

На правах рукописи

Камышнян Альберт Михайлович



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

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Козярук Анатолий Евтихиевич

Официальные оппоненты:

Пронин Михаил Васильевич

доктор технических наук, ПАО «Силовые машины», отдел проектирования электропривода и комплектных устройств, начальник сектора регулируемого общепромышленного электропривода;

Борисов Павел Александрович

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», ведущий инженер.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита состоится 30 сентября 2020 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1171 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

На защиту выносятся следующие положения:

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 больших грузных карьерных автосамосвалов обеспечивает повышение энергетической эффективности, обеспечивающей 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 сходимость 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 электромеха-

нических 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено общее описание работы, обоснована актуальность выполненной работы, сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе представлено современное состояние открытого способа добычи полезных ископаемых.

В настоящее время основная тенденция развития горной промышленности на обозримую перспективу рассматривается с упором на добычу полезных ископаемых открытым способом разработки. Вместе с тем сегодняшний этап развития отрасли также характеризуется ухудшением горнотехнических условий добычи полезных ископаемых, увеличением глубины открытых выработок.

Автомобильный транспорт является основным средством транспортировки горной массы со дна карьера до места переработ-

ки. При этом в последнее время наблюдается тенденция к увеличению общей доли горной массы, перевезенной автомобильным транспортом, при одновременном сокращении парка автомашин и увеличении грузоподъемности.

Карьерный автомобильный транспорт (карьерные автосамосвалы) по строению рамы разделяют на два основных вида: карьерные автосамосвалы с шарнирно-сочлененной рамой и карьерные автосамосвалы с жесткой рамой.

Грузоподъемность карьерных автосамосвалов с шарнирно-сочлененной рамой составляет от 20 до 60 тонн при массе автомобиля от 40 до 100 тонн. К достоинствам машин данной конструкции относятся высокая маневренность и возможность работы в условиях местности со сложным рельефом. Однако в то же самое время шарнирное соединение в этой конструкции является наиболее слабым местом, являясь точкой сосредоточения наибольших нагрузок. Применение данного узла в карьерных автосамосвалах большой грузоподъемности потребует значительного увеличения массогабаритных параметров шарнира, в связи с чем эти машины, как правило, обладают малой грузоподъемностью.

Карьерные автосамосвалы с жесткой рамой, в силу отсутствия подвижных элементов в конструкции рамы, обладают большей грузоподъемностью, от 30 до 500 тонн, в результате чего общая масса транспортных средств составляет от 60 тонн до более чем 390 тонн. 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.

С учетом тенденции к увеличению доли горной массы, перевозимой карьерным автомобильным транспортом, с одновременным увеличением грузоподъемности карьерных автосамосвалов в обозримой перспективе карьерные автосамосвалы большой грузоподъемности с жесткой рамой будут являться основным средством транспортировки при разработке месторождений открытым способом.

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

Среди производителей карьерной автомобильной техники наибольшее распространение получили два типа трансмиссий – гидромеханическая и электромеханическая. Однако ввиду меньших

массогабаритных показателей, более высоких тяговых свойств привода (большей скорости при движении на подъем), гибкости компоновки, защите первичного двигателя от перегрузок электромеханическая трансмиссия получила наиболее широкое распространение на большегрузных карьерных автосамосвалах.

Таким образом, в ближайшем будущем разработка месторождений открытым способом, несмотря на ухудшающиеся горнотехнические условия, будет являться основным способом добычи полезных ископаемых. Транспортировка горной массы в большинстве случаев будет осуществляться карьерным автомобильным транспортом большой грузоподъемности, оборудованным электромеханической трансмиссией. Однако ухудшение условий добычи будет сказываться на требованиях, предъявляемых к карьерной технике в плане улучшения эффективности, надежности и экологичности.

Во второй главе произведен анализ существующих систем электромеханических трансмиссий, определены их недостатки.

Основным поставщиком карьерной автомобильной техники средней и большой грузоподъемности для российского рынка является холдинг БелАЗ. При этом карьерные автосамосвалы, поставляемые на российский рынок, комплектуются преимущественно системами электромеханических трансмиссий производства ПАО «Силовые машины» (филиал «Электросила»).

