

*На правах рукописи*



**ЧЕРНЫШКОВ Антон Сергеевич**

**КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
АГРЕГАТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИЛОВОГО ПРИВОДА  
АВТОМОБИЛЕЙ НА СТЕНДАХ С БЕГОВЫМИ БАРАБАНАМИ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2023 г.

Работа выполнена  
в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении  
высшего образования  
«Иркутский национальный исследовательский технический университет».

**Научный руководитель****Федотов Александр Иванович**

Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», заведующий кафедрой Автомобильного транспорта

**Официальные оппоненты:****Васильев Валерий Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», профессор кафедры «Автомобили и автомобильный транспорт» (г. Курган)

**Карпухин Кирилл Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент,  
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»), директор проекта (г. Москва)

**Ведущая организация**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Защита состоится «16» февраля 2024 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета ИРНТУ.05.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» и на официальном сайте: <https://www.istu.edu/deyatelnost/nauka/dissertatsii/elementy/>

Отзывы на автореферат (два экземпляра, заверенные гербовой печатью организации) направлять в адрес диссертационного совета ИРНТУ.05.01:

**664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, аудитория К-115;**

e-mail: [ds.05.01@istu.edu](mailto:ds.05.01@istu.edu); телефон: **8-(3952) 40-56-89**; факс: **8-(3952) 40-51-00**

Автореферат разослан: «22» декабря 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета ИРНТУ.05.01,  
кандидат технических наук



Яньков Олег Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность научного исследования.** В последнее десятилетие основным направлением в сфере автомобильного транспорта является акцент на экологические показатели колесных транспортных средств (КТС). Ужесточаются требования к количеству вредных выбросов от использования двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Это приводит к все большему распространению электрических силовых установок (ЭСУ), применяемых в автомобилях. На дорогах увеличивается численность автомобилей с электрическими силовыми приводами (АЭСП). Статистический анализ показывает, что их количество в дальнейшем будет только расти, а вопросы поддержания и восстановления их работоспособности, обеспечения качественной диагностики, в том числе контроля технического состояния агрегатов и тягово-динамических свойств (ТДС), в целях эффективной и безопасной эксплуатации АЭСП становятся особенно актуальны.

Сложность конструкций АЭСП, их систем и агрегатов часто приводит к периодическому возникновению отказов. Статистика показывает, что на ЭСУ и трансмиссию, составляющих электрический силовой привод (ЭСП), суммарно приходится до 39 % отказов, а на тяговую высоковольтную батарею (ТВБ) и высоковольтные цепи питания (ВВЦ) суммарно приходится до 28 % отказов. Подобные неисправности значительно снижают эффективность эксплуатации АЭСП на дорогах общего пользования. При этом значительная часть временных затрат при простое АЭСП приходится не на ремонтные работы при устранении неисправности, а на поиск неисправного агрегата и определение причин его отказа. Отсутствие современных методов диагностики, а также реализующего их оборудования не позволяет выполнять эффективный поиск неисправностей и их причин в АЭСП.

Для определения работоспособности агрегатов АЭСП обычно применяют диагностические сканеры, однако они не способны дать полную информацию об их техническом состоянии (ТС). При помощи диагностического сканера невозможно оценить развиваемую ЭСП мощность, эффективность работы трансмиссии ЭСП, эффективность работы ЭСУ в режиме рекуперации энергии, поскольку для определения этих параметров АЭСП должен полноценно функционировать на режимах, наиболее характерных для условий эксплуатации. Это также невозможно выполнить ни в условиях современных населенных пунктов, ни на дорогах общего пользования.

Эффективно осуществлять контроль ТС агрегатов автомобилей позволяют стенды с беговыми барабанами (СББ). Стенды являются одним из наиболее информативных инструментов для контроля ТС АЭСП в условиях эксплуатации.

Анализ методов диагностики АЭСП показывает, что стендовые методы контроля ТС автомобилей разработаны для решения ограниченного круга задач. Существующие методы диагностики и реализующее их оборудование не дают возможности задавать все тестовые режимы (ТР), идентичные режимам функционирования АЭСП в дорожных условиях. Современные стенды не способны измерять разнонаправленные усилия на каждом колесе автомобиля индивидуально. Это не позволяет выполнять полноценный контроль ТС агрегатов ЭСП при наличии индивидуальных электрических мотор-колес. При помощи современных методов контроля ТС практически невозможно оценивать эффективность функционирования АЭСП в режиме рекуперации энергии (РЭ), что препятствует получению полноценной информации о ТС агрегатов ЭСП автомобилей.

Контроль ТС агрегатов АЭСП **невозможно** качественно выполнять по причине **недостатка знаний** о процессах их функционирования на СББ, поскольку, во-первых, нет научно обоснованных ТР, при которых необходимо контролировать процессы функционирования агрегатов АЭСП в стендовых условиях. Во-вторых, отсутствуют знания о диагностических параметрах (ДП) и их нормативных значениях, пригодных для контроля ТС АЭСП на стендах. В-третьих, отсутствуют функциональные зависимости между параметрами ТС агрегатов АЭСП и ДП. *Вышеизложенное доказывает актуальность проведения научного исследования процесса функционирования АЭСП при контроле ТС их силовых систем и агрегатов на СББ.*

Исследование процессов функционирования АЭСП на СББ, научное обоснование тестовых режимов их функционирования в стендовых условиях, обоснование ДП и их нормативных значений, выявление функциональных зависимостей ДП от параметров ТС АЭСП **даст возможность разработать стендовый метод контроля ТС агрегатов АЭСП.** Это позволит значительно

повысить оперативность и качество контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ в условиях эксплуатации, снизить трудоемкость контроля их ТС и сократить простои АЭСП в процессе поиска неисправных силовых агрегатов, обеспечит контроль их ТС, основанный на доказательствах.

**Степень разработанности темы диссертационного исследования.** Вопросы совершенствования и разработки стендовых методов контроля технического состояния и диагностики автомобилей отражены в трудах ученых России и зарубежья. Разработка теоретических основ новых методов и средств диагностики, а также интенсивное ее развитие связаны с именами таких выдающихся ученых как: Аллилуев В.А., Аринин И.Н., Биргер И.А., Борц А.Д., Васильев В.И., Веденяпин Г.В., Верзаков Г.Ф., Говорущенко Н.Я., Гришкевич А.И., Гребенников А.С., Гурьянов С.И., Денисов А.С., Карпухин К.Е., Косолапов Г.М., Колчин А.В., Крамаренко Г.В., Левинсон Б.В., Лившиц В.М., Малюков А.А., Михлин В.М., Мирошников Л.В., Мозгалевский А.В., Павлов Б.В., Сергеев А.Г., Серов А.В., Терских И.П., Топалиди В.А., Федотов А.И., Черноиванов В.И., Харазов А.М., Н. Gethoffen, F.H. Lange, R. Rabiner и многие другие.

К настоящему времени глубоко проработаны вопросы теории и практики диагностики тормозных систем на стендах с беговыми барабанами. Теоретически и экспериментально хорошо проработаны вопросы контроля технического состояния бензиновых и дизельных силовых агрегатов КТС на СББ как силовым, так и динамическим методами. Достаточно хорошо проработаны вопросы контроля на СББ ТС агрегатов трансмиссии КТС.

Большой вклад в развитие конструкций и контроля технического состояния отечественных КТС с ЭСУ внесли научные коллективы таких учреждений как ФГБОУ ВО МАДИ, НГТУ, им. Р.Е. Алексеева, МАМИ, НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ», МГТУ им. Н.Э. Баумана и др.

Значимыми недостатками, общими для известных методов и средств контроля ТС силовых агрегатов и трансмиссии КТС являются, во-первых, невозможность измерения силовых параметров на колесах КТС при их диагностике на инерционных стендах, во-вторых, невозможность воспроизведения режимов разгона и выбега на силовых стендах и, в-третьих, отсутствует возможность измерения противоположных по направлению сил на колесах КТС во время контроля их ТС на СББ, что сильно ограничивает возможность контроля ТС агрегатов ЭСП КТС на СББ.

**Цель работы** – повышение информативности и оперативности контроля технического состояния агрегатов силового электрического привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами.

**Рабочей гипотезой** являлось предположение о том, что информативность и оперативность контроля технического состояния агрегатов силового электрического привода автомобилей можно значительно повысить, если его выполнять на стендах с беговыми барабанами при наиболее характерных для эксплуатации режимах, с использованием функциональных зависимостей, связывающих диагностические параметры и показатели их тягово-динамических свойств с параметрами технического состояния силовых агрегатов и систем.

**Объект исследования** – процесс функционирования автомобилей с электрическими силовыми приводами при контроле их технического состояния на стендах с беговыми барабанами.

**Предмет исследования** – функциональные зависимости диагностических параметров и показателей тягово-динамических свойств автомобилей с электрическими силовыми приводами от параметров технического состояния силовых агрегатов и систем при контроле их технического состояния на стендах с беговыми барабанами.

**Задачи исследования:**

1. Выявить агрегаты и неисправности, лимитирующие надежность электрического силового привода и провести анализ их отказов в условиях эксплуатации.

2. Разработать математическую модель для имитационного моделирования процесса функционирования автомобилей с электрическими силовыми приводами при контроле технического состояния их силовых агрегатов и систем на стендах с беговыми барабанами.

3. Научно обосновать тестовые режимы и количественные показатели, обеспечивающие контроль технического состояния агрегатов силового электрического привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами.

4. Выявить зависимости диагностических параметров и показателей тягово-динамических свойств автомобилей с электрическими силовыми приводами от параметров технического состояния их агрегатов и систем.

5. На основе выявленных зависимостей разработать методику контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей на стенде с беговыми барабанами.

6. Выполнить производственную проверку результатов исследования и дать им технико-экономическую оценку.

