении, $K = \sqrt{\frac{3}{2}}$.

Линейное напряжение между ключами выпрямителя может быть представлено как (3.5):

$$\begin{cases} U_{Sab} = (S_a - S_b)U_{DC} \\ U_{Sbc} = (S_b - S_c)U_{DC} , \\ U_{Sca} = (S_c - S_a)U_{DC} \end{cases} \quad (3.5)$$

где S_a, S_b, S_c – функции переключения модулей ключей, определяемые как (3.6):

$$S_i = \begin{cases} 1 - \text{верхний ключ включен} \\ 0 - \text{нижний ключ включен} \end{cases}, \quad i = a, b, c. \quad (3.6)$$

Тогда напряжение на ключе будет равно (3.7):

$$\begin{aligned} U_{Sa} &= f_a U_{DC} \\ U_{Sb} &= f_b U_{DC} , \\ U_{Sc} &= f_c U_{DC} \end{aligned} \quad (3.7)$$

где (3.8):

$$\begin{aligned} f_a &= S_a - S^* = S_a - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b &= \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \\ f_c &= \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Управляемый выпрямитель может быть описан двумя выражениями, первое из которых определяет напряжение каждой фазы, второе – связывает токи выпрямителя, нагрузки и напряжение звена постоянного тока (3.9, 3.10):

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Sa} \\ U_{Sb} \\ U_{Sc} \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

$$C \frac{dU_{DC}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_L. \quad (3.10)$$

Объединяя выражения (3.5 – 3.10), получаем следующую структурную схему математической модели активного выпрямителя [85], где S_a, S_b, S_c – вход сигналов состояния ключей, поступающих от широтно-импульсного

модулятора для каждого плеча моста. U_a, U_b, U_c – входные значения напряжения, i_L – ток нагрузки, U_{dc} – выпрямленное значение напряжения:

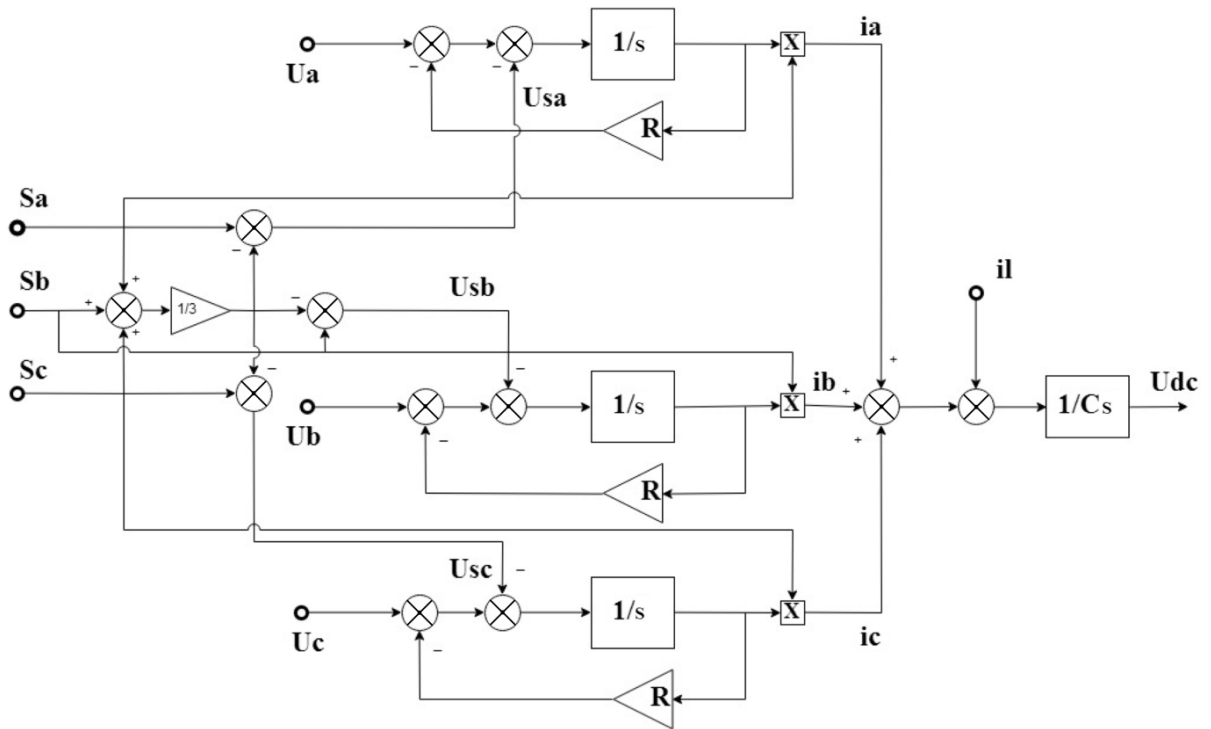


Рисунок 3.7 – Эквивалентная схема математической модели активного выпрямителя

Для синтеза системы управления необходимо осуществить переход в двухфазную систему координат, ориентированную по вектору тока сети, при этом сигналы будут представлять собой сигналы постоянного тока, что позволит осуществить настройку регуляторов.

Выражения (3.9), (3.10) при переходе из трехфазной в неподвижную двухфазную систему координат будут иметь вид (3.11, 3.12):

$$\begin{bmatrix} U_{L\alpha} \\ U_{L\beta} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{S\alpha} \\ U_{S\beta} \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

$$C \frac{dU_{DC}}{dt} = S_{\alpha} i_{L\alpha} + S_{\beta} i_{L\beta} - i_L, \quad (3.12)$$

где $S_{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c)$; $S_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c)$.

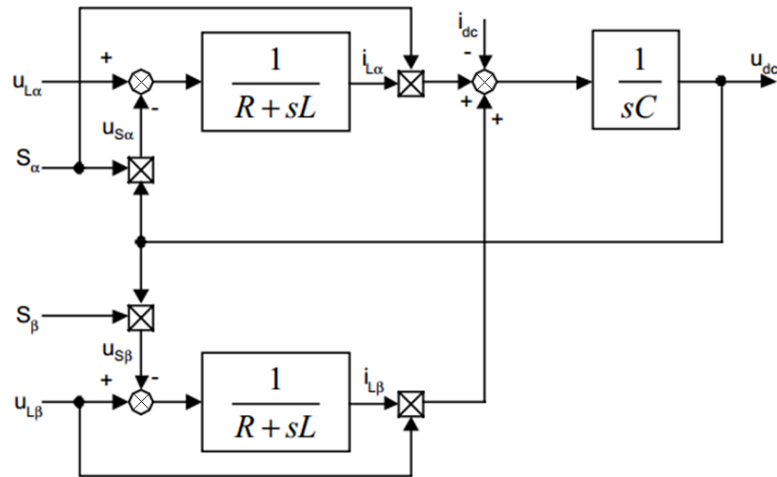


Рисунок 3.8 – Структурная схема математической модели активного выпрямителя в неподвижной двухфазной системе координат

Осуществляя переход от двухфазной неподвижной к вращающейся системе координат выражения (3.11, 3.12) примут следующий вид (3.11-3.13):

$$U_{Ld} = Ri_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega Li_{Lq} + U_{Sd} \quad (3.11)$$

$$U_{Lq} = Ri_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} + \omega Li_{Ld} + U_{Sq} \quad (3.12)$$

$$C \frac{dU_{DC}}{dt} = S_d i_{Ld} + S_q i_{Lq} - i_L, \quad (3.13)$$

где $S_d = S_\alpha \cos \omega t + S_\beta \sin \omega t$; $S_q = S_\beta \cos \omega t - S_\alpha \sin \omega t$.

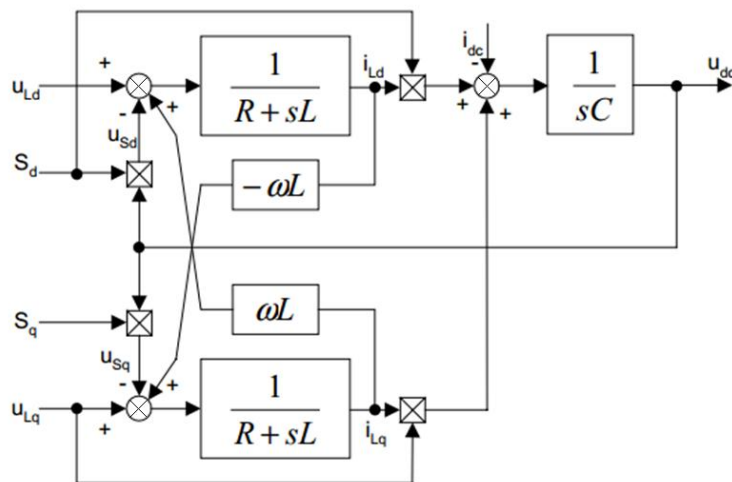


Рисунок 3.9 – Структурная схема математической модели активного выпрямителя во вращающейся системе координат

Выражения могут быть упрощены за счет исключения из расчетов параметра R , т.к. активное сопротивление дросселя и соединительных

кабелей незначительно по сравнению с их реактивным сопротивлением, тогда (3.14-3.18):

$$\overline{U}_L = \frac{d\overline{i}_L}{dt} L + \overline{U}_S, \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Sa} \\ U_{Sb} \\ U_{Sc} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} U_{L\alpha} \\ U_{L\beta} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{S\alpha} \\ U_{S\beta} \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

$$U_{Ld} = L \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega L i_{Lq} + U_{Sd}, \quad (3.17)$$

$$U_{Lq} = L \frac{di_{Lq}}{dt} + \omega L i_{Ld} + U_{Sq}. \quad (3.18)$$

Активная и реактивная мощности, питающие выпрямитель, определяются как (3.19, 3.20):

$$p = \operatorname{Re}\{ui^*\} = U_\alpha i_\alpha + U_\beta i_\beta = U_a i_a + U_b i_b + U_c i_c, \quad (3.19)$$

$$q = \operatorname{Im}\{ui^*\} = U_\beta i_\alpha - U_\alpha i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_{bc} i_a + U_{ca} i_b + U_{ab} i_c). \quad (3.20)$$

Тогда во вращающейся системе координат мощности будут равны (3.21, 3.22):

$$p = U_{Lq} i_{Lq} + U_{Ld} i_{Ld} = \frac{3}{2} E_m I_m, \quad (3.21)$$

$$q = U_{Lq} i_{Ld} - U_{Ld} i_{Lq}, \quad (3.22)$$

где, при условии поддержания единичного коэффициента мощности, $i_{Lq} = 0$,

$$U_{Lq} = 0, U_{Ld} = \sqrt{\frac{3}{2}} E_m, i_{Ld} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m, q = 0.$$

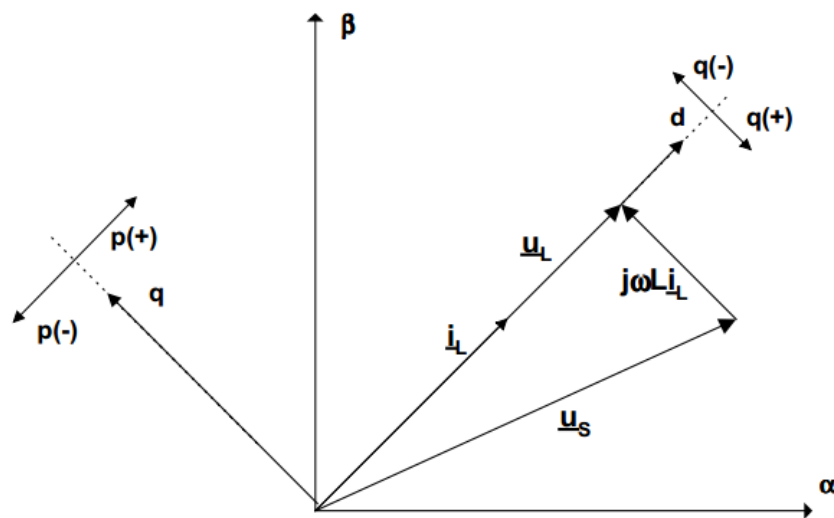


Рисунок 3.10 – Зависимость движения мощности от направления тока в активном выпрямителе

На векторной диаграмме (рисунок 3.10) представлено графическое изображение зависимости изменения мощности в активном выпрямителе от направления движения тока i_L .

3.1.2 Ограничения при работе выпрямителя

Снижение искажений формы токов и корректная работа выпрямителя требует задания минимального значения напряжения в звене постоянного тока U_{DCmin} . Корректная работа активного выпрямителя возможна только при условии стабилизации напряжения в звене постоянного тока на уровне значения, превышающего значение U_{DCmin} , при этом пиковые значения напряжения не должны превышать допустимое рабочее напряжение обратных диодов в составе силовых IGBT ключей моста выпрямителя.

Теоретически максимальное выходное напряжение звена постоянного тока является пиковым среднеквадратичным значением линейного напряжения (3.23) [96]:

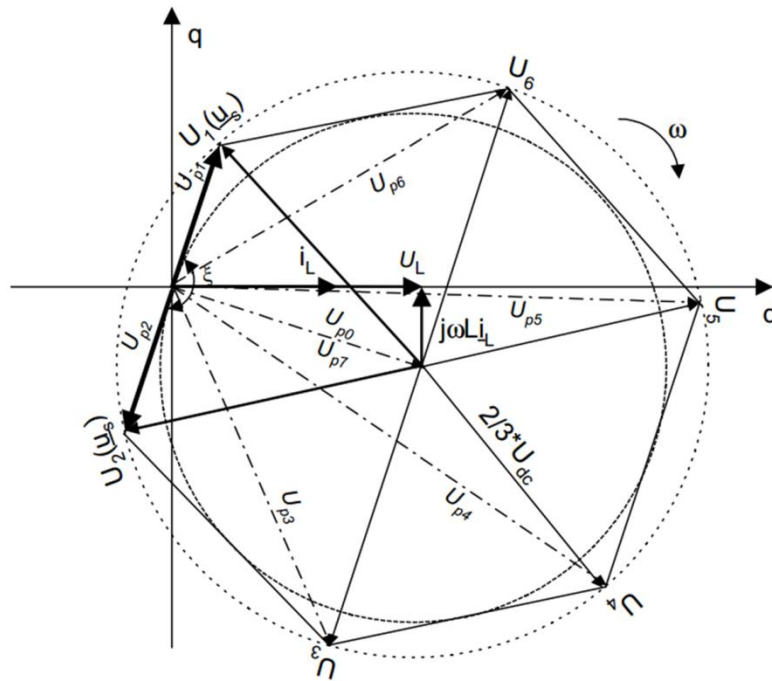
$$U_{DCmin} > \sqrt{2}U_{LL(rms)} = \sqrt{2}\sqrt{3}U_{LN(rms)}. \quad (3.23)$$

Однако выражение (3.23) справедливо только для диодного мостового выпрямителя. В некоторых работах [83, 84] описывается возможность поддержания минимального значения напряжения, но они не учитывают значение индуктивности на входе инвертора.

Выражения (3.17, 3.18) могут быть преобразованы в векторную форму в синхронных d-q координатах, определяющих производную тока как (3.24):

$$L \frac{di_{Ldq}}{dt} = U_{Ldq} - j\omega L i_{Ldq} - U_{sdq}. \quad (3.24)$$

Выражение (3.24) определяет направление и скорость вращения вектора тока. Шесть векторов U_{1-6} (рисунок 3.11) входного напряжения управляемого выпрямителя вращаются по часовой стрелке в системе координат d-q. Для векторов $U_0, U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7$ производные тока обозначены $U_{p0}, U_{p1}, U_{p2}, U_{p3}, U_{p4}, U_{p5}, U_{p6}, U_{p7}$ соответственно.



3.11 – Мгновенное положение векторов

Управление током, протекающим через выпрямитель, возможно при условии нахождения данного вектора в пределах заданной зоны (рисунок 3.12).

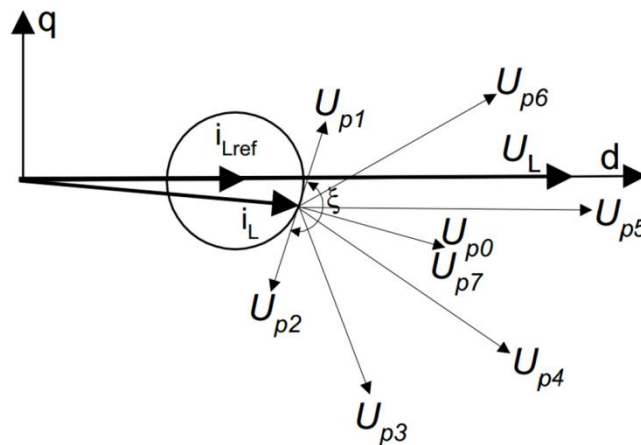


Рисунок 3.12 – Ограничения при работе выпрямителя

Рисунки 3.11 и 3.12 демонстрируют то, что любой из шести векторов U_{p1-6} может стабилизировать вектор тока в заданной зоне, при условии $\xi \leq \pi$. Данное утверждение следует из законов тригонометрии, векторы U_{p1} , U_{p2} , U_1 и U_2 образуют равносторонний треугольник при $\xi = \pi$, где $\underline{u}_{Ldq} - j\omega L \underline{i}_{Ldq} -$

высота. Следовательно, граничное условие может быть определено как (3.25):

$$|U_{Ldq} - j\omega L i_{Ldq}| = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{sdq}. \quad (3.25)$$

После преобразования принимая, что $U_{sdq} = \frac{2}{3} U_{DC}$, $U_{Ldq} = E_m$, $i_{Ldq} = i_L$, выражение, ограничивающее минимальное значение напряжения звена постоянного тока, примет следующий вид (3.26):

$$U_{DC} > \sqrt{3 |E_m^2 + (\omega L i_{Ldq})^2|} \quad \text{при } \xi > \pi. \quad (3.26)$$

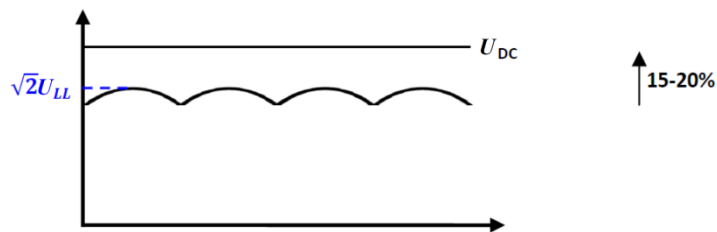


Рисунок 3.13 – Напряжение звена постоянного тока

Как показала практика, задание по значению выпрямленного напряжения звена постоянного тока для большинства случаев рекомендуется принимать на 15-20 % больше среднеквадратичного значения фазного напряжения (рисунок 3.13).

3.1.3 Определение параметров схемы

Максимальная величина индуктивности дросселя на входе выпрямителя определяется на основании выбранного значения выпрямленного напряжения (U_{DC}). На основании формулы (3.26) значение индуктивности определяется как (3.27) [96]:

$$L < \frac{\sqrt{\frac{U_{DC}^2 - E_m^2}{3}}}{\omega i_{Ldq}}. \quad (3.27)$$

При конечном выборе значения индуктивности следует учитывать, что малое значение индуктивности усиливает пульсации тока, увеличивая значение коэффициента несинусоидальности, большое – снижает пульсации тока, но в то же время уменьшает рабочий диапазон напряжений

выпрямителя. Наличие ЭДС дросселей позволяет, при работе активного выпрямителя, управлять током сети, что позволяет стабилизировать напряжение звена постоянного тока, при этом максимальное значение напряжения ограничивается заданным значением напряжения звена постоянного тока. Следовательно, большие значения токов, протекающих через индуктивность выпрямителя, требуют либо большего заданного значения напряжения звена постоянного тока, либо низкого значения индуктивности дросселя.

