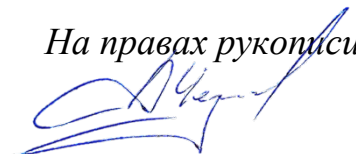


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт авиамашиностроения и транспорта

Кафедра Автомобильного транспорта

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
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Федотов Александр Иванович,
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Иркутск – 2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Состояние вопроса и задачи исследования	15
1.1 Общие положения	15
1.2 Обзор конструкций АЭСП	18
1.3 Методы и средства диагностирования АЭСП.....	23
1.4 Анализ стендов для диагностики АЭСП	27
1.5 Обзор математических моделей процессов функционирования автомобилей и их систем на СББ	30
1.5.1 Обзор математических описаний ЭД.....	30
1.5.2 Обзор математических моделей эластичных шин.....	36
1.6 Задачи исследования.....	41
1.7 Выводы по первой главе диссертации	42
2 Теоретическое обоснование контроля ТДС АЭСП на СББ.....	44
2.1 Выявление взаимосвязей в системе «АЭСП – СББ».....	45
2.2 Обоснование ТР контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ.....	47
2.3 Математическая модель системы «АЭСП – СББ»	55
2.3.1 Математическое описание положения АЭСП на СББ	55
2.3.2 Математическое описание взаимодействия ЭШ с ББ диагностического стенда.....	63
2.3.3 Математическое описание крутильных колебаний в системе «АЭСП – СББ».....	67
2.3.4 Математическое описание ЭСП автомобиля	71
2.4 Алгоритм расчета ТДС АЭСП при его функционировании на СББ	84
2.5 Методы определения областей нахождения ДП.....	86
2.5.1 Распознавание ТС АЭСП при контроле их ТС на СББ.....	86
2.5.2 Распознавание ТС АЭСП на основе метода НС	88

2.5.3 Метод постановки диагноза на основе ДМ.....	91
2.6 Выводы по второй главе диссертации	92
3 Методики экспериментальных исследований.....	94
3.1 Методика экспериментального исследования процесса функционирования АЭСП на СББ	95
3.2 Обоснование требований к оборудованию для реализации методик экспериментального исследования процесса функционирования АЭСП на СББ	100
3.3 Оборудование для реализации методик экспериментального исследования процесса функционирования АЭСП на СББ	104
3.3.1 Система измерения силовых параметров функционирования АЭСП.....	107
3.3.2 Система силового нагружения АЭСП	110
3.3.3 Система измерения скоростных параметров функционирования АЭСП.....	112
3.3.4 Система измерения параметров функционирования ЭСП автомобиля	114
3.4 Методика планирования экспериментального исследования.....	116
3.5 Методика калибровки систем измерения оборудования	118
3.5.1 Методика калибровки системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП.....	122
3.5.2 Методика калибровки системы измерения скоростных параметров функционирования АЭСП.....	126
3.6 Методика оценки погрешностей измерения	128
3.7 Методика анализа адекватности математической модели	132
3.8 Выводы по материалам третьей главы	134
4 Результаты исследования	136
4.1 Результаты аналитического исследования процесса функционирования АЭСП на СББ	136
4.2 Результаты экспериментального исследования.....	142

4.3 Оценка адекватности разработанной математической модели процесса функционирования АЭСП на СББ	147
4.4 Определение ДП, характеризующих ТС АЭСП, в процессе функционирования АЭСП на СББ	149
4.4.1 Выявление функциональной связи потокосцепления ψ с силой тяги R_x на колесе АЭСП	150
4.4.2 Выявление функциональной связи тока I на инверторе с сопротивлением R_S обмоток статора ЭД	152
4.4.3 Выявление функциональной связи диссипации $d_{тр}$ трансмиссии АЭСП с силой R_x , затрачиваемой на вращение трансмиссии АЭСП....	153
4.4.4 Выявление функциональной связи сопротивления $R_{В\Delta T}$ ВВЦ подключения ТВБ с напряжением $U_{В\Delta T}$ ТВБ.....	155
4.5 Разработка метода контроля ТС агрегатов АЭСП при их функционировании на СББ.....	157
4.6 Выводы по четвертой главе диссертации.....	160
5 Экономическая эффективность методика контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ при контроле их ТДС.....	163
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	167
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	171
Приложение 1	194
Приложение 2	199
Приложение 3	201

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭСП – автомобиль с электрическим силовым приводом

ББ – беговой барабан

БМСД – бесконтактный магнитострикционный датчик

ВВЦ – высоковольтная цепь питания

ГПС – гибридный полнопронный стенд

ДВС – двигатель внутреннего сгорания

ДМ – диагностическая матрица

ДН – диагностический норматив

ДП – диагностический параметр

ДФХ – динамическая фазовая характеристика

КТС – колесное транспортное средство

ЛД – локальных диагноз

НС – наибольшее сечение

ОД – объект диагностирования

РКР – реализованная касательная реакция

РПИ – регулятор пропорционально-интегральный

РСС – ролик следящей системы

РЭ – рекуперация энергии

СББ – стенд с беговыми барабанами

СДПМ – синхронный двигатель с постоянными магнитами

СТО – станция технического обслуживания

ТВБ – тяговая высоковольтная батарея

ТДС – тягово-динамическое свойство

ТР – тестовый режим

ТС – техническое состояние

ФСМ – формирователь способа модуляции

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЭБУ – электронный блок управления

ЭВМ – электронная вычислительная машина

ЭД – электродвигатель

ЭДГ – электродвигатель-генератор

ЭДТ – электродинамический тормоз

ЭСП – электрический силовой привод

ЭСУ – электрическая силовая установка

ВВЕДЕНИЕ

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 диагностикой, 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.

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.

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, примененные при проведении исследования:

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.

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», ВГЛУ, 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.

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.

1 Состояние вопроса и задачи исследования

В данной главе диссертации представлен анализ статистики, характеризующей темпы развития рынка продаж АЭСП. Представлены результаты выполненного анализа существующих методов контроля ТС и диагностики современных АЭСП. Представлены результаты проведенного поискового эксперимента, направленного на выявление наиболее часто встречающихся эксплуатационных режимов. На основании приведенных результатов сделано заключение о типовых режимах функционирования АЭСП в условиях эксплуатации, пригодных для имитации в стендовых условиях с целью контроля ТС агрегатов АЭСП. Представлены результаты поискового эксперимента, демонстрирующего основные узлы, системы и агрегаты, в которых возникают неисправности, влияющие на безопасность и эффективность эксплуатации АЭСП. Также приводится анализ математических моделей процессов функционирования автомобилей и отдельных его систем. В завершении главы сформулированы и приведены задачи исследования.

1.1 Общие положения

В условиях жестких экологических требований к традиционным ДВС по ограничению количества вредных выбросов все более распространенным становится применение ЭСП в КТС. На дорогах чаще встречаются АЭСП. Анализ статистики продаж АЭСП в мире (рис. 1.1) демонстрирует, что их численность в дальнейшем будет только расти.

Современные АЭСП являются сложными техническими системами, что обусловлено непрерывным их совершенствованием. Сложность конструкций АЭСП, их систем и агрегатов часто приводит к периодическому возникновению отказов. Предварительно был проведен поисковый эксперимент, целью которого было выявление основных систем, узлов

и агрегатов АЭСП, в которых возникают неисправности в условиях эксплуатации. Поисковый эксперимент был реализован путем мониторинга информации, поступившей от сотрудников предприятий и СТО, осуществляющих ремонт и техническое обслуживание АЭСП. На рисунке 1.2 в графическом виде представлена статистика продаж АЭСП на мировом рынке по 2022 г. включительно.

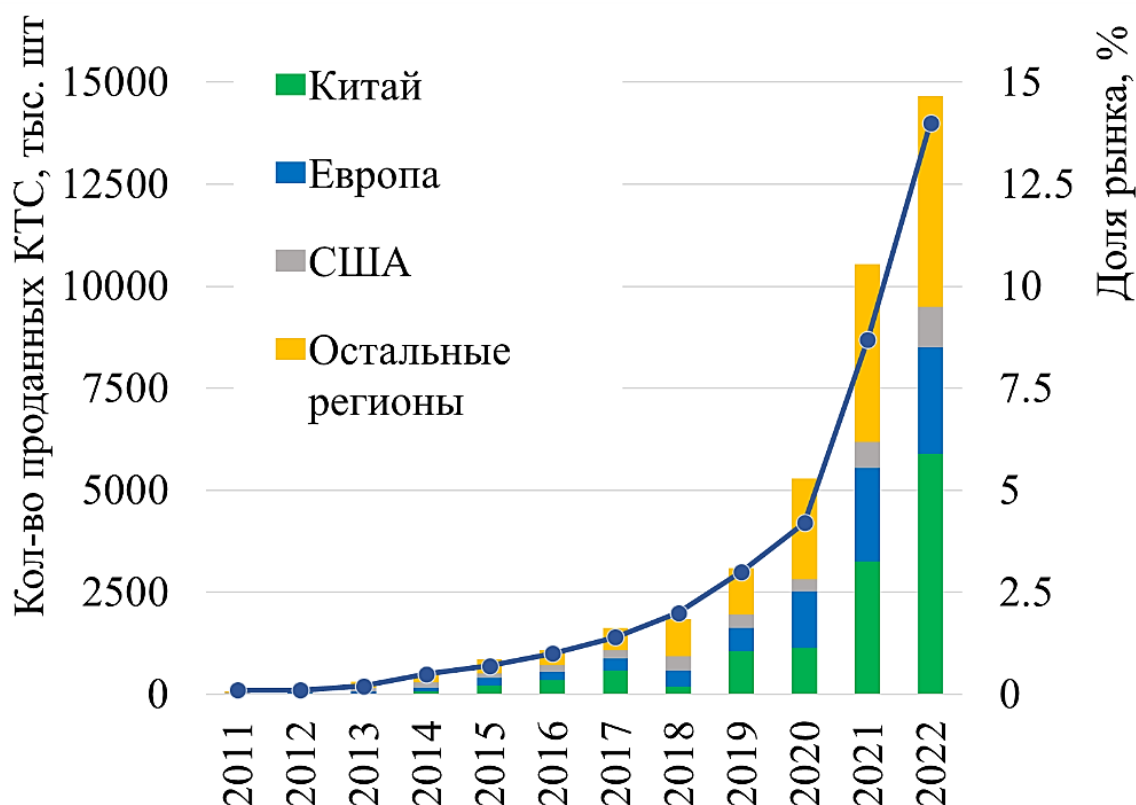


Рисунок 1.1 – Статистика продаж АЭСП на мировом рынке

Анализ полученных данных говорит о том, что на ЭСУ и трансмиссию, составляющих ЭСП, суммарно приходится до 39 % отказов, а на ТВБ и ВВЦ суммарно приходится до 28 % отказов. В большинстве случаев выход из строя элементов ЭСП вызван нарушением температурного режима функционирования ЭСУ. Неисправности, вызванные отказом системы охлаждения в ЭСП, возникают примерно в 15 % случаев.

АЭСП обладают большей динамичностью в процессе эксплуатации, поскольку уже на низкой частоте вращения ротора электродвигателя (ЭД)

способен развивать максимальный крутящий момент M_e . Наличие этой особенности провоцирует водителей АЭСП к агрессивному стилю вождения. В результате постоянных динамичных разгонов и более жестких условий эксплуатации транспортного средства в 18 % случаев наступает отказ трансмиссии АЭСП, связанный с выходом из строя подшипников, приводных валов и корпуса редуктора.



Рисунок 1.2 – Основные системы и агрегаты АЭСП, в которых возникают неисправности

Неоптимальные погодно-климатические условия эксплуатации АЭСП (высокие и низкие температуры окружающей среды), равно как и нарушение условий заряда ТВБ в 19 % случаев приводят к преждевременному ее выходу из строя. Также в 9 % случаев наступает отказ ВВЦ питания по причине их окисления из-за нарушения герметичности соединений.

Помимо перечисленных неисправностей примерно 18 % приходится на отказ вспомогательной электроники, которая в меньшей степени влияет на безопасность и эффективность эксплуатации АЭСП.

1.2 Обзор конструкций АЭСП

Под термином АЭСП следует подразумевать все автомобили, которые приводятся в движение с помощью электроэнергии. К АЭСП следует относить как автомобили с ТВБ, так и гибридные автомобили, в том числе и автомобили, в конструкции которых используются топливные элементы. Стоит отметить, что данная работа направлена на контроль ТС агрегатов *аккумуляторных автомобилей с электрическим силовым приводом*, речь о которых пойдет ниже [183].