***Научная новизна и теоретическая значимость исследования:***

1) разработанная математическая модель впервые позволяет выполнять имитационное моделирование динамических процессов функционирования автомобилей с электрическими силовыми приводами на стенде с беговыми барабанами, а также проводить аналитические исследования изменения диагностических параметров от параметров технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей в процессе контроля технического состояния их агрегатов;

2) впервые выявленные зависимости диагностических параметров от параметров технического состояния автомобилей с электрическими силовыми приводами позволяют разрабатывать методы и оборудование для контроля их технического состояния на стендах с беговыми барабанами;

3) впервые научно обоснованные тестовые режимы функционирования автомобилей с электрическими силовыми приводами на стендах с беговыми барабанами позволяют значительно расширить теоретические предпосылки разработки методов диагностирования и контроля технического состояния автомобилей с электрическим приводом;

4) впервые выявленные нормативные показатели технического состояния, полученные при помощи нового подхода к установлению диагностических параметров, основанного на методе секущих, переводящем решение двумерной задачи с неоднозначными реализациями к одномерной задаче с однозначной зависимостью диагностического параметра от параметра технического состояния, позволяют значительно повышать информативность и качество контроля.

***Практическая значимость.*** Результаты выполненного исследования позволяют:

1) фирмам и предприятиям, занимающимся контролем ТС автомобилей, значительно повышать качество контроля ТС агрегатов ЭСП автомобилей за счет снижения трудоемкости и повышения оперативности работ;

2) предприятиям-изготовителям диагностического оборудования совершенствовать конструкции производимых ими СББ с целью обеспечения возможности контроля ТС агрегатов ЭСП автомобилей;

3) образовательным учреждениям использовать разработанную математическую модель и методику контроля ТС агрегатов ЭСП автомобилей в учебном процессе подготовки специалистов для сферы эксплуатации автомобильного транспорта.

***Методы исследований,*** использованные при выполнении данной работы:

1) процесс функционирования АЭСП экспериментально был исследован стендовым методом;

2) аналитическое исследование проводилось при помощи разработанной математической модели, позволяющей выполнять имитационное моделирование процесса функционирования КТС с ЭСП на СББ при контроле их ТДС в режиме реального времени, на основе численных методов, а также методов интегрального и дифференциального исчисления;

3) для планирования экспериментальных исследований были использованы методы математической статистики и теории вероятности;

4) при обработке данных, полученных в результате проведенных исследований и для оценки адекватности разработанной математической модели были использованы методы регрессионного анализа и наименьших квадратов.

***Научные положения, выносимые на защиту:***

1. Значительное повышение информативности и оперативности контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей возможно на основе определения их тягово-динамических свойств на стендах с беговыми барабанами при имитации функционирования на режимах, характерных для условий эксплуатации.

2. Разработанная математическая модель позволяет выполнять имитационное моделирование процессов функционирования автомобилей с электрическими силовыми приводами

на стенде с беговыми барабанами в режиме реального времени, проводить аналитические исследования зависимостей диагностических параметров агрегатов электрического силового привода от параметров их технического состояния и разрабатывать методы контроля их технического состояния.

3. Научно обоснованные тестовые режимы с выявленными зависимостями диагностических параметров от параметров технического состояния агрегатов электрических силовых приводов автомобилей позволяют выполнять контроль их технического состояния на стендах с беговыми барабанами.

4. Разработанная на основе выявленных зависимостей диагностических параметров от параметров технического состояния агрегатов электрических силовых приводов автомобилей методика, позволяет выполнять контроль их технического состояния на стендах с беговыми барабанами с использованием разработанного алгоритма и диагностической матрицы. Методику реализует разработанное стендовое оборудование, конструкция которого защищена патентом на полезную модель № 199093 от 13.08.2020 г.

***Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается:***

1) значительным объемом экспериментальных и аналитических исследований, выполненных в Научно-исследовательской лаборатории компьютерной диагностики КТС кафедры Автомобильного транспорта ФГБОУ ВО ИРНИТУ на аттестованном оборудовании;

2) высокими метрологическими показателями средств измерений;

3) корректным использованием современного математического аппарата, сопоставимостью теоретических и экспериментальных результатов, не противоречащих результатам ранее проведенных исследований.

***Апробация работы.*** В период с 2019 по 2023 гг. результаты исследований были рассмотрены и одобрены на: II Всероссийской научно-практической конференции «Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация», ЗабГУ, Чита, 30–31 октября 2018 г.; 106-й Международной научно-технической конференции ААИ «Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации», ИРНИТУ, Иркутск, 23–26 апреля 2019 г.; Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергоэффективность автотранспортных средств: нанотехнологии, информационно-коммуникационные системы, альтернативные источники энергии», ВГЛТУ, Воронеж, 4–7 июня 2019 г.; Международном автомобильном научном форуме (МАНФ-2019) «Технологии и компоненты наземных интеллектуальных транспортных систем», ФГУП «НАМИ», Москва, 16–18 октября 2019 г.; E3S Web of Conferences «Key Trends in Transportation Innovation», Хабаровск, 24–26 октября 2019 г.; Международном автомобильном научном форуме (МАНФ-2020) «Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы», ФГУП «НАМИ», Москва, 14–15 октября 2020 г.; 79-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, «Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта», МАДИ, Москва, 26–27 января 2021 г.; 110-й Международной научно-технической конференции ААИ «Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации», ИРНИТУ, Иркутск, 02–04 июня 2021 г.; Международном автомобильном научном форуме (МАНФ-2021) «Наземные инновационные транспортные средства с низким углеродным следом», ФГУП «НАМИ», Москва, 19–20 октября 2021 г.; 80-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ «Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта», МАДИ, Москва, 25–26 января 2022 г.; 81-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 30 января–3 февраля 2023 г.

***Область исследования*** соответствует пункту 15 паспорта научной специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта.

***Личный вклад автора.***

1) разработана математическая модель имитационного моделирования динамических процессов функционирования автомобилей с электрическими силовыми приводами на стендах с беговыми барабанами при контроле их тягово-динамических свойств в режиме реального времени;

2) выполнены аналитические и экспериментальные исследования процесса функционирования автомобиля с электрическим силовым приводом на стенде с беговыми барабанами при контроле его тягово-динамических свойств в типовых режимах, характерных для эксплуатации, обработаны результаты расчетов и экспериментов;

3) разработана методика и реализующее ее оборудование, позволяющие осуществлять контроль технического состояния агрегатов автомобилей с электрическими силовыми приводами на стендах с беговыми барабанами; Выполнена их производственная проверка.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 17 печатных трудов общим объемом 6,98 усл. п. л., (автору принадлежит 5,14 усл. п. л.), из них 3 публикации в изданиях из Перечня ВАК РФ, 3 публикации в зарубежных изданиях, 4 патента на полезную модель РФ, 1 свидетельство о государственной регистрации программ.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 205 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, содержащего основные результаты и выводы, списка использованных источников, включающего 207 наименований, в том числе 18 на иностранном языке, содержит 4 таблицы, 60 рисунков и 3 приложения с материалами результатов исследований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, приводится общая характеристика работы, описывается цель исследования и ставятся задачи, представляются основные защищаемые научные положения.

**В первой главе** проведен анализ существующих методов контроля ТС агрегатов современных АЭСП, представлен анализ статистики (рис. 1), характеризующей темпы развития рынка продаж АЭСП. Приведены результаты поискового эксперимента с анализом типовых режимов функционирования АЭСП в условиях эксплуатации. Представлены результаты поискового эксперимента с анализом неисправностей в ЭСП, влияющих на безопасность и эффективность эксплуатации АЭСП (рис. 2).

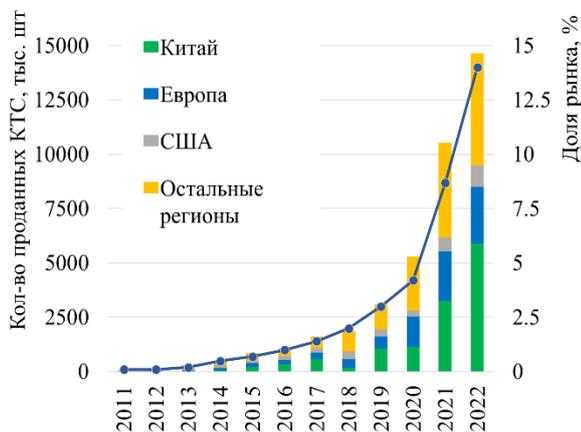


Рис. 1 – Статистика продаж АЭСП на мировом рынке



Рис. 2 – Основные системы и агрегаты АЭСП, в которых возникают неисправности

Анализ современных методов и средств контроля ТС агрегатов АЭСП показывает, что большинство диагностических стендов обладают узконаправленным функционалом, не позволяющим в полной мере осуществлять полноценный контроль ТС АЭСП. В результате анализа установлено, что разработка стендового метода, пригодного для полноценного контроля ТС агрегатов АЭСП, возможна за счет устранения существующего недостатка знаний о процессе функционирования АЭСП на СББ и связях между параметрами их функционирования и параметрами, характеризующими ТС.

В заключение главы ставится цель исследования, формулируются задачи и принимается к реализации общая структура диссертации.

**Вторая глава** посвящена разработке теоретических предпосылок контроля ТС агрегатов АЭСП при их функционировании на СББ.

Для выявления предварительного комплекса ДП исследуемый процесс был представлен в виде системы «Автомобиль с электрическим силовым приводом – Стенд с беговыми барабанами» («АЭСП – СББ»), структурная схема которой приведена на рис. 3.