3.1.4 Система управления активным выпрямителем

При классификации систем управления активными выпрямителями можно провести аналогию с системами управления асинхронными частотно регулируемые приводами:

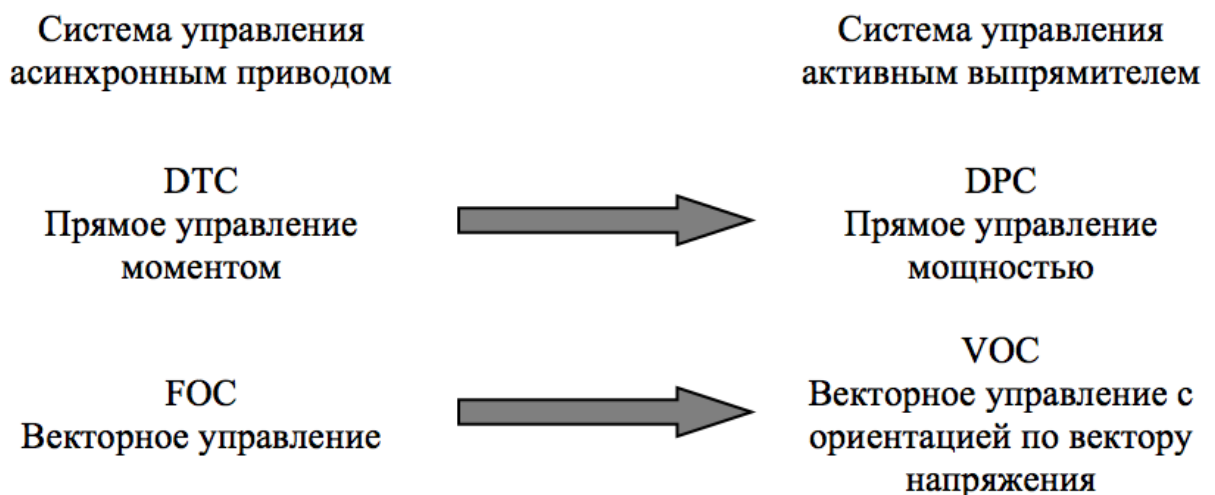


Рисунок 3.14 – Системы управления активным выпрямителем

Системы управления активным выпрямителем могут быть разделены на две категории: системы управления, основанные на изменении вектора напряжения и системы управления, основанные на вычислении вектора полной мощности, являющиеся прямым аналогом системы управления асинхронным двигателем [98, 100, 110-112, 113, 114].

3.1.4.1 Векторная система управления активным выпрямителем с ориентацией по вектору напряжения

Структурная схема векторной системы управления активным выпрямителем представлена на рисунке 3.15. Для синтеза системы автоматического управления активным выпрямителем необходим переход от трехфазной неподвижной системы координат к эквивалентной двухфазной вращающейся системе координат, ориентированной по вектору фазного напряжения сети.

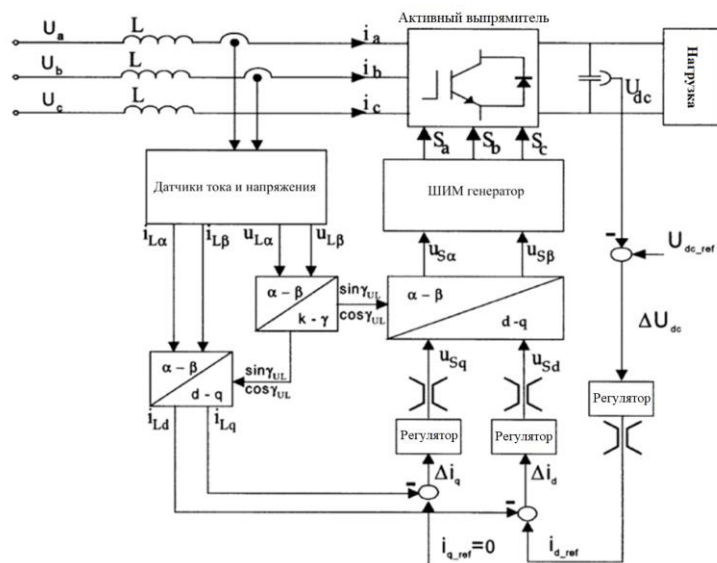


Рисунок 3.15 – Структурная схема векторной системы управления активным выпрямителем

Управление работой активного выпрямителя осуществляется путем регулирования составляющих фазных токов по осям d , q и энергии в звене постоянного тока тремя регуляторами.

В соответствии с выражениями (3.11 – 3.13), описывающими математическую модель активного выпрямителя, а также соответствующую им структурную схему (рисунок 3.7), рассмотрим синтез контура регулирования тока системы управления. Расчет параметров выполнен в режиме холостого хода (ток нагрузки равен нулю $i_N=0$) путем настройки на технический оптимум.

Эквивалентная структурная схема контура регулирования фазных токов имеет вид:

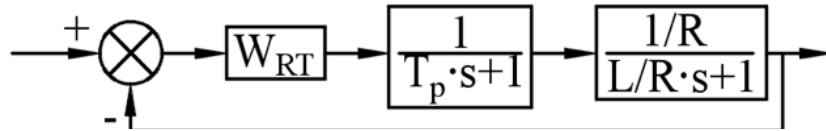


Рисунок 3.16 – Эквивалентная структурная схема контура регулирования тока, где T_p – малая постоянная времени, $T_p = \frac{1}{2\pi f_s}$, f_s – несущая частота широтно-импульсной модуляции.

Передаточная функция разомкнутого контура (рисунок 3.16) определяется как (3.28):

$$W_{RAZ1}(s) = W_{RT} \frac{\frac{1}{R}}{(T_p s + 1)(\frac{L}{R} s + 1)}. \quad (3.28)$$

Передаточная функция разомкнутого контура, настроенного на оптимум по модулю, равна (3.29):

$$W_{RAZ1}^{TO}(s) = \frac{1}{2T_p s (T_p s + 1)}. \quad (3.29)$$

Тогда, с учетом (3.28, 3.29), передаточная функция регулятора имеет вид (3.30):

$$W_{RT}(s) = \frac{R}{2T_p} \frac{\frac{L}{R} s + 1}{s}, \quad (3.30)$$

что соответствует ПИ алгоритму управления.

Контур регулирования фазных токов является подчиненными по отношению к контуру регулирования энергии в накопительном конденсаторе звена постоянного тока. Внутренний контур регулирования тока описывается эквивалентной передаточной функцией (3.31):

$$W_{KN}(s) = \frac{1}{2T_p s (T_p s + 1) + 1} \approx \frac{1}{2T_p s + 1}. \quad (3.31)$$

Передаточная функция контура регулирования мощности в звене постоянного тока может быть получена из условия баланса мощностей (3.32) [115]:

$$W(s) = \frac{3E_S}{c_s} i_S - \frac{2}{c_s} P_N. \quad (3.32)$$

В соответствии с (3.32) эквивалентная структурная схема контура регулирования мощности имеет вид:

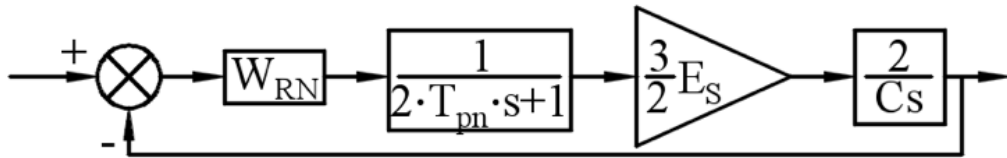


Рисунок 3.17 – Эквивалентная структурная схема контура регулирования мощности

Передаточная функция разомкнутого контура (рисунок 3.17) (3.33):

$$W_{RAZn}(s) = W_{RN} \frac{3E_s}{(2T_{pn}s+1)Cs}. \quad (3.33)$$

Тогда из (3.32) следует, что передаточная функция ПИ регулятора будет равна (3.34):

$$W_{RN}(s) = \frac{Cs}{3E_s} \frac{1}{4T_{pn}s}, \quad (3.34)$$

где E_s – амплитудное значение фазного напряжения; T_{pn} – постоянная времени определяемая как: $T_{pn} = 2T_p$.

Таким образом, могут быть определены параметры регуляторов векторной системы управления активным выпрямителем с ориентацией по вектору напряжения генератора.

3.1.4.2 Система прямого управления мощностью активного выпрямителя

Другим методом управления активным выпрямителем, основанным на управлении активной и реактивной мощностями, является метод прямого управления мощностью [111, 112].

Принцип работы данной системы автоматического управления активным выпрямителем аналогичен принципу работы системы прямого управления моментом асинхронного двигателя, где вместо контроля момента и потока статора контролируются активная и реактивные мощности.

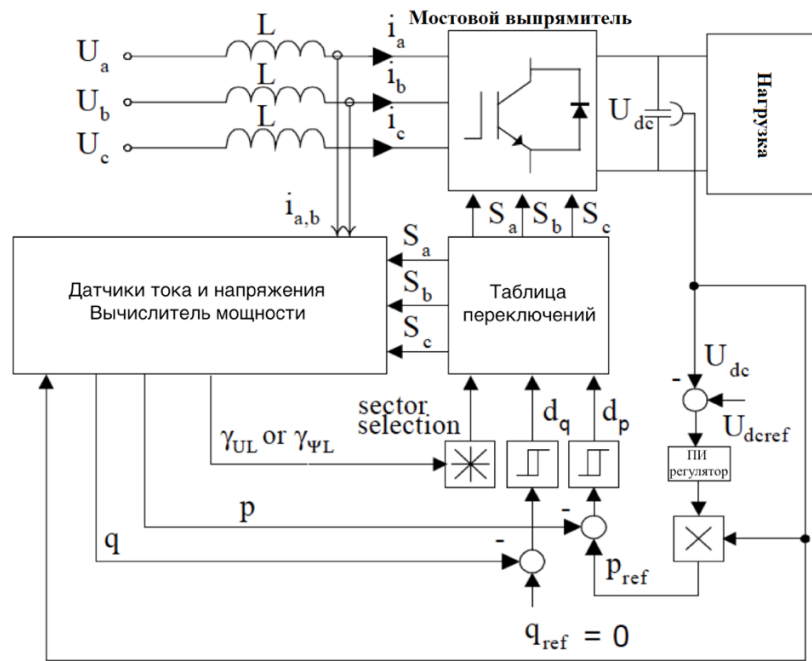


Рисунок 3.18 – Структурная схема системы прямого управления мощностью активного выпрямителя

Как показано на рисунке 3.19, мгновенные активная и реактивные мощности зависят от положения в пространстве вектора напряжения выпрямителя, который косвенно оказывает влияние на ЭДС дросселя, а также на фазы и амплитуды линейных токов сети.

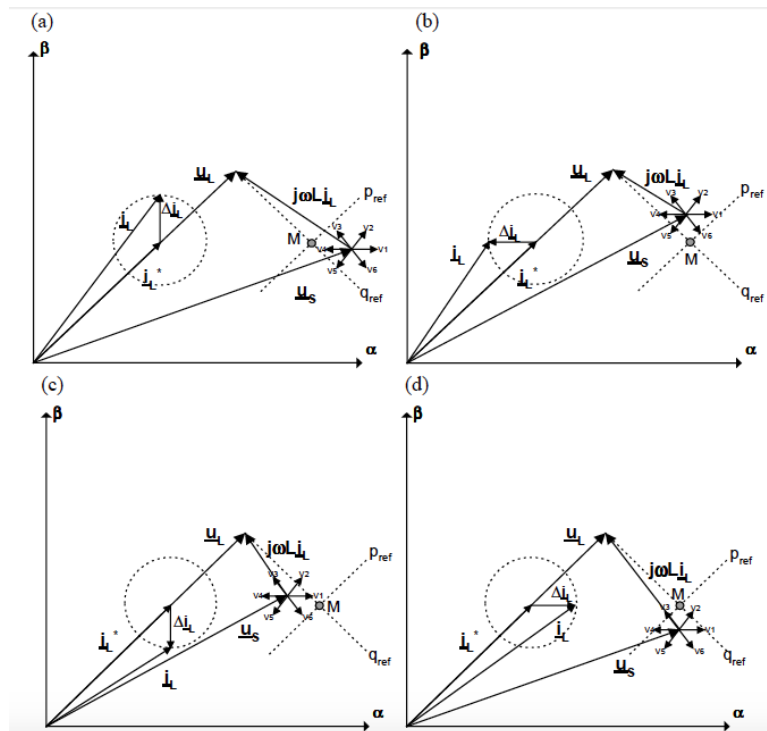


Рисунок 3.19 – Изменение мгновенных мощностей: а) $p_{ref} < p, q_{ref} > q$ (0,1); б) $p_{ref} > p, q_{ref} > q$ (1,1); в) $p_{ref} > p, q_{ref} < q$ (1,0); г) $p_{ref} < p, q_{ref} < q$ (0,0);

Таким образом, для реализации прямого управления мощностью требуется формирование вектора напряжения согласно таблице состояний полупроводниковых ключей.

Бездатчиковое определение положения вектора напряжения реализуется путем вычисления действующих значений активной и реактивной мощностей (3.35, 3.36) [111, 112]:

$$p = L \left(\frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + U_{DC} (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c), \quad (3.35)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ 3L \left(\frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) - U_{DC} [S_a (i_b - i_c) + S_b (i_c - i_a) + S_c (i_a - i_b)] \right\}. \quad (3.36)$$

и последующим вычислением линейных напряжений (3.37):

$$\begin{bmatrix} U_{L\alpha} \\ U_{L\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{i_{L\alpha}^2 + i_{L\beta}^2} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} & -i_{L\beta} \\ i_{L\beta} & i_{L\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}. \quad (3.37)$$

Задание на изменение требуемого значения реактивной мощности q_{ref} (задается равным нулю для обеспечения коэффициента мощности близким к единице) и активной мощности p_{ref} (задание поступает от контроллера напряжения звена постоянного тока) формируется после сравнения требуемых и измеренных значений мощности, осуществляемого релейными регуляторами, а также определения положения вектора напряжения сети.

Выходной сигнал регулятора реактивной мощности определяется исходя из выражений (3.38, 3.39):

$$d_q = 1, \text{ елси } q < q_{ref} - H_q, \quad (3.38)$$

$$d_q = 0, \text{ елси } q > q_{ref} + H_q. \quad (3.39)$$

Аналогично определяется сигнал регулятора активной мощности (3.40, 3.41):

$$d_p = 1, \text{ елси } p < p_{ref} - H_p, \quad (3.40)$$

$$d_p = 0, \text{ елси } p > p_{ref} + H_p, \quad (3.41)$$

где H_p ; H_q – ширина петли гистерезиса.

Выбор требуемого вектора напряжения осуществляется таким образом, чтобы выполнялось условие нахождения ошибки между фактическим и требуемым значениями мощностей в пределах, ограниченных шириной петли гистерезиса релейных регуляторов (3.38 - 3.41) (рисунок 3.20).

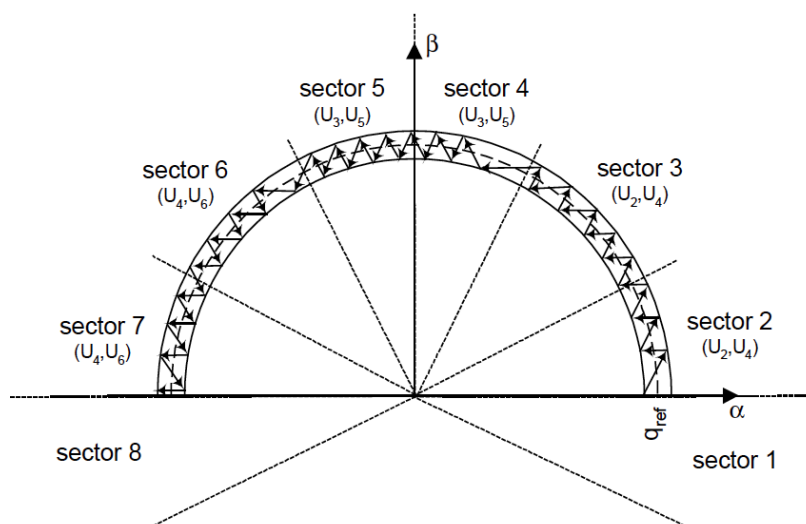


Рисунок 3.20 – Границы зоны, определяемой релейными регуляторами

Как правило, плоскость, в которой вращается вектор напряжения, делится на шесть либо двенадцать секторов. Таблица переключений при этом будет различаться для каждого из случаев, как показано в [106], использование деления пространства на двенадцать секторов при синтезе системы управления позволяет улучшить быстродействие работы за счет возможности выбора промежуточных положений вектора напряжения в пространстве.

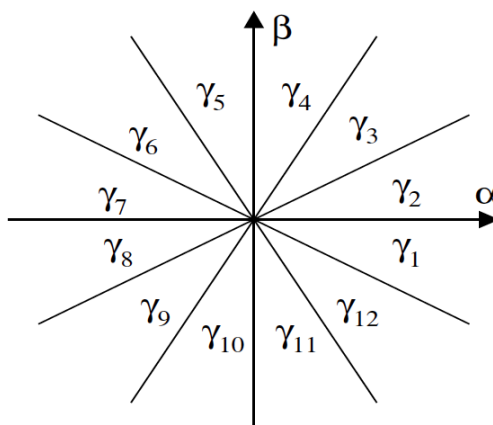


Рисунок 3.21 – Деление плоскости вращения вектора напряжения на двенадцать секторов

Положение вектора напряжения на плоскости, разделенной на двенадцать секторов, определяется как (рисунок 3.21) (3.42):

$$(n - 2)\pi \leq \gamma < n - \pi \quad \text{где } n = 1, 2, \dots, 12. \quad (3.42)$$

В [90, 91, 97, 104, 124, 125] представлены различные техники и таблицы переключения ключей для реализации метода прямого управления

моментом асинхронных двигателей, в то же время в силу новизны метода прямого управления мощностью на данный момент не разработано большого количества техник и таблиц переключения. В качестве примера приведена одна из возможных таблиц переключений для плоскости, разделенной на двенадцать секторов:

Таблица 3.2 – Таблица переключений

d_p	d_q	Sector A	Sector B
1	0	U_B	U_7
	1	U_0	U_7
0	0	U_B	
	1	U_A	
$U_A=U_1(100), U_2(110), U_3(010), U_4(011), U_5(001), U_6(101)$ $U_B=U_6(101), U_1(100), U_2(110), U_3(010), U_4(011), U_5(001)$ $U_0=U_0(000), U_7(111)$			

Вычисленные значения d_p, d_q , а также угол вектора напряжения формируют сигнал управления, замыкающий полупроводниковые ключи в соответствии с таблицей переключений (таблица 3.2), создавая требуемый вектор напряжения.