Классифицировать АЭСП принято по типу подачи электрической энергии на ЭСП. Если провести классификацию по степени «гибридизации» автомобиля, начиная от автомобиля с ДВС, то можно все автомобили разделить по следующим признакам [183].

Традиционные (обычные) автомобили – автомобили, в которых применяется ДВС. В данном случае в качестве топлива могут использоваться как бензин или дизельное топливо, так и сжиженный газ.

Микро-гибриды – автомобили, у которых силовые электрические компоненты предназначены только для реализации функции «Старт/Стоп». Зачастую это обычный автомобиль, в котором присутствует дополнительная силовая система запуска двигателя [183].

Средний гибрид – автомобили-аналоги микро-гибридов, у которых в дополнении к функции «Старт/Стоп» ЭД поддерживает работу ДВС. Движение такого автомобиля только на электрическом приводе невозможно, однако присутствует система РЭ [183].

Полный гибрид (*HEV – Hybrid Electric Vehicle* – автомобиль с полностью гибридным приводом) – аналог среднему гибриду, в дополнение которому ЭД может поддерживать работу ДВС. Движение такого автомобиля возможно на электрическом приводе. Типичный полный гибрид – *Toyota Prius* [183].

Плагин-гибрид (*PHEV – Plugin Hybrid Electric Vehicle* – автомобиль с полностью гибридным приводом, имеющий возможность пополнения энергии от электрической сети или зарядной станции) – аналог полного гибрида, в дополнение к которому имеется возможность зарядки высоковольтной батареи от внешней электросети. Одним из типичных представителей автомобилей плагин-гибрид является *Chevrolet Volt* [183].

Аккумуляторные автомобили с электрическим силовым приводом (*BEV – Battery Electric Vehicle, EV – Electric Vehicle* – АЭСП с аккумуляторными батареями) – «чистые» АЭСП, которые приводятся в движение только электрическим приводом (рис. 1.3) [183].

У автомобилей с ДВС и ЭСП довольно много общих, похожих или аналогичных элементов, к которым можно отнести кузов, подвеску и т. д. Электродвигатель-генератор (ЭДГ) 3 и редуктор с главной передачей 10 являются основной составляющей ЭСП автомобиля. Коробка переключения передач в АЭСП отсутствует, так как крутящий момент, развиваемый ЭДГ 3 достаточен для трогания автомобиля с места. ЭДГ 3 управляет силовой блок 4. Система охлаждения 2 используется как для отвода тепла от ЭДГ 3, так и от блока силовой электроники 4. Функционирование и управление системы климат-контроля посредством отопителя салона 11 и кондиционера 12, а также усилителя тормозной системы осуществляется блоком управления 4 через систему высоковольтных проводов 6. В традиционных автомобилях эти устройства функционировали за счет отбора тепловой или других видов энергии от ДВС. В АЭСП отопитель салона 11 и кондиционер 12, а также усилитель тормозной системы функционируют от электроэнергии высоковольтной батареи 13 и вместе с ЭДГ 3 составляют высоковольтную силовую систему АЭСП [183].

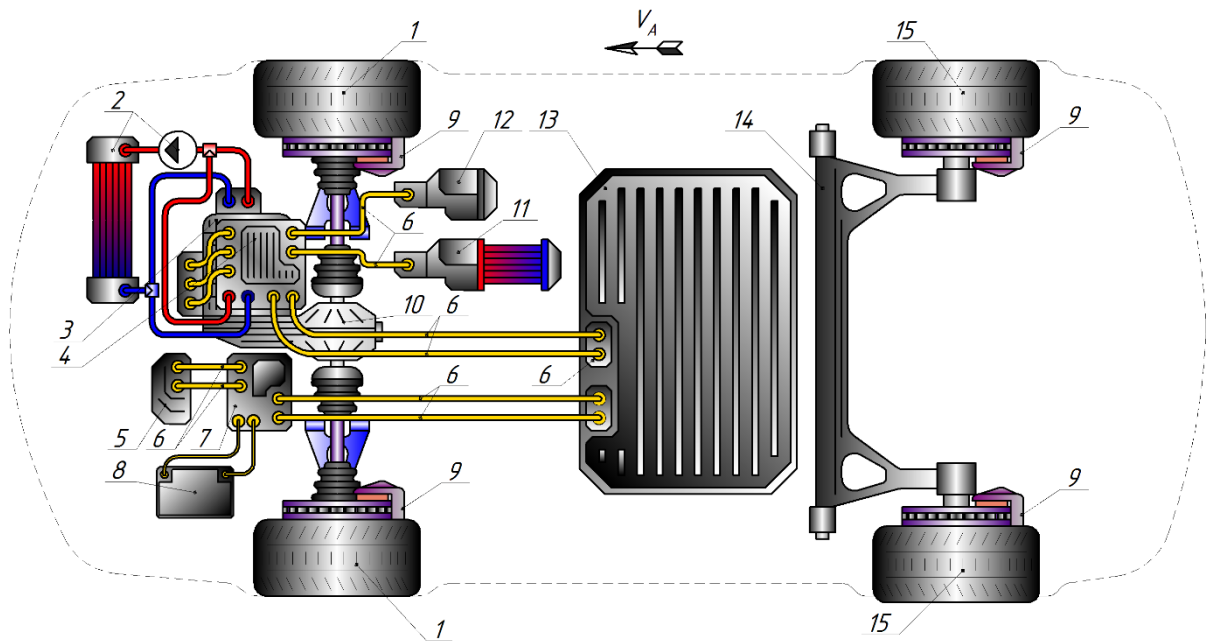


Рисунок 1.3 – Схема аккумуляторного АЭСП

1 – ведущие колеса; 2 – система термостатирования электрического силового привода; 3 – электродвигатель; 4 – блок управления электрическим силовым приводом; 5 – зарядное устройство; 6 – высоковольтная система проводов; 7 – преобразователь напряжения; 8 – 12-вольтовая аккумуляторная батарея; 9 – тормозная система; 10 – главная передача; 11 – отопитель салона; 12 – кондиционер; 13 – высоковольтная батарея; 14 – элементы задней подвески; 15 – ведомые колеса

Вспомогательные электронные системы АЭСП осуществляют функционирование от 12-вольтовой сети постоянного тока. Для их питания используется аккумуляторная батарея 8 с номинальным напряжением 12 В, которая подзаряжается от высоковольтной батареи 13 в процессе движения или от зарядного устройства 5, когда АЭСП установлен на зарядку. Преобразователь 7 используется для трансформации из высокого напряжения в низкое. В некоторых АЭСП преобразователь напряжения 7 может быть выполнен в одном устройстве вместе с блоком силовой электроники 4 и блоком управления [183].

При функционировании автомобиля из ТВБ 13 электроэнергия передается на блок управления 4. Штатное зарядное устройство 5 реализует возможность зарядки ТВБ автомобиля от электрической сети.

АЭСП, при эксплуатации которых не происходит выбросов вредных веществ в атмосферу, принято классифицировать как *Zero Emission Vehicle (ZEV)* или просто *Zero Emission (ZE)*. Наиболее типичными представителями этих автомобилей являются *Nissan Leaf*, *Kia Soul EV* [183].

АЭСП с топливными элементами (*FCBEV*, *FCEV* – *Fuel Cell Battery Electric Vehicle* – аккумуляторный АЭСП с топливными элементами) – АЭСП, приводимые в движение только электрическим приводом с дополнительными химическими преобразователями энергии (рис. 1.4) [183].

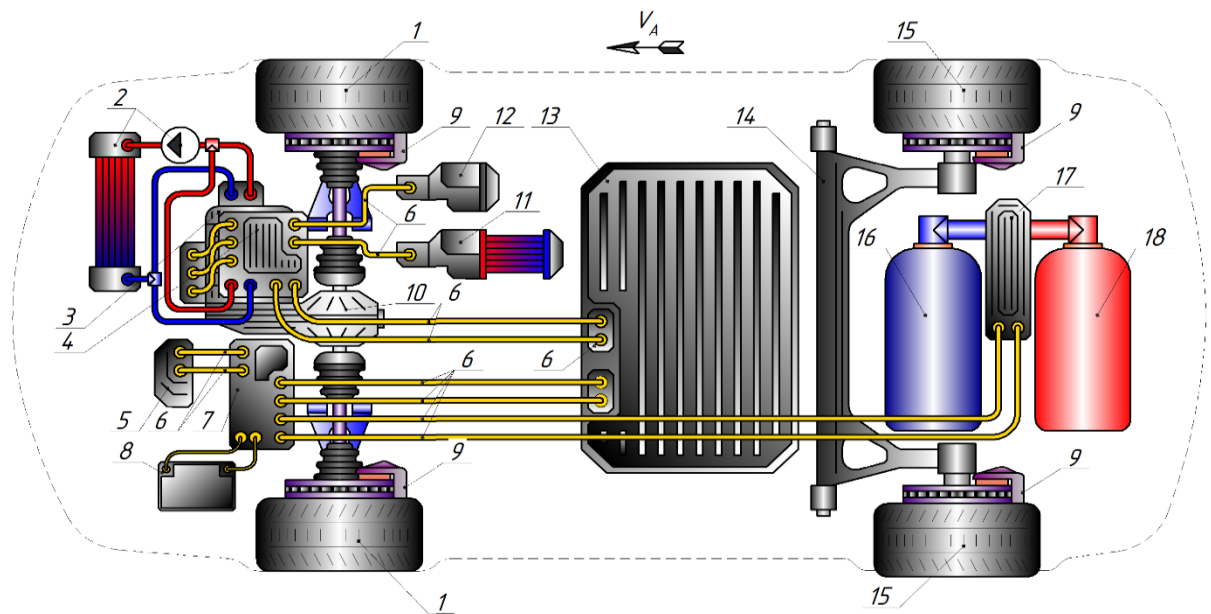


Рисунок 1.4 – Схема аккумуляторного АЭСП с топливными элементами

1 – ведущие колеса; 2 – система охлаждения; 3 – электродвигатель-генератор; 4 – блок управления; 5 – зарядное устройство; 6 – высоковольтная система проводов; 7 – преобразователь напряжения; 8 – 12-вольтовая АКБ; 9 – тормозная система; 10 – главная передача; 11 – отопитель салона; 12 – кондиционер; 13 – высоковольтная батарея; 14 – элементы задней подвески; 15 – ведомые колеса; 16 – баллон с водородом; 17 – топливный элемент; 18 – баллон с кислородом

В целом конструкция АЭСП с топливными элементами во многом схожа с конструкцией АЭСП с ТВБ. Различие состоит в том, что в качестве дополнительного источника энергии, кроме зарядки батареи от сети, в АЭСП с топливными элементами имеется гальванический элемент, состоящий из топливного элемента 17 и баллонов с водородом 16 и кислородом 18.

Водород, выполняющий роль топлива, заправляется в отдельный топливный баллон 16, из которого в последствии при эксплуатации АЭСП при помощи топливного элемента 17 вырабатывается электрическая энергия. В некоторых случаях баллон с кислородом 18 может отсутствовать, вместо этого используется кислород, имеющийся в атмосфере [183].

Предварительно был проведен поисковый эксперимент, основанный на методе экспертных оценок, в ходе которого были выявлены наиболее типовые режимы движения АЭСП, как в условиях города, так и при движении за городом. Типовые режимы функционирования АЭСП в процессе движения в городском и в загородном циклах отображены на рисунке 1.5 [158].