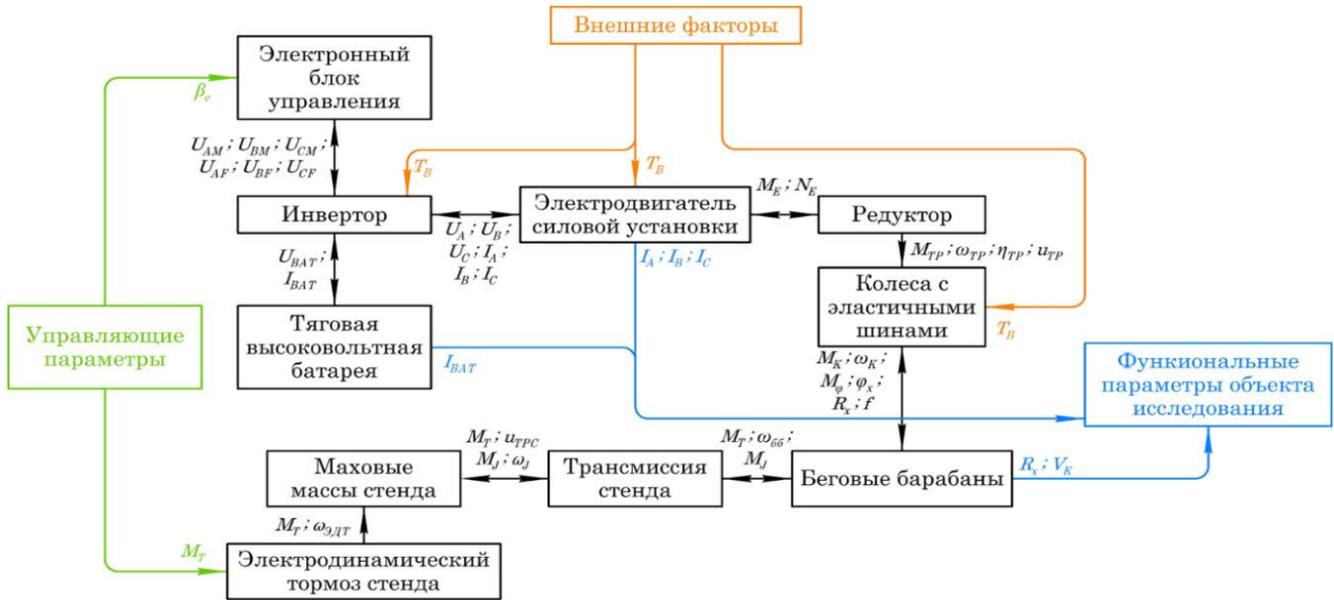


Рис. 3 – Структурная схема процесса функционирования системы «АЭСП – СББ»

Система была составлена из двух подсистем и позволяет выявлять взаимосвязи между ними, а также связи с внешними и внутренними факторами, оказывающими воздействие на исследуемый процесс. Разработанная структурная схема позволила определить управляющие параметры, которыми регулируется исследуемый процесс, и выходные параметры, по которым производится контроля ТС агрегатов АЭСП. Разработка структурной схемы исследуемого процесса позволила выявить взаимосвязи между ТС ОД и основными параметрами его функционирования, а также обосновать управляющие параметры ТР и предварительно выделить необходимые ДП.

С использованием структурной схемы были выявлены: управляющие факторы (коэффициент управления ЭСП  $\beta_e$ , тормозной момент электродинамического тормоза (ЭДТ)  $M_T$ , а также суммарный момент инерции маховых масс СББ  $\Sigma M_J$ ); внутренние факторы (потокосцепление  $\psi$  в электродвигателе (ЭД), сопротивление обмоток статора ЭД  $R_A, R_B, R_C$  и сопротивление высоковольтной цепи (ВВЦ) подключения тяговой высоковольтной батареи (ТВБ)  $R_{ВАТ}$ , емкость ТВБ  $Q_{ВАТ}$ , а также потери на трение в подшипниках ЭД  $d_e$  и редуктора  $d_{ред}$ ); выходные параметры (сила тяги в режиме разгона (сила, затрачиваемая на вращение трансмиссии, в режиме выбега)  $R_X$  на колесах АЭСП; скорость  $V_A$ , имитируемая на стенде; ток, потребляемый ЭД  $I_e$ ; мощность  $N_e$  и крутящий момент  $M_e$ , развиваемые ЭД).

Анализ данных поискового эксперимента, представленного в первой главе, и структурной схемы исследуемого процесса (рис. 3) позволил обосновать ТР стендового метода контроля ТС АЭСП, аналогичные типовым режимам их функционирования в условиях эксплуатации. Были выделены следующие ТР, пригодные для контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ при контроле их ТДС: разгон по горизонтальной дороге, разгон с нагрузкой, движение с постоянной скоростью, режим свободного выбега, режим рекуперативного торможения. Для каждого режима составлены уравнения силового баланса на ведущих колесах АЭСП в соответствии с выражениями (1-5).

$$F_K = F_f + F_W + F_J \cdot \delta_J; \quad (1)$$

$$F_K = F_f + F_\alpha + F_W + F_J \cdot \delta_J; \quad (2) \quad F_K = F_f + F_W; \quad (3)$$

$$F_J \cdot \delta_J = F_{TЭД} + F_f + F_W + F_T; \quad (4) \quad F_J = F_f + F_W; \quad (5)$$

Представленные выражения (1-5) пригодны для описания силового баланса АЭСП при его движении в дорожных условиях, однако не позволяют описать аналогичные режимы при функционировании на СББ. Для описания силового баланса на ведущих колесах АЭСП при контроле его ТДС стендовым методом приведены формулы (6-10), позволяющие имитировать типовые дорожные режимы функционирования АЭСП на СББ.

$$\frac{M_e \cdot i_{TP} \cdot \eta_{TP}}{r_{ko}} = \frac{M_T \cdot i_T \cdot \eta_T}{r_6} + \frac{1}{r_{ko}} \sum \frac{J_M d\omega_M}{r_6 dt} + \frac{\sum J_K \frac{d\omega_K}{dt}}{r_{ko}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{TP} \cdot \eta_{TP}}{r_{ko}} \quad (6)$$

$$\frac{M_e \cdot i_{TP} \cdot \eta_{TP}}{r_{ko}} = \frac{M_T \cdot i_T \cdot \eta_T}{r_6} + \frac{1}{r_{ko}} \sum \frac{J_M d\omega_M}{r_6 dt} + \frac{\sum J_K \frac{d\omega_K}{dt}}{r_{ko}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{TP} \cdot \eta_{TP}}{r_{ko}} \quad (7)$$

$$\frac{M_e \cdot i_{TP} \cdot \eta_{TP}}{r_{ko}} = \frac{M_T \cdot i_T \cdot \eta_T}{r_6} \quad (8)$$

$$\frac{1}{r_{ko}} \sum \frac{J_M d\omega_M}{r_6 dt} + \frac{\sum J_K \frac{d\omega_K}{dt}}{r_{ko}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{TP} \cdot \eta_{TP}}{r_{ko}} = \frac{M_{TD} \cdot i_{TP} \cdot \eta_{TP}}{r_{ko}} + \frac{M_T \cdot i_T \cdot \eta_T}{r_6} \quad (9)$$

$$\frac{1}{r_{ko}} \sum \frac{J_M d\omega_M}{r_6 dt} + \frac{\sum J_K \frac{d\omega_K}{dt}}{r_{ko}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{TP} \cdot \eta_{TP}}{r_{ko}} = \frac{M_T \cdot i_T \cdot \eta_T}{r_6} \quad (10)$$

Для аналитического исследования влияния выявленных взаимосвязей и факторов на выбранный комплекс ДП была составлена математическая модель для имитационного моделирования процесса функционирования АЭСП на СББ в соответствии со схемой исследуемого процесса (рис.3). Для составления дифференциальных уравнений перемещений кузова АЭСП была разработана двумерная расчетная схема автомобиля на СББ (рис. 4).

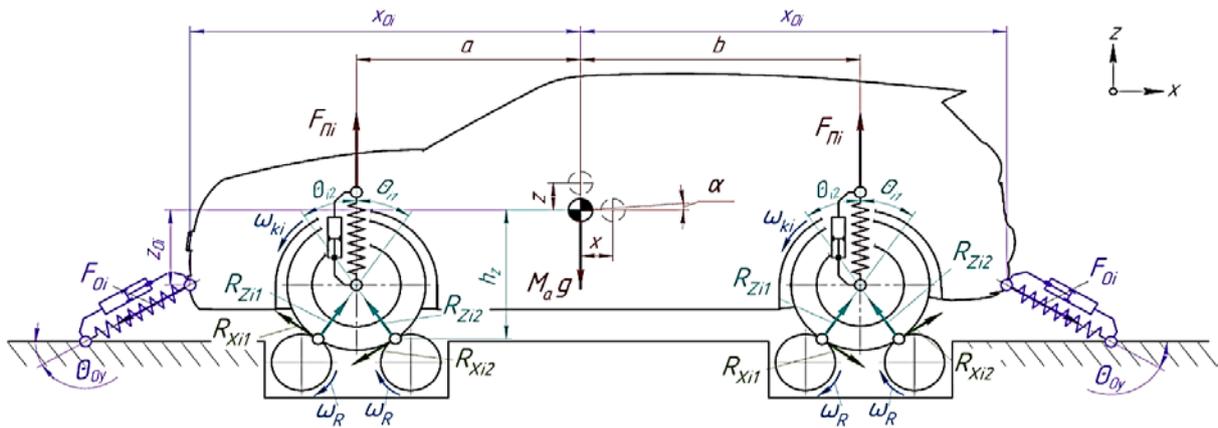


Рис. 4 – Двухмерная расчетная схема процесса функционирования системы «АЭСП – СББ»

Линейные и угловые перемещения кузова АЭСП при его функционировании на СББ в разработанной математической модели описываются в соответствии с

$$M_a \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum R'_{Xi} + \sum R'_{Zi} + \sum F'_{Oi}; \quad (11)$$

$$M_a \frac{d^2 z}{dt^2} = \sum R'''_{Xi} + \sum R'''_{Zi} + \sum F'''_{Oi} - M_a \cdot g; \quad (12)$$

$$J_y \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \sum (R'_{Xi} \cdot z_i) + \sum (R'_{Zi} \cdot z_i) + \sum (R'''_{Xi} \cdot x_i) + \sum (R'''_{Zi} \cdot x_i) + \sum (F'_{Oi} \cdot z_{Oi}) + \sum (F'''_{Oi} \cdot x_{Oi}) + \sum (F_{Pi} \cdot a) + \sum (F_{Pi} \cdot b) \quad (13)$$

дифференциальными уравнениями (11–13), учитывающими перемещения кузова АЭСП, жесткости и демпфирующие свойства элементов подвески, а также ограничителей перемещения кузова.