3.2 Методы повышения показателей энергетической эффективности за счет установки фильтров

Наиболее распространенным решением проблемы повышения электромагнитной совместимости электроэнергетических сетей является использование пассивных LC-фильтров. Несмотря на относительную дешевизну и простоту, данным фильтрам присущи следующие недостатки [93]:

- каждый фильтр конструируется для конкретных условий эксплуатации;
- большие токи приводят к дополнительным электрическим потерям;
- большие массогабаритные параметры фильтров.

В последнее десятилетие в связи с активным развитием и распространением в промышленности силовых полупроводниковых ключей,

рассчитанных на повышенное значение напряжения, стало набирать популярность применение активных фильтров, отличающихся лучшими динамическими показателями и способностью регулирования напряжения в звене постоянного тока.

Большинство активных фильтров действуют на основе широтно-импульсного (ШИМ) преобразователя, при проектировании и изготовлении силовой части трехфазного фильтра наибольшее распространение получили полностью управляемые полупроводниковые ключи (IGBT транзисторы), собранные по трехфазной мостовой схеме. Во время работы активный фильтр осуществляет роль несинусоидального источника тока, генерирующего сигнал тока, который компенсирует реактивную мощность, генерируемую в сети переменного тока нелинейной нагрузкой. Фильтр оснащается накопителем в звене постоянного тока, чаще всего конденсаторной батареей, обеспечивающей циркуляцию токов компенсации.

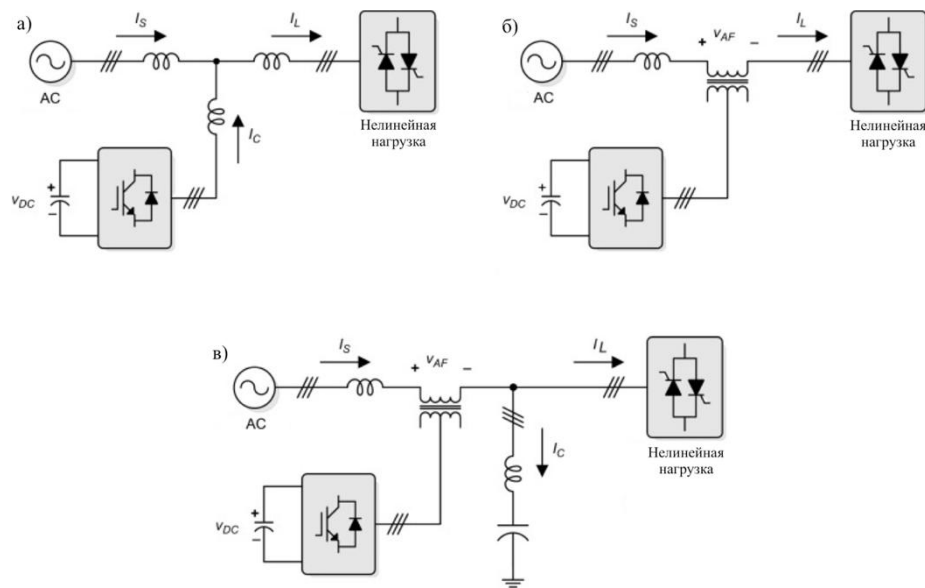


Рисунок 3.22 – Схемы включения активного фильтра а) – параллельная, б) – последовательная, в) – гибридная

Активные фильтры можно классифицировать по структуре силовой цепи, способу управления и выбору регулируемого параметра. Наибольшее распространение получила классификация основанная на виде схемы подключения активного фильтра, различают параллельную,

последовательную и гибридную схемы подключения (рисунок 3.22) [116, 123].

3.2.1 Последовательная и гибридная схемы подключения активного фильтра

Последовательные активные фильтры впервые появились на рынке в конце 1980-х, фильтры данной конструкции в основном применяются в качестве регулятора напряжения для устранения высших гармоник питающей сети. Таким образом, использование данного фильтра наиболее целесообразно для корректировки баланса напряжений, подавления искажений питающего напряжения, стабилизации напряжения сети переменного тока.

К достоинствам данной схемы можно отнести относительно небольшую мощность фильтра, составляющую приблизительно 5% от номинальной мощности нагрузки, однако в случае необходимости поддержания заданного значения напряжения расчетная мощность последовательного активного фильтра возрастает.

Гибридная топология активного фильтра представляет собой комбинацию пассивного и активного фильтров.

3.2.2 Параллельный активный фильтр

Параллельный активный фильтр, представленный на рисунке 3.22 а, является наиболее перспективным, из всех представленных ранее схем включения, вариантом модернизации электромеханической трансмиссии автосамосвала, так как в отличие от последовательной или гибридной схемы включения не требует дополнительного трансформатора и пассивного фильтра, а следовательно, в меньшей степени окажет влияние на массогабаритные параметры и показатели надежности, таким образом, мощность фильтра определяется мощностью искажений.

С учетом выбранной схемы включения был разработан следующий вариант модернизации электромеханической трансмиссии [55]:

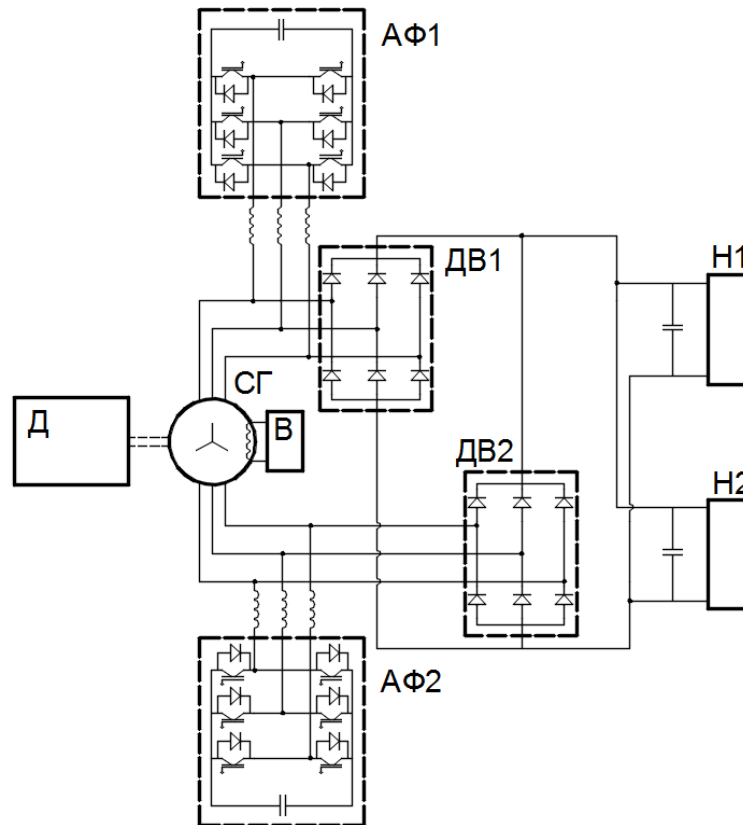


Рисунок 3.23 – Вариант модернизации электромеханической трансмиссии на основе активного фильтра

Работа фильтра схожа с работой источника тока и основана на компенсации «паразитных» гармоник тока путем инъекции в сеть гармоник тока, равных по модулю, но находящихся в противофазе, стремясь сделать нагрузку только активной.

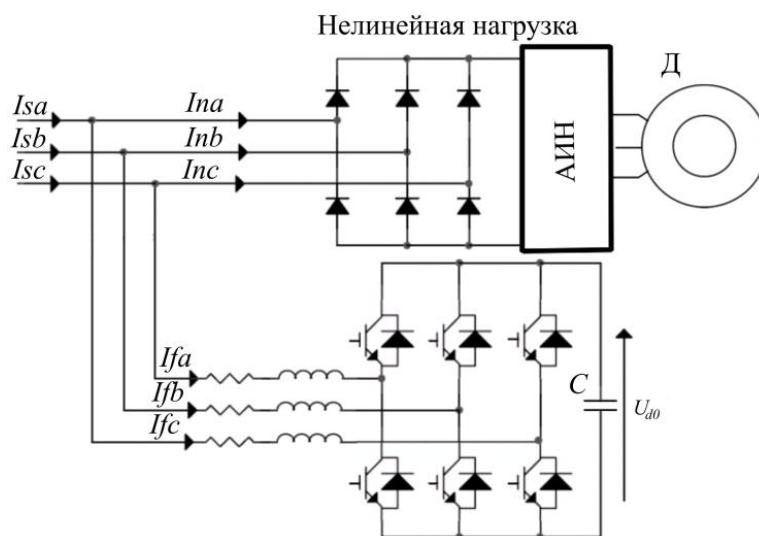


Рисунок 3.24 – Распределение токов в схеме с подключенным активным фильтром

Трехфазные токи сети (I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}), изображенные на рисунке 3.24, разделяются на токи нелинейной нагрузки (I_{na}, I_{nb}, I_{nc}) и опорные токи (I_{fa}, I_{fb}, I_{fc}) (ток коррекции), генерируемые по заданию системы управления активным фильтром (3.43) [21]:

$$\dot{I}_s = \dot{I}_n + \dot{I}_f, \quad (3.43)$$

где \dot{I}_s – ток сети, \dot{I}_n – ток нагрузки, \dot{I}_f – ток активного фильтра.

Ток коррекции формируемый активным фильтром, при условии синфазности и синусоидальности требуемых токов и напряжений сети, будет равен (3.44):

$$\dot{I}_f = \dot{I}_s - \dot{I}_n. \quad (3.44)$$

Математическое описание трехфазного мостового выпрямителя на основе полупроводниковых ключей, лежащего в основе активного фильтра, соответствует математическому описанию трехфазного мостового активного выпрямителя, приведенному ранее.

3.2.3 Система управления активным фильтром

Основным отличием системы управления активным фильтром от систем управления активным выпрямителем, рассмотренным ранее, является наличие входного фильтра, отвечающего за выделение основной гармоники питающей сети.

Система управления активным фильтром (рисунок 3.25) формирует задание на генерацию опорных токов, необходимых для компенсации гармоник тока нагрузки и реактивной мощности, а также поддержания заданного значения напряжения в звене постоянного тока. Эффективность работы активного фильтра зависит от его способности формировать требуемый опорный сигнал с минимальной погрешностью и временной задержкой .

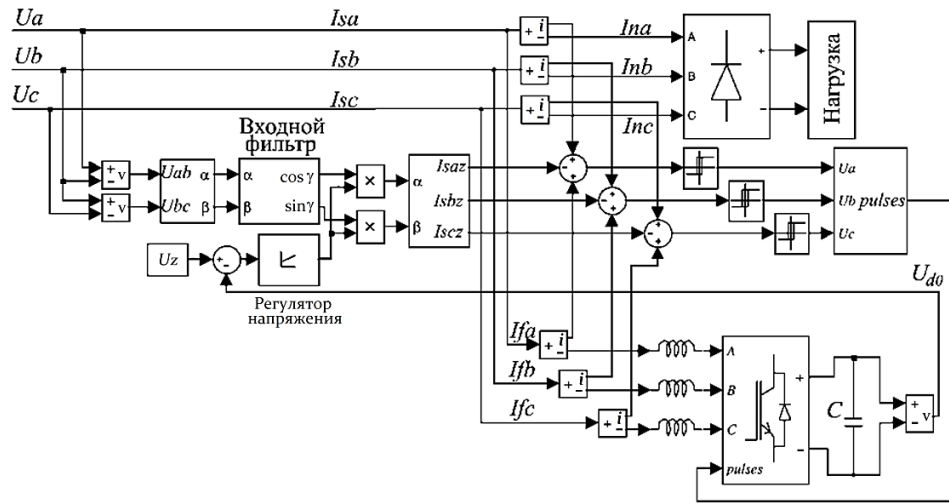


Рисунок 3.25 – Структурная схема системы управления активным фильтром

Известны различные способы формирования опорного сигнала тока, необходимого для компенсации нелинейной нагрузки, в частности, основанные на таких техниках как теория мгновенной реактивной мощности и выделении компонентов токов во вращающейся системе координат d-q [116, 123].

Однако наибольшее распространение, благодаря простоте вычислений, получил метод, основанный на выделении основной гармоники напряжения [21]. Для формирования требуемого тока коррекции система управления должна выделять основную гармонику питающей сети и формировать требуемый опорный сигнал с минимальной погрешностью и временной задержкой для формирования заданного тока сети.

Входной фильтр, находящийся в структуре активного фильтра, отвечает за выделение основной гармоники напряжения, в качестве которого наибольшее распространение получил вектор-фильтр (рисунок 3.26).

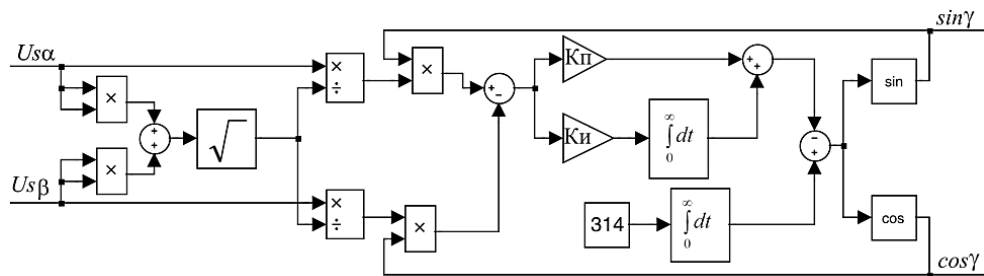


Рисунок 3.26 – Схема входного вектор фильтра, где K_{Π} и $K_{И}$ – коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной составляющих

Данный фильтр генерирует два синусоидальных сигнала, при этом рассогласование фаз сгенерированных и входных сигналов отсутствует.

Фильтр работает следующим образом. Измеренные сигналы входных напряжений преобразуются в сигналы с единичной амплитудой согласно следующим выражениям (3.45):

$$\begin{aligned} U_{sm} &= \sqrt{U_{s\alpha}^2 + U_{s\beta}^2}, \\ \cos \varphi &= \frac{U_{s\alpha}}{U_{sm}}, \\ \sin \varphi &= \frac{U_{s\beta}}{U_{sm}}. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Вычисление рассогласования фаз напряжения на входе и сгенерированного напряжения осуществляется следующим образом (3.46):

$$\sin(\gamma - \varphi) = \sin \gamma \cos \varphi - \sin \varphi \cos \gamma. \quad (3.46)$$

Блок управления напряжением постоянного тока поддерживает заданное напряжение звена постоянного тока. Регулирование напряжения осуществляется за счет управления энергией, запасенной в конденсаторной батарее активного фильтра, путем изменения амплитуды опорного тока. Стабилизация напряжения на конденсаторе в звене постоянного тока осуществляется регулятором напряжения в составе системы управления активным фильтром путем формирования задания в двухфазной системе координат по требуемому току коррекции.

После сравнения сформированного сигнала задания по току с токами на входе нагрузки осуществляется формирование требуемых токов активного фильтра. Управление ключами моста осуществляется релейными регуляторами, получающими сигналы рассогласований по токам.

Таким образом, высшие гармоники тока, содержащиеся в токе, потребляемом нелинейной нагрузкой, устраняются работой параллельного активного фильтра, поддерживающего синусоидальность сетевых токов и синфазность сетевых токов и напряжений.

3.3 Математическое моделирование возможных вариантов модернизации электромеханической трансмиссии

С целью проверки всех синтезированных имитационных моделей на способность обеспечивать коэффициент мощности системы близким к единице, а также поддержания и регулирования напряжения звена постоянного тока без изменения параметров питающей сети были созданы имитационные модели двух возможных вариантов модернизации электромеханической трансмиссии.

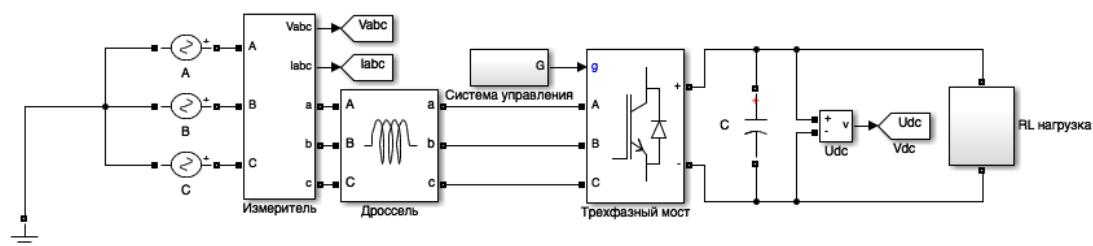


Рисунок 3.27 – Функциональная схема имитационной модели на основе активного выпрямителя

Для проверки работоспособности моделей активного выпрямителя (рисунок 3.27) были созданы две имитационные модели, различающиеся системами управления. Первая модель активного выпрямителя была выполнена на основе векторной системы управления с ориентацией по вектору напряжения (рисунок 3.28 а), вторая – системы прямого управления мощностью (рисунок 3.28 б). В качестве нагрузки в звене постоянного тока были подключены R и L элементы. Реализация моделей осуществлялось на основании методологии, приведенной в разделе 3.1.4. В приложении В представлены тексты программ функциональных блоков, входящих в структуру системы прямого управления мощностью.