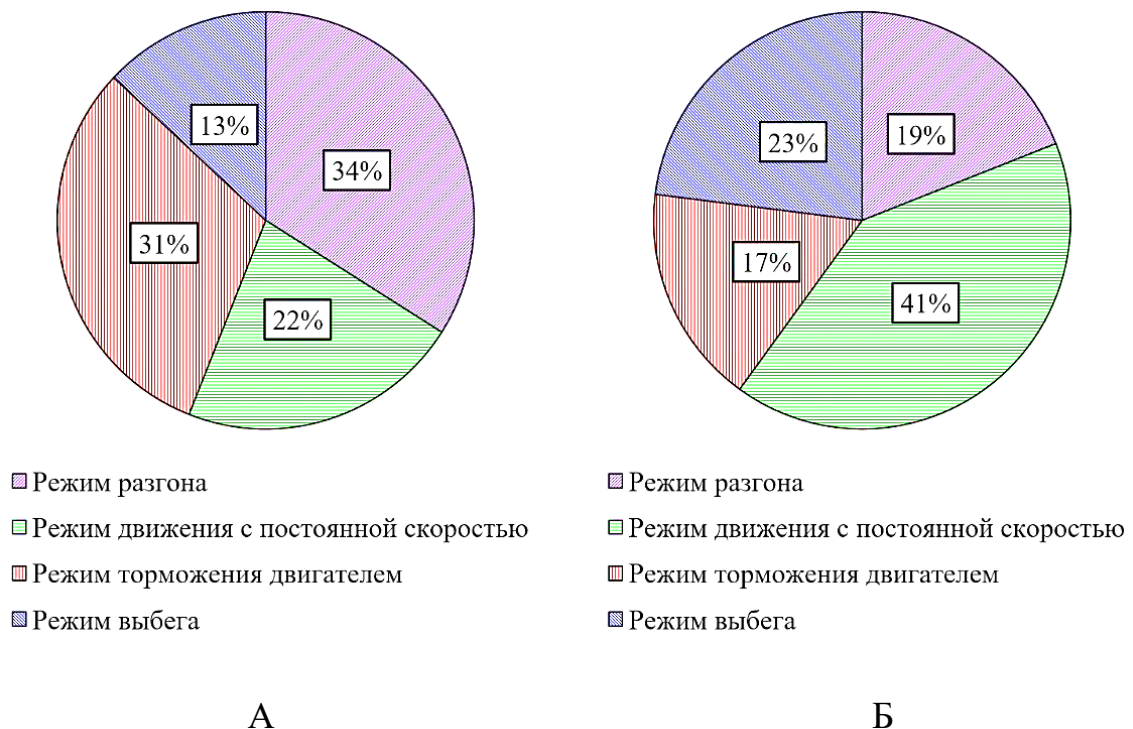


Рисунок 1.5 – Типовые режимы движения АЭСП

А – в городском цикле; Б – в загородном цикле.

Анализ результатов проведенного поискового эксперимента позволил установить наиболее часто встречающиеся режимы движения АЭСП при их эксплуатации. К этим режимам относятся:

- разгон на горизонтальной дороге и/или в гору;
- выбег на горизонтальной дороге и/или под гору;
- торможение тормозной системой и/или двигателем;
- движение с постоянной скоростью на горизонтальной дороге;
- движение с постоянной скоростью под нагрузкой (например, движение в гору).

Воспроизведение в стендовых условиях каждого из перечисленных режимов движения позволит в полной мере оценивать ТДС. А это, в свою очередь, даст возможность эффективно контролировать ТС агрегатов АЭСП на СББ.

Такой подход позволит значительно повысить информативность и оперативность контроля ТС агрегатов АЭСП и, как следствие, эффективность эксплуатации [158].

1.3 Методы и средства диагностирования АЭСП

Значительная часть времени затрачивается на локализацию неисправности и определение причин ее возникновения, а не на ремонтные работы. Реализовать эффективный контроль ТС АЭСП без использования современных методов диагностики и реализующего их оборудования не представляется возможным. Применение методов контроля ТС агрегатов АЭСП является важным элементом стратегии поддержания ТС АЭСП на должном уровне, поскольку позволяет значительно сократить временные затраты на поиск неисправностей и постановку диагноза о ТС АЭСП. Это приводит к снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт АЭСП, а также к повышению уровня их безопасности в условиях эксплуатации.

Как в Российской Федерации, так и за ее пределами, существенный вклад в разработку методов и средств технической диагностики автомобилей внесли многие организации и учреждения: ФГБОУ ВО МАДИ, НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ», МАМИ, СФУ, ИрННТУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Санкт-Петербургский ГАСУ, Саратовский ГТУ, НГТУ, им. Р.Е. Алексеева, НИИАТ, НАТИ, ГОСНИТИ, Курганский государственный университет, Новосибирский ГАУ, американская компания «General Electric», немецкая компания «Robert Bosch GmbH», бельгийская компания «WABCO», американская фирма «MTS», а так же ведущие фирмы и компании других стран.

Появление и распространение теории о методах диагностики, а также реализующего их оборудования, произошло благодаря следующим исследователям: 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., Карпучин 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., Мозгалеvский 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.

Методы диагностирования, применяемые для определения ТС агрегатов автомобилей, делятся на три группы (рис. 1.6). Первая группа методов реализуется путем измерения основных эксплуатационных свойств автомобиля, что дает возможность провести оценку его работоспособности и эксплуатационных свойств в целом. Ко второй группе методов относят те методы, которые осуществляются за счет измерения параметров процессов, сопутствующих функционированию автомобиля, его систем, агрегатов и механизмов. Использование второй группы методов позволяет определить конкретные причины возникновения неисправностей. В связи с этим при контроле ТС автомобиля, его систем, агрегатов и механизмов применяют сначала первую группу методов, основанную на принципе перехода «от целого к частному». Методами второй группы реализуется более точное определение причин возникновения отказа агрегатов автомобилей.



Рисунок 1.6 – Классификация методов диагностирования автомобилей

Контроль ТС агрегатов АЭСП целесообразно выполнять на СББ, поскольку такой метод позволяет получить более полную информацию о ТС объекта диагностирования (ОД) [140, 144, 151]. Однако реализация этого метода сдерживается недостатком знаний о процессе функционирования АЭСП на СББ. Во-первых, отсутствуют научно-обоснованные ТР, при которых возможен эффективный контроль ТС агрегатов АЭСП в стендовых условиях. Во-вторых, наблюдается отсутствие знаний о ДП и их нормативных значениях, пригодных для контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ. В-третьих, нет выявленных функциональных зависимостей между параметрами ТС агрегатов АЭСП и ДП. Кроме того, необходимо определить эффективный метод контроля ТС агрегатов АЭСП [140, 144, 151].

Контроль ТС АЭСП может выполняться как стендовым, так и дорожным методом что подтверждается нормативными документами, а именно ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Часть 1. Электромобили [57].

Существующие методы дорожного контроля ТС АЭСП выполняются без использования дорогостоящего диагностического оборудования, что позволяет считать их дешевыми и доступными. При этом дорожные методы

контроля ТС не получили широкого распространения. Во-первых, реализация дорожного метода невозможна при неблагоприятных погодных-климатических условиях. Во-вторых, невозможно в городских условиях безопасно задавать объекту диагностирования тестовые воздействия, необходимые для выявления неисправностей и их причин. В-третьих, при реализации дорожных методов диагностики АЭСП отсутствует возможность измерения основных параметров, таких как сила тяги на ведущем колесе или сила рекуперативного торможения, что не позволяет сделать количественную оценку ТС агрегатов ЭСП автомобиля. Все вышеперечисленное приводит к тому, что дорожные методы технического контроля АЭСП и его агрегатов являются неэффективными и не применяются повсеместно в условиях эксплуатации [140, 144, 151].

При определении работоспособности агрегатов АЭСП можно применять диагностические сканеры, однако они далеко не всегда способны дать полную информацию о ТС ОД. При помощи диагностического сканера невозможно оценить развиваемую ЭСП мощность, эффективность работы трансмиссии ЭСП, эффективность работы ЭСУ в режиме РЭ, 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.

По этой причине наиболее эффективно контролировать ТДС автомобилей позволяют СББ. Они являются одним из самых информативных инструментов при контроле автомобилей в условиях эксплуатации, поскольку позволяют получать более точную и подробную информацию о состоянии ОД. Контроль ТС агрегатов автомобилей стендовым методом получил наибольшее распространение, поскольку он выполняется в закрытых помещениях без воздействия внешних факторов со стороны окружающей среды. Помимо этого, контроль ТС автомобиля на СББ дает возможность количественной оценки ТС ЭСП, к примеру, через измерение основных тягово-динамических параметров автомобиля.

1.4 Анализ стендов для диагностики АЭСП

Процессы функционирования автомобилей на СББ изучали и отечественные и зарубежные знаменитые ученые такие как: Бойко А.В., Васильев В.И., Гринюк А.С., Гуревич Л.В., Гурьянов С.И., Димов Н.Н., Малюков А.А., Мирошников Л.В., Михлин В.М., Мозгалеvский А.В., Портнягин Е.М., Потапов А.С., Степанов А.Н., Тихов-Тинников Д.А., Топалиди В.А., Федоткин И.В., Федотов А.И., Харазов А.М. и др.

Методы стендового и дорожного контроля ТС агрегатов автомобилей являются значительным достижением и весомым результатом их исследований.

Далеко не все СББ и методы, которые они реализуют, корректно отражают ТСД АЭСП. Наиболее информативные и точные для постановки диагноза данные способны дать силовые стенды контроля ТС автомобилей. Стенды силового типа позволяют реализовать замер таких параметров, как сила тяги и мощность на колесах, сила и мощность, затрачиваемые на вращение трансмиссии.

Современные силовые стенды (рис. 1.7) состоят из пары блоков с передними 4 и задними 3 беговыми барабанами. Беговые барабаны (ББ) 3 и 4 являются опорой для колес автомобиля. При этом скорость их вращения отслеживается датчиками 8 частоты вращения ББ.

Электродинамический тормоз (ЭДТ) 1 является нагружающим устройством и при имитации разгона автомобиля на СББ оказывает силовое воздействие на его силовую установку, которое измеряется датчиком усилия 2. Скорость вращения ротора ЭДТ регистрируется датчиком 7. Полученные с датчиков частоты сигналы отправляются в программное обеспечение на ПК через аналого-цифровой преобразователь с целью последующей обработки и постановки диагноза [176].

Главный недостаток силовых СББ заключается в невозможности воспроизведения неустановившихся тестовых воздействий. То есть силовые

стенды не способны имитировать движение автомобиля в режимах разгона и выбега. Большинство неисправностей можно определить именно в этих режимах. Поэтому для полного и информативного контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ необходимо имитировать еще и разгон автомобиля, что невозможно реализовать на стендах силового типа.

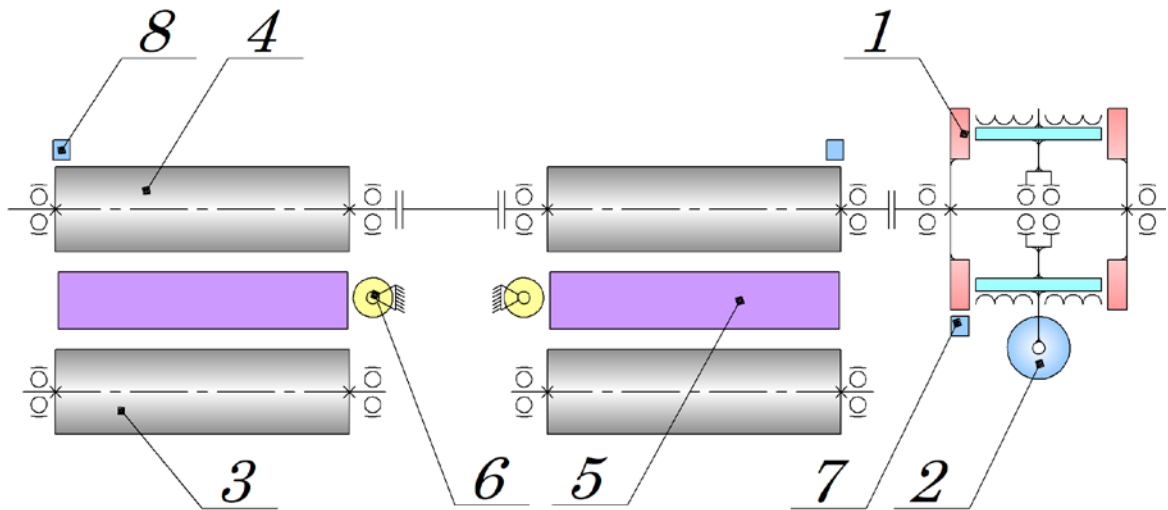


Рисунок 1.7 – Структура силового СББ

1 – электродинамический тормоз; 2 – датчик усилия на электродинамическом тормозе; 3 – задний беговой барабан; 4 – передний беговой барабан; 5 – подъемно-выталкивающее устройство; 6 – ограничительный ролик-отбойник; 7 – датчик частоты вращения электродинамического тормоза; 8 – датчик частоты вращения бегового барабана

Прямой противоположностью силовым стендам являются СББ инерционного типа, реализующие динамические методы диагностики автомобилей. Инерционные СББ (рис. 1.8) состоят из блоков с передними 2 и задними 4 ББ. Каждая пара ББ 2 и 4 соединена муфтой с редуктором 8, который, в свою очередь, соединен с инерционной маховой массой 1, выполняющей функции нагружающего устройства. Датчики 7, расположенные вблизи ББ 2, регистрируют частоту их вращения. Дальнейшая обработка сигналов, зарегистрированных измерительными датчиками, реализуется в программном обеспечении диагностического стенда [176].