Колеса с эластичными шинами (ЭШ) выполняют важную роль в процессе функционирования АЭСП. Именно они являются основным элементом, через который реализуется связь АЭСП и ББ диагностического стенда. ЭШ передают как касательные, так и нормальные реакции, возникающие при функционировании АЭСП. При качении колес АЭСП по ББ диагностического стенда возникает проскальзывание, определяющие режимы функционирования колес с ЭШ. Для корректного описания такого взаимодействия были составлены расчетные схемы сил, возникающих в пятнах контакта ЭШ с опорными поверхностями беговых барабанов стенда в тяговом (рис. 5, а) и тормозном (рис. 5, б) режимах.

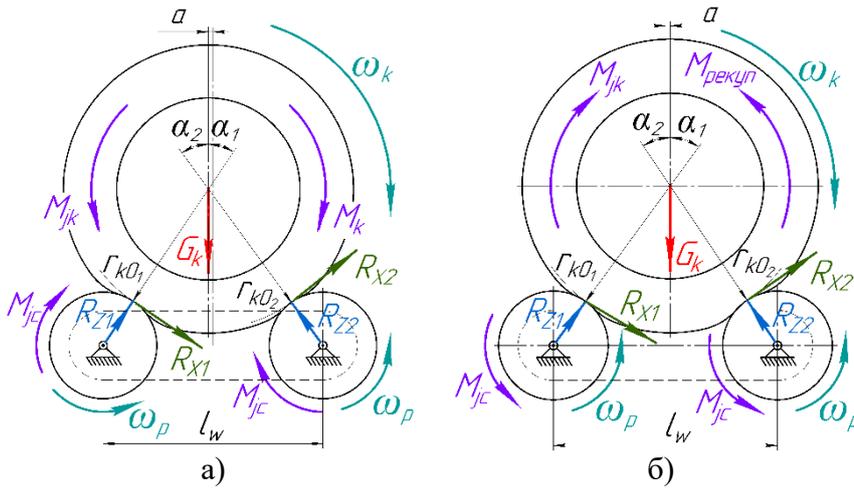


Рис. 5 – Схема сил при взаимодействии колес

а) – тяговый режим взаимодействия;

б) – тормозной режим взаимодействия

$$\frac{d\omega_k}{dt} = \frac{M_k - R_{X1} \cdot r_{k0_1} - R_{X2} \cdot r_{k0_2} - M_{jk} - M_{jc} - M_f}{J_k}; \quad (14)$$

$$\frac{d\omega_k}{dt} = \frac{-M_T + M_{jk} + R_{X1} \cdot r_{k0_1} + R_{X2} \cdot r_{k0_2} + M_{jc} - M_f}{J_k}; \quad (15)$$

$$R_{Xi} = \varphi_{max} \cdot R_{zi} \cdot f(S); \quad (16) \quad f(S) = \sin(A \cdot \arctg(B \cdot S)). \quad (17)$$

$$S = 1 - \frac{\omega_k \cdot r_k}{\omega_{66} \cdot r_{66}}. \quad (18) \quad S = 1 - \frac{\omega_{66} \cdot r_{66}}{\omega_k \cdot r_{k0}}; \quad (19)$$

Для расчета крутильных колебаний в трансмиссии автомобиля при его функционировании на стенде была составлена кинематическая схема, учитывающая моменты инерции компонентов трансмиссии АЭСП, его колес и элементов трансмиссии стенда, а также жесткости и демпфирующие свойства связующих элементов, таких как полуоси, карданные валы и цепные передачи. Разработанная кинематическая схема была преобразована с учетом передаточных чисел в линейную схему (рис. 6), разделенную на участки.

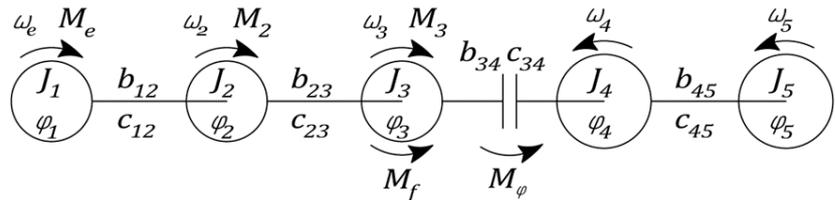


Рис. 6 – Приведенная схема для описания крутильных колебаний в системе «АЭСП – СФБ»

В общем виде вращение компонентов трансмиссии, учитывающее крутильные колебания, определяется в соответствии с дифференциальными уравнениями (20–24).

Математическая модель ЭСП автомобиля включает описание ЭД, инвертора, ПИ-регулятора тока, блоков широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и формирователя модулирующего сигнала (ФСМ). Структурная схема ЭСП представлена на рис. 7. Синхронный ЭД с постоянными магнитами (СДПМ) является основой ЭСП автомобиля,

$$\frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = \frac{M_e}{J_1 + J_2 + 2 \cdot J_3}; \quad (20)$$

$$\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = \frac{c_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - c_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - b_{12} \frac{d\varphi_2}{dt}}{J_2}; \quad (21)$$

$$\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = \frac{c_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - c_{34} \cdot (\varphi_3 - \varphi_4) - b_{23} \frac{d\varphi_3}{dt} - F_f \cdot r_{k0}}{J_3}; \quad (22)$$

$$\frac{d^2\varphi_4}{dt^2} = \frac{R_{x1}r_r - F_f r_{k0}}{J_4}; \quad (23) \quad \frac{d^2\varphi_5}{dt^2} = \frac{c_{45} \cdot (\varphi_4 - \varphi_5) - b_{45} \frac{d\varphi_5}{dt}}{J_5}; \quad (24)$$

который приводит его в движение. В модели использован метод расчета характеристик СДПМ в невращающихся координатах  $ABC$  с целью использования разработанной модели для сопоставления ДП с параметрами ТС ЭСУ, а также для реализации возможности изменения параметров ТС ЭД в ЭСУ. Модель позволяет рассчитывать не только крутящий момент  $M_e$  на роторе СДПМ в тяговом режиме, но и генерируемые им напряжение и ток в режиме рекуперации энергии. Построение системы управления СДПМ реализовано во вращающихся координатах с применением преобразователей координат  $ABC \Rightarrow dq$  и  $dq \Rightarrow ABC$ .

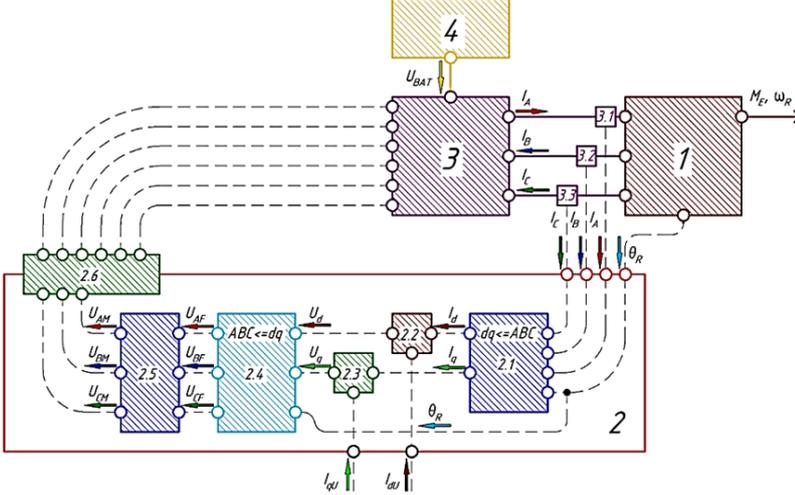


Рис. 7 – Структурная схема математической модели ЭСП автомобиля  
ЭДС, в соответствии с выражениями (26).

$$\begin{cases} E_{1A} = \sin(\Theta_\psi + \delta_A); \\ E_{1B} = \sin(\Theta_\psi + \delta_B); \\ E_{1C} = \sin(\Theta_\psi + \delta_C); \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} E_A = \psi_F Z_P \omega_e E_{1A}; \\ E_B = \psi_F Z_P \omega_e E_{1B}; \\ E_C = \psi_F Z_P \omega_e E_{1C}; \end{cases} \quad (26)$$

Угол поворота ротора  $\Theta_R$  и скорость вращения поля  $\omega_\psi$  зависят от количества полюсов  $Z_P$  статора и рассчитывается по выражениям (27) и (28).

$$\Theta_\psi = \Theta_e \cdot Z_P; \quad (27) \quad \omega_\psi = \omega_e \cdot Z_P. \quad (28)$$

Мгновенные значения токов  $I_A, I_B, I_C$  определяются дифференциальными уравнениями (29).

$$\begin{cases} \frac{dI_A}{dt} = \frac{2U_A - U_B - U_C - 3R_{\Phi i} I_A + \psi_F Z_P \omega_e (E_{1B} + E_{1C} - 2E_{1A})}{3(L_{\Phi i} - L_{\Phi \Phi i})}; \\ \frac{dI_B}{dt} = \frac{2U_B - U_A - U_C - 3R_{\Phi i} I_B + \psi_F Z_P \omega_e (E_{1C} + E_{1A} - 2E_{1B})}{3(L_{\Phi i} - L_{\Phi \Phi i})}; \\ \frac{dI_C}{dt} = \frac{2U_C - U_B - U_A - 3R_{\Phi i} I_C + \psi_F Z_P \omega_e (E_{1A} + E_{1B} - 2E_{1C})}{3(L_{\Phi i} - L_{\Phi \Phi i})}; \\ \frac{dI_A}{dt} + \frac{dI_B}{dt} + \frac{dI_C}{dt} = 0; \end{cases} \quad (29)$$

Крутящий момент  $M_e$  на роторе СДПМ рассчитывается по формуле (30), скорость ротора  $\omega_e$  определяется выражением (31). Управление крутящим моментом  $M_e$  на роторе СДПМ осуществляется блоком электронного управления (см. рис. 7), в состав которого входят преобразователи координат 2.1 и 2.4, фильтрующий элемент, регуляторы токов 2.3 и 2.2, ФСМ 2.5, а также блок ШИМ 2.6. Для качественного управления крутящим моментом  $M_e$  на роторе ЭД необходимо использовать вращающуюся систему координат с осями  $dq$ . Для преобразования из одной системы координат в другую воспользуемся известными преобразованиями Кларк и Парка. Преобразования  $ABC \Rightarrow dq$  осуществляются по формулам (32–33).