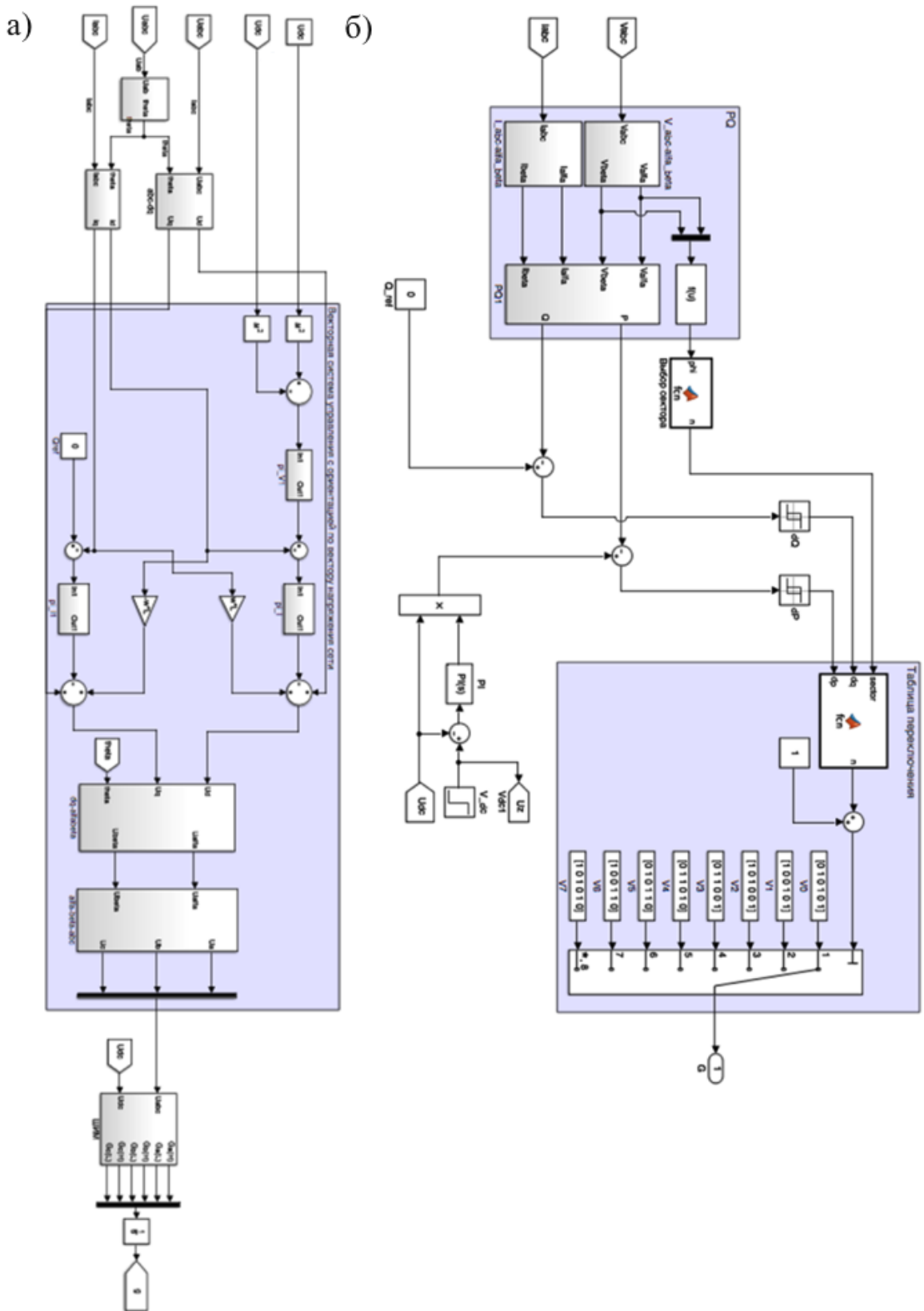


Рисунок 3.28 – Функциональные схемы векторной системы управления с ориентацией по вектору напряжения сети (а) и прямого управления мощностью (б)

Моделирование в обоих случаях выполнялось при заданном значении напряжения звена постоянного тока. После моделирования процесса пуска

дизель-генератора и достижения значением напряжения звена постоянного тока заданного уровня (момент времени 0-1), для проверки динамических свойств системы управления выполнялось увеличение заданного значения напряжения (момент времени 1-2). Графики переходных процессов в звене постоянного тока при использовании различных систем управления представлены на рисунке 3.29 а, б.

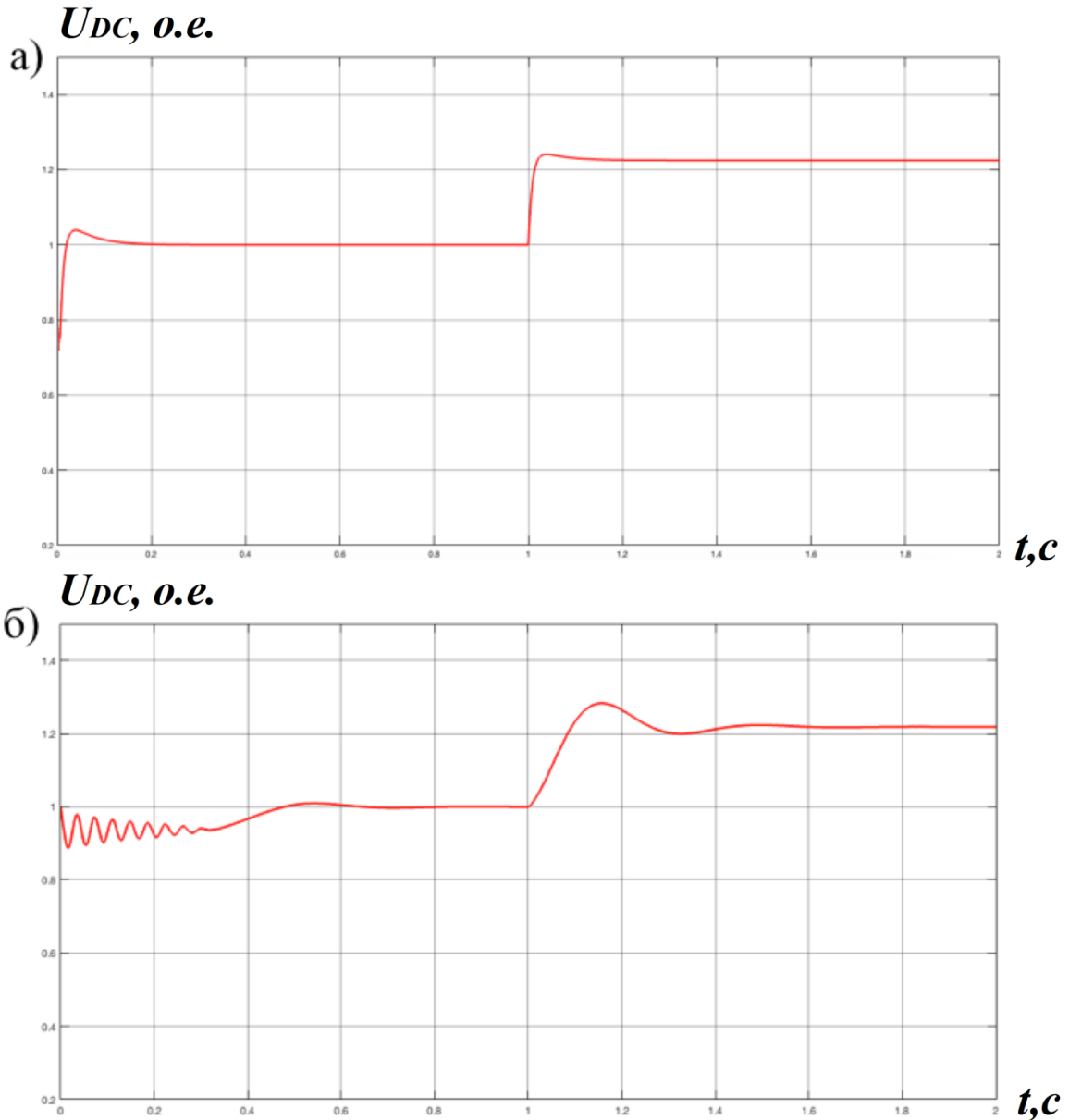


Рисунок 3.29 – Графики переходных процессов в звене постоянного тока активного выпрямителя с векторной системой управления с ориентацией по вектору напряжения (а) и системой прямого управления мощностью (б)

В процессе моделирования работы систем управления были также вычислены коэффициенты мощности в части системы источник – активный выпрямитель для обоих случаев (рисунок 3.30 а, б)

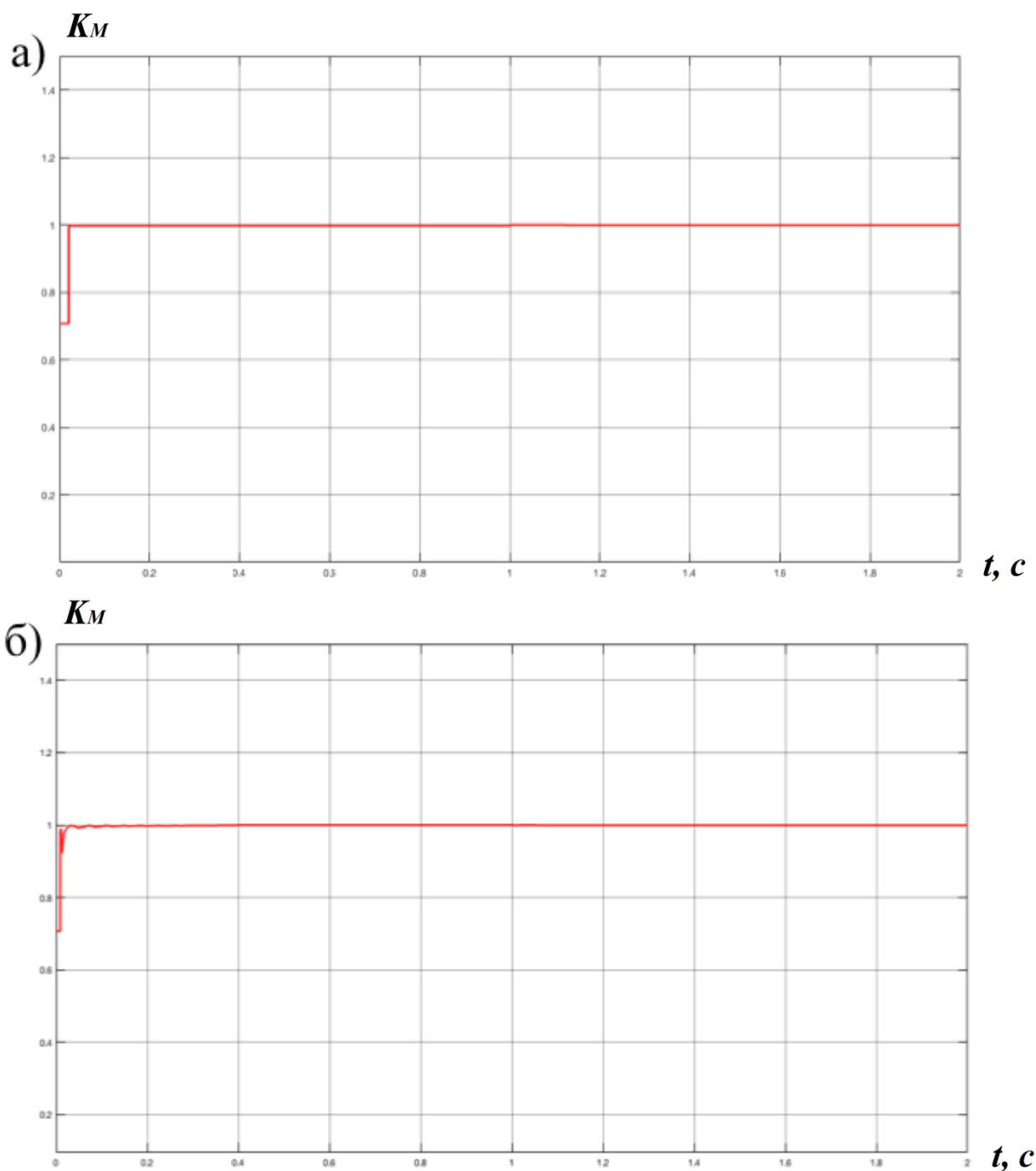


Рисунок 3.30 – Графики изменения коэффициентов мощности части системы источник - активный выпрямитель с векторной системой управления с ориентацией по вектору напряжения (а), системой прямого управления мощностью (б)

Оценка работоспособности синтезированной модели активного фильтра и его системы управления (рисунок 3.31) была произведена по аналогии с моделью активного выпрямителя.

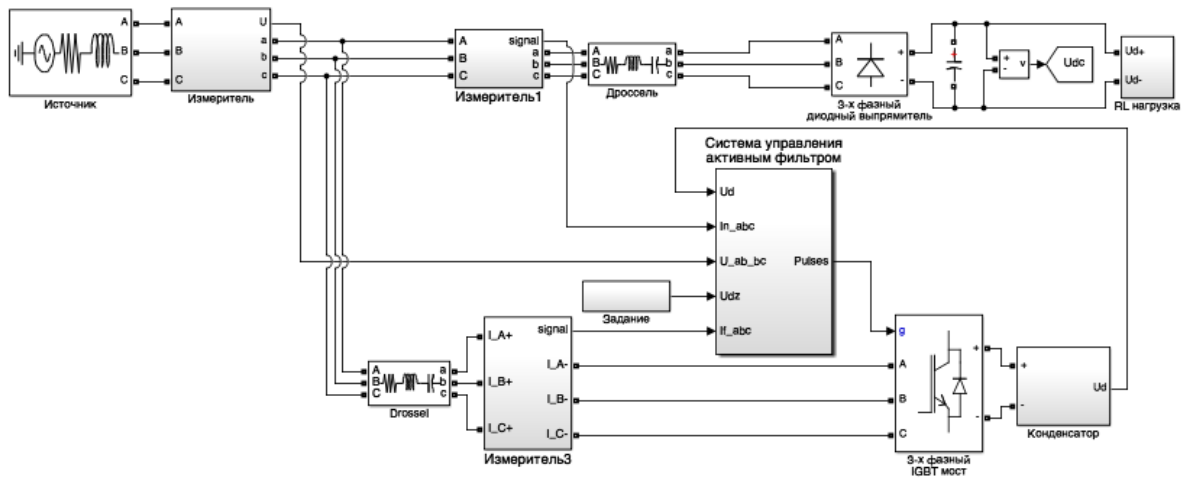


Рисунок 3.31 – Имитационная модель активного фильтра

Переходный процесс в звене постоянного тока системы неуправляемого выпрямителя с активным фильтром при работе на нелинейную нагрузку с выходом на заданное значение напряжения постоянного тока (момент времени 0-1) с последующим увеличением задания по напряжению (момент времени 1-2) представлен на рисунке 3.32.

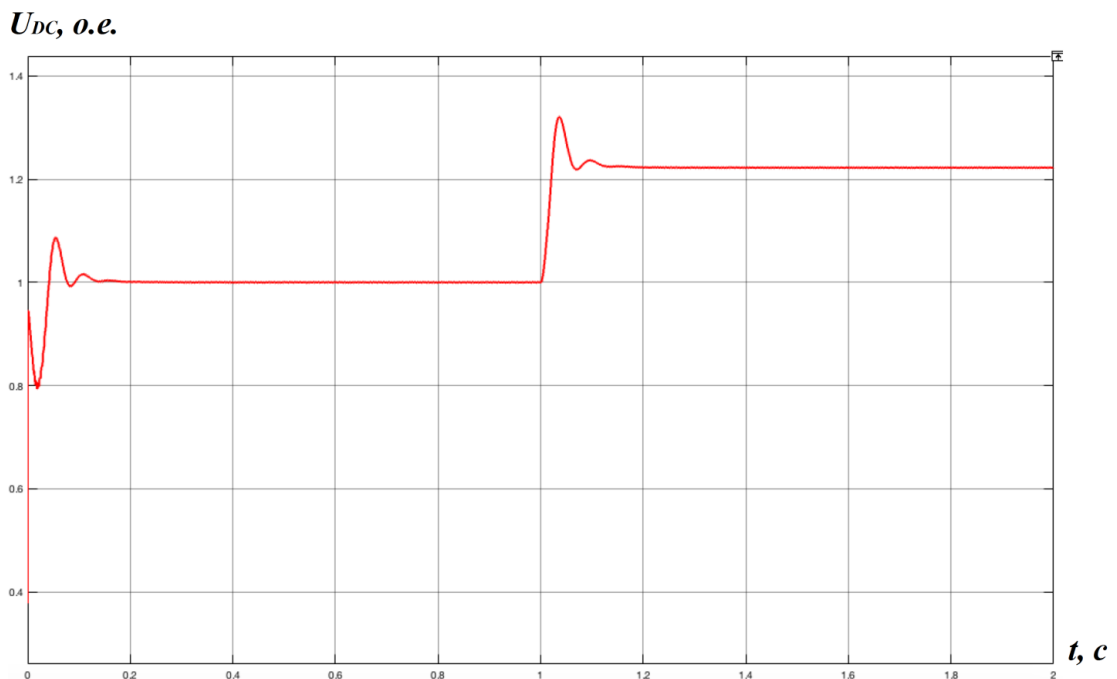


Рисунок 3.32 – Переходный процесс в звене постоянного тока системы с неуправляемым выпрямителем и активным фильтром

В процессе моделирования был вычислен коэффициент мощности в части системы источник – неуправляемый диодный выпрямитель, график изменения которого представлен на рисунке 3.33.

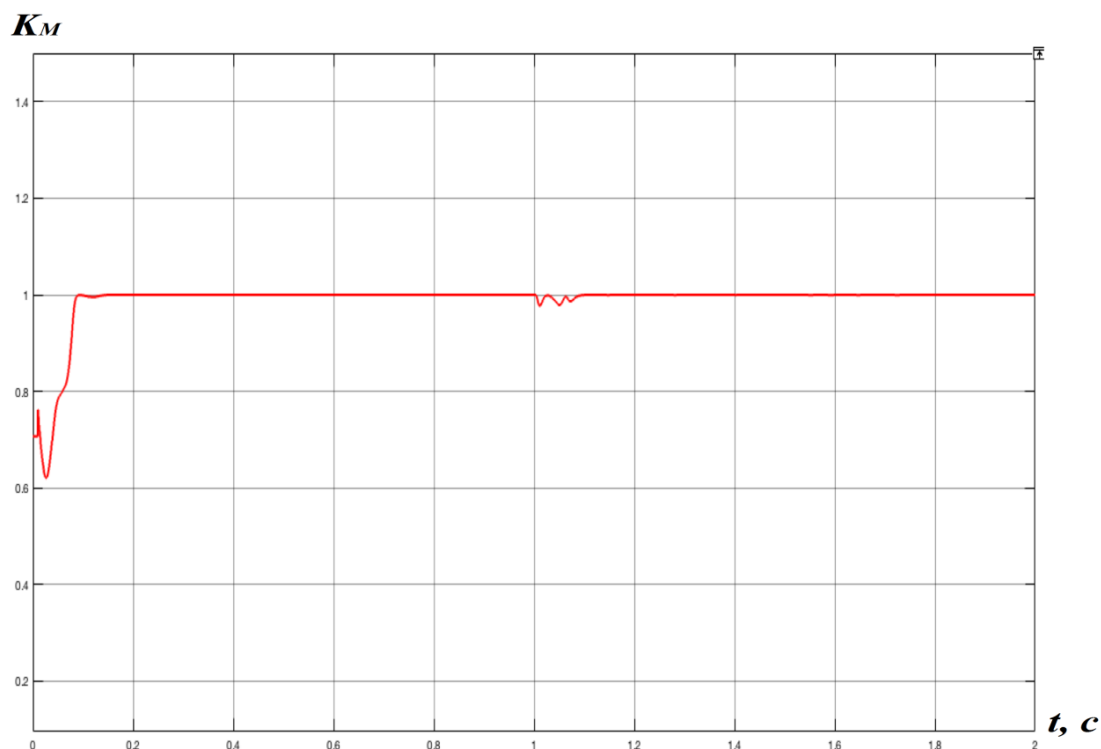


Рисунок 3.33 – Коэффициент мощности системы источник – неуправляемый диодный выпрямитель при работе активного фильтра

Как видно из результатов моделирования, все рассмотренные системы (рисунок 3.27, 3.28 а, б, 3.31) позволяют поддерживать заданное значение напряжения звена постоянного тока (рисунок 3.29 а, б, 3.32), обеспечивая при этом коэффициент мощности части системы источник – выпрямитель близким к единице в условиях изменяющегося напряжения звена постоянного тока (рисунок 3.30 а, б, 3.33).

Стоит отметить недостатки некоторых из рассмотренных систем друг относительно друга. Рассматривая переходные процессы в звене постоянного тока (рисунок 3.29 а, б, 3.32) очевидно преимущество активного выпрямителя с векторной системой управления, при использовании которой обеспечивается наиболее быстрый выход напряжения постоянного тока на заданное значение, что объясняется использованием регуляторов тока, подчиненных регулятору напряжения.