Стоит отметить, что разработка альтернативных комплектов электромеханических трансмиссий для карьерной автомобильной техники также проводится концерном «Русэлпром» (ПАО «НИПТИЭМ») и ВПО «НИУ МЭИ». Основным отличием системы электромеханической трансмиссии разработки ВПО «НИУ МЭИ» является использование в качестве тяговых двигателей вентильный индукторно-реактивных двигателей. Однако применение данного типа электрических машин в качестве тяговых двигателей осложняется некоторыми недостатками. Вентильный индукторно-реактивный двигатель с самовозбуждением требует специального силового преобразователя, а также обладает существенными пульсациями момента на валу двигателя. Вентильный индукторно-реактивный двигатель с независимым возбуждением, в свою очередь, подвержен замыканиям магнитного потока возбуждения через подшипниковые узлы в обход магнитопровода статора, что требует принятия специальных мер, усложняющих конструкцию, кроме того, для него характерна проблема перегрева обмоток возбуждения. Общей проблемой машин данного типа является гармонический состав питающего тока, содержащий значительное количество высших

гармоник, что снижает электромагнитную совместимость оборудования. В связи с этим промышленное применение тяговых вентильных индукторно-реактивных двигателей на данном этапе технического развития не является целесообразным.

Электромеханические трансмиссии переменного тока производства ПАО «Силовые машины» строятся по схеме, основанной на использовании двухзвенного преобразователя частоты, включающей в себя дизельный двигатель, синхронный тяговый генератор переменного тока с самовозбуждением, два неуправляемых выпрямителя на основе диодов, два параллельно включенных инвертора на основе IGBT транзисторов, тяговые асинхронные двигатели, каждый из которых соединен через планетарный редуктор с ведущим колесом.

Как показал опыт эксплуатации, трансмиссия переменного тока с частотно регулируемые асинхронными тяговыми двигателями, получающими питание от автономных инверторов напряжения на основе IGBT транзисторов, является наиболее эффективным решением.

Промышленно выпускаемые системы электромеханических трансмиссий вне зависимости от типа электрических машин, используемых в качестве тяговых двигателей, обладают общим недостатком, связанным с работой тягового синхронного генератора через неуправляемый выпрямитель на нелинейную нагрузку. Данный недостаток приводит к снижению энергетической эффективности системы электромеханической трансмиссии в части тяговый синхронный генератор – выпрямитель, что обуславливает низкое значение коэффициента мощности этой части системы.

Электромеханическая трансмиссия карьерного автосамосвала представляет собой сложную систему со множеством взаимосвязанных параметров, вследствие чего для оценки параметров энергетической эффективности системы в части тяговый синхронный генератор – выпрямитель были выбраны методы математического и имитационного моделирования.

С целью сокращения времени моделирования схема электромеханической трансмиссии была условно разделена на две части 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 1).



Рисунок 1 – Моделируемая часть электромеханической трансмиссии

Для реализации имитационной модели был выбран пакет прикладных программ Matlab с расширением Simulink. На основе типовых функциональных блоков была реализована имитационная модель электромеханической трансмиссии, функциональная схема которой представлена на рисунке 2.

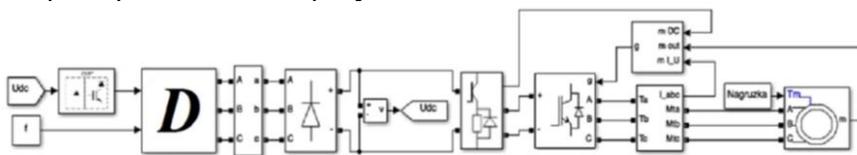


Рисунок 2 – Функциональная схема имитационной модели моделируемой части электромеханической трансмиссии, где **D** – дизель-генератор

Проверка адекватности модели выполнялась посредством сравнения данных моделирования и данных «отчета о работе приемочной комиссии опытного образца электропривода асинхронного для самосвала «БелАЗ» грузоподъемностью 136 т».