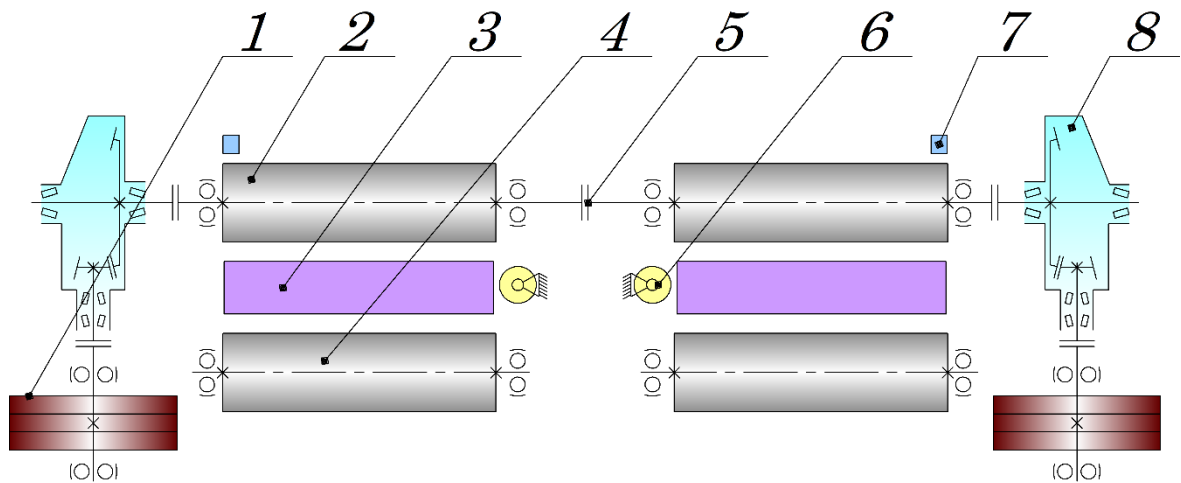


Рисунок 1.8 – Структура инерционного СББ

1 – инерционная маховая масса; 2 – передний беговой барабан; 3 – подъемно-выталкивающее устройство; 4 – задний беговой барабан; 5 – муфта; 6 – отбойный ролик; 7 – датчик регистрации скорости вращения колеса; 8 – редуктор

Наиболее существенная разница между силовыми и инерционными СББ наблюдается в перечне регистрируемых ими параметров функционирования автомобиля. К ним относятся время и путь разгона, время и путь выбега. Анализ конструкций СББ тяговых качеств показывает, что существуют еще и инерционно-силовые стенды, реализующие силовой и инерционный методы задания тестовых режимов. Измерения силовых параметров на них производится датчиком силы, установленном на балансирном вихретоковом тормозе.

Все вышеописанные стенды способны измерять суммарную тяговую силу на ведущих колесах автомобиля. В то время как у современных электромобилей и беспилотных КТС необходимо контролировать силы тяги на каждом колесе индивидуально.

Измеряемые на инерционных стендах кинематические и временные параметры крайне нестабильны. Они малоинформативны и требуют большого количества измерений. Инерционные стенды дают возможность имитировать динамические режимы (разгон или выбег). Эти режимы крайне важны и информативны для контроля ТС агрегатов автомобилей.

Для контроля ТДС автомобилей на стендах необходимо измерять как скорость вращения колес, так сил тяги на колесах. Следовательно, для качественного анализа ТДС АЭСП необходимо выполнять контроль их функционирования как в установившихся режимах, так и в режиме «разгон – выбег». Сказанное подразумевает как индивидуальное применение названных режимов, так и их разумное совмещение [176].

Анализ существующих методов и кинематических схем реализующих их стендов показывает, что на сегодняшний день нет оборудования, позволяющего измерять силы тяги на каждом ведущем колесе КТС и при этом обеспечивать применение силового и динамического методов как индивидуально, так и совместно.

Подводя итог вышесказанному, можно сделать заключение о том, что применение гибридных конструкций стендов, совмещающих преимущества инерционных и силовых стендов, является наиболее эффективным с точки зрения диагностики. Стенды гибридных конструкций позволяют имитировать нагрузку на автомобиль, аналогичную реальным условиям его эксплуатации. Очень важно при этом измерять, прежде всего, силовые параметры. Именно силовые параметры являются гораздо более информативными и стабильными, чем время и кинематические параметры – путь и скорость.

1.5 Обзор математических моделей процессов функционирования автомобилей и их систем на СББ

1.5.1 Обзор математических описаний ЭД

Для контроля ТС агрегатов АЭСП в условиях эксплуатации актуальным вопросом является разработка математического описания ЭД, позволяющего получать зависимости, характеризующие влияние ТС ЭСП на ДП, и параметры, характеризующие ТДС АЭСП. Повышение эффективности эксплуатации АЭСП за счет сокращения временных и трудовых затрат на поиск неисправностей возможно при решении этой задачи [19, 77, 78, 183].

1. Математическое описание выходных характеристик ЭД. Для разработки математического описания синхронного ЭД рассмотрим наиболее упрощенную ее модель [19, 77, 78, 183]. Подобно внешней скоростной характеристике ДВС, при расчете крутящего момента на роторе ЭД $M_{\text{ЭД}}$ и мощности $N_{\text{ЭД}}$, развиваемой ЭД, она основывается на их зависимости от частоты вращения ротора $n_{\text{ЭД}}$ при работе ЭД под нагрузкой. Характеристика крутящего момента $M_{\text{ЭД}}$ при работе ЭД под нагрузкой вычисляется по выражению:

$$M_{\text{ЭД}} = \begin{cases} M_{\text{ЭД} \max} & \text{при } 0 \leq n_{\text{ЭД}} \leq n_{\text{ЭД} \min} \\ \frac{30N_{\text{ЭД, ном}}}{\pi n_{\text{ЭД}}} & \text{при } n_{\text{ЭД} \min} < n_{\text{ЭД}} \leq n_{\text{ЭД} \max} \end{cases}; \quad (1.1)$$

где $M_{\text{ЭД} \max}$ – крутящий момент ЭД;

$N_{\text{ЭД}}$ – мощность ЭД;

$n_{\text{ЭД}}$ – частота вращения ротора ЭД.

Мощность тягового ЭД рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{ЭД}} = \frac{M_{\text{ЭД}} \pi n_{\text{ЭД}}}{30}. \quad (1.2)$$

Представленное математическое описание ЭД просто в описании, так как позволяет вычислять крутящий момент $M_{\text{ЭД}}$ и мощность $N_{\text{ЭД}}$ в зависимости от скорости вращения $n_{\text{ЭД}}$ ротора ЭД. Это дает возможность существенно уменьшить количество времени, затрачиваемого на моделирование. Однако математическое описание не позволяет выполнять анализ энергетических параметров ЭД таких, как напряжение $U_{\text{ЭД}}$ и ток $I_{\text{ЭД}}$.

Это важные параметры, которые характеризуют эффективность работы и техническое состояние ЭСП, а также эффективность работы ТВБ.

2. Математическое описание ЭД с вращающейся системой координат dq . Синхронный ЭД функционирует благодаря взаимодействию магнитных полей. В таких ЭД поле ротора постоянно, а поле статора вращается (рис. 1.9).

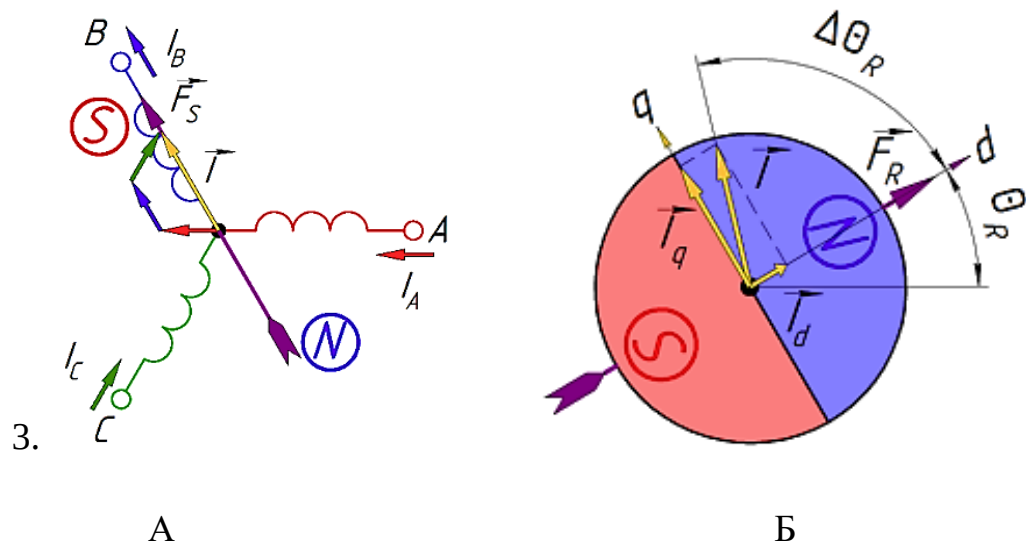


Рисунок 1.9 – Схемы, поясняющие принцип работы синхронного ЭД

А – результирующие векторы тока и вектор магнитного поля статора: A, B, C – катушки фаз A, B и C соответственно; I_A, I_B, I_C – токи, протекающие в обмотках фаз A, B и C соответственно; $\vec{I}$ – результирующий вектор тока; $\vec{F}_S$ – вектор магнитного поля; Б – результирующий вектор тока и вектор магнитного поля ротора в системе координат dq ; $\vec{I}$ – результирующий вектор тока статора; $\vec{F}_R$ – вектор магнитного поля ротора; I_d – составляющая вектора $\vec{I}$ на ось d ; I_q – составляющая вектора $\vec{I}$ на оси q ; θ_R – угол поворота ротора; $\Delta\theta_R$ – угол регулировки положения вектора $\vec{I}$

Вектор тока статора $\vec{I}$ вращается, так как образован за счет гармонических токов в катушках (рис. 1.9, А), равных друг другу по амплитуде, частоте и сдвинутых относительно друг друга на равный угол. При управлении ЭД делают упрощение и принимают направление вектора поля статора $\vec{F}_S$ полностью совпадающим с направлением вектора тока $\vec{I}$. Таким образом удобно контролировать вращение вектора поля $\vec{F}_S$, который будет пропорционален вектору тока $\vec{I}$ [19, 77, 78, 183].

Положение ротора (рис. 1.9, Б), при котором между вектором магнитного поля ротора $\vec{F}_R$ и вектором магнитного поля статора $\vec{F}_S$ образуется угол $\Delta\theta_E = \pi/2$, будет соответствовать такому взаимодействию этих полей, при котором образовывается наибольший крутящий момент ротора. Именно в таком расположении полюса ротора и статора будут наиболее эффективно взаимодействовать друг с другом: одноименные полюса отталкиваются, разноименные – притягиваются. Такое положение вектора тока $\vec{I}$ будет являться оптимальным для эффективной работы ЭД [19, 77, 78, 183, 185].

Векторы напряжения на статоре синхронного ЭД во вращающейся системе координат dq определяются по следующим зависимостям [19, 77, 78, 183, 185]:

$$\begin{cases} U_{sd} = L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} + R_S I_{sd} - \omega_e L_{sq} I_{sq} \\ U_{sq} = L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + E + R_S I_{sq} + \omega_e L_{sd} I_{sd} \end{cases}; \quad (1.3)$$

где L_{sd}, L_{sq} – индуктивность обмоток статора по осям d и q соответственно;

E – величина вектора ЭДС по амплитуде;

I_{sd}, I_{sq} – векторы тока статора по осям d и q ;

ω_e – угловая скорость ротора;

R_S – сопротивление обмоток статора ЭД;

$\frac{dI_{sd}}{dt}$ и $\frac{dI_{sq}}{dt}$ – скорость изменения тока по осям d и q .