Реализация варианта модернизации на основе активного фильтра обладает дополнительным недостатком, связанным с внесением значительных изменений в конструкцию шкафа преобразователя электромеханической трансмиссии, так как потребует дополнительного пространства для установки силовых полупроводниковых ключей активного фильтра, модернизации системы охлаждения полупроводниковых ключей.

Принимая во внимание ранее изложенные факты, наиболее перспективным вариантом модернизации электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала будет являться вариант, основанный на использовании активного выпрямителя с векторной системой управления.

3.4 Выводы по Главе 3

В третьей главе рассмотрены различные варианты модернизации электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала. Предложено два перспективных варианта модернизации. Первый – за счет модернизации силовой части существующей трансмиссии, второй – за счет установки дополнительного оборудования. Для обоих вариантов приведены методики создания математических моделей при использовании различных вариантов систем управления.

Математическое моделирование, выполненное с целью определения наиболее перспективного варианта модернизации, показало преимущество варианта, основанного на использовании активного выпрямителя с векторной системой управления и ориентацией по вектору напряжения сети.

ГЛАВА 4 РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ

Повышение эффективности работы карьерных автосамосвалов, оснащенных электромеханической трансмиссией, возможно путем комплексной модернизации всех систем как энергетической части трансмиссии, так и вспомогательных систем.

4.1 Модернизация электрической части

С учетом выбранной схемы силовой электрической части была разработана структура модернизированной электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала, представленная на рисунке 4.1.

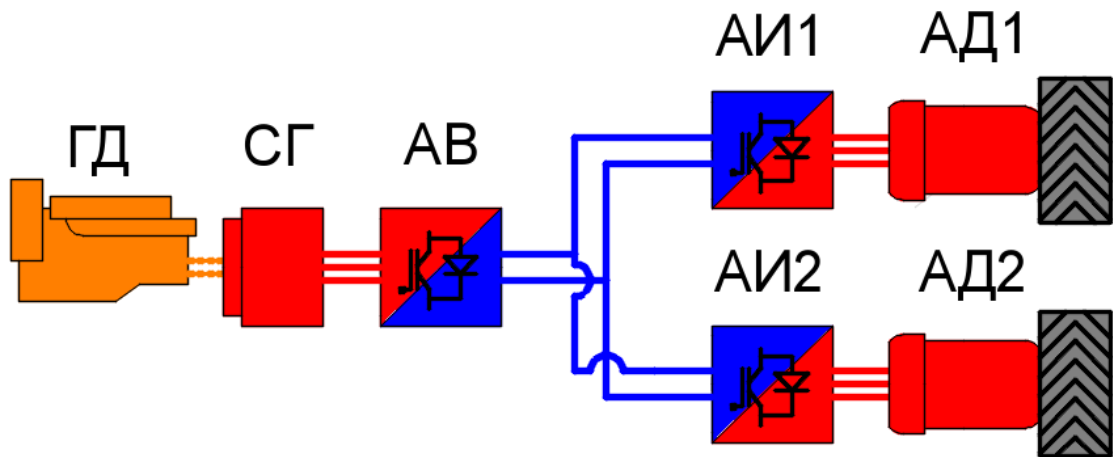


Рисунок 4.1 – Структурная схема модернизированной электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала

В качестве первичного двигателя в модернизированной электромеханической трансмиссии рекомендуется применение двигателя на газовом топливе (ГД), например для автосамосвала грузоподъемностью 130 тонн возможно использование российского газопоршневого двигателя ГПП производства АО «ОДК – Газовые турбины» мощностью от 0,6 до 4,0 МВт или турбовального двигателя ТВ7-117В производства АО «Климов» мощностью от 1,47 до 2 МВт, что как показано в работах [11, 29, 46]

обеспечит снижение содержания вредных веществ в отработанных газах, а следовательно сокращение простоев открытых горных выработок на проветривание.

Внедрение в структуру трансмиссии активного выпрямителя (АВ), обладающего возможностью поддержания и регулирования напряжения в звене постоянного тока [102], позволяет отказаться от регулирования выходного напряжения тягового синхронного генератора. Это дает возможность перейти к применению в качестве тягового генератора синхронного генератора с постоянными магнитами (СГ), обладающего, по сравнению с ранее использованной электрической машиной, большим значением удельной мощности. Кроме того, отказ от системы возбуждения тягового генератора сократит трудоемкость изготовления и упростит обслуживание и ремонт электромеханической трансмиссии. Также согласно рекомендациям комиссии по приемке опытного образца асинхронного электропривода для автосамосвала БелАЗ является целесообразным переход к трехфазному синхронному генератору с одной звездой у статорной обмотки [53].

Применение мотор-колес, оснащенных тяговыми асинхронными двигателями (АД) в паре с автономными инверторами напряжения (АИ) имеет большой положительный опыт промышленной эксплуатации, а при использовании современных силовых ключей и методов управления обеспечивается коэффициент мощности системы инвертор – двигатель близким к единице. Однако в связи со значительным числом аварийных ситуаций во время работы карьерного автомобильного транспорта необходимо рассмотреть вопрос модернизации системы управления путем реализации адаптивной системы управления, изменяющей тяговую характеристику привода в зависимости от дорожных и погодных условий, массы перевозимого груза.

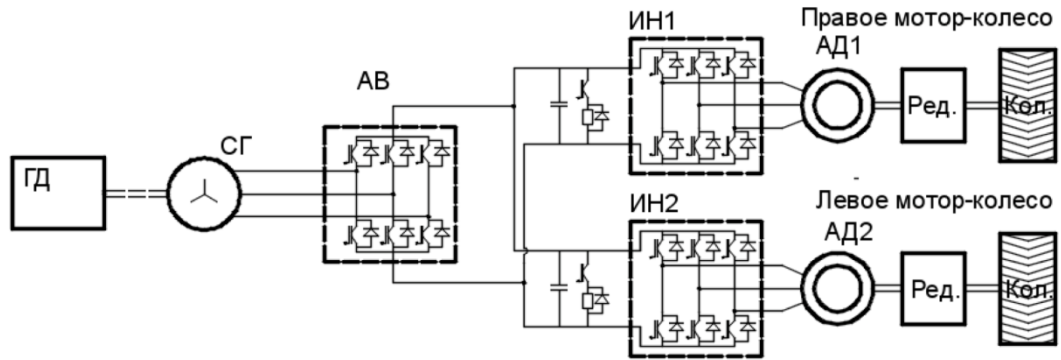


Рисунок 4.2 – Функциональная схема электрической части модернизированной электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала

Оценка показателей энергетической эффективности модернизированной электромеханической трансмиссии осуществлялась методом математического моделирования. На основе функциональной схемы (рисунок 4.2), разработанной с учетом выбранного варианта модернизации, была выделена моделируемая часть электромеханической трансмиссии и синтезирована имитационная модель.

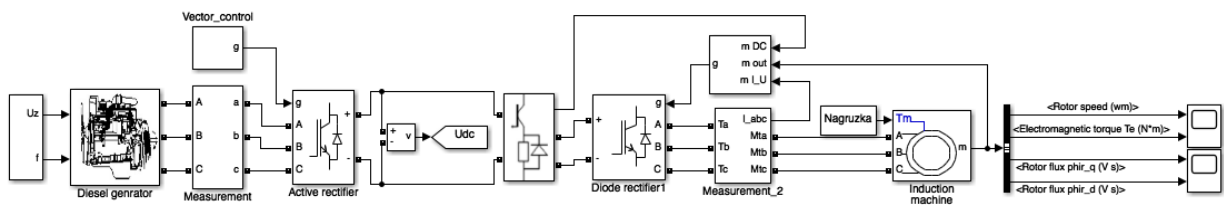


Рисунок 4.3 – Имитационная модель моделируемой части электромеханической трансмиссии

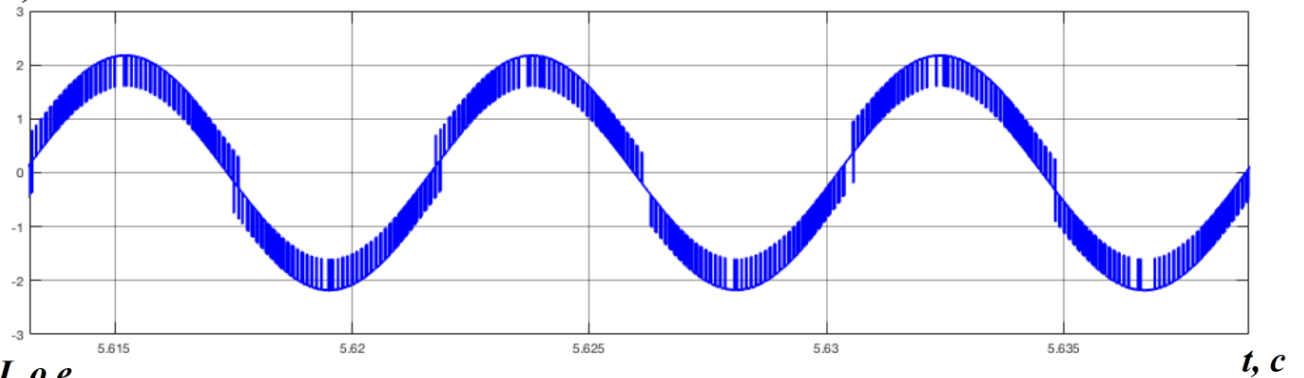
Моделирование выполнялось в соответствии с условиями моделирования электромеханической трансмиссии, оснащенной неуправляемым диодным выпрямителем (рисунок 2.26), то есть пуском дизель генератора, выходом напряжения звена постоянного тока к установившемуся значению, запуском асинхронного двигателя под номинальной нагрузкой (момент времени 3,5 с) с её последующим увеличением до полуторакратного значения (момент времени 7 с). Действие обратной связи звена постоянного тока с возбудителем генератора не

учитывалось, таким образом, выходное напряжение генератора не изменялось.

По результатам моделирования были сняты сигналы с датчиков тока и напряжения на выходе генератора, значение напряжения звена постоянного тока, коэффициент мощности системы генератор – активный выпрямитель.

Форма кривых тока и напряжения генератора в установившемся режиме представлена ниже:

$U, \text{ o.e.}$



$I, \text{ o.e.}$

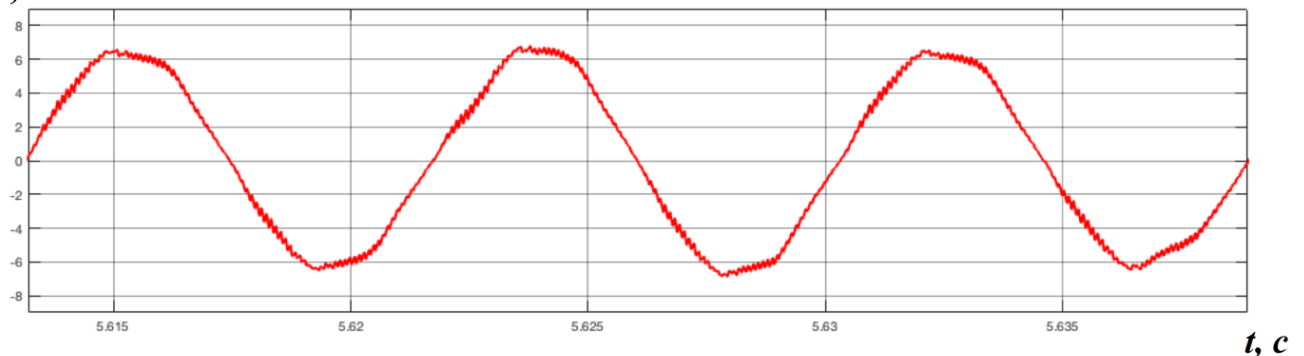


Рисунок 4.4 – Форма кривых тока и напряжения на выходе генератора в установившемся режиме

На рисунке 4.5 представлен график коэффициента мощности системы генератор – активный выпрямитель, который вычислялся на протяжении всего процесса моделирования:

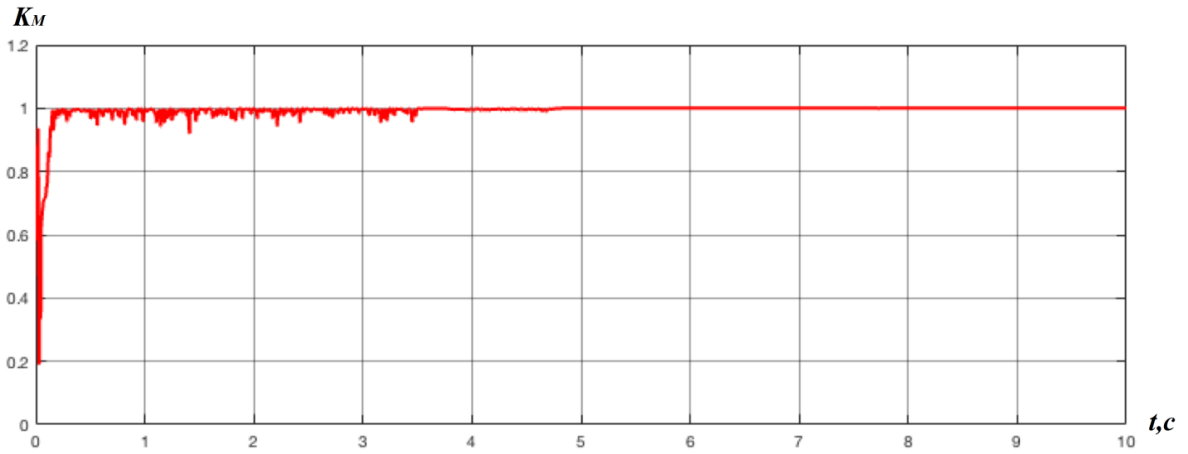


Рисунок 4.5 – Коэффициент мощности системы генератор – активный выпрямитель

Как видно из приведенных графиков, внедрение в состав электромеханической трансмиссии активного выпрямителя заметно улучшило формы кривых тока и напряжения. Коэффициенты нелинейных искажений тока и напряжения в установившемся режиме составили 6,91 % и 8,4 %, что на 7,44 % и 5,54 % меньше значений аналогичных показателей для системы, оснащенной неуправляемым диодным выпрямителем. На всем протяжении процесса моделирования после завершения пуска коэффициент мощности K_M части системы генератор – активный выпрямитель в момент пуска дизель-генератора не опускался ниже 0,92, при этом в процессе работы асинхронных двигателей его значение находилось в пределах 0,99 – 1.

Напряжение звена постоянного тока на протяжении всего процесса моделирования:

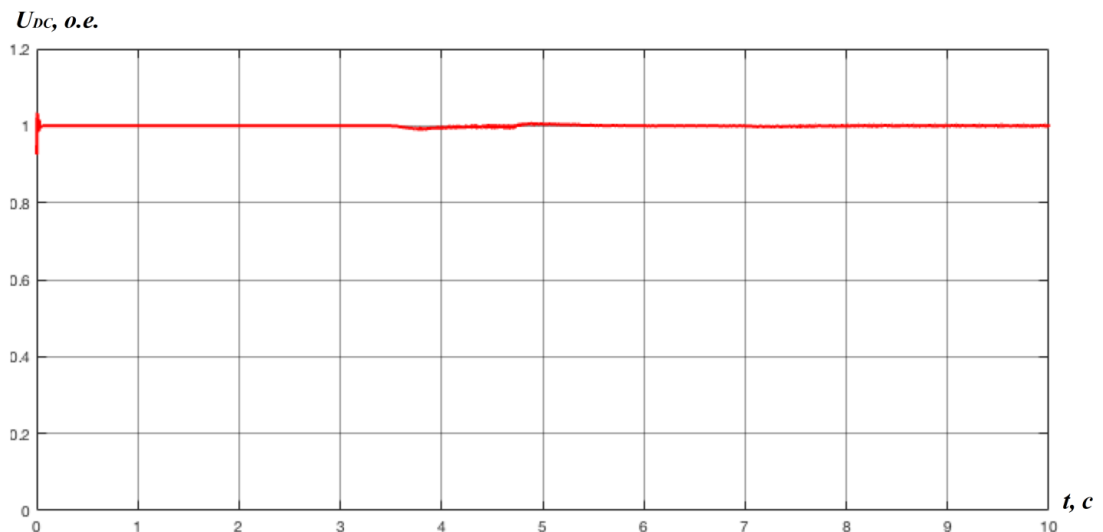


Рисунок 4.6 – Напряжение звена постоянного тока

Как видно из приведенного выше графика, активный выпрямитель поддерживал стабильно значение напряжения постоянного тока как в установившихся, так и в переходных режимах работы без регулирования напряжения обмотки возбуждения тягового генератора, что позволяет перейти к использованию тягового синхронного генератора с постоянными магнитами.

4.2 Модернизация вспомогательных систем

Эффективность работы карьерных автосамосвалов зависит в том числе и от эффективности работы вспомогательных систем, устанавливаемых на них, в частности, системы диагностики тяговых асинхронных двигателей и бортовой системы автосамосвала.

4.2.1 Модернизация системы диагностики

Избежание непреднамеренных сбоев в работе транспортной системы карьера вследствие непредвиденной поломки самосвала возможно при переходе к системе обслуживания автопарка по фактическому состоянию. Переход к обслуживанию по фактическому состоянию невозможен без использования современных систем диагностики.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили спектр-токовые методы оценки технического состояния тяговых асинхронных двигателей, основанные на преобразовании Фурье сигналов мгновенных значений фазных токов с последующим анализом амплитуды и частоты полученных спектров. Большое распространение данных методов обуславливается возможностью диагностирования как электрических, так и механических неисправностей асинхронных тяговых двигателей по диагностическим сигналам тока.

Система диагностики работает следующим образом. При появлении неисправности тягового асинхронного двигателя происходит увеличение амплитуды гармоник, связанных с данной неисправностью, и при

достижении пороговых значений на приборную панель водителя выводится сообщение о необходимости ремонта.

Однако анализ диагностических сигналов методом Фурье преобразования имеет определенные недостатки, обусловленные математической основой метода:

- отсутствие возможности временной локализации события;
- отсутствие возможности у базисных функций разложения отображать перепады сигналов с бесконечной крутизной;
- «размытие» диагностических особенностей (разрывы, ступеньки, пики и т.д.) сигналов по всему частотному диапазону спектра в процессе анализа.

Наиболее перспективным подходом для обработки диагностических сигналов, обеспечивающих устранение вышеизложенных недостатков, является Вейвлет-анализ [41, 99]. Особенностью Вейвлет-анализа является возможность использования различных анализирующих функций или Вейвлетов (всплесков), что обеспечивает гибкость данной техники обработки сигналов [68]. При этом для более эффективного проведения обработки сигналов возможен выбор наиболее подходящей функции. При выполнении спектр токовой диагностики рекомендуется использование, в качестве анализирующей функции, Вейвлетов Морле и «мексиканская шляпа», позволяющих, благодаря своей форме, проанализировать все особенности исследуемых сигналов.