Для проверки адекватности системы управления было выполнено моделирование пуска асинхронного двигателя под нагрузкой. Сравнение результатов испытаний и эксперимента приведены ниже:

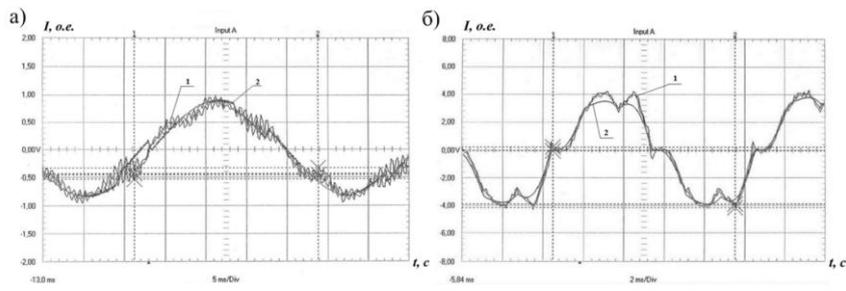


Рисунок 3 – Графики тока фазы тягового асинхронного двигателя в режиме тяги (а) и тока фазы тягового синхронного генератора (б), полученные экспериментально (1) и в результате имитационного моделирования (2)

Оценка энергетической эффективности системы синхронный генератор – неуправляемый выпрямитель в составе электромеханической трансмиссии производилась в наиболее энергоемком режиме работы, в режиме тяги асинхронного двигателя, так как в режиме электродинамического торможения вся энергия, вырабатываемая тяговыми двигателями, переведенными в генераторный режим, «утилизируется» тормозными резисторами звена постоянного тока.

Измерение коэффициента мощности производилось с момента запуска дизельного двигателя, соединенного с валом синхронного генератора, при последующем запуске частотно-регулируемого тягового асинхронного двигателя под номинальной нагрузкой (M_n) с дальнейшим полуторакратным набросом нагрузки ($1,5 M_n$) (рисунок 4 а).

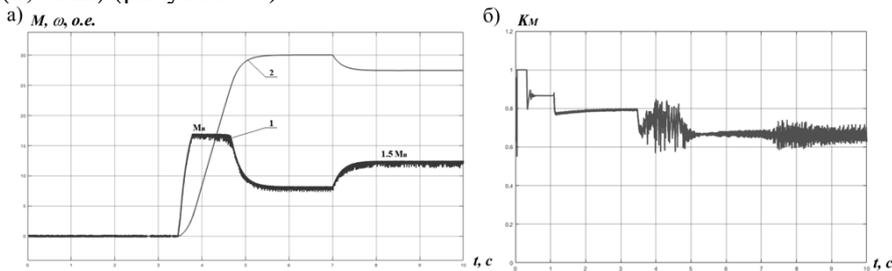


Рисунок 4 а – электромагнитный момент (1) и скорость (2) асинхронного двигателя, б – коэффициент мощности системы синхронный генератор – неуправляемый выпрямитель

Из графика, приведенного на рисунке 4 б видно, что при работе тягового асинхронного двигателя при номинальной нагрузке коэффициент мощности составил 0,8, а при увеличении нагрузки снизился до 0,7.

В третьей главе рассмотрены методы повышения технико-энергетических показателей систем электромеханических трансмиссий.

С целью повышения энергетической эффективности системы электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала в части системы синхронный тяговый генератор – выпрямитель было разработано два варианта модернизации, предполагающих как модернизацию существующей силовой части, так и установку дополнительного оборудования.

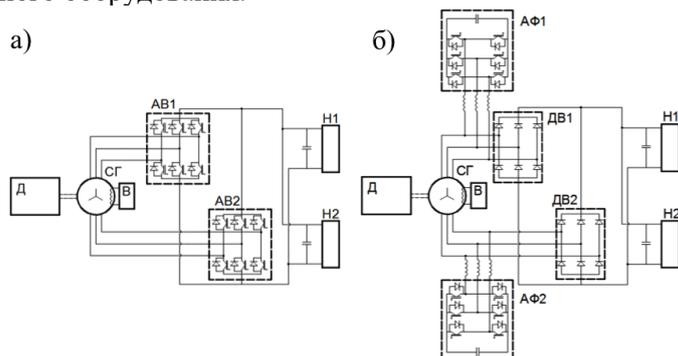


Рисунок 5 – Варианты модернизации электромеханической трансмиссии путем модернизации силовой части (а) и за счет установки дополнительного оборудования (б)

Для каждого из разработанных вариантов была синтезирована компьютерная модель, позволяющая оценить параметры энергетической эффективности и показатели качества переходных процессов в звене постоянного тока. Для варианта модернизации на основе применения активного выпрямителя (рисунок 5 а) были исследованы две системы управления – векторная система управления с ориентацией по вектору напряжения сети и система прямого управления мощностью.