Потокосцепление статора ЭД формируется током в обмотке, которая имеет индуктивность, и магнитным потоком ротора. Во вращающейся системе координат оно будет иметь следующий вид [5]:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \psi_f \\ \psi_{sq} = L_{sq} I_{sq} \end{cases}; \quad (1.4)$$

где ψ_{sd}, ψ_{sq} – составляющие вектора потокосцепления по осям d и q ;

ψ_f – амплитуда потокосцепления между ротором и фазной катушкой.

С учетом формул (1.3, 1.4) уравнение для вычисления развиваемого ЭД крутящего момента примет вид [77, 78, 183, 185]:

$$M_{\text{ЭД}} = \frac{3Z_p}{2} (I_{sq}\psi_{sd} - I_{sd}\psi_{sq}) = \frac{3Z_p}{2} (I_{sq}\psi_f + I_{sd}I_{sq}(L_{sd} - L_{sq})) \quad (1.5)$$

где Z_p – число пар полюсов магнита ЭД;

ψ_f – амплитуда потокосцепления ротора и фазной катушки.

Данное математическое описание ЭД с вращающейся системой координат dq позволяет описать энергетические параметры (напряжение U_{sd}, U_{sq} ; токи I_{sd}, I_{sq} ; потокосцепление ψ_{sd}, ψ_{sq}), протекающие в обмотках ЭД на разных режимах движения АЭСП. С их помощью можно с довольно высокой точностью рассчитать характеристики крутящего момента $M_{\text{ЭД}}$ и мощности $N_{\text{ЭД}}$ ЭД под нагрузкой.

4. Математическое описание ЭД в неподвижной системе координат A, B и C . Для описания такого математического описания ЭД возникает необходимость вычислять мгновенные значения токов I_A, I_B, I_C , протекающих в фазных катушках [77, 78, 183, 185]:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_A = \left(\frac{k}{T_p + 1} \right) \cdot (2U_A - U_B - U_C + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1B} + E_{1C} - 2E_{1A})); \\ I_B = \left(\frac{k}{T_p + 1} \right) \cdot (2U_B - U_C - U_A + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1C} + E_{1A} - 2E_{1B})); \\ I_C = \left(\frac{k}{T_p + 1} \right) \cdot (2U_C - U_A - U_B + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1A} + E_{1B} - 2E_{1C})); \end{array} \right. \quad (1.6)$$

$$k = \frac{1}{3R_{\phi i}};$$

$$T_p = \frac{L_{\phi i} - L_{\phi \phi i}}{R_{\phi i}};$$

где U_A, U_B, U_C – напряжение инвертора, поступающие на вход фаз A, B, C ;

ψ_f – амплитуда потокосцепления между ротором и фазной обмоткой;

ω_R – угловая скорость вращения ротора ЭД;

T_p – постоянная времени инерционного звена первого порядка;

E_{1A}, E_{1B}, E_{1C} – единичные функции форм ЭДС [5, 15].

k – коэффициент усиления инерционного звена первого порядка, описывающий сопротивление обмоток статора;

Z_p – количество полюсов статора ЭД;

$R_{\phi i}$ – активное сопротивление i -й фазной катушки статора ЭД;

$L_{\phi i}$ – индуктивность i -й фазной катушки статора ЭД;

$L_{\phi\phi i}$ – взаимная индуктивность двухфазных катушек статора ЭД;

Единичные функции форм ЭДС определяются из выражений [5, 15]:

$$E_{1A} = \sin(\theta_E + \delta_A); \quad (1.7)$$

$$E_{1B} = \sin(\theta_E + \delta_B); \quad (1.8)$$

$$E_{1C} = \sin(\theta_E + \delta_C); \quad (1.9)$$

где θ_E – угол поворота поля статора;

$\delta_A, \delta_B, \delta_C$ – углы сдвига фаз A, B и C соответственно:

$$\theta_E = \theta_R \cdot Z_p; \quad (1.10)$$

где θ_R – угол поворота ротора;

Z_p – количество полюсов статора.

Угловая скорость ротора ЭД определяется по зависимости [5, 15]:

$$\omega_R = \frac{1}{J} \int (M_e - M_c) dt; \quad (1.11)$$

где M_C – момент, оказывающий сопротивление вращению ротора ЭД со стороны трансмиссии АЭСП;

J – момент инерции вращающихся элементов ЭСП автомобиля.

Мгновенные ЭДС E_A , E_B и E_C в фазах статора ЭД можно определить, используя единичные функции формы ЭДС в соответствии с выражениями [5, 15]:

$$E_A = \psi_F \cdot Z_P \cdot \omega_R \cdot E_{1A}; \quad (1.12)$$

$$E_B = \psi_F \cdot Z_P \cdot \omega_R \cdot E_{1B}; \quad (1.13)$$

$$E_C = \psi_F \cdot Z_P \cdot \omega_R \cdot E_{1C}; \quad (1.14)$$

где ψ_F – амплитуда потокосцепления между ротором и фазной обмоткой;

ω_R – угловая скорость вращения ротора ЭД.

Крутящий момент $M_{ЭД}$ на роторе синхронного ЭД рассчитывается по формуле [77, 183]:

$$M_{ЭД} = \frac{I_A E_A + I_B E_B + I_C E_C}{\omega_R}. \quad (1.15)$$

Данное математическое описание ЭД в неподвижной системе координат A , B и C позволяет описать энергетические параметры (токи I_A , I_B , I_C ; мгновенные ЭДС E_A , E_B и E_C), протекающие в ЭД на разных режимах движения АЭСП. С их помощью можно с довольно высокой точностью рассчитать характеристики крутящего момента $M_{ЭД}$, и мощности $N_{ЭД}$ ЭД под нагрузкой.

При моделировании исследуемых процессов с использованием таких математических описаний ЭД необходимы большие вычислительные мощности электронно-вычислительных машин (ЭВМ).

1.5.2 Обзор математических моделей эластичных шин

На данное время в области создания математического описания процесса взаимодействия автомобильного колеса с эластичной шиной (ЭШ) с опорной поверхностью известны работы таких ученых, как: Астров В.А., Балабин И.В., Бойко А.В., Дик А.Б., Катанаев Н.Т., Немчинов М.В., Петров М.А., Федотов А.И., Чудаков Е.А., Расејка Н.В. и многие другие.

Одна из математических моделей ЭШ была предложена Burckhardt M. В основе разработанного им математического описания ЭШ заложена

экспоненциальная зависимость. Модель была создана с целью расчета коэффициента сцепления ЭШ с опорной поверхностью:

$$\varphi = (C_1 \cdot (1 - e^{-C_2 \cdot S}) - C_3 \cdot S) \cdot e^{-C_4 \cdot S \cdot V}; \quad (1.16)$$

где C_1 – коэффициент, определяющий максимальное сцепление ЭШ с опорной поверхностью;

$$C_1 = \varphi_{\max}; \quad (1.17)$$

C_2 – коэффициент, характеризующий кривизну и форму функции проскальзывания S ;

$$C_2 \cdot e^{-C_2 \cdot S} = \frac{C_3 \cdot 100}{C_1}; \quad (1.18)$$

C_3 – коэффициент, определяющий падение фрикционных свойств ЭШ в блоке;

$$C_3 = \varphi_{\max} - \varphi_B; \quad (1.19)$$

C_4 – коэффициент, учитывающий параметры внешних воздействий, а именно влажность воздуха.

Представленная модель дает возможность рассчитывать коэффициент сцепления. При этом модель учитывает изменения линейной скорости движения автомобиля.

Математическое описание ЭШ, разработанное учеными Kiencke U. и Daiss A., было усовершенствовано немецким ученым Denny M. Целью совершенствования модели являлся определение коэффициента сцепления в зависимости от проскальзывания ЭШ относительно опорной поверхности. В предложенной им модели не учитывается линейная скорость и, соответственно, математическое описание принимает вид [198]:

$$\varphi = \frac{a \cdot S}{b + c \cdot S + S^2}; \quad (1.20)$$

где a , b , c – коэффициенты, учитывающие максимальное сцепление ЭШ

с опорной поверхностью, снижение фрикционных свойств ЭШ в блоке и величину критического проскальзывания.

Значения коэффициентов a , b и c можно рассчитать в соответствии с выражениями [198]:

$$a = \frac{\varphi_{\max} \cdot \varphi_B}{\varphi_{\max} - \varphi_B}; \quad (1.21)$$

$$b = S_{KP}^2; \quad (1.22)$$

$$c = \frac{\varphi_B \cdot (1 + S_{KP}^2) - 2 \cdot \varphi_{\max} \cdot S_{KP}}{\varphi_{\max} - \varphi_B}. \quad (1.23)$$

Следующий пример математического описания ЭШ основывается на синтезе двух парабол для определения коэффициента φ . Ключевыми в данной модели являются два уравнения параболы. Первое необходимо для описания зависимости $\varphi=f(S)$ при возрастании коэффициента сцепления от нуля до максимального значения. Проскальзывание ЭШ относительно опорной поверхности в этот момент увеличивается от нулевого до критического значения.

Второе уравнение параболы описывает снижение фрикционных свойств ЭШ от максимальной величины коэффициента сцепления до его значения в блоке. При этом величина проскальзывания изменяется от критического значения до единицы. Общая зависимость $\varphi=f(S)$ в модели строится путем соединения двух парабол, направленных в противоположные стороны:

$$\varphi = \begin{cases} a_0 \cdot S^2 + b_0 \cdot S + c_0 & \text{при } S \leq S_{KP}; \\ a_1 \cdot S^2 + b_1 \cdot S + c_1 & \text{при } S \geq S_{KP}; \end{cases} \quad (1.24)$$

Коэффициенты a_0 , b_0 , c_0 , a_1 , b_1 и c_1 , необходимые для функционирования модели, определяются по формулам:

$$a_0 = \frac{d_0}{S_{KP}} - \frac{\varphi_{\max}}{S_{KP}^2}; \quad (1.25)$$

$$b_0 = \frac{2 \cdot \varphi_{\max}}{S_{KP}} - d_0; \quad (1.26)$$

$$c_0 = 0; \quad (1.27)$$

$$a_1 = \frac{d_1}{S_{KP}} - \frac{\varphi_{\max}}{S_{KP}^2} + \frac{c_1}{S_{KP}^2}; \quad (1.28)$$

$$b_1 = \frac{2 \cdot \varphi_{\max}}{S_{KP}} - \frac{2 \cdot c_1}{S_{KP}} - d_1; \quad (1.29)$$

$$c_1 = \frac{S_{KP}^2 \cdot (\varphi_B + d_1)}{1 - 2 \cdot S_{KP} + S_{KP}^2} - \frac{S_{KP} \cdot (2 \cdot \varphi_{\max} - d_1) + \varphi_{\max}}{1 - 2 \cdot S_{KP} + S_{KP}^2}. \quad (1.30)$$

Коэффициенты d_0 и d_1 необходимы для определения форм кривых первой и второй парабол соответственно.

Математическая модель ЭШ, разработанная учеными Расејка Н. и Bakker E. является самой популярной и широко применяется при описании колес с ЭШ. Представленная модель также известна как «Магическая формула», в которой функция $\varphi = f(S)$ представляется как аппроксимирующая эмпирическая зависимость вида [204]:

$$\varphi = \left(D \cdot \sin \left(C \cdot \arctan \left(B \cdot S - E \cdot \left(B \cdot S - \arctan (B \cdot S) \right) \right) \right) \right) + S_v. \quad (1.31)$$

Значения коэффициентов B , C , D , E применяются для обозначения как нормальной нагрузки на колесо G_K , так и угла развала колес γ [204].

С целью повышения точности расчетов представленная модель включает ряд дополнительных коэффициентов. Они реализованы перечнем конкретных параметров для различных типов ЭШ. Поскольку количество дополнительных коэффициентов достигает 85 штук, то для полноценного использования модели ЭШ необходимо проводить большое количество экспериментальных и аналитических исследований.

Эталонная модель ЭШ, основанная на применении нормированных параметров, была предложена учеными Bettella M. и Sharp R. Целью их работы было снижение сложности применения модели Расејка Н. путем уменьшения числа коэффициентов модели [204].