ПИ-регулятор устанавливает выходное значение напряжения  $U_d$  и  $U_q$  для осей  $d$  и  $q$ , в зависимости от величины ошибки между заданным и действующим рассчитанным значением тока, и описан выражениями (34). Максимальный ток  $I_{qmax}$  ограничивается таким образом, чтобы крутящий момент  $M_e$  на роторе СДПМ не превышал максимально допустимого значения, при котором существует вероятность механического повреждения ЭД (35).

С использованием разработанной математической имитационной модели процесса функционирования АЭСП на СББ был проведен поисковый эксперимент с целью уточнения комплекса ДП и выявления областей локальных диагнозов (ЛД) при изменении параметров ТС АЭСП при его функционировании на СББ (рис. 8).

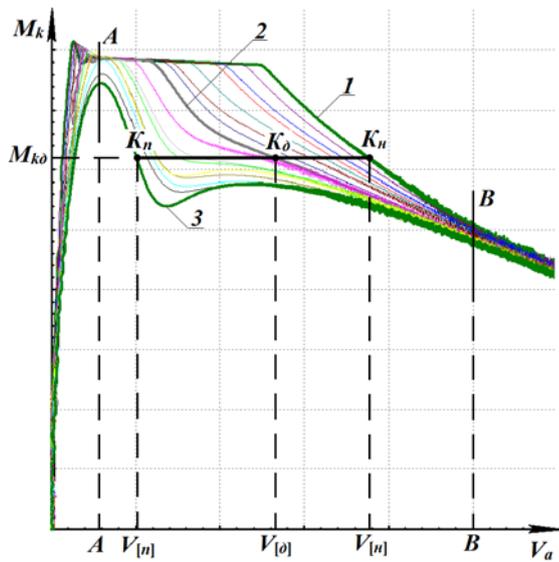


Рис. 8 – Выявление областей ЛД

функционирования на СББ был разработан алгоритм, представленный на рис. 9.

Данный алгоритм защищен свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021613529 «Расчет параметров процесса функционирования электромобиля при контроле его тягово-динамических качеств на стенде с беговыми барабанами» от 10 марта 2021 г. Предложенный алгоритм позволяет исследовать процесс функционирования системы «АЭСП – СББ» и определять основные эксплуатационные параметры автомобиля, а именно его ТДС.

Метод контроля ТС агрегатов АЭСП, основанный на применении диагностической матрицы (ДМ), позволяет фиксировать состояние ОД в зависимости от измеренных параметров его функционирования. Чтобы управлять этим методом, получать и анализировать информацию, а также заполнять данные в ДМ необходимо применять управляющий алгоритм. Разработанный алгоритм, представленный на рис. 10, позволяет выполнять контроль ТС АЭСП на СББ, а также количественно оценивать ТС их систем и агрегатов.

$$M_e = \frac{I_A E_A + I_B E_B + I_C E_C}{\omega_e}; \quad (30)$$

$$\omega_e = \frac{1}{J} \int (M_e - M_c) dt; \quad (31)$$

$$I_d = \left( \frac{I_B - I_C}{\sqrt{3}} \right) \cdot \sin \theta_E + I_A \cdot \cos \theta_E; \quad (32)$$

$$I_q = \left( \frac{I_B - I_C}{\sqrt{3}} \right) \cdot \cos \theta_E - I_A \cdot \sin \theta_E \quad (33)$$

$$\begin{cases} U_d = k_{pd}(I_{dU} - I_d) + k_{id} \int (I_{dU} - I_d) dt; \\ U_q = k_{pq}(I_{qU} - I_q) + k_{iq} \int (I_{qU} - I_q) dt; \end{cases} \quad (34)$$

$$I_{qmax} = \frac{I_{nom} M_{max}}{M_{nom}}; \quad (35)$$

Распознавание ТС АЭСП при контроле его ТДС на СББ и выявление зависимостей ДП от параметров ТС ОД в работе реализовано при помощи метода наибольших сечений, суть которого заключается в следующем. В каждой области ЛД диагностических фазовых характеристик (ДФХ) необходимо определить диагностические участки с максимальной чувствительностью к изменениям параметров ТС ЭСП автомобиля. Отрезок этой секущей, ограниченный крайними ДФХ, будет являться диагностическим участком (см. рис. 8). Пересечение ДФХ, с этой секущей позволило определить ДП ТС. Нормативные значения определялись статистическим методом на основе толерантных границ.

Для дальнейшего аналитического исследования влияния изменения параметров ЭСП автомобиля на основные эксплуатационные параметры его

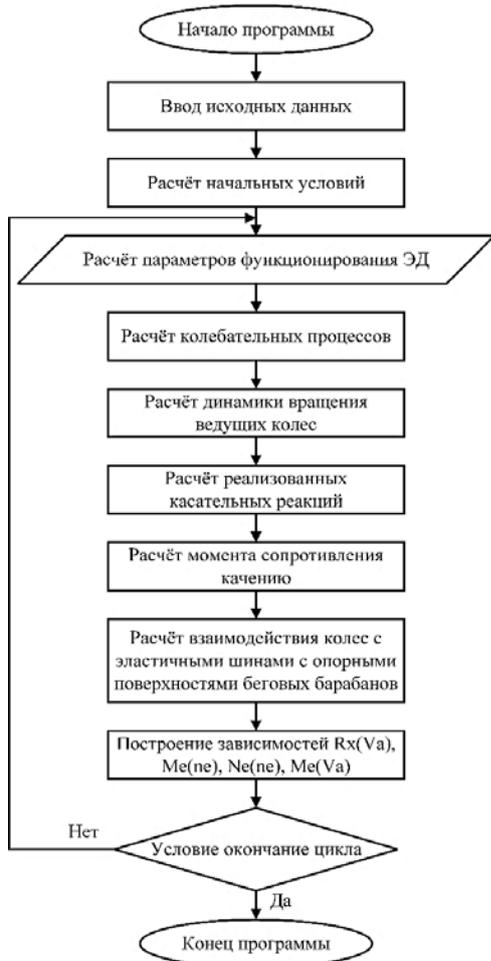


Рис. 9 – Алгоритм расчета параметров функционирования системы «АЭСП – СББ»

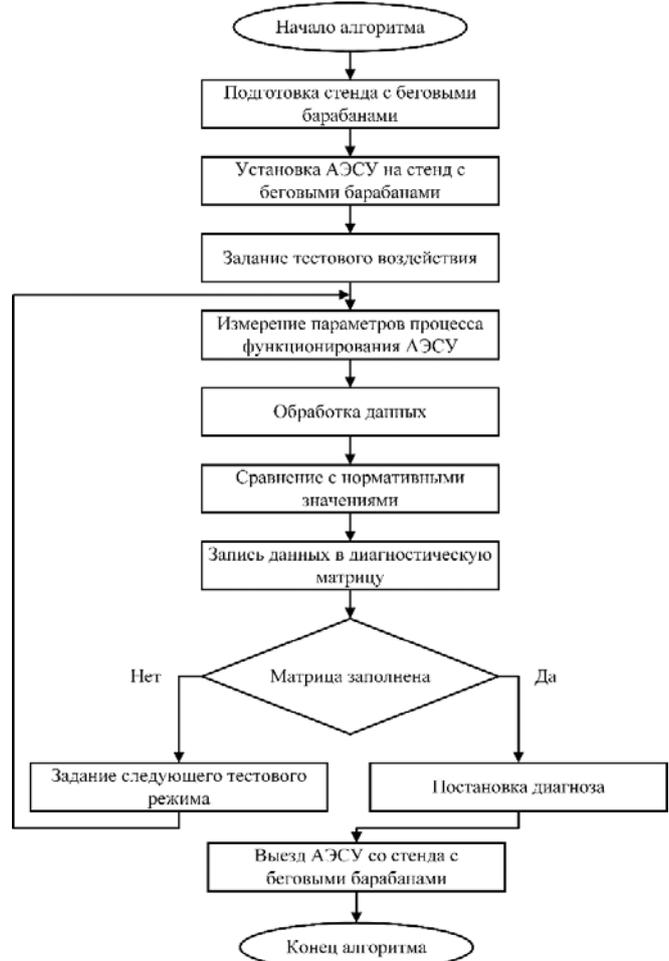


Рис. 10 – Алгоритм контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ с использованием диагностической матрицы

**Третья глава** посвящена разработке методик экспериментального исследования и реализующего их оборудования. Приводится описание общей и частных методик экспериментальных исследований, аппаратного обеспечения экспериментальных исследований, определены нормативные значения ТР разрабатываемого метода. Для осуществления процесса функционирования АЭСП на СББ были разработаны или усовершенствованы следующие методики:

1. Методика планирования экспериментального исследования.
2. Методика калибровки измерительных систем СББ.
3. Методика оценки погрешности измерений.
4. Методика экспериментального исследования процесса функционирования АЭСП на СББ при контроле его ТДС в режиме имитации:
  - a. Тяговый режим;
  - b. Тяговый режим с нагрузкой;
  - c. Движение с постоянной скоростью;
  - d. Свободный выбег;
  - e. Рекуперативное торможение.
5. Методика оценки адекватности математической модели.