Моделирование осуществлялось при работе каждой из разработанных схем на нелинейную нагрузку, эквивалентную нагрузке, создаваемой тяговыми двигателями автосамосвала. После запуска

процесса и выхода значения напряжения звена постоянного тока на установившееся значение производилось скачкообразное увеличение задания по напряжению.

Во время моделирования были произведены записи показателей датчиков напряжения звена постоянного тока для каждого варианта, а также вычислено значение коэффициента мощности системы в части источник – выпрямитель.

Все из исследованных вариантов показали способность к коррекции коэффициента мощности как в статических, так и в динамических режимах, обеспечивая значения коэффициента близкими к единице.

Выбор наиболее перспективного варианта модернизации осуществлялся на основании динамических показателей исследованных схем, оцениваемых на основании переходных процессов в звене постоянного тока каждой из схем.

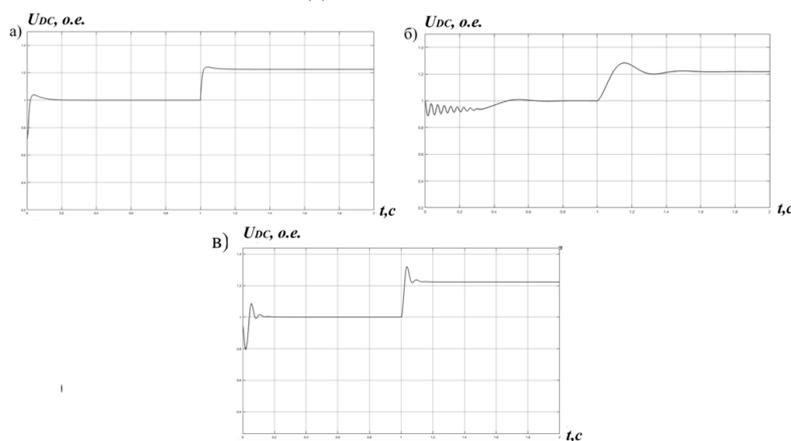


Рисунок 6 – Графики переходных процессов в звене постоянного тока при изменении задания по напряжению: а – при использовании активного выпрямителя с векторной системой управления с ориентацией по вектору напряжения, б – при использовании активного выпрямителя с системой прямого управления мощностью, в – при использовании активного фильтра

Из приведенных графиков видно преимущество использования активного выпрямителя, обеспечивающего наилучшее качество

переходного процесса (скорость выхода напряжения к заданному значению при минимальном перерегулировании).

Таким образом, вариант модернизации, основанный на применении активного выпрямителя с векторной системой управления с ориентацией по вектору напряжения, является наиболее перспективным.

В четвертой главе представлена реализация модернизированной электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала.

Повышение эффективности работы модернизированной системы электромеханической трансмиссии как сложного электромеханического комплекса достигается за счет модификации как электрической части, так и модификации вспомогательных систем.

С учетом выбранной схемы модернизации силовой части была разработана структура энергоэффективной электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала, представленная на рисунке 7.

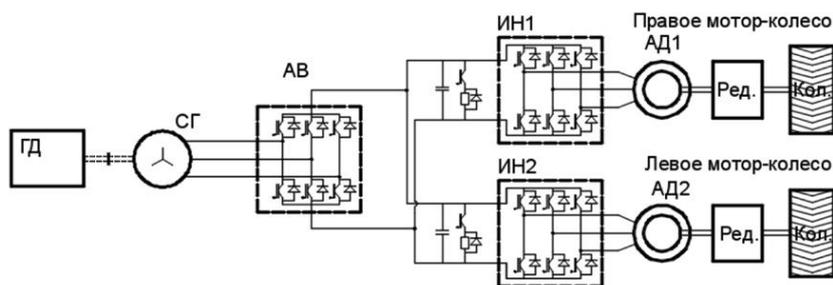


Рисунок 7 – Структурная схема модернизированной электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала

С учетом постоянно ухудшающейся экологической обстановки на дне карьеров с целью снижения содержания вредных веществ в отработанных газах первичного двигателя при производстве новых и модернизации существующих комплектов электромеханических трансмиссий рекомендуется использование первичных двигателей, работающих на газовом топливе (ГД), применение которых в составе опытных образцов электромеханических трансмиссий получило положительную оценку. Так, например, для автосамосвалов грузоподъемностью 250 тонн может быть использован газопоршневой двигатель ГПП производства АО «ОДК – Газовые турбины»

мощностью от 0,6 до 4,0 МВт или турбовальный двигатель ТВ7-117В производства АО «Климов» мощностью от 1,47 до 2 МВт.

Внедрение в структуру трансмиссии активного выпрямителя (АВ), обладающего возможностью поддержания заданного напряжения в звене постоянного тока, позволяет отказаться от регулирования выходного напряжения тягового синхронного генератора за счет изменения напряжения обмотки возбуждения. Это дает возможность перехода к применению в качестве тягового синхронного генератора (СГ) синхронного генератора с постоянными магнитами или синхронного генератора с самовозбуждением. Также согласно рекомендациям комиссии по приемке опытного образца асинхронного электропривода для автосамосвала БелАЗ осуществлен переход к трехфазному синхронному генератору с одной звездой у статорной обмотки.

Применение мотор-колес, оснащенных тяговыми асинхронными двигателями (АД) в паре с автономными инверторами напряжения (АИ), имеет большой положительный опыт промышленной эксплуатации. Кроме того, использование силовых IGBT ключей и векторной системы управления обеспечивает высокий показатель энергетической эффективности.

Проверка показателей энергетической эффективности модернизированной электромеханической трансмиссии осуществлялась методом математического и имитационного моделирования. На основе функциональной схемы, разработанной с учетом выбранного варианта модернизации, была выделена моделируемая часть электромеханической трансмиссии и синтезирована имитационная модель (рисунок 8).

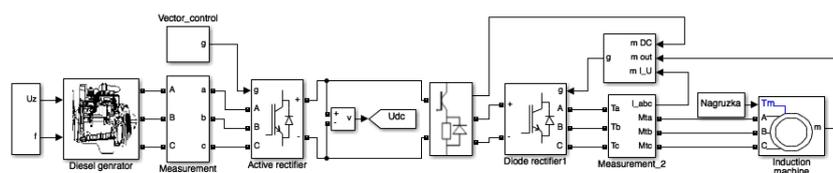


Рисунок 8 – Структурная схема имитационной модели модернизированной электромеханической трансмиссии

Моделирование выполнялось на основании технических данных электромеханической трансмиссии автосамосвала грузоподъемностью 130 тонн при условиях, аналогичных имитационному

моделированию электромеханической трансмиссии, оснащенной неуправляемым диодным выпрямителем.

По результатам моделирования были получены кривые тока и напряжения на выходе тягового синхронного генератора, представленные ниже:

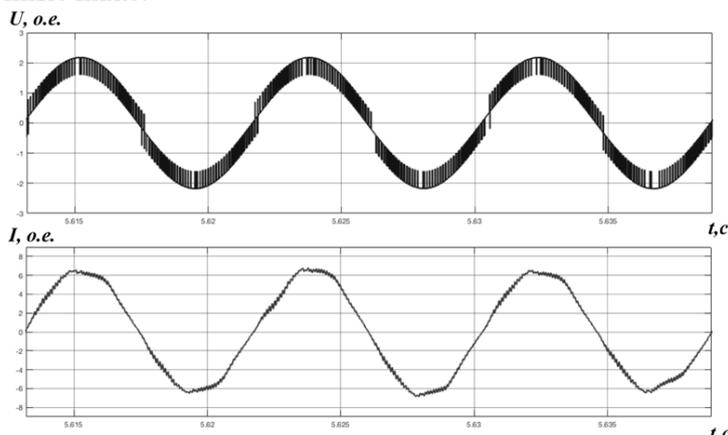


Рисунок 9 – Кривые тока и напряжения генератора в установившемся режиме

Коэффициент мощности системы генератор – активный выпрямитель на всем протяжении процесса моделирования:

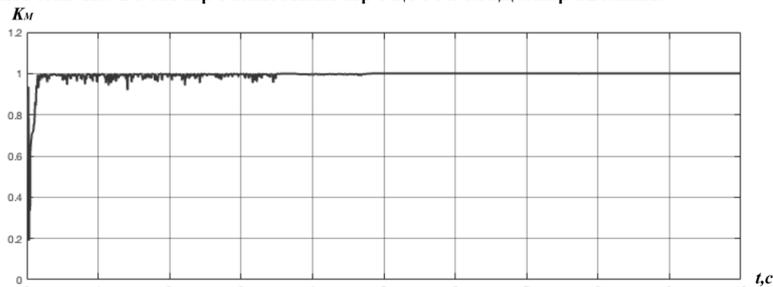


Рисунок 10 – Коэффициент мощности системы генератор – активный выпрямитель

Как видно из приведенных графиков, внедрение в состав электромеханической трансмиссии активного выпрямителя существенно улучшило формы кривых тока и напряжения. Коэффициент мощности части системы генератор – активный выпрямитель не

опускался ниже 0,92 в период холостого хода тягового генератора, при этом во время работы тяговых асинхронных двигателей как под номинальной, так и под полуторакратной нагрузкой значение коэффициента находилось в пределах 0,99 – 1.

Кроме того, активный выпрямитель поддерживал напряжение звена постоянного тока с отклонением от заданного значения, не превышающим 1 % как в установившихся, так и в переходных режимах работы при постоянном значении напряжения на выходе тягового синхронного генератора, что позволит использовать тяговый синхронный генератор с постоянными магнитами или самовозбуждением.

Внедрение метода токовой диагностики тяговых асинхронных двигателей на основании декомпозиции сигналов посредством Вейвлета преобразования, вместо преобразования Фурье, позволит диагностировать неисправности как механической, так и электрической частей, а также устранить такие недостатки последнего, как отсутствие временной локализации события, невозможность разложения базисными функциями сигналов с бесконечной крутизной, «размытие» диагностических особенностей сигналов по всему частотному диапазону спектра в процессе анализа. Дополнительно обеспечивается возможность выборочного контроля диагностических частот, что снижает требования к вычислительным ресурсам при выполнении диагностики. Данные меры приведут к повышению качества декомпозиции диагностических сигналов при диагностике.

Модернизация алгоритмического обеспечения системы контроля загрузки путем введения корректирующего коэффициента позволит повысить точность системы взвешивания груза при погрузке минимум на 2 %, что обеспечит снижение количества рейсов автосамосвала с недогрузом. Выполнение технологического взвешивания во время движения автосамосвала на основании разработанного алгоритма с использованием среднего значения давления в цилиндрах подвески позволит отказаться от использования стационарных средств взвешивания, требующих в процессе взвешивания замедления движения автосамосвала или его полной остановки, что сократит время рейса, при обеспечении точности измерений массы груза с погрешностью от 0,47 % до 1,01 %. Использование полученных данных о массе перевозимого груза в системе адаптивного управления тяговыми асинхронными двигателями позволит формировать максимальную силу тяги без проскальзывания ведущих колес], что обеспечит возможность поддержания максимальной скорости на протяжении всего рейса.

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 внедрения результатов диссертационной работы в производственную деятельность АО «Новая ЭРА».

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Kozyaruk, A. Improving the energy efficiency of the electro-mechanical 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 – С. 576 – 582 (ВАК, Scopus, GeoRef).

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus)

2. Bolshunova, O. Diagnostics of Electric Motors Technical Condition Using Wavelet Analysis [Текст] / 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).

3. Bolshunova, O. Diagnostics of Career Dump Truck Traction Induction Motors Technical Condition Using Wavelet Analysis [Текст] / 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).

4. Semenov, M. Modernization of the dump truck onboard system [Текст] / 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).

5. Bolshunova, O. Adaptive control system of dump truck traction electric drive [Текст] / 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).