Математическое описание «Магической формулы» было успешно модернизировано отечественным ученым Диком А.Б. [71]. Итогом его трудов стала более совершенная модель Расејка Н.В. – Дика А.Б., основанная на упрощенной нормированной функции проскальзывания [71]:

$$f(S) = \sin(a \cdot \arctan(b \cdot S)); \quad (1.32)$$

где a и b – коэффициенты, которые характеризуют форму кривой функции $f(S)$ [71].

Математическое описание ЭШ по этой модели легко реализуемо, достаточно универсально и выдает результаты с высокой точностью. Рассматриваемое описание колеса с ЭШ имеет некоторое количество недочетов. Первый недостаток заключается в том, что применение такой модели подразумевает наличие для исследуемой ЭШ нормированной $(\varphi-S)$ -диаграммы. Нормированную диаграмму можно получить при испытаниях ЭШ, но для этого необходимо разрабатывать как специальные методики экспериментальных исследований, так и оборудование, позволяющее воспроизводить эти методики. Проведение таких работ вызывает значительные материальные затраты и требует большого количества времени.

Максимально точным в описании характеристик ЭШ и их сцепления с опорной поверхностью признан метод конечных элементов. Модели ЭШ, построенные на основе представленного метода, дают возможности для расчета деформаций и напряжений в пятне контакта ЭШ с поверхностью и при этом максимально описывают взаимодействие ЭШ с поверхностями различного профиля. Ученые Белкин А.Е., Нарская Н.Л., Одинцов О.А. сумели добиться существенных результатов в этой области. Основным и довольно весомым недостатком математических моделей подобного типа является

их быстрое действие. Для вычислений на таких моделях необходимо иметь значительные вычислительные ресурсы, а также мощное и сложное программное обеспечение.

1.6 Задачи исследования

Изучение результатов исследований, предшествующих данной диссертации, позволило сформулировать следующие задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели:

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.

1.7 Выводы по первой главе диссертации

1. На данный момент существует ярко выраженная электрификация автомобильного транспорта, сопровождающаяся отказом от двигателей внутреннего сгорания и увеличением числа автомобилей с электрическим силовым приводом. Автомобили с электрическим силовым приводом, равно как и автомобили с двигателями внутреннего сгорания, нуждаются в регулярном техническом обслуживании, ремонте, диагностике и контроле технического состояния их агрегатов.

2. Анализ методов контроля технического состояния агрегатов автомобилей с электрическим силовым приводом показывает, что стендовые методы предназначены для решения ограниченного перечня задач. Существующие методы контроля технического состояния агрегатов автомобилей и реализующее их оборудование не предоставляют возможности задавать все тестовые режимы, идентичные типовым дорожным режимам функционирования автомобилей с электрическим силовым приводом. При помощи современных методов контроля технического состояния практически невозможно оценить эффективность функционирования автомобилей с электрическим силовым приводом в режиме рекуперации энергии. Это приводит к невозможности получения полноценной информации о состоянии электрического силового привода.

3. В процессе анализа отказов агрегатов электрического силового привода автомобилей в условиях эксплуатации установлено, что лимитирующими надежность 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.

4. Контроль технического состояния автомобилей с электрическим силовым приводом стендовым методом невозможен по причине значительного недостатка знаний о процессе функционирования автомобилей с электрическим силовым приводом на стендах с беговыми барабанами:

- во-первых, нет научно-обоснованных тестовых режимов, при которых необходимо контролировать техническое состояние агрегатов автомобилей с электрическим силовым приводом в стендовых условиях;

- во-вторых, наблюдается отсутствие знаний о диагностических параметрах и их нормативных значениях, пригодных для оценки технического состояния автомобилей с электрическим силовым приводом;

- в-третьих, нет выявленных функциональных зависимостей между параметрами технического состояния автомобилей с электрическим силовым приводом и диагностическими параметрами.

2 Теоретическое обоснование контроля ТДС АЭСП на СББ

В соответствии с задачами, поставленными в диссертации, в данной главе приведено математическое описание процесса функционирования АЭСП на СББ при контроле его ТДС. Математическая модель позволяет рассчитывать основные параметры функционирования ЭСП автомобиля, параметры его энергопотребления и силовые параметры на ведущих колесах, а также выходные характеристики АЭСП, которые позволяют оценить его ТС.

Для анализа процесса функционирования АЭСП на СББ при контроле его ТДС была разработана математическая модель в программном комплексе «Универсальный механизм». В разработанной математической модели АЭСП *KIA Soul EV* установлен на гибридный полноопорный стенд (ГПС) конструкции ИРНИТУ (рис. 2.1).

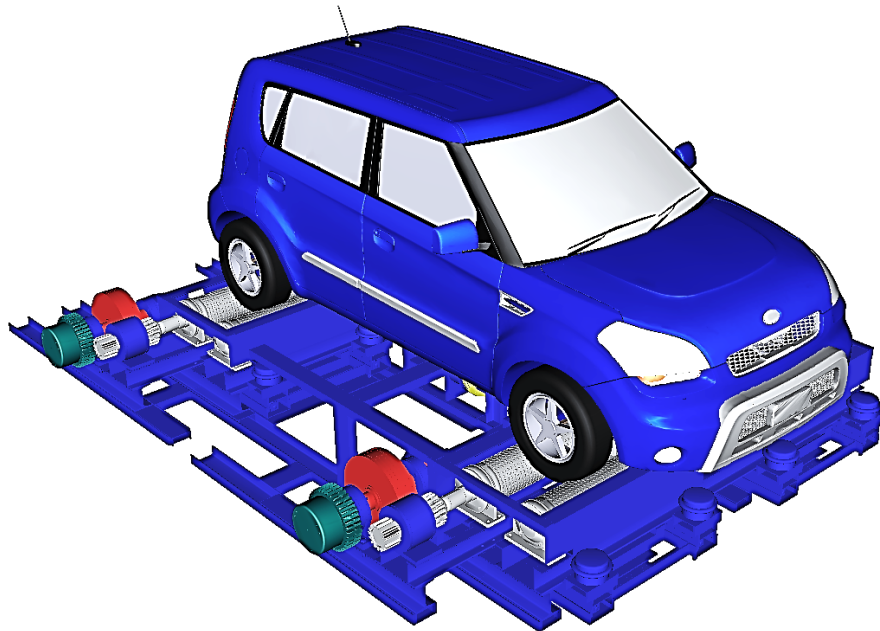


Рисунок 2.1 – АЭСП *KIA Soul EV* на ГПС в разработанной математической модели

Программа «Универсальный механизм» является наиболее удобной, так как структурное построение модели исследуемого процесса выполнено в виде трехмерной модели, содержащей объекты исследуемого процесса,

и отдельно его математического описания. Трехмерное ядро программного комплекса позволяет создавать большие системы, содержащие значительное количество различных элементов, взаимодействующих между собой [124].

2.1 Выявление взаимосвязей в системе «АЭСП – СББ»

Объектом исследования в диссертации принят процесс функционирования АЭСП на СББ при контроле их ТС на СББ. Для реализации аналитического исследования этого процесса была составлена обобщенная структурная схема, представленная на рисунке 2.2.

Анализируя разработанную структурную схему, можно определить факторы, влияющие на объект исследования. С помощью такой схемы выявляются внешние и внутренние факторы функционирования исследуемого процесса. При этом регулирование процесса функционирования объекта исследования осуществляется при помощи управляющих факторов.

Управляющими являются те факторы, которые управляют объектом исследования в процессе его функционирования. Этими факторами в том числе задаются тестовые режимы при контроле ТС АЭСП. К ним относятся коэффициент управления силовой установкой ЭД β_e , тормозной момент ЭДТ M_T , а также суммарный момент инерции маховых масс СББ ΣM_J .

Внешними факторами для исследуемого процесса являются температура окружающей среды T_B и атмосферное давление $P_{\text{АТМ}}$. Эти факторы могут оказывать существенное влияние на процесс функционирования АЭСП в том случае, если не предпринимать никаких защитных мер.

Факторами, определяющими текущее состояние объекта исследования, принято называть внутренними. Также они характеризуют особенности его функционирования. В данном случае к внутренним факторам можно отнести потокосцепление ψ в ЭД, сопротивление обмоток статора ЭД R_A , R_B , R_C и сопротивление ВВЦ $R_{\text{ВЦ}}$, емкость ТВБ $Q_{\text{ВТБ}}$, а также потери на трение в подшипниках ЭД d_e и редуктора $d_{\text{ред}}$.

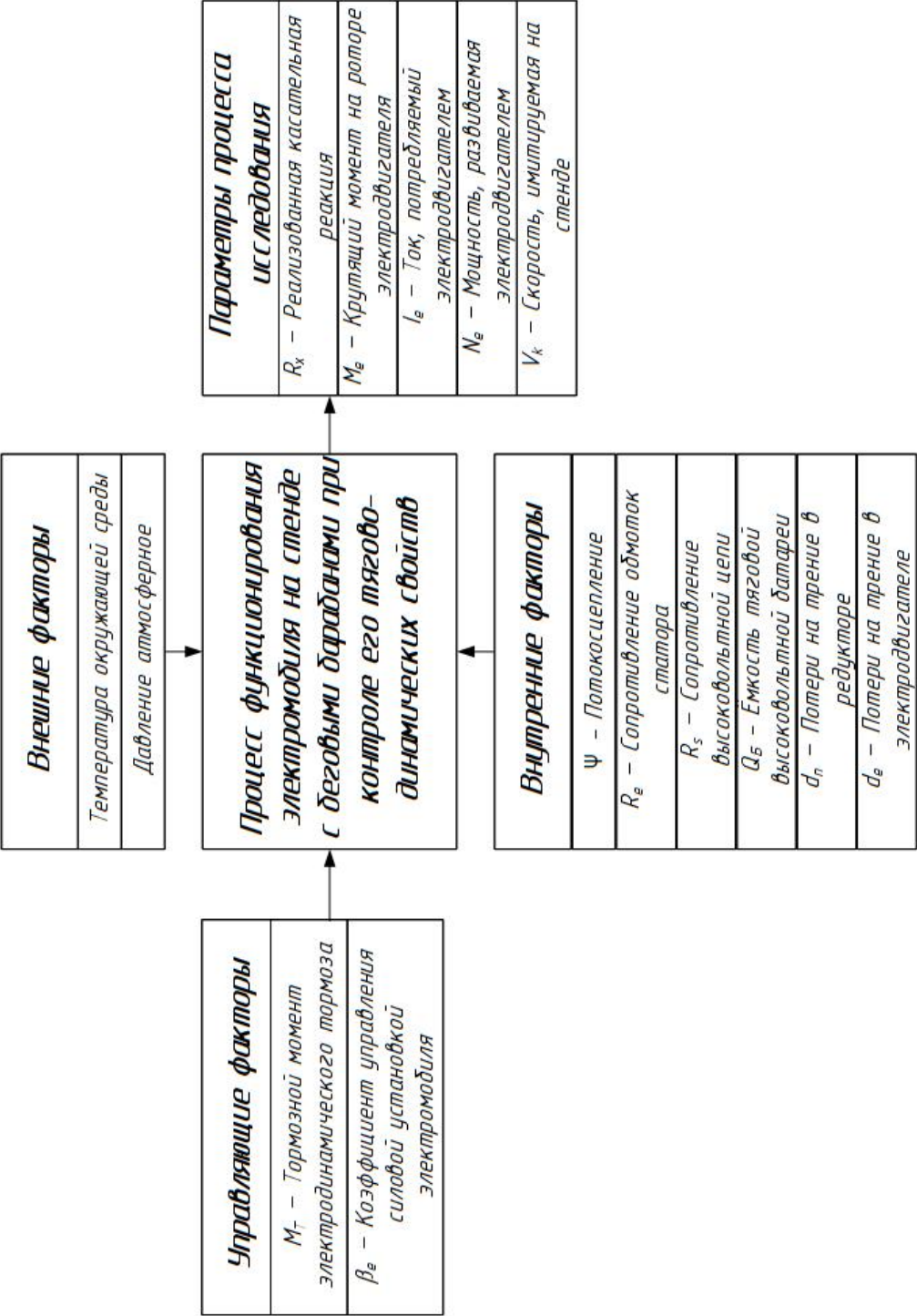


Рисунок 2.2 – Обобщенная структурная схема исследуемого процесса функционирования АЭСП при контроле их ТС на СББ

Выходными параметрами являются сила тяги 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. Опираясь на выходные параметры объекта исследования можно точно и информативно охарактеризовать его ТС.