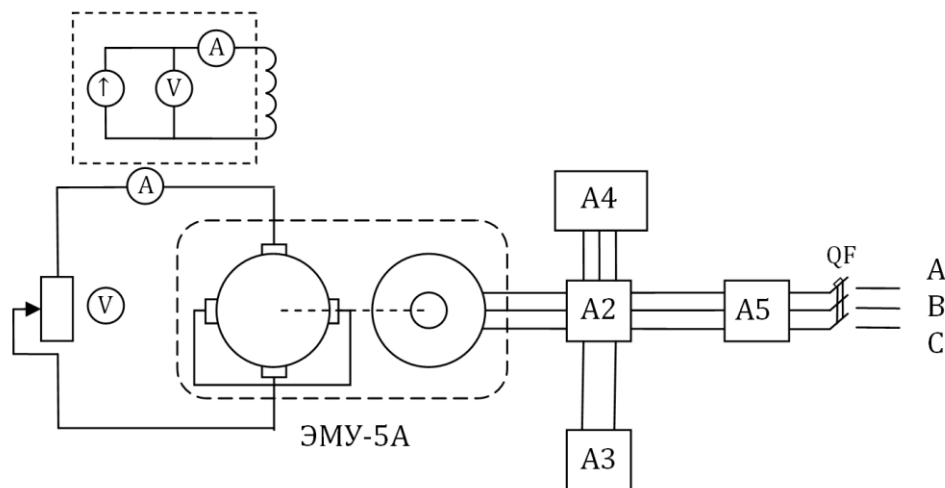


Рисунок 4.7 – Структурная схема испытательного стенда

Для проверки возможности использования метода Вейвлет-анализа для декомпозиции диагностических сигналов и определения механических и электрических неисправности тяговых асинхронных двигателей был собран лабораторный стенд (рисунок 4.7), включающий в себя электромашинный усилитель ЭМУ-5А, преобразователь частоты Altivar ATV 31HU40N4, измерительную плату, датчик вибрации, цифровой осциллограф, источники питания, измерительные приборы и нагрузочное сопротивление.

Электромашинный усилитель ЭМУ-5А включает в себя асинхронный двигатель, имеющий неисправность – эксцентриситет ротора, и двигатель постоянного тока, выполняющий функцию нагрузочной машины.

Запись диагностических сигналов осуществлялась посредством разработанной измерительной платы, включающей в себя датчики тока Honeywell CSNE151, работающие на эффекте Холла (рисунок 4.8).

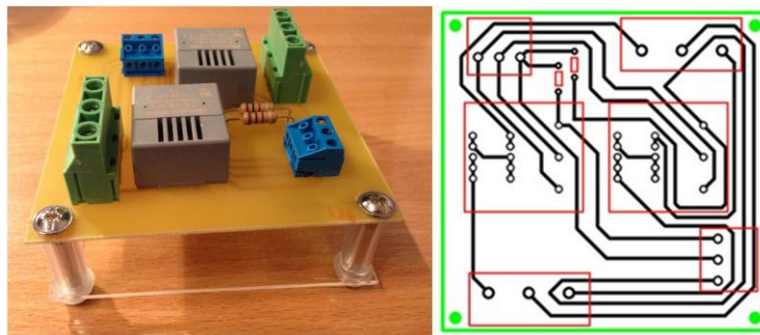


Рисунок 4.8 – Измерительная плата

На рисунке 4.9 представлен график диагностического сигнала тока фазы асинхронного двигателя, получающего питание от двухзвенного преобразователя частоты, при максимальной нагрузке.

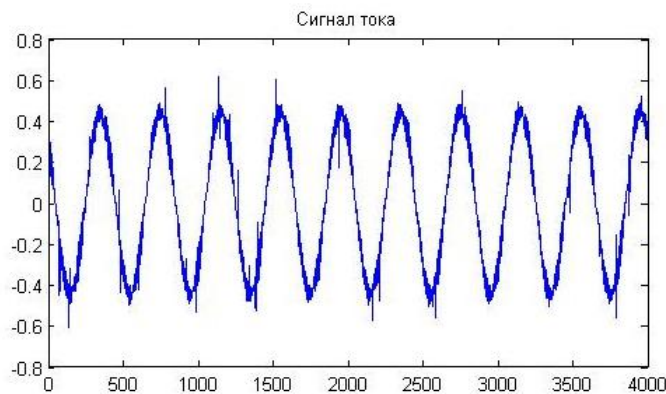


Рисунок 4.9 – Диагностический сигнал тока фазы асинхронного двигателя

Результат Вейвлет-преобразования диагностического сигнала тока асинхронного двигателя представлен на рисунке 4.10 а.

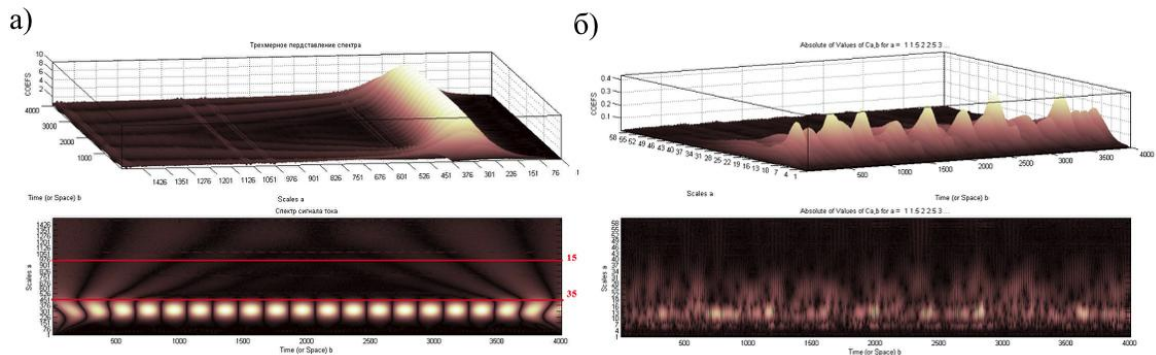


Рисунок 4.10 – Вейвлет-преобразование диагностического сигнала тока

На приведенном трехмерном графике, помимо максимума приходящегося на 40 Гц, соответствующего частоте питающего тока, видно наличие максимумов, приходящихся на частоты 15 и 35 Гц, что соответствует неисправностям механического характера испытанного асинхронного двигателя.

Дополнительным преимуществом Вейвлет-анализа, сокращающим требуемые для обработки диагностического сигнала вычислительные ресурсы, является возможность вычисления спектра для определенного диапазона частот, что позволяет выборочно контролировать диагностические частоты (рисунок 4.10 б) [88].

Таким образом, применение Вейвлет-анализа обеспечивает требуемое качество декомпозиции диагностических сигналов тяговых асинхронных двигателей, позволяя выявлять неисправности как механической, так и электрической части [89]. Универсальность данного метода для выявления различных особенностей сигнала обеспечивается возможностью использования требуемых базисных функций разложения (Вейвлетов) при незначительных затратах вычислительных ресурсов за счет контроля только требуемых диагностических частот спектра сигнала.

4.2.2 Модернизация бортовой системы

Одним из условий эффективного и безопасного использования карьерных автосамосвалов является загрузка в каждом рейсе в соответствии с их номинальной грузоподъемностью, оптимальный скоростной режим движения в груженом состоянии в соответствии с загрузкой и дорожными условиями, минимальный холостой пробег и минимальное время простоев. Обеспечить выполнение этих режимов невозможно без использования на автосамосвалах цифровых систем автоматики или бортовых систем автоматического контроля загрузки и технологического учета перевезенной горной массы.

В настоящее время на отечественном рынке большинство карьерных автосамосвалов оснащается автоматизированной системой диспетчеризации «Карьер», включающей в себя систему контроля загрузки и топлива (СКЗиТ). Бортовая система СКЗиТ устанавливается на все серийные автосамосвалы грузоподъемностью 55–220 т непосредственно на заводе «БелАЗ» при их выпуске, начиная с 2000 г [8, 30].

Основной недостаток СКЗиТ – низкая точность взвешивания горной массы как при ее погрузке в автосамосвал, так и при последующем технологическом взвешивании. Погрешность контроля загрузки может составлять 8-10% от максимальной загрузки кузова [66]. Значительная погрешность связана с существующей технологией погрузки. Груз из ковша при разгрузке не высыпается с определенной высоты, а ковш кладется в кузов, открывается днище и при его подъеме груз высыпается. При такой погрузке на цилиндры подвески автосамосвала действует большая нагрузка, их штоки проседают на большую величину и после снятия нагрузки создавшееся давление не может вытолкнуть штоки до требуемого положения, так как их движение блокируется силами сухого трения. Это вызывает преждевременное срабатывание сигнального фонаря, информирующего о полной загрузке, что в свою очередь приводит к тому, что 65 – 70% от выполненных рейсов совершаются с недогрузом.

Снизить количество рейсов, выполненных с недогрузом, возможно только за счет модернизации системы загрузки [44] путем устранения влияния сил сухого трения. Обороты двигателя создают вибрацию с частотой кратной оборотам холостого хода. Вибрация является эффективным способом борьбы с сухим трением. Воздействие вибрации приводит к медленному изменению давления газа в цилиндрах подвески. При изменении давления газа также меняются и показания массы груза в кузове на экране прибора СКЗиТ в пределах от 0,5 до 6 тонн при продолжительности от 25 с до 45 с. Введение коэффициента коррекции (рисунок 4.11), зависящего от скорости протекания процесса вибрационного сглаживания, в качестве дополнительного параметра контроля загрузки позволяет значительно снизить погрешность контроля загрузки без необходимости ожидания окончания скользящего процесса.

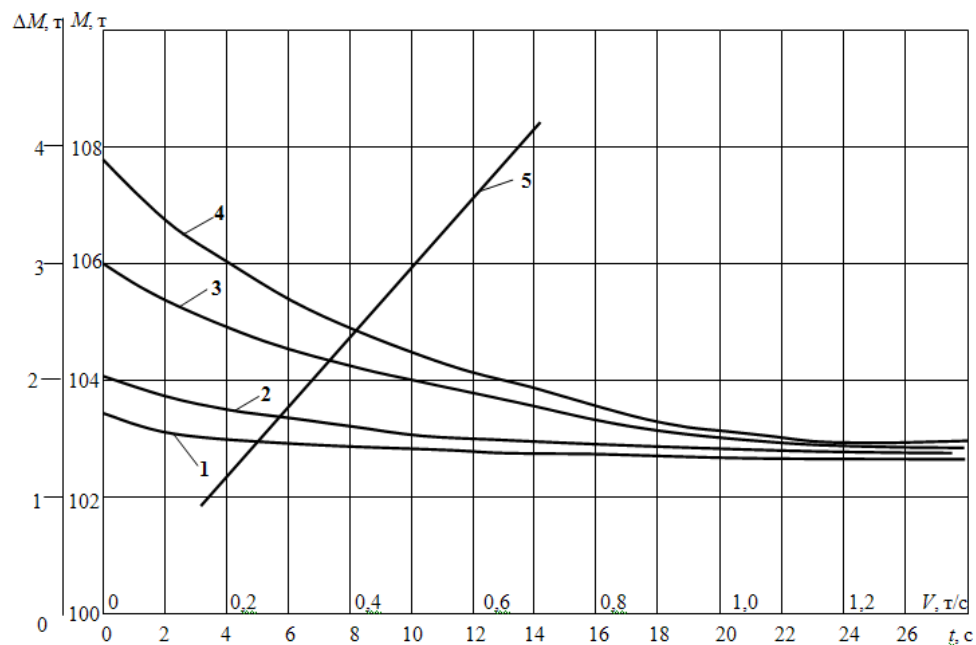


Рисунок 4.11 – Экспериментальные характеристики изменения показаний массы груза M в кузове автосамосвала БелАЗ-75191 от времени при загрузке мерного груза массой 10,64 т (кривые 1-4) и изменения коррекции ΔM от скорости вибрационного сглаживания V (кривая 5)

Проверка методики выполнено на автосамосвалах БелАЗ при загрузке мерных грузов. Испытания показали расхождение фактической и измеренной массы груза в кузове в пределах 3 % [65].

Техническая реализация данного способа контроля загрузки потребует только расширения функциональных возможностей программного обеспечения контроллера СКЗиТ.

Большее повышение точности системы СКЗиТ позволит осуществлять технологическое взвешивание перевозимой горной массы без необходимости остановки либо замедления хода при взвешивании на стационарных средствах взвешивания, что дополнительно повышает эффективность работы.

Добиться снижения погрешности системы можно в случае выполнения взвешивания во время движения автосамосвала. По среднему значению давления можно вычислить массу перевозимого груза M на основании следующего выражения (4.1), при этом погрешность от действия сил сухого трения будет сведена к минимуму за счет колебаний, вызванных профилем дороги.

$$M = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} S_{\text{п}} [p_{\text{пл}}(t) + p_{\text{пп}}(t)] + S_{\text{з}} K [p_{\text{зл}}(t) + p_{\text{зп}}(t)] \cos \alpha(t) dt, \quad (4.1)$$

где $p_{\text{пл}}$, $p_{\text{пп}}$, $p_{\text{зл}}$, $p_{\text{зп}}$ – давление газо-масляной смеси в переднем левом, переднем правом, заднем левом и заднем правом цилиндрах подвески, соответственно, Па; $S_{\text{п}}$ и $S_{\text{з}}$ – площади штоков переднего и заднего цилиндров, м²; K – конструктивный коэффициент, учитывающий влияние реактивных рычагов задней подвески; τ – время интегрирования, с; α – угол продольного крена автосамосвала, вычисляемый как среднее значение за время τ .

Экспериментально установлено, что время интегрирования должно быть не менее 10-15 с. За это время груженный автосамосвал преодолевает 50-60 м пути при средней скорости движения 15-20 км/ч.

В ходе испытания опытных образцов погрешность взвешивания составила от 0,47 % до 1,01 %, что соответствует уровню стационарных средств взвешивания автосамосвалов [122].

Таким образом, модернизация системы СКЗиТ позволяет снизить недогруз автосамосвала за счет повышения точности системы загрузки.

Измерение массы груза по показаниям давления массы в цилиндрах обеспечивает технологический учет перевезенной горной массы без необходимости использования стационарных средств взвешивания, что позволит сократить время рейса.

Выбор оптимального скоростного режима напрямую зависит от возможности поддержания максимальной силы тяги при отсутствии проскальзывания ведущих колес. Из выражений (1.8), (1.10), (1.11) видно, что возможность поддержания максимальной силы тяги без проскальзывания ведущих колес зависит от двух переменных составляющих, значения которых могут изменяться в некотором диапазоне – масса груза в кузове автосамосвала и коэффициент сцепления ведущих колес с дорожным покрытием. Значение коэффициента сцепления ведущих колес с дорогой зависит от множества внешних факторов и не может быть определен напрямую, в то же время масса груза в кузове автосамосвала может быть измерена в процессе движения с высокой точностью. Использование данных технологического взвешивания в системе адаптивного регулирования тягового электропривода позволит обеспечить поддержание максимальной силы тяги без проскальзывания ведущих колес [87], что обеспечит возможность поддержания максимальной скорости на протяжении всего рейса.

4.3 Выводы по Главе 4

В четвертой главе было представлено комплексное решение по модернизации электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала.

На основании ранее выбранного варианта модернизации, с целью проверки его работоспособности в условиях, приближенных к реальным, была синтезирована математическая и имитационная модели. В результате моделирования были подтверждены все ранее вынесенные гипотезы в части повышения энергетической эффективности части системы тяговый генератор – выпрямитель за счет внедрения в структуру трансмиссии

активного выпрямителя. Кроме того, была доказана возможность активного выпрямителя поддерживать заданное значение напряжения звена постоянного тока без изменения выходных параметров тягового генератора в условиях резко изменяющейся нагрузки, характерной для карьерных автосамосвалов.

Дополнительное повышение эффективности работы работы карьерных автосамосвалов, оснащенных электромеханической трансмиссией, возможно за счет модернизации вспомогательных систем, а именно системы диагностики и бортовой системы. Предложенные варианты модернизации вспомогательных систем не требуют значительных капитальных затрат, поскольку данные варианты предполагают только модернизацию программной части, и являются перспективными направлениями дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – повышения эффективности системы электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основании анализа существующих конструкций электромеханических трансмиссий большегрузных карьерных автосамосвалов определен основной недостаток, заключающийся в низкой энергетической эффективности системы в части синхронный тяговый генератор – неуправляемый диодный выпрямитель при работе на нелинейную нагрузку.

2. На базе стандартных функциональных блоков пакета прикладных программ Matlab-Simulink разработана имитационная модель существующей электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов, позволившая оценить показатели энергетической эффективности системы в части синхронный тяговый генератор – неуправляемый диодный выпрямитель.

3. Получены патенты на два разработанных варианта модернизации электромеханической трансмиссии. Произведен сравнительный анализ параметров энергетической эффективности и показателей качества переходных процессов в звене постоянного тока каждого варианта модернизации при использовании различных алгоритмов управления. На основании анализа выбран вариант модернизации с использованием активного выпрямителя с векторной системой управления с ориентацией по вектору напряжения тягового генератора.

4. С учетом выбранного варианта модернизации на базе стандартных функциональных блоков пакета прикладных программ Matlab-Simulink разработана имитационная модель модернизированной электромеханической трансмиссии, подтвердившая способность модернизированной системы к

обеспечению высоких значений показателей энергетической эффективности в части системы синхронный тяговый генератор – активный выпрямитель.

5. Предложен вариант модернизации электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов на основе использования энергоэффективных технических решений.

6. Определены направления дальнейших исследований по повышению эксплуатационных характеристик электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов за счет модернизации вспомогательных систем, системы диагностики и бортовой системы.

7. Получен акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс Горного университета и справка о возможности внедрении результатов диссертационной работы в производственную деятельность АО «Новая ЭРА».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б.Н. Электромеханические комплексы с синхронным двигателем и тиристорным возбуждением / Б.Н. Абрамович, В.Я. Чаронов, Ф.Д. Дубинин, Ю.В. Коновалов // Санкт-Петербург: «Наука», 1995. – 264 с. : ил. – Библиогр.: с. 263-264. – 2500 экз. – Текст: непосредственный.
2. Адкинс, Б. Общая теория электрических машин / Б. Адкинс // М. – Л.: ГЭИ. 1970 – 271 с.
3. Артюхов, И.И. Электромагнитная совместимость и качество электро- энергии: учеб. пособие / И.И. Артюхов, А.Г. Сошитов, И.И. Бочкарева. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2015. – 124 с.
4. Бахтурин Ю.А. Современное состояние карьерного транспорта/ Ю.А. Бахтурин. – Текст : электронный // Горная Техника: каталог справочник. – 2005. URL: <http://probelaz.ru/ru/help/usefull/36.html> (дата обращения: 21.09.2018).
5. Битколов, Н.З. Аэрология карьеров / Н.З. Битколов, И.И. Медведев. – Москва: Недра, 1992. – 264 с. : ил. – Библиогр.: с. 262-264. – 1700 экз. – Текст: непосредственный.
6. Важнов, А.И. Электрические машины / А.И. Важенев // Л.: Энергия, 1969. – 768 с.
7. Виноградов, А.Б. Тяговое электрооборудование переменного тока карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 90 и 240 тонн / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, В.Л. Чистосердов, Н.Е. Гнездов, А.А. Коротков // Энергетика и энергосбережение: теория и практика. КузГТУ: . – 2017. – С.303-309.
8. Владимиров, Д.Я. Система управления горнотранспортным комплексом «Карьер»: основные направления, модернизация и развитие / Д.Я. Владимиров, А.Ф. Клебанов // Горное оборудование и электромеханика. – 2006. – №. 8. – С. 10-17.
9. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек // Л.: Энергия – 1974. – 840 с.