Проведенное научное обоснование ТР контроля ТС агрегатов АЭСП стендовым методом позволило выдвинуть требования, которым

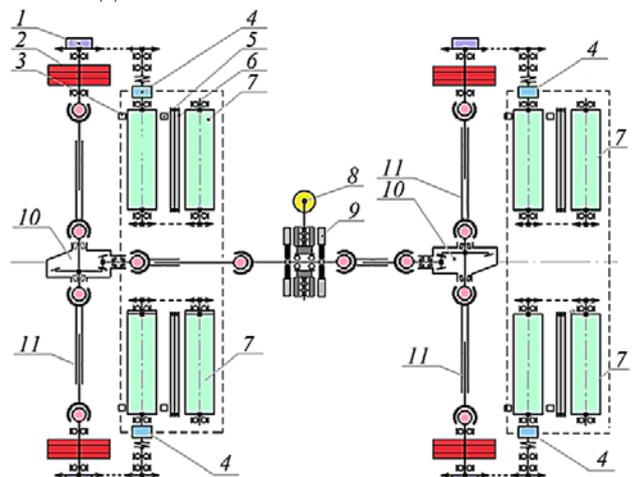


Рис. 11 – Структура ГПС ИРНТУ для контроля ТС агрегатов АЭСП

должен соответствовать СББ, пригодный для получения полноценной информации о ТС ОД:

- 1) обеспечение типовых режимов функционирования АЭСП;
- 2) наличие инерционных и силовых нагрузочных устройств;
- 3) жесткая кинематическая связь всех беговых барабанов стенда;
- 4) возможность измерения скорости вращения каждого колеса АЭСП индивидуально;
- 5) возможность измерения разнонаправленных сил на каждом колесе АЭСП;
- 6) возможность измерения параметров функционирования ЭСУ автомобиля.

Соответствующий всем перечисленным требованиям гибридный полноопорный стенд (ГПС) был разработан, создан и защищен Патентом на полезную модель № 199093 U1 «Гибридный универсальный полноопорный стенд для контроля технического состояния колесных транспортных средств» от 13.08.2020 г. Кинематическая схема и внешний вид разработанного ГПС для контроля ТС агрегатов АЭСП приведены на рис. 11 и 12 соответственно. Конструкция ГПС позволяет создавать как инерционную нагрузку за счет разгона инерционных масс 2 для имитации неустановившихся режимов функционирования АЭСП, так и силовую нагрузку за счет ЭДТ 9 для реализации режимов функционирования АЭСП с постоянной скоростью. Беговые барабаны 7 ГПС кинематически жестко связаны между собой, что обеспечивает режим качения колес АЭСП аналогично дорожным условиям. Измерение силовых параметров на каждом колесе осуществляется бесконтактными магнитоэлектрическими датчиками 4, позволяющими отслеживать продольные на каждом колесе АЭСП индивидуально как в тяговом, так и в тормозном режимах, что предоставляет возможность оценивать ТС ЭСП и трансмиссии автомобиля в режимах свободного выбега и рекуперативного торможения.

**В четвертой главе** приведены результаты математического моделирования и экспериментального исследования процесса функционирования АЭСП на СББ при контроле его ТДС.

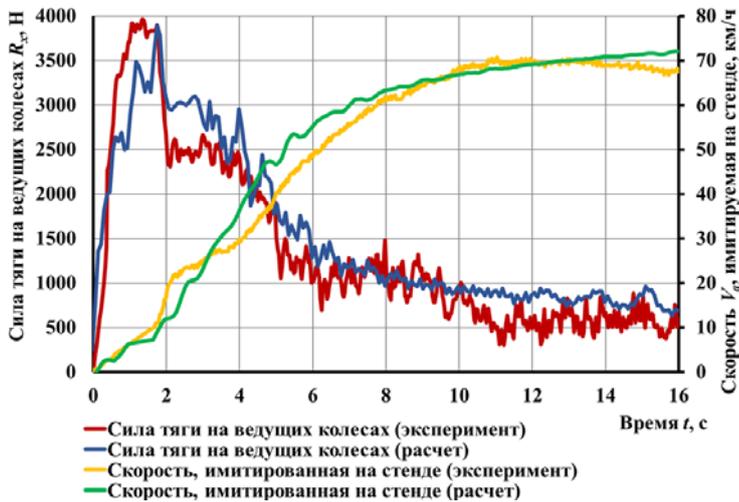


Рис. 13 – Оциллограмма тестирования АЭСП KIA Soul EV в режиме разгона до 70 км/ч на полноопорном стенде

имитационного моделирования процесса функционирования АЭСП на СББ. При моделировании были проведены многовариантные виртуальные эксперименты с изменением параметров ТС ЭСП автомобиля. Были просчитаны основные параметры функционирования АЭСП на СББ, такие как сила тяги на ведущих колесах  $R_x$  на ведущих колесах автомобиля; скорость  $V_a$ , имитируемая на СББ; ток потребления ЭСУ  $I$ ; фазные токи  $I_A, I_B, I_C$ , протекающие в обмотках ЭД; время разгона  $t_p$  и выбега  $t_b$ . ТС агрегатов ЭСП изменялось при помощи следующих параметров ТС:



Рис. 12 – Внешний вид ГПС ИРНТУ с АЭСП KIA Soul EV

Экспериментальное исследование проводилось реализацией процесса функционирования АЭСП KIA Soul EV на ГПС в научно-исследовательской лаборатории технической диагностики ИРНТУ. В процессе исследования были измерены основные параметры функционирования АЭСП. Полученные данные позволили сравнить результаты экспериментальных исследований и аналитических расчетов, провести проверку адекватности разработанной математической модели и сделать вывод о ее адекватности. Сравнение представлено на рис. 13.

Аналитическое исследование проводилось с использованием разработанной математической модели путем

потокосцепление  $\psi$ ; сопротивление фаз ЭД  $R_A, R_B, R_C$ ; сопротивление ВВЦ подключения ТВБ  $R_{ВАТ}$ ; диссипации  $d_{тр}$  в трансмиссии АЭСП. Результаты многовариантных расчетов представлены на рис. 14-15.

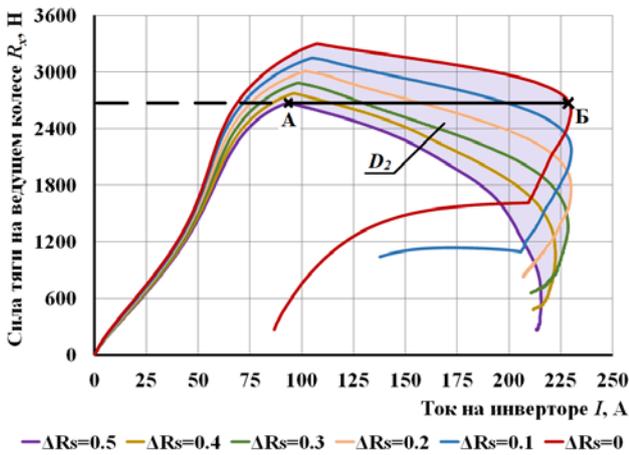


Рис. 14 – Выявление функциональной связи между сопротивлением  $R_s$  обмоток статора ЭД и силой тока  $I$  на инверторе АЭСП методом наибольших сечений

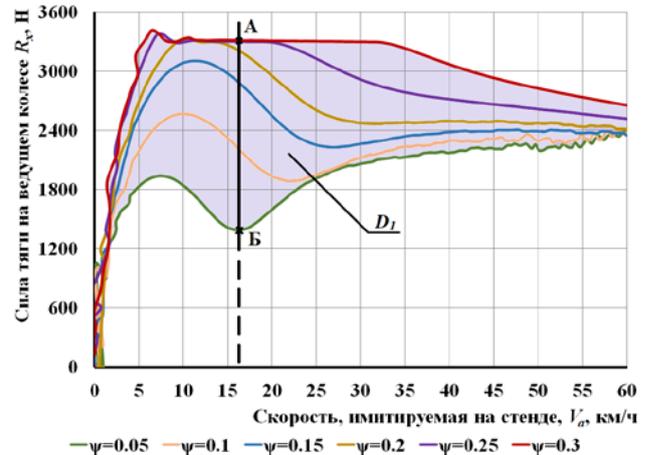


Рис. 15 – Выявление функциональной связи между потокосцеплением  $\psi$  ЭД и силой тяги  $R_x$  на колесе АЭСП методом наибольших сечений

Полученные зависимости функциональных параметров АЭСП были проанализированы на предмет их диагностической информативности. С помощью метода наибольших сечений были найдены участки с наибольшей чувствительностью ДП к изменению параметров ТС, в результате чего были получены зависимости изменения основных ДП от параметров ТС, а также от параметров процесса функционирования АЭСП на заданных режимах (рис. 16–19).