Для более глубокого анализа исследуемого процесса и выявления внутренних взаимосвязей была разработана подробная структурная схема (рис. 2.3). Схема исследуемой системы «Автомобиль с электрическим силовым приводом – стенд с беговыми барабанами» («АЭСП – СББ») позволяет детально выявлять и подвергать анализу причинно-следственные взаимодействия и связи между элементами представленной системы.

Принято допущение о том, что исследуемый процесс не подвергается воздействию внешних факторов. Данное допущение обосновывается применением стендового контроля ТС АЭСП, подразумевает нахождение как самого АЭСП, так и СББ в закрытом помещении. Данный факт свидетельствует о том, что объект исследования изолирован от воздействий внешней среды.

Анализ структурной схемы исследуемого процесса дает возможность выявлять взаимосвязи в системе «АЭСП – СББ», которые позволяют разработать математическую модель рассматриваемой системы.

2.2 Обоснование ТР контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ

В процессе контроля ТС агрегатов АЭСП необходимо обеспечивать тестовые воздействия, включающие разгон, движение с постоянной скоростью под нагрузкой, выбег, а также режим РЭ. При этом необходимо измерять силовые и кинематические параметры на каждом колесе.

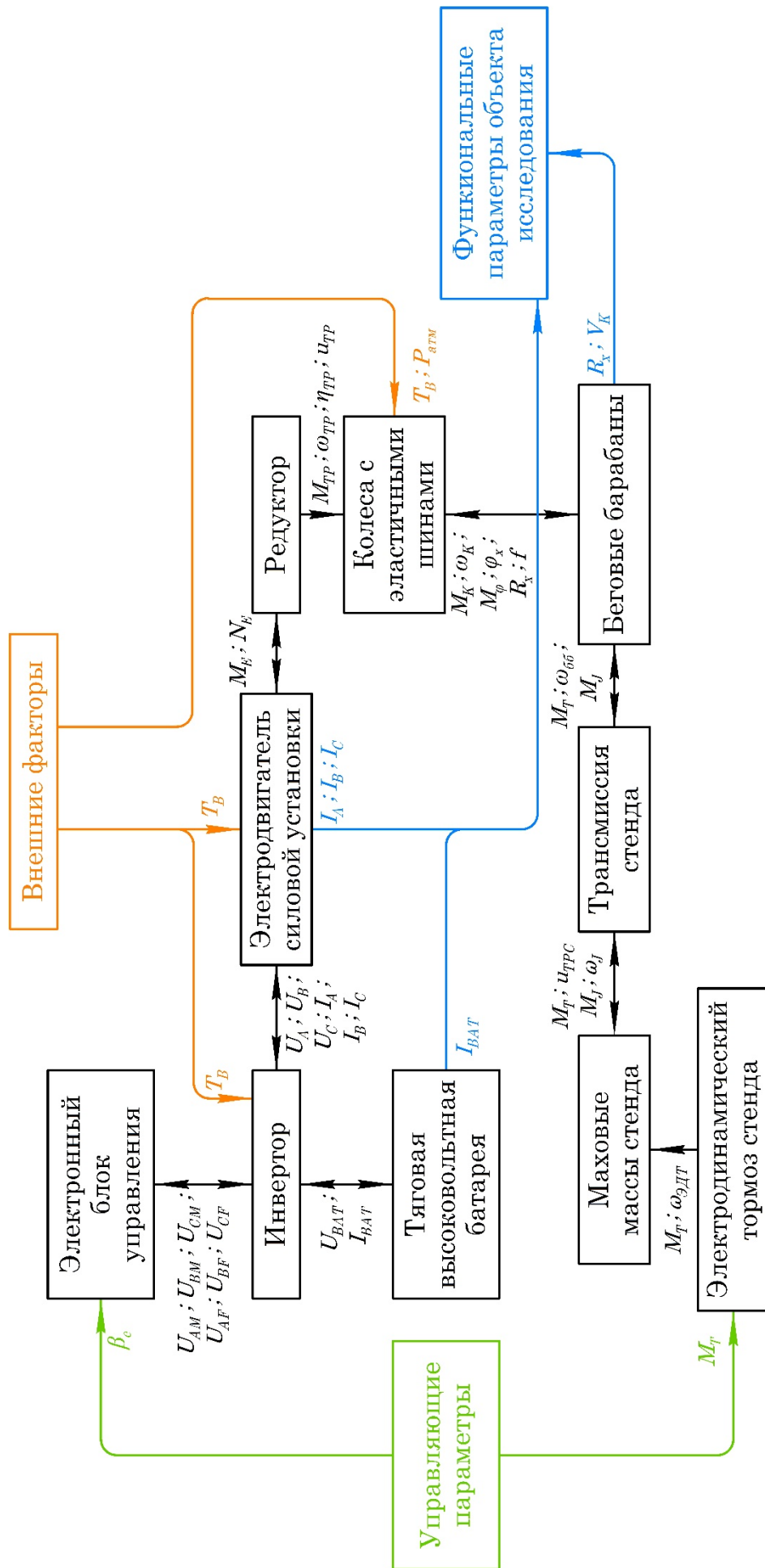


Рисунок 2.3 – Структурная схема процесса функционирования системы «АЭСП – СББ»

В процессе эксплуатации АЭСП наиболее используемыми являются пять основных режимов движения:

- разгон на горизонтальной дороге и/или в гору;
- выбег на горизонтальной дороге и/или под гору;
- торможение тормозной системой и/или двигателем;
- движение с постоянной скоростью на горизонтальной дороге;
- движение с постоянной скоростью под нагрузкой (например, движение в гору).

Для количественной оценки ТС агрегатов АЭСП необходимо воспроизводить тестовые воздействия, аналогичные представленным режимам функционирования АЭСП в дорожных условиях. Имитация стендовым методом каждого из представленных дорожных режимов позволит существенно повысить эффективность эксплуатации АЭСП за счет увеличения информативности контроля ТС агрегатов АЭСП.

Уравнение силового баланса сил на ведущих колесах АЭСП в режиме его разгона в гору в общем виде может быть представлено как [133, 140, 147, 158]:

$$F_k = F_f + F_\alpha + F_{wx} + F_{jx} \cdot \delta_j; \quad (2.1)$$

где F_k – сила тяги на ведущих колесах;

F_f – сила сопротивления качению;

F_α – составляющая веса АЭСП, параллельная опорной поверхности;

F_{wx} – сила аэродинамического сопротивления;

F_{jx} – сила инерции поступательного движения АЭСП;

δ_j – коэффициент, учитывающий инерцию разгона вращающихся масс.

В развернутом виде уравнение (2.1), приведенное к ведущим колесам АЭСП, будет выглядеть следующим образом [133, 140, 147, 158]:

$$\frac{M_e \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр}}{r_{ko}} = G \cdot \cos \alpha \cdot f + G \cdot \sin \alpha + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2} + \frac{G \cdot dV}{g \cdot dt} + \quad (2.2)$$

$$+ \frac{\sum J_k \frac{d\omega_k}{dt}}{r_{ko}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр}}{r_{ko}}.$$

Баланс сил на ведущих колесах АЭСП при движении с постоянной скоростью по ровной горизонтальной поверхности показывает расход его силы тяги на преодоление сил сопротивления качению и сил аэродинамического сопротивления [133, 140, 147, 158]:

$$F_k = F_f + F_{wx}. \quad (2.3)$$

В более развернутой форме выражение (2.3) можно представить как [133, 140, 147, 151]:

$$\frac{M_e \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр}}{r_{ko}} = G \cdot f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}. \quad (2.4)$$

Баланс сил на ведущих колесах АЭСП при движении с постоянной скоростью в гору представлен уравнением вида [133, 140, 147, 158]:

$$F_k = F_f + F_\alpha + F_{wx}. \quad (2.5)$$

В развернутой форме выражение (2.5) можно представить как [133, 140, 147, 158]:

$$\frac{M_e \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр}}{r_{ko}} = G \cdot \cos\alpha \cdot f + G \cdot \sin\alpha + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}. \quad (2.6)$$

В режиме рекуперативного торможения АЭСП при помощи его ЭД на горизонтальной поверхности дороги приведенные к ведущим колесам силы затрачиваются на снижение кинетической энергии поступательного движения АЭСП и вращательного движения его масс:

$$F_{jx} \cdot \delta_j = F_{тд} + F_f + F_{wx}. \quad (2.7)$$

В развернутой форме уравнение (2.7) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{G \cdot dV_a}{g \cdot dt} + \frac{\sum J_k \frac{d\omega_k}{dt}}{r_{ko}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр}}{r_{ko}} = \\ = \frac{M_{тд} \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр}}{r_{ko}} + G \cdot f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}; \end{aligned} \quad (2.8)$$

где $F_{тд}$ – подведенная к ведущим колесам сила потерь в ЭД;

$M_{тд}$ – тормозной момент ЭД.

Режим свободного выбега АЭСП на горизонтальной поверхности описывается выражением:

$$F_{jx} = F_f + F_{wx}. \quad (2.9)$$

В развернутой форме выражение (2.9) будет иметь следующий вид:

$$\frac{G \cdot dV_a}{g \cdot dt} + \frac{\sum J_k \frac{d\omega_k}{dt}}{r_{ko}} = G \cdot f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{r_{ko}}. \quad (2.10)$$

Выражения (2.1) ÷ (2.10) описывают силовой баланс АЭСП для дорожных условий их движения, но не являются корректными для описания силового баланса в условиях их функционирования на СББ. Для корректного описания процесса функционирования АЭСП на СББ необходимо преобразование выражений (2.1) ÷ (2.10) с учетом следующих факторов [158].

В первую очередь функционирование АЭСП в стендовых условиях характеризуется тем, что масса автомобиля остается неподвижной. Данный фактор необходимо учитывать при описании силового баланса на колесах АЭСП. Поскольку отсутствует перемещение массы, соответственно, ее скорость и ускорение остаются неизменны и равны нулю. С учетом вышесказанного изменение кинетической энергии W_a поступательно движущихся масс ускоряющего или замедляющегося АЭСП необходимо имитировать на СББ.

Реализовать это возможно при помощи кинетической энергии W_m ускорения и замедления вращения маховых масс СББ. Такое решение позволяет воспроизводить динамические режимы функционирования АЭСП в стендовых условиях [158].

Приравняв величины кинетических энергий поступательного и вращательного движения $W_a = W_m$, получим выражение, в соответствии с которым можно описать процесс разгона АЭСП на СББ:

$$\frac{G \cdot dV}{g \cdot dt} = \frac{1}{r_{\text{ко}}} \cdot \sum J_m \frac{d\omega_m}{dt}; \quad (2.11)$$

где J_m – момент инерции одного маховика СББ;

ω_m – угловая скорость маховика СББ.

При условии, что буксование колес АЭСП относительно поверхности ББ стенда отсутствует, угловое ускорение ББ связано с ускорением автомобиля и рассчитывается по формуле:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{r_6}; \quad (2.12)$$

где r_6 – радиус ББ стенда.

Замена силы инерции поступательного разгона массы АЭСП осуществляется в соответствии с выражением:

$$\frac{G \cdot dV}{g \cdot dt} = \frac{1}{r_{\text{ко}}} \cdot \sum \frac{J_m}{r_6} \frac{dV}{dt}. \quad (2.13)$$

Чтобы определить момент инерции маховых масс СББ необходимо учитывать приведенную к ББ массу АЭСП, а также моменты инерции ББ и передаточные числа кинематических элементов СББ:

$$\frac{G}{g} \cdot r_{\text{ко}}^2 = \sum J_m \cdot i_6^2 \cdot i_{\text{п}}^2 + \sum J_6 \cdot i_{\text{п}}^2. \quad (2.14)$$

Определить момент инерции одной маховой массы СББ можно используя выражение:

$$J_M = \frac{\frac{G}{g} r_{ko}^2 - \sum J_6 \cdot r_{\Pi}^2}{r_6^2 \cdot r_{\Pi}^2 \cdot N}; \quad (2.15)$$

где N – количество маховиков в конструкции СББ.