10. Гавришев, С.Е. Повышение эффективности использования автосамосвалов в условиях карьеров на открытых горных работах / С.Е. Гавришев, А.Д. Кольга, И.А. Пыталев, Т.М. Попова // Известия тульского государственного университета. Науки о земле. – 2019. – No. 3 – С. 161-170.

11. Герасимов, В. Перевод карьерных самосвалов на газодизельный и газовый режим работы с использованием бортовых топливных систем сжиженного природного газа / В. Герасимов, В. Передельский, В Дарбинян. – 2005. – URL: http://www.rmo.ru/ru/nmobarudovanie/nmobarudovanie/2005-1/29_33_nmo_1_05.pdf (дата обращения: 13.01.2019).

12. Глебов, И.А. Проблемы пуска сверхмощных синхронных машин / И.А. Глебов, Н.В. Шулаков, Е.А. Крутяков // Л.: Наука, 1988.

13. Глебов, И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин / И.А. Глебов // –Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1979. – 313 с.

14. Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев // ГЭИ. – 1950.

15. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Норма качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.

16. Григорьев, О.А. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ / О.А. Григорьев, В.С. Петухов, В.А. Соколов, И.А. Красилов // Ж. «Новости электротехники». – 2002. – No. 6 (18).

17. Группа компаний «Либхер» : официальный сайт. – Москва. – URL: <https://www.liebherr.com/ru/rus/пуск/начальная-страница.html> (дата обращения: 21.09.2018). – Текст : электронный.

18. Даниярова, К. Беларусь везёт в Россию «квинтэссенцию наукоёмкости в автомобилестроении» / К. Даниярова // Форпост Северо-Запад: [сайт]. – 2019. – 25 мар. – URL: <https://forpost-sz.ru/a/2019-03->

12/belarus-vezyot-v-rossiyu-kvintehssenciyu-naukoyomkosti-v-avtomobilstroenii (дата обращения: 27.03.2019).

19. Дикун, И.А. Структуры и алгоритмы управления транзисторных систем самовозбуждения синхронных генераторов / И.А. Дикун // ЛЭТИ. – 2018. – 114 с.

20. Егоров, А.Н. Карьерные самосвалы с электромеханической трансмиссией переменного тока / А.Н. Егоров, Н.В. Бигель // Горный журнал. – 2013. – №. 1. – С. 50-51.

21. Емельянов, А.П. Электропривод машин и оборудования / А.П. Емельянов, В.И. Вершинин, А.Е. Козярук // Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. – 222 с.

22. Жерве, Г.К. Промышленные испытания электрических машин / Г.К. Жерве // Л.: Энергоатомиздат, 1984.

23. Завод «Реостат» («Силовые машины») – Санкт-Петербург. – URL: http://reostat.ru/production/cat-2/samosval_belaz/oborudovanie (дата обращения: 21.11.2018). – Текст : электронный.

24. Зеньков, И.В. Территориальные и технологические особенности добычи угля открытым способом в республике Вьетнам / И.В. Зеньков // Уголь. – 2018. – № 12 (1113). – С. 102-104.

25. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский // М.: Энергия, 1980.

26. Ильин, С.А. Состояние и перспективы развития открытого способа разработки месторождений полезных ископаемых / С.А. Ильин. // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2013. – №. S1. – С. 364-383.

27. Казовский, Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е.Я. Казовский // М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – 624 с.

28. Камышьян, А.М. Выбор структуры энергоэффективного электропривода карьерного автосамосвала на основе активного выпрямителя

[Текст] / Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. Москва. – 2017. – С.62-64.

29. Карьерные самосвалы на газовом топливе // Прогресс технологий: [сайт]. – 2019. – URL: <https://proteh.org/articles/30062019-karernye-samosvaly-na-gazovom-toplive/> (дата обращения: 30.06.2019).

30. Клебанов, А.Ф. Система диспетчеризации большегрузных автосамосвалов «КАРЬЕР» на разрезе «Черниговский»: структура, функциональность, экономическая эффективность / А.Ф. Клебанов, Д.Я. Владимиров, Л.В. Рыбак // Горная промышленность. – 2003. – No. 1. – С. 52-57.

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

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

33. Козярук, А.Е. Методы и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронными электроприводами / А.Е. Козярук, Б.Ю. Васильев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: энергетика. – 2015. – No. 1. – С. 47-53.

34. Козярук, А.Е. Современные тенденции развития бесконтактной электротрансмиссии большегрузных карьерных автосамосвалов / Козярук А.Е., Камышьян А.М. // Инновации на транспорте и в машиностроении. – Сборник трудов IV международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург. – 2016. – Том 1. – С.75-78.

35. Козярук, А.Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов / А.Е. Козярук // Электротехника. – 2019. – No. 3 – С. 33-37.

36. Козярук, А.Е. Энергоэффективные электромеханические комплексы горно-добывающих и транспортных машин / А.Е. Козярук // Записки горного института. – 2016. – Т. 218 – С. 261-269.

37. Козярук, А.Е. Эффективный промышленный электропривод сегодня / А.Е. Козярук // Труды IX международной (XX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – 2016. – С. 56-58.

38. Компания «Катерпиллар СНГ»: официальный сайт. – Москва. – URL: https://www.cat.com/ru_RU.html (дата обращения: 21.09.2018). – Текст : электронный.

39. Компания «Комацу СНГ»: официальный сайт. – Москва. – URL: <https://www.komatsu.ru> (дата обращения: 21.09.2018). – Текст : электронный.

40. Компания «Хитачи Констракшн Машинери Евразия»: официальный сайт. – Москва. – URL: <https://www.hitachicm.ru> (дата обращения: 21.09.2018). – Текст : электронный.

41. Константинов, К.В. Вейвлет-технологии в области вибродиагностики объектов железнодорожного транспорта / К.В. Константинов, А.В. Дороничев // Транспорт Урала. – 2010. – No. 1 (24). – С. 39-42.

42. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин/ И.П. Копылов // М.: Высш. шк., 1987. – 248 с.

43. Корпорация «Терекс»: официальный сайт. – Москва. – URL: <https://www.terex.com/ru/> (дата обращения: 21.09.2018). – Текст : электронный.

44. Кулешов, А.А. Эффективность и перспективы применения бортовых систем контроля загрузки и учета работы карьерных автосамосвалов / А.А. Кулешов, М.А. Семенов // Горные машины и автоматика. – 2000. – No. 3. – С. 35-38.

45. Лайбль, Т. Теория синхронной машины при переходных процессах / Т. Лайбль // М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 168 с.

46. Луняшин, П.Д. Карьерные самосвалы с пониженным потреблением дизельного топлива / П.Д. Луняшин // Золотодобыча. – 2018. – No. 241. – URL: <https://zolotodb.ru/article/12004> (дата обращения: 13.01.2019).

47. Мариев, П.Л. «БелАЗ» и современные тенденции развития карьерного автотранспорта / П.Л. Мариев, К.Ю. Анистратов. – Текст: электронный // Горная промышленность: [сайт]. – 2001. – URL: <https://mining-media.ru/ru/article/transport/1807-belaz-i-sovremennyye-tendentsii-razvitiya-karernogo-avtotransporta> (дата обращения: 21.09.2018).

48. Мариев, П.Л. Карьерный автотранспорт / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов. – Санкт-Петербург: «Наука», 2004. – 429 с. – Библиогр.: с. 427-429. – 3000 экз. – Текст: непосредственный.

49. Мариев, П.Л. Тенденции развития мировых концернов, выпускающих карьерные самосвалы / П.Л. Мариев, Е.Л. Резников, К.Ю. Анистратов, А.Н. Домбровский. – Текст: электронный // Макси Экскаватор Ру: [сайт]. – 2000. – 25 февр. – URL: <https://maxi-exkavator.ru/articles/trucks/~id=626> (дата обращения: 21.09.2018).

50. Министерства энергетики Российской Федерации: официальный сайт. – Москва. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/323> (дата обращения: 15.11.2018). – Текст : электронный.

51. Новожилов, А.Н. Моделирование токов в обмотках синхронного компенсатора при витковом замыкании в обмотке статора / .Н. Новожилов, В.Н. Горюнов, Т.А. Новожилов, А.М. Акаев // Электротехника. – 2016. – No 4. – С. 199-201.

52. Новожилов, А.Н. Моделирование токов в обмотках синхронного компенсатора при витковом замыкании в обмотке статора/ А.Н. Новожилов, В.Н. Горюнов, Т.А. Новожилов, А.М. Акаев // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. – 2015 г. С. 120-125.

53. Отчет «О результатах испытаний опытного образца электропривода асинхронного для самосвала «БелАЗ» грузоподъемностью 136 т». – Санкт-Петербург: СПГГИ, 2006. – 62 с.

54. Патент № 2653945 Российская Федерация, МПК В60L 11/08 (2006.01), H02M 5/458 (2006.01), В60W 10/105 (2012.01). Энергоэффективный тяговый электропривод автономного транспортного средства : № 2017121480 : заявл. 19.06.2017 : опубл. 15.05.2018 / Козярук А.Е., Камышьян А.М.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 10 с. : ил.

55. Патент № 2692288 Российская Федерация, МПК В60L 50/13 (2019.01), H02M 5/42 (2006.01), В60L 7/06 (2006.01). Тяговый электропривод автономного транспортного средства : № 201813376 : заявл. 24.09.2018 : опубл. 24.06.2019 / Козярук А.Е., Камышьян А.М., Большунова О.М., Коржев А.А; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 10 с. : ил.

56. Перспективы развития открытой добычи полезных ископаемых в восточно-российском регионе / Г.В. Секисов, В.С. Нечеткий, А.А. Якимов // горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – No. 2. – С. 197-199.

57. Пронин, М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов. – Санкт-Петербург: Электросила. – 2003. – 172 с. : ил. – Библиогр.: с. 5. – Текст: непосредственный.

58. Пронин, М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов., П.Н. Калачиков, А.П. Емельянов – Санкт-Петербург: Электросила. – 2004. – 252 с. : ил. – Библиогр.: с. 4-6. – Текст: непосредственный.

59. Пронин, М.В. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам / М.В.Пронин, А.Г.Воронцов // Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – 222 с. : ил. – Библиогр.: с. 3-5. – Текст: непосредственный.

60. Птах, Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт / Г.К. Птах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – No. 3. – С. 23-33.

61. Развитие открытого способа добычи угля в России / В.Д. Грунь, В.Г. Килимник, Н.В. Ефимова // Горная промышленность. – 2007. – No 5 (75). – С. 18-21.

62. Рождественский, В.Н. Условия и особенности ведения буровзрывных работ в глубоких карьерах / В.Н. Рождественский // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2007. – No. 2 – С. 68-77.

63. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау // Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.

64. Савчук, В.П. Обработка результатов экспериментов / В.П. Савчук // Одесса: ОНПУ, 2002. – 54 с.

65. Семенов, М.А. Контроль загрузки карьерных автосамосвалов / М.А. Семенов, О.М. Большунова // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 143-145.

66. Семенов, М.А. Повышение точности автоматического контроля загрузки карьерных автосамосвалов / М.А. Семенов // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии. – 2012. – URL: <https://online-electric.ru/articles.php?id=22> (дата обращения: 07.06.2019).

67. Сипайлов, Г.А. Некоторые вопросы работы маломощного синхронного генератора на выпрямительную нагрузку / Г.А. Сипайлов, В.А. Зорин, Т.В. Кузнецова, А.Б. Цукублин // Известия политехнического института имени С.М. Кирова. – 1966. – Т. 145. – С. 145-150.

68. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MatLab / Н.К. Смоленцев. – М: ДМК. – 2005. – 304 с.

69. Состояние сырьевой базы угольной промышленности Кузбасса / С.В. Шаклеин, М.В. Писаренко // Известия тульского государственного университета. Науки о земле. – 2019. – No. 4. – С. 177-186.

70. Фефелов, Е.В. Систематизация горнотехнических условий эксплуатации карьерного автотранспорта / Е.В. Фефелов // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2012. – No. 911. – С. 207-211.

71. Хазин, М.Л. Техничко-экологическая оценка горных машин / М.Л. Хазин. – Текст: непосредственный // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции / Уральский государственный горный университет; под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. – Екатеринбург. – 2019. – С. 456-459.

72. Хазин, М.Л. Эколого-экономическая оценка карьерных троллейбусов / М.Л. Хазин, А.П. Тарасов // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – No. 2 – С. 166-180.

73. Харлов, Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учеб. пособие / Н.Н. Харлов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.

74. Холдинг «БелАЗ»: официальный сайт. – Жодино. – URL: <http://www.belaz.by> (дата обращения: 21.09.2018). – Текст : электронный.

75. Хохряков, В.С. Открытая разработка месторождений полезных ископаемых / В.С. Хохряков. – Москва: Недра, 1991. – 334 с. : ил. – Библиогр.: с. 332-334. – 6240 экз. – Текст: непосредственный.

76. Ческидов, В.И. Ресурсный потенциал открытой добычи угля в Кузбассе / В.И. Ческидов // Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2008. – No. 4 (86). – С. 23-25.

77. Чурбанов, В.С. Предпосылки создания и принципы работы отвалообразователей / В.С. Чурбанов // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – No. 1 (975). – С. 160-162.

78. Шарипов, В.М. Трансмиссии тракторов (конструкция) / В.М. Шарипов, И.М. Эглит, А.П. Парфенов, Ю.С. Щетинин. – Москва: МГТУ «МАМИ», 1999. – 245 с. – Библиогр.: с. 244-245. – 500 экз. – Текст: непосредственный.

79. Яковлев, В.Л. Причины аварийности на технологическом автотранспорте карьеров и пути ее снижения / В. Л. Яковлев, В. Л. Могилат, П. И. Тарасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – No. 1. – С. 211-217.

80. Ясюченя, С.В.. О повышении операционной эффективности открытых горных работ в компании ОАО «СУЭК» / С.В. Ясюченя // Горная Промышленность. – 2013. – No 6. – С. 23-27.

81. Aspalli, M.S. Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method / M.S. Aspalli., R. Asha, P.V. Hunagund // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2012. – Vol. 1. – pp. 463-469. – URL: https://www.ijareeie.com/upload/november/18_THREE%20PHASE%20INDUCTION.pdf (дата обращения: 12.04.2019).

82. Barlik, R. Three-phase PWM rectifier with power factor correction / R. Barlik, M. Nowak // in proc. EPN 2000. – 2000. – pp.57-80.

83. Bhowmik, S. New simplified control algorithm for synchronous rectifiers / S. Bhowmik, R. Spee, G.C. Alexander, J.H.R. Enslin // in proc. IEEE-IECON Conf. – 1995. – pp. 494-499.

84. Bhowmik, S. Sensorless current control for active rectifiers / S. Bhowmik, A.V. Zyl, R. Spee, J.H.R. Enslin // in proc. IEEE-IAS Conf. – 1996. – pp. 898-905.

85. Blasko, V. A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter / V. Blasko, V. Kaura // IEEE Trans. on Power Electronics. – 1997. – Vol. 12. – No. 1. – pp. 116-122.

86. Boldea, I. Synchronous Generators / I. Boldea // Boca Raton: CRC Press, 2005. – 448 p.

87. Bolshunova, O. Adaptive control system of dump truck traction electric drive / O. Bolshunova, A. Korzhev, A. Kamyshyan. – DOI 10.1088/1757-899X/327/5/052007 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Tomsk, 2017 – Vol. 87. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/5/052007/pdf> (дата обращения: 23.09.2019).

88. Bolshunova, O. Diagnostics of Career Dump Truck Traction Induction Motors Technical Condition Using Wavelet Analysis / O. Bolshunova, A. Kamyshian, A. Bolshunov. – DOI 10.1109/Dynamics.2016.7818988 // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, 2016. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7818988> (дата обращения: 23.09.2019).

89. Bolshunova, O. Diagnostics of Electric Motors Technical Condition Using Wavelet Analysis / O. Bolshunova, A. Kamyshian, A. Bolshunov. – DOI 10.1109/ICIEAM.2016.7911524 // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk, 2016. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7911524> (дата обращения: 23.09.2019).

90. Buja, G. Direct Stator Flux and Torque control of an induction motor: Theoretical Analysis and Experimental Results / G. Buja, D. Casadei, G. Serra // in proc. IEEE-IECON Conf. – 1998. – pp. T50-T64.

91. Faiz, J. Comparison of different switching patterns in Direct Torque Control techniques / J. Faiz, M.B.B. Sharifian // Power Electronics and Motion Control Conference. – 2004. – Vol. 1. – pp. 63-75.

92. Hansen, S. Harmonic cancelation by mixing nonlinear single phase and three-phase loads / S. Hansen, P. Nielsen, F. Blaabjerg // in proc. IEEE Trans. on Ind. Application. – 2000. – Vol. 36. – No. 1. – pp. 152-159.

93. Hansen, S. Harmonic distortion and reduction techniques of PWM adjustable speed drives - a cost – benefit analysis / S. Hansen, P. Nielsen, P. Thogersen // in proc. Norpie Conf. – 2000. – pp. 271-277.

94. Harnefors, L. Control of Variable-Speed Drives / L. Harnefors. – Sweden: Malardalen University, 2002. – 194 p.

95. Hartman, H.L. Introductory Mining Engineering / H.L. Hartman, J.M. Mutmansky. – Hoboken: Wile, 2008. – 570 p.; 25 cm. – Bibliographical references; pp. 534-563. – pp. 11-12.

96. Kasmierkowski, M.P. Control in power electronics, selected problem / M.P. Kasmierkowski, F. Blaabjerg, R. Krishnan // USA: Elsevier Science, 2002. – 518 p.

97. Kazmierkowski, M.P. A novel control scheme for transistor PWM inverter-fed induction motor drive / M.P. Kaźmierkowski, W. Sulkowski // IEEE Trans. on Ind. Electronics. – 1991. – Vol. 38. – No. 1. – pp. 41-47.

98. Kazmierkowski, M.P. The three phase current controlled transistor DC link PWM converter for bi-directional power flow / M.P. Kazmierkowski, M.A. Dzieciakowski, W. Sulkowski // in proc. PEMC Conf. – 1990. – pp. 465-469.

99. Khalaf, S.G. Wavelet fault diagnosis and tolerant of induction motor: A review / S.G. Khalaf, W.P. Hew // International Journal of the Physical Sciences. – 2011. – Vol. 6 (3). – pp. 358-376.

100. Kohlmeier, H. High dynamic four quadrant AC-motor drive with improved power-factor and on-line optimized pulse pattern with PROMC / H. Kohlmeier, O. Niermeyer, D. Schroder // in proc. EPE Conf. – 1985. – pp. 173-178.

101. Kolar, J.W. A new concept for reconstruction of the input phase currents of a three-phase/switch/level PWM (VIENNA) rectifier based on neutral

point current measurement / J.W. Kolar, F. Stogerer, J. Minibock, H. Ertl // in proc. IEEE-PESC Conf. – 2000. – pp. 139-146.

102. Kozyaruk, A. Improving the energy efficiency of the electromechanical transmission of an open-pit dump truck / A. Kozyaruk, A. Kamyshyan. – DOI 10.31897/PMI.2019.5.576 // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 239, № 5. – pp. 576 – 582.