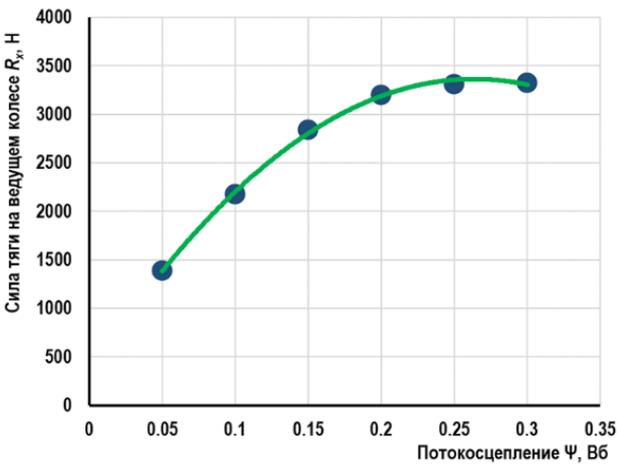


Рис. 16 – Зависимость ДП  $R_x$  от параметра ТС ЭД  $\psi$  при скорости, имитируемой на СББ,  $V_a = 16$  км/ч

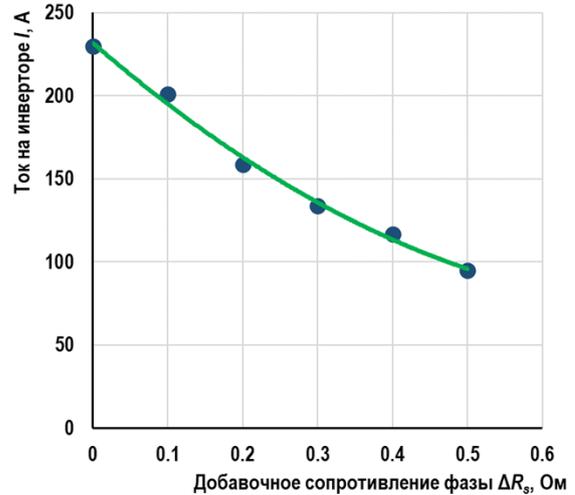


Рис. 17 – Зависимость ДП  $I$  от параметра ТС ЭСП  $R_s$  при силе тяги на колесе АЭСП  $R_x = 2670$  Н

Экспериментально подтверждены результаты теоретического исследования по формированию оптимального комплекса ДП, включающего в себя однозначные и чувствительные параметры. Получены зависимости, позволяющие контролировать ТС агрегатов ЭСП автомобиля на основе измерения его функциональных параметров, параметров энергопотребления и ТДС при заданных тестовых воздействиях, позволили сформировать ДМ (рис. 20). Определены на основе статистического метода предельно допустимые значения ДП, учитывающих вероятностные процессы возникновения неисправностей изменения ТС. Особенностью нормирования ДП разрабатываемого метода является необходимость нормирования параметров отдельно для каждого ТР диагностирования.

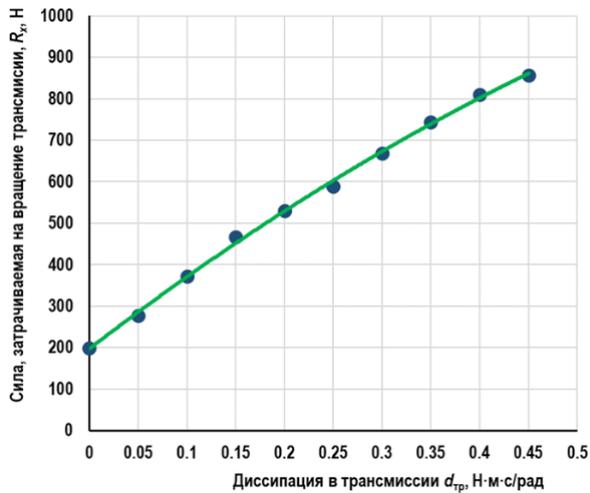


Рис. 18 – Зависимость ДП  $R_x$  от параметра ТС трансмиссии АЭСП  $d_{tr}$  при скорости, имитируемой на СББ,  $V_a = 63$  км/ч

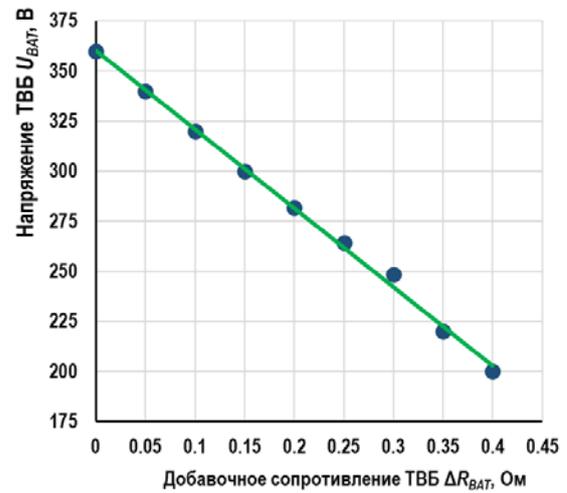


Рис. 19 – Зависимость ДП  $U_{BAT}$  от параметра ТС АЭСП  $R_{BAT}$  при скорости, имитируемой на стенде,  $V_a = 5$  км/ч

Разработанная ДМ обеспечивает возможность количественного контроля ТС АЭСП на основе разработанного нового и совершенствования существующих методов контроля ТС силовых агрегатов и систем АЭСП при их функционировании на СББ.

Режим функционирования автомобиля с ЭСУ	Контролируемый параметр	Нормативные значения	Д И А Г Н О З				
			АЭСУ исправен	Неисправна ЭСУ	Неисправна трансмиссия	Неисправны высоковольтные цепи	Неисправна ТВБ
Тяговый режим	Сила фазных токов $I_A, I_B, I_C$ , А	$I_A = I_B = I_C$ $275 < I_l < 300$	0	-1	1	-1	0
	Сила тока от ТВБ $I_{BAT}$ , А	$240 < I_{BAT} < 260$	0	1	0	0	-1
	Напряжение ТВБ $U_{BAT}$ , В	$U_{BAT} > 350$	0	0	0	0	-1
	Время разгона $t_p$ , с	$t_p < 10,5$	0	1	1	1	0
	Сила тяги на ведущих колесах $R_x$ , Н	$3400 < R_x < 3700$	0	-1	-1	-1	0
Тяговый режим с нагрузкой	Сила фазных токов $I_A, I_B, I_C$ , А	$I_A = I_B = I_C$ $315 < I_l < 340$	0	-1	1	-1	0
	Сила тока от ТВБ $I_{BAT}$ , А	$270 < I_{BAT} < 290$	0	1	0	0	-1
	Напряжение ТВБ $U_{BAT}$ , В	$U_{BAT} > 345$	0	0	0	0	-1
	Время разгона $t_p$ , с	$t_p < 13,8$	0	1	1	1	0
	Сила тяги на ведущих колесах $R_x$ , Н	$3900 < R_x < 4200$	0	-1	-1	-1	0
Движение с постоянной скоростью	Сила фазных токов $I_A, I_B, I_C$ , А	$I_A = I_B = I_C$ $80 < I_l < 105$	0	-1	1	-1	0
	Сила тока от ТВБ $I_{BAT}$ , А	$50 < I_{BAT} < 60$	0	1	0	-1	-1
	Сила тяги на ведущих колесах $R_x$ , Н	$340 < R_x < 500$	0	-1	-1	-1	0
Рекуперативное торможение	Сила фазных токов $I_A, I_B, I_C$ , А	$I_A = I_B = I_C$ $65 < I_l < 80$	0	0	0	0	0
	Сила тока от ТВБ $I_{BAT}$ , А	$50 < I_{BAT} < 60$	0	0	0	-1	-1
	Напряжение ТВБ $U_{BAT}$ , В	$U_{BAT} > 350$	0	0	0	0	0
	Сила рекуперативного торможения $R_x$ , Н	$R_x > 1680$	0	-1	0	0	0
Свободный выбег	Сила, затрачиваемая на вращение трансмиссии $R_x$ , Н	$R_x < 245$	0	0	1	0	0
	Время выбега $t_e$ , с	$t_e > 17$	0	0	-1	0	0

Рис. 20 – ДМ постановки диагноза при контроле ТС агрегатов АЭСП KIA Soul EV на СББ

**Пятая глава** содержит результаты расчета экономической эффективности применения разработанного метода контроля ТС агрегатов АЭСП. Экономический эффект достигается за счет сокращения издержек, связанных с неоправданным ремонтом и длительным простоем АЭСП при определении ТС их агрегатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки, обеспечивающие повышение информативности и оперативности контроля технического состояния

агрегатов силового электрического привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами, имеющие существенное значение для развития транспортной отрасли страны.

По результатам исследования сделаны следующие выводы:

1. В процессе анализа отказов агрегатов электрического силового привода автомобилей в условиях эксплуатации установлено, что лимитирующими надежностью в условиях эксплуатации агрегатами, являются: тяговый электродвигатель; инвертор; высоковольтные цепи питания; тяговая батарея; редуктор. Наиболее характерными для агрегатов электрического силового привода неисправностями являются *электрические* (выход из строя силовых ключей инвертора, окисление контактов, нарушение изоляции проводников, замыкания и обрывы) и *механические* (износ и разрушение подшипников, валов, шестерен, корпуса редуктора). Следствием этих неисправностей является изменение параметров: *повышение сопротивления высоковольтных цепей, снижение емкости тяговой батареи, повышение силовых потерь в трансмиссии, снижение потокосцепления в электродвигателе*. Установлены диапазоны изменения числовых значений этих параметров в реальных условиях эксплуатации.

2. Разработанная математическая модель имитационного моделирования процесса функционирования автомобилей при контроле технического состояния агрегатов электрического силового привода на стендах с беговыми барабанами учитывает:

- параметры, характеризующие процесс функционирования электрического силового привода;
- процессы взаимодействия колес с эластичными шинами с беговыми барабанами стенда;
- динамические процессы в системе «Автомобиль с электрическим силовым приводом – Стенд с беговыми барабанами»;
- изменения технического состояния агрегатов трансмиссии и электрического силового привода автомобиля.

Модель впервые позволяет выявлять зависимости диагностических параметров и показателей тягово-динамических свойств автомобилей с электрическими силовыми приводами от параметров технического состояния их агрегатов и систем в стендовых условиях.

3. Научно обоснованные тестовые режимы (*Тяговый, Тяговый с нагрузкой, Движение с постоянной скоростью, Свободный выбег, Рекуперативное торможение*) позволяют с высокой информативностью и оперативностью выявлять техническое состояние агрегатов электрического силового привода автомобилей в процессе их функционирования на стендах с беговыми барабанами и контролировать их тягово-динамические свойства, значительно снижая трудоемкость такого контроля в условиях эксплуатации.

4. Выявленные зависимости диагностических параметров и показателей, характеризующих тягово-динамические свойства автомобилей с электрическими силовыми приводами, от параметров технического состояния их агрегатов и систем показывают, что:

- снижение потокосцепления  $\Psi$  *электродвигателя* электрического силового привода переднеприводного автомобиля категории М1 от 0,3 до 0,05 Вб, вызывает снижение силы тяги на ведущих колесах  $R_x$  на 72% в тяговом режиме, при скорости  $V_a = 16$  км/ч;
- увеличение сопротивления обмоток *статора электродвигателя* электрического силового привода переднеприводного автомобиля категории М1  $R_i$  на 0,5 Ом вызывает снижение мощности привода  $N_e$  в тяговом режиме при тяговой силе ведущих на колесах  $R_x = 2670$  Н на 58,3%;
- повышение диссипации  $d_{тр}$  *в трансмиссии* переднеприводного автомобиля с электрического силового привода категории М1 от 0 до  $0,45 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$  в режиме выбега с начальной скорости  $V_a = 63$  км/ч вызывает увеличение силы, затрачиваемой на вращение ведущих колес, в 4,29 раза;
- увеличение сопротивления в цепи подключения *тяговой высоковольтной батареи* переднеприводного автомобиля категории М1 с электрическим силовым приводом  $R_{BAT}$  от 0 Ом до 0,4 Ом приводит к снижению напряжения тяговой батареи  $U_{BAT}$  на 44% при контроле в тяговом режиме на скорости  $V_a = 5$  км/ч.

5. Методика контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей, разработанная на основе выявленных зависимостей параметров, характеризующих тягово-динамические свойства автомобилей с электрическими силовыми приводами, от параметров технического состояния их агрегатов и систем, осуществляется с использованием разрабо-

танных алгоритма и диагностической матрицы. Она позволяет выполнять диагностику и количественный контроль технического состояния агрегатов электрического силового привода при функционировании автомобилей на стендах с беговыми барабанами. Методика реализуется на разработанном стендовом оборудовании, конструкция которого защищена патентом на полезную модель № 199093 U1 от 13.08.2020 г.

б. Производственную проверку результатов проведенного исследования выполняли на предприятиях, осуществляющих сервисное обслуживание и экспертизу автомобилей. Она показывает, что разработанная методика контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами и реализующее её оборудование позволяют с высокой информативностью осуществлять контроль технического состояния агрегатов силовых электрических установок в условиях СТО – (ошибки «пропуск отказа» снижены на 29%, ошибки «ложная тревога» снижены на 17%), на 13 – 20% снизить трудоемкость поиска неисправного агрегата и сокращать время пребывания автомобиля в СТО на 12-32%.

Разработанная математическая модель для имитационного моделирования процесса функционирования автомобилей с электрическими силовыми приводами на стендах с беговыми барабанами прошла производственную проверку, а методика контроля технического состояния принята к внедрению в АО «ГАРО-ТРЕЙД» г. Великий Новгород, ООО «ФРИТРЕЙН» г. Екатеринбург, ООО «СТО Bravo» г. Иркутск.

*Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.* Дальнейшими перспективами данной работы могут стать исследования, посвященные поэлементной диагностике электрических силовых приводов автомобилей, их агрегатов и систем, с учетом широких диагностических возможностей стендов с беговыми барабанами.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ*

1. Яньков, О. С. Математическая модель силовой установки электроавтомобиля / О. С. Яньков, А. С. Чернышков // Грузовик. – 2022. – № 9. – С. 15-21. – DOI 10.36652/1684-1298-2022-9-15-21.
2. Федотов, А. И. О тестовых режимах контроля тягово-динамических свойств колесных транспортных средств с электрическим приводом на стендах с беговыми барабанами / А. И. Федотов, О. С. Яньков, А. С. Чернышков // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 8. – С. 16-21.
3. Чернышков А.С. О функциональной диагностике автомобилей с электрической силовой установкой / А.С. Чернышков, А.И. Федотов, О.С. Яньков // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 53-68.

### *Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и WoS*

4. Experimental study of metrological properties of magnetostrictive sensors when changing their design parameters / O. S. Yan'kov, A. S. Chernyshkov, M. V. Korniyakov, A. V. Gilev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICIAE 2019, Irkutsk, 27 мая – 01 2019 года. Vol. 632. – Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012025. – DOI 10.1088/1757-899X/632/1/012025.
5. Fedotov, A. Traction control and diagnostics of electric and unmanned vehicles on roller stands / A. Fedotov, O. Yankov, A. Chernyshkov // E3S Web of Conferences : Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019, Khabarovsk, 24–26 октября 2019 года. Vol. 157. – Khabarovsk: EDP Sciences, 2020. – P. 01021. – DOI 10.1051/e3sconf/202015701021.
6. Yankov, O. Complex for Research of Power and Speed Losses in Tires of the Car, at Their Rolling on Rollers of the Diagnostic Stand / O. Yankov, A. Chernyshkov, R. Sergushko // Safety in Aviation and Space Technologies : Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century". – Cham : Springer, 2022. – P. 271-280. – DOI 10.1007/978-3-030-85057-9\_23.

### *Патенты*

7. Патент на полезную модель № 199093 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13. Гибридный универсальный полноопорный стенд для контроля технического состояния колесных транспортных средств : № 2020111732 : заявл. 23.03.2020 : опубл. 13.08.2020 / А. И. Федотов, О. С.

Яньков, А. С. **Чернышков** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ").

8. Патент на полезную модель № 198516 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/28. бесконтактный измеритель для силового тормозного роликового стенда : № 2020113148 : заявл. 26.03.2020 : опубл. 14.07.2020 / А. И. Федотов, О. С. Яньков, А. С. **Чернышков** [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Фритрейн".

9. Патент на полезную модель № 215729 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13. Гибридный стенд с планетарным балансирным редуктором для контроля технического состояния колесных транспортных средств : № 2022130297 : заявл. 23.11.2022 : опубл. 23.12.2022 / А. И. Федотов, О. С. Яньков, А. С. **Чернышков**, П. А. Киселев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет".

10. Патент на полезную модель № 213401 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13, G01M 17/007. Стенд контроля технического состояния колесных транспортных средств с обгонной муфтой : № 2022106787 : заявл. 16.03.2022 : опубл. 09.09.2022 / А. И. Федотов, О. С. Яньков, М. В. Холманских, А. С. **Чернышков** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет".

#### *Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ*

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613529 Российская Федерация. Расчет параметров процесса функционирования электромобиля при контроле его тягово-динамических качеств на стенде с беговыми барабанами : № 2021612484 : заявл. 03.03.2021 : опубл. 10.03.2021 / А. И. Федотов, О. С. Яньков, А. С. **Чернышков** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

#### *Другие публикации*

12. Яньков, О. С. Совершенствование конструкции силоизмерительного магнитоэлектрического датчика тормозного стенда / О. С. Яньков, А. С. **Чернышков** // Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация : II Всероссийская научно-практическая конференция, Чита, 30–31 октября 2018 года. – Чита: Забайкальский государственный университет, 2018. – С. 53-59.

13. **Чернышков, А. С.** О скоростных и силовых потерях в шинах ведущих колес АТС при их диагностировании на стендах с беговыми барабанами / Федотов А.И., Яньков О.С., Чернышков А.С. // Энергоэффективность автотранспортных средств: нанотехнологии, информационно-коммуникационные системы, альтернативные источники энергии : Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Воронеж, 4-7 июня 2019г. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2019. – С. 234-240.

14. **Чернышков, А. С.** Экспериментальное исследование метрологических характеристик магнитоэлектрических датчиков при изменении их конструктивных параметров / А. С. Чернышков, О. С. Яньков, Г. А. Безносков // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации : материалы 106-й Международной научно-технической конференции, Иркутск, 23–26 апреля 2019 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 514-524.

15. **Чернышков, А. С.** Математическая модель взаимодействия колеса с опорной поверхностью роликов диагностического стенда в среде "Универсальный Механизм" / О. С. Яньков, П. А. Киселев, М. И. Штерман // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации : Материалы 110-й Международной научно-технической конференции, Иркутск, 02–04 июня 2021 года. Том 2. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. – С. 119-132.

16. **Чернышков, А. С.** Повышение качества контроля тягово-динамических свойств электромобилей на стендах с беговыми барабанами / А. С. Чернышков // Проблемы технической эксплу-

атации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : Сборник научных трудов, посвященный 85-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, по материалам 79-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 26–27 января 2021 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – С. 196-202.

17. **Чернышков, А. С.** Математическое моделирование процесса функционирования электро-мобиля при контроле его тягово-динамических свойств на стенде с беговыми барабанами / А. С. Чернышков, О. С. Яньков // Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : Сборник научных трудов по материалам 80-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 25–26 января 2022 года / Под общей редакцией А.А. Солнцева. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2022. – С. 89-97.

Подписано в печать 14.12.2023. Формат 60 x 90 / 16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Зак.149. Поз. Плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83