103. Kuck, D.L. Advantages of Surface Mining / D.L. Kuck // Science. – 1974. – Vol. 183. – 28 p.

104. Lascu, C. A modified Direct Torque Control for induction motor sensorless drive / C. Lascu, I. Boldea, F. Blaabjerg // IEEE Trans. on Ind. Application. – 2000. – Vol. 36. – No. 1. – pp. 122-130.

105. Lundberg, S. Lecture slides: Electric Drives II / S. Lundberg. Sweden: Department of Energy and Environment. – 2009.

106. Malinowski, M. Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers. – PhD Thesis, Warsaw University of Technology. – Warsaw, Poland. 2001. – 128 p.

107. Marques, G.D. A Simple and Accurate System Simulation of Three-phase Diode Rectifiers / G.D. Marques // Conference: Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE. – 1998. – Vol. 1. – pp. 416-421.

108. Marques, G.D. On Parks Models for the Simulation of the Slip Power Recovery Drive / G.D. Marques // IMACS TC1-IEEE. – 1987. – pp. 24-31.

109. Mohan, N. Power Electronics: Converters, Applications, and Design / N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins // New York: John Wiley & Sons. – 1995.

110. Niermeyer, O. AC-Motor drive with regenerative braking and reduced supply line distortion / O. Niermeyer, D. Schroder // in proc. EPE Conf. – 1989. – pp. 1021-1026.

111. Noguchi, T. Direct Power Control of PWM converter without power-source voltage sensors / T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, I. Takahashi // IEEE Trans. on Ind. Applications. – 1998. – Vol. 34. – No. 3. – pp. 473-479.

112. Ohnishi, T. Three-phase PWM converter/inverter by means of instantaneous active and reactive power control / T. Ohnishi // in proc. IEEE-IECON Conf. – 1991. – pp. 819-824.

113. Ooi, B.T. A 3-phase controlled current PWM converter with leading power factor / B.T. Ooi, J.C. Salmon, J.W. Dixon, A.B. Kulkarni // in proc. IEEE-IAS Conf. – 1985. – pp. 1008-1014.

114. Ooi, B.T. An integrated AC drive system using a controlled current PWM rectifier/inverter link / B.T. Ooi, J.W. Dixon, A.B. Kulkarni, M. Nishimoto // in proc. IEEE-PESC Conf., pp. 494-501, 1986.

115. Ottersten, R. On Control of Back-to-Back converters and Sensorless Induction Machine Drives / R. Ottersten. – Sweden, University of Technology, 2003. – 165 p.

116. Ozkaya, H. Parallel Active Filter Design, Control, and Implementation / H. Ozkaya. Turkey: Middle east technical university, 2007. – 361 p.

117. Park, R.H. Two-Reaction Theory of Synchronous Machines / R.H. Park // Tr. AIEE, 1930.

118. Parvathi, M.S. Transient Simulation Based Average Model of a Three Phase Diode Bridge Rectifier / M.S. Parvathi, G.K. Nisha // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – 2016. – Vol. 39. – No. 5. – pp. 257-259

119. Rachana, G. Design of unity power factor controller for three-phase induction motor drive fed from single phase supply / G. Rachana, M. Priya, K. Parmod, G. Rohit // Journal of Automation and Control Engineering. – 2014. – Vol 2. – No. 3. – pp. 221-227. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/1c30/f23aef65b8c1b6d2f1a7cebcacc45a618e9c.pdf> (дата обращения: 12.04.2019).

120. Rajagopalan, V. Computer-Aided Analysis of Power Electronic Systems / V. Rajagopalan // Proceedings.14 Annual Conference of Industrial Electronics Society. – 1988. – No. 105. – pp. 528-533.

121. Ramani, R.V. Surface Mining Technology: Progress and Prospects / R.V. Ramani // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 46. – pp. 9-21

122. Semenov, M. Modernization of the dump truck onboard system / M. Semenov, O. Bolshunova, A. Korzhev, A. Kamyshyan. – DOI 10.1088/1755-1315/87/2/022017 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Tomsk, 2017 – Vol. 87. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/2/022017> (дата обращения: 23.09.2019).

123. Shahbaz, M. Active Harmonics Filtering of Distributed AC System / M. Shahbaz. – Norway: University of Science and Technology, 2012. – 101 p.

124. T.G. Habetler, D.M. Divan Control strategies for Direct Torque Control / T.G. Habetler, D.M. Divan // IEEE Trans. on Ind. Application. – 1992. – Vol. 28. – No. 5. – pp. 1045-1053.

125. Takahashi, I. A new quick response and high efficiency control strategy of induction motor / I. Takahashi, T. Noguchi // in proc. IEEE-IAS Conf. – 1985. – pp. 496-502.

126. Trends in the mining and metals industry Mining's contribution to sustainable development / International Council on Mining and Metals (ICMM). – London: Oxford, 2012. – 54 p.

127. Yamatomi, J. Surface Mining Methods and Equipment/ J. Yamatomi, S. Okubo // Civil engineering. – 2009. – Vol. 11. – pp. 155-170

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Структурная схема заводского стенда для испытаний электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов

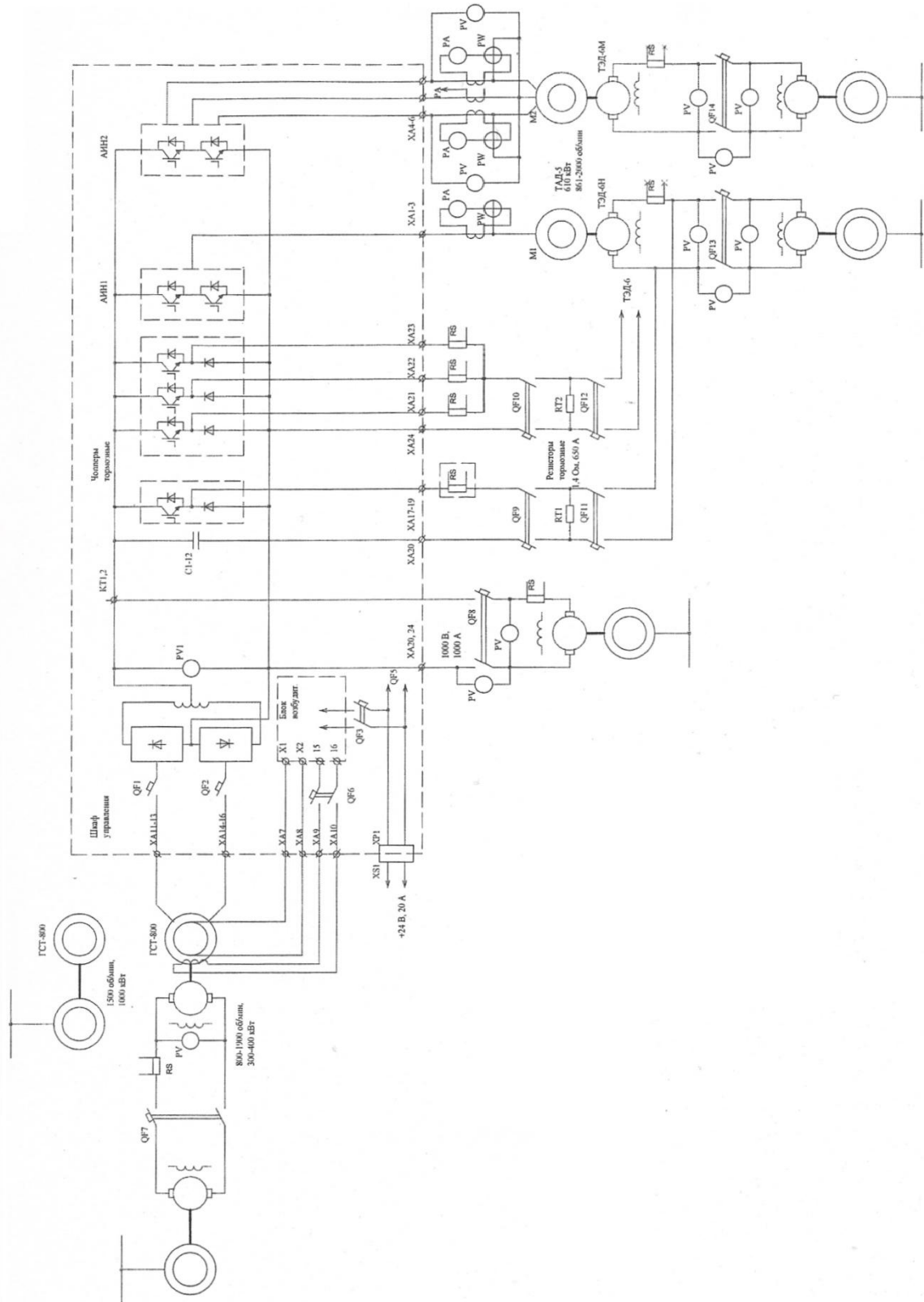


Рисунок А.1 – Структурная схема заводского стенда для испытаний электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Параметры электрических двигателей заводского стенда для испытаний электромеханической трансмиссии карьерных автосамосвалов

P2н = 610.00 кВт		Un = 660.0 В		In = 682.72 А	
P1 = 655.32 кВт		cos = .8397		N = 860.87 об/мин	
f = 29.00 Гц		m = 3		соединение - звезда	
				GD ² /J	
-----T-----		-----T-----		-----T-----	
Тau=39.66	статор	ротор	2p= 4	магнитная цепь	
-----T-----		-----T-----		-----T-----	
Da/Di	835.0 / 505.0	501.0 / 180.0	Da/Di	E10, В	374.49
Lt/Le	500.0 / 475.0	500.0 / 475.0	Lt/Le	Фн, Вб	.1554
каналы	ряд. 1 * @35.0	ряд. 1 * @30.0	каналы	Km	1.010
Ha/La	98.17 / 57.87	114.00 / 23.09	Ha/La	Bd, Т	1.23090
Qa	2 * 466.3	2 * 541.5	Qa	Ba1, Т	1.66638
сталь	.50 / 2412	.50 / 2412	сталь	Bz1, Т	1.96219
z1/q	60 / 5.0	50	z2	Bz2, Т	2.08075
пазы	прямоугольные	прямоугольные	пазы	Ba2, Т	1.43496
размеры	43.5*10.5(10.5)	25.50 * 9.50	размеры		
Hs*Bs	3.00 * 10.50	1.00 * 2.00	Hs*Bs	Ha1	22.08
t1/...	26.44/27.96/31.00	31.48/29.26/28.15	t2/...	Hz1	83.85
Bz/...	15.94/17.46/20.50	19.76/ 18.65	Bz/...	Hz2	134.40
Qz/Lz	1244.0 / 8.70	1173.2 / 5.30	Qz/Lz	Ha2	5.12
обмотка	двухслойная	короткозамкн.	обмотка		
Sn/A1	2 / 1	25.00 * 9.00	Ac*Bc	Fd, А	5299.9
W1/Fw	20 / .936	221.2 / 540.0	Qc/Lc	Fa1, А	1278.0
Y1/By	13 / .867	медь	матер.	Fz1, А	729.5
провод	ППИПКТ	30.0 * 40.0	Ar*Br	Fz2, А	712.3
размеры	3.15 * 8.00	1198.1 / 469.0	Qr/Dr	Fa2, А	118.3
сечение	5 * 24.77=123.86	медь	матер.	Fn, А	8138.0
Lw(Ls)	2152. (576.)	.5982E-04	Rc		
r1	.0061 / .0085	.1918E-04	Rr	Im, А	321.77
Rg1	*****	.00666	R21	Io, А	323.05
x1	.0304	.0353	x21	Xm, Ом	1.164
лямбда	1.82/ .91/ 1.43	1.75/ 1.79/ 1.04	лямбда	Kнас	1.536
-----T-----		-----T-----		-----T-----	
Зазор = 2.00 мм		Qd = 1983.1 см ²		Kd = 1.344 (1.292 / 1.040)	
-----T-----		-----T-----		-----T-----	
нагрузка статора		нагрузка ротора		потери и кпд	
-----T-----		-----T-----		-----T-----	
I1 = 682.72 А		I21= 574.55 А		Qcu1= 11920. Вт	
cos = .8397		I2 = 1292.67 А		Qcu2= 6600. Вт	
As1= 516.40 А/см		As2= 407.39 А/см		Qfe = 14602. Вт	
Sa1= 5.512 А/мм ²		Sac/Sar= 5.84/ 4.30 А/мм ²		Qfea= 11673. Вт	
-----T-----		-----T-----		-----T-----	
коэффициент скоса пазов		гильза на статоре .00 мм		Qg1= 0. Вт	
C1= 1.00 C2= .00		гильза на роторе .00 мм		Qmex= 8733. Вт	
Fsk= .998		уд. сопротивление*****		Qдоб= 3465. Вт	
-----T-----		-----T-----		-----T-----	
масса обмотки статора		148.0 кг		P1 = 655.3 кВт	
масса обмотки ротора (стерж/кольца)		53.1/ 31.4 кг		кпд=93.084 %	
масса стали статора (ядро/зубцы)		973./ 176. кг		Sn = .0105 се	
масса стали ротора (ядро/зубцы)		464./ 101. кг		-----T-----	
масса активного ядра (статор+ротор)		1947. кг		кратности тока	
удельный расход стали		.248 кг/(Н*м)		и моментов	
удельный расход меди		.034 кг/(Н*м)		Мэм= 6.902 кН*м	
-----T-----		-----T-----		-----T-----	
электродвигатель типа tad5		Вариант		Кмм= 5.50(4.55)	
исполнитель - KALASHIKOV		-----T-----		Sm = .150(.102)	
дата проведения расчета 5/ 4/2004		-----T-----		Кмп= 2.81(1.01)	
-----T-----		-----T-----		-----T-----	
				Кип=11.04(8.42)	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Тексты программ функциональных блоков системы прямого управления мощностью активного выпрямителя

Пример текста программы выбора

Текст программы выбора сектора

состояния полупроводниковых
ключей для первого сектора

```

1  function n = fcn(phi)
2  -   n=0;
3
4  -   if(phi>=0)&&(phi<pi/6)
5  -       n=2;
6  -   end
7  -   if(phi>=pi/6)&&(phi<pi/3)
8  -       n=3;
9  -   end
10 -   if(phi>=pi/3)&&(phi<pi/2)
11 -       n=4;
12 -   end
13 -   if(phi>=pi/2)&&(phi<2*pi/3)
14 -       n=5;
15 -   end
16 -   if(phi>=2*pi/3)&&(phi<5*pi/6)
17 -       n=6;
18 -   end
19 -   if(phi>=5*pi/6)&&(phi<pi)
20 -       n=7;
21 -   end
22 -   if(phi>=-pi)&&(phi<-5*pi/6)
23 -       n=8;
24 -   end
25 -   if(phi>=-5*pi/6)&&(phi<-2*pi/3)
26 -       n=9;
27 -   end
28 -   if(phi>=-2*pi/3)&&(phi<-pi/2)
29 -       n=10;
30 -   end
31 -   if(phi>=-pi/2)&&(phi<-pi/3)
32 -       n=11;
33 -   end
34 -   if(phi>=-pi/3)&&(phi<-pi/6)
35 -       n=12;
36 -   end
37 -   if(phi>=-pi/6)&&(phi<0)
38 -       n=1;
39 -   end

```

```

1  function n = fcn(dp,dq,sector)
2  -   n=0;
3  -   % sector 1
4  -   if(sector==2)&&(dp==1)&&(dq==0)
5  -       n=1;
6  -   end
7  -   if(sector==2)&&(dp==1)&&(dq==1)
8  -       n=0;
9  -   end
10 -   if(sector==2)&&(dp==0)&&(dq==0)
11 -       n=1;
12 -   end
13 -   if(sector==2)&&(dp==0)&&(dq==1)
14 -       n=2;
15 -   end
16
17 -   if(sector==3)&&(dp==1)&&(dq==0)
18 -       n=7;
19 -   end
20 -   if(sector==3)&&(dp==1)&&(dq==1)
21 -       n=7;
22 -   end
23 -   if(sector==3)&&(dp==0)&&(dq==0)
24 -       n=1;
25 -   end
26 -   if(sector==3)&&(dp==0)&&(dq==1)
27 -       n=2;
28 -   end

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Патенты на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2653945

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Козярук Анатолий Евтихиевич (RU),
Камышьян Альберт Михайлович (RU)*

Заявка № 2017121480

Приоритет изобретения 19 июня 2017 г.

Дата государственной регистрации в

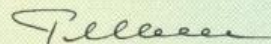
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 15 мая 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 19 июня 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2692288

ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОНОМНОГО
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Козярук Анатолий Евтихиевич (RU), Камышьян Альберт Михайлович (RU), Большунова Ольга Михайловна (RU), Коржнев Александр Александрович (RU)*

Заявка № 2018133766

Приоритет изобретения 24 сентября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 июня 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 24 сентября 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт внедрения результатов работы в учебный процесс

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Камышьяна А.М. «Структура и алгоритмы управления бесконтактным тяговым электроприводом карьерных автосамосвалов» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

В частности при обучении студентов по направлениям: 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника», профилю «Электропривод и автоматика», 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника», профилю «Электроприводы и системы управления электроприводов», 21.05.04 – «Горное дело», профилю «Электрификация и автоматизация горного производства». Проводятся практические занятия по синтезу систем управления электроприводами, оценки влияния полупроводниковых преобразователей на электромагнитную совместимость электромеханических систем.

На основании результатов исследований в соавторстве с преподавателями кафедры электроэнергетики и электромеханики изданы методические указания – «Математические модели и расчет систем управления технологических комплексов», «Теория автоматического управления» для студентов направления подготовки бакалавриата 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», «Физические основы электроники расчет и моделирование аналоговых электронных устройств» для студентов направления подготовки бакалавриата 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и направления подготовки специалитета 21.05.04 «Горное дело» по специализации «Электрификация и автоматизация горного производства».

Декан электромеханического
факультета д.т.н. профессор

Заведующий кафедрой
электроэнергетики и электромеханики
д.т.н. профессор

В.В. Максаров

В.А. Шпенст

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Справка о внедрении результатов работы

СПРАВКА
О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
на соискание ученой степени кандидата технических наук
«Структура и алгоритмы управления бесконтактной тяговой электромеханической
трансмиссией карьерных автосамосвалов с использованием преобразователей на
основе полностью управляемых полупроводниковых ключей»
КАМЫШЬЯНА АЛЬБЕРТА МИХАЙЛОВИЧА

Настоящей справкой подтверждается, что результаты исследований Камышьяна А.М. актуальны, представляют практический интерес и могут быть использованы в производственной деятельности АО «Новая ЭРА».

В частности, разработанные автором новые технические решения могут быть применены при производстве систем частотно-регулируемых электроприводов, оснащенных автономным источником энергии.

Предлагаемые автором решения позволяют гарантировать высокий уровень энергетической эффективности систем частотно-регулируемых электроприводов, оснащенных автономным источником энергии, в части генератор – выпрямитель, обеспечивая коэффициент мощности близким к единице за счет использования современной полупроводниковой базы в совокупности с энергоэффективными алгоритмами управления.

Заместитель директора конструкторского бюро
начальник отдела преобразовательной техники

20.09.2019