Сила аэродинамического сопротивления F_{wx} , равно как и параллельная опорной поверхности составляющая веса АЭСП F_{α} (2.1–2.10), будут равны нулю при функционировании АЭСП на СББ. Соответственно, их воздействие на АЭСП в стендовых условиях необходимо имитировать, создавая искусственную нагрузку $F_{и}$ на ведущие колеса АЭСП. Представленные величины при функционировании АЭСП в дорожных условиях не постоянны. Они изменяются в зависимости от скорости движения и профиля дороги. Вследствие чего их влияние на АЭСП при его функционировании в стендовых условиях необходимо имитировать. Сделать это возможно за счет подведения к ББ тормозного момента M_T . В этом случае имитируемая искусственная нагрузка $F_{и}$, подведенная к ведущим колесам АЭСП от действия тормозного момента M_T , рассчитывается по формуле:

$$F_{и} = \frac{M_T \cdot i_T \cdot \eta_T}{r_6} = G \cdot \cos \alpha \cdot f + G \cdot \sin \alpha + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}. \quad (2.16)$$

После выполнения преобразований с учетом вышеописанных особенностей функционирования АЭСП в стендовых условиях уравнение (2.2) баланса сил на ведущих колесах АЭСП при имитации его разгона в гору на СББ режима имеет следующий вид [158]:

$$\frac{M_e \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр}}{r_{ko}} = \frac{M_T \cdot i_T \cdot \eta_T}{r_6} + \frac{1}{r_{ko}} \cdot \sum \frac{J_M}{r_6} \frac{dV}{dt} + \frac{\sum J_K \frac{d\omega_K}{dt}}{r_{ko}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр}}{r_{ko}}. \quad (2.17)$$

Преобразование выражения (2.4), описывающего процесс движения с постоянной скоростью, для описания имитации движения АЭСП на СББ

по горизонтальной дороге и неизменной скорости с учетом выражений (2.11) ÷ (2.16) будет иметь вид [158]:

$$\frac{M_e \cdot i_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{тр}}}{r_{ko}} = \frac{M_T \cdot i_T \cdot \eta_T}{r_6}. \quad (2.18)$$

В этом случае правая часть уравнения (2.18) – представляющая силу $F_{\text{и}}$, имитирующую искусственную нагрузку на ББ, которую создает тормоз стенда, определяется в соответствии с выражением:

$$F_{\text{и}} = \frac{M_T \cdot i_T \cdot \eta_T}{r_6} = G \cdot f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}. \quad (2.19)$$

Уравнение (2.6) баланса сил на ведущих колесах АЭСП при имитации движения с постоянной скоростью в гору на СББ режима тоже может быть представлено в виде формулы (2.18). При этом выражение (2.16), описывающее имитацию нагрузки F_u на ЭСУ, будет определять правую часть уравнения (2.18). Уравнение (2.8) баланса сил на ведущих колесах АЭСП при имитации режима торможения ЭД на горизонтальной поверхности дороги на СББ, приведенные к ведущим колесам силы, затрачиваются на снижение кинетической энергии поступательного движения АЭСП и вращательного движения его масс СББ, имеет следующий вид [158]:

$$\frac{G \cdot dV_a}{g \cdot dt} + \frac{\sum J_k \frac{d\omega_k}{dt}}{r_{ko}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{тр}}}{r_{ko}} = \frac{M_{\text{тд}} \cdot i_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{тр}}}{r_{ko}} + \frac{M_T \cdot i_T \cdot \eta_T}{r_6}. \quad (2.20)$$

Представленный уравнениями (2.9) и (2.10) режим свободного выбега АЭСП на горизонтальной поверхности лишен смысла с энергетической точки зрения. В рассматриваемом случае не происходит заряда ТВБ. При этом энергия движения АЭСП тратится исключительно на преодоление сил сопротивления движению автомобиля. На основании этого можно сделать вывод о том, что данный режим функционирования АЭСП

не является информативным с точки зрения контроля ТС агрегатов ЭСП. Рассматриваемый режим целесообразно применять исключительно для контроля ТС трансмиссии и ходовой части АЭСП.

2.3 Математическая модель системы «АЭСП – СББ»

2.3.1 Математическое описание положения АЭСП на СББ

При функционировании АЭСП на СББ под действием силы тяги или торможения на его колесах происходят перемещение и наклон кузова АЭСП. Эти перемещения влияют на механику взаимодействия ЭШ с опорными поверхностями ББ диагностического стенда [29, 150, 154].

При описании динамики перемещений кузова АЭСП в разрабатываемой имитационной математической модели были приняты определенные допущения. Они дают возможность реализовать описание исследуемого процесса в более простой форме. Функционирование АЭСП на СББ происходит при имитации его движения по прямой дороге без поворотов с равномерным покрытием.

В модели не учитывается действие на АЭСП действие боковых сил. Благодаря этому исключается необходимость учета отклонения автомобиля от прямолинейного направления. На основании этого в модели коэффициенты сцепления всех четырех колес принимаются равными. Также путь, пройденный колесами с левой и правой сторон АЭСП, принимаются равными. В связи с этим исключается необходимость в описании перемещения кузова АЭСП во всех плоскостях и целесообразно просчитывать перемещения кузова только в плоскости XOZ .

Для составления дифференциальных уравнений перемещений кузова АЭСП в указанной плоскости была разработана двухмерная расчетная схема АЭСП на СББ (рис. 2.4).

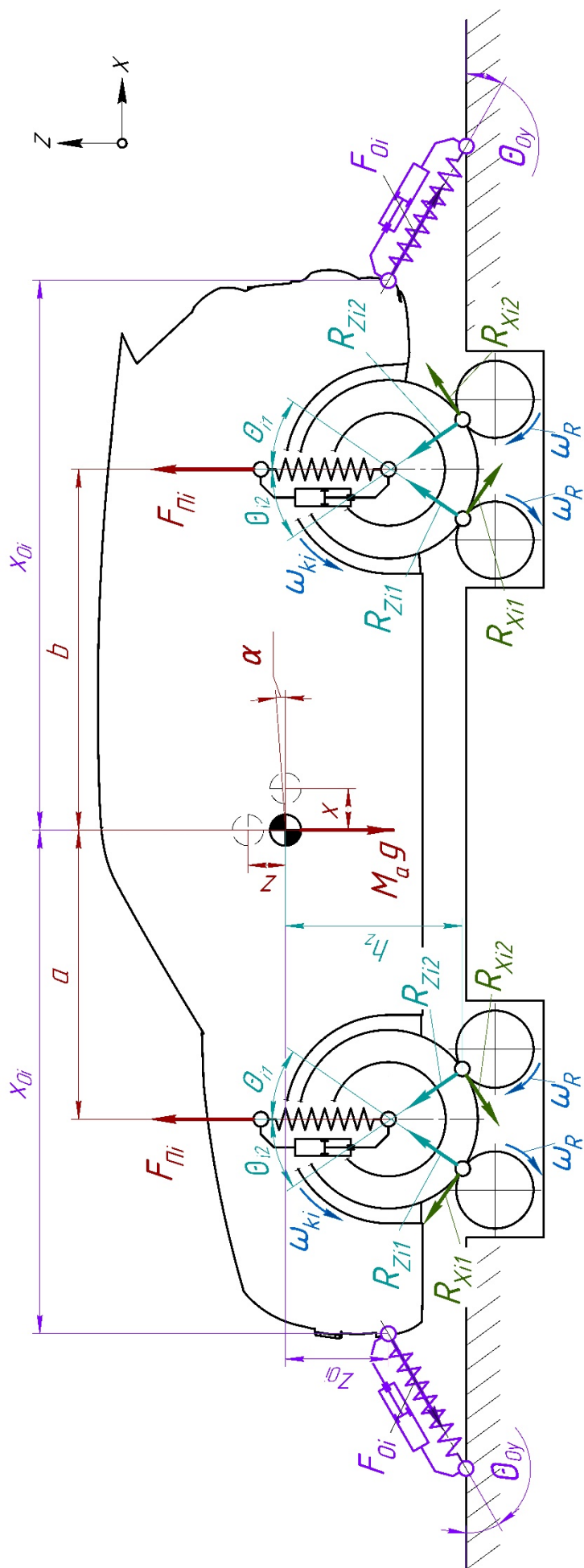


Рисунок 2.4 – Двухмерная расчетная схема процесса функционирования системы «АЭСП – СББ»

Дифференциальное уравнение для расчета ускорения продольного перемещения подрессоренной массы АЭСП вдоль оси OX имеет следующий вид:

$$M_a \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum R'_{Xi} + \sum R'_{Zi} + \sum F'_{Oi}; \quad (2.21)$$

где M_a – подрессоренная масса АЭСП;

$\sum R'_{Xi}$ – сумма проекций на ось OX реализованных касательных реакций (РКР) i -го колеса АЭСП в пятнах контакта ЭШ с ББ диагностического стенда;

$\sum R'_{Zi}$ – сумма проекций на ось OX нормальных реакций i -го колеса в пятнах контакта ЭШ АЭСП с ББ диагностического стенда;

$\sum F'_{Oi}$ – сумма проекций на ось OX усилий в i -м ограничителе, возникающих при перемещении кузова АЭСП.

Сумма проекций на ось OX РКР i -го колеса АЭСП в пятнах контакта ЭШ с ББ диагностического стенда определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \sum R'_{Xi} = & -R_{X11} \cdot \cos \theta_{11} - R_{X12} \cdot \cos \theta_{12} - R_{X21} \cdot \cos \theta_{21} - \\ & -R_{X22} \cdot \cos \theta_{22} + R_{X31} \cdot \cos \theta_{31} + R_{X32} \cdot \cos \theta_{32} + \\ & + R_{X41} \cdot \cos \theta_{41} + R_{X42} \cdot \cos \theta_{42}; \end{aligned} \quad (2.22)$$

где R_{Xi1} и R_{Xi2} – РКР в пятнах контакта i -го колеса с передними и задними ББ диагностического стенда соответственно;

θ_{i1} и θ_{i2} – угол между вертикальной осью OZ и РКР R_{Xi1} и R_{Xi2} i -го колеса соответственно.

Сумма проекций на ось OX нормальных реакций i -го колеса в пятнах контакта колес АЭСП с беговыми барабанами стенда рассчитывается из выражения:

$$\begin{aligned} \sum R'_{Zi} = & -R_{Z12} \cdot \sin \theta_{12} - R_{Z22} \cdot \sin \theta_{22} + R_{Z11} \cdot \sin \theta_{11} + \\ & + R_{Z21} \cdot \sin \theta_{21} - R_{Z32} \cdot \sin \theta_{32} - R_{Z42} \cdot \sin \theta_{42} + \\ & + R_{Z31} \cdot \sin \theta_{31} + R_{Z41} \cdot \sin \theta_{41} \end{aligned} \quad (2.23)$$

где R_{Zi1} и R_{Zi2} – нормальные реакции в пятнах контакта i -го колеса с передними и задними беговыми барабанами стенда соответственно.

Сумма проекций на ось OX усилий i -го ограничителя, возникающая при перемещении кузова АЭСП определяется по выражению:

$$\sum F'_{Oi} = -F_{O1} \cdot \cos \theta_{Oy1} - F_{O2} \cdot \cos \theta_{Oy2} + F_{O3} \cdot \cos \theta_{Oy3} + F_{O4} \cdot \cos \theta_{Oy4}; \quad (2.24)$$

где F_{Oi} – усилия в i -м ограничителе, возникающие от перемещения кузова АЭСП;
 θ_{Oyi} – угол в плоскости XOZ между осью OX и i -м ограничителем.

Дифференциальное уравнение для расчета ускорения продольного перемещения поддрессоренной массы АЭСП вдоль оси OZ имеет следующий вид:

$$M_a \frac{d^2 z}{dt^2} = \sum R''_{Xi} + \sum R''_{Zi} + \sum F'''_{Oi} - M_a \cdot g; \quad (2.25)$$

где $\sum R''_{Xi}$ – сумма проекций на ось OZ РКР i -го колеса АЭСП в пятнах контакта ЭШ с ББ диагностического стенда;

$\sum R''_{Zi}$ – сумма проекций на ось OZ нормальных реакций i -го колеса в пятнах контакта ЭШ АЭСП с ББ диагностического стенда;

$\sum F'''_{Oi}$ – сумма проекций на ось OZ усилий в i -м ограничителе, возникающих при перемещении кузова АЭСП;

g – ускорение свободного падения.

Сумма проекций на ось OZ РКР i -го колеса АЭСП в пятнах контакта ЭШ с ББ диагностического стенда определяется как:

$$\begin{aligned} \sum R''_{Xi} = & R_{X11} \cdot \sin \theta_{11} - R_{X12} \cdot \sin \theta_{12} + R_{X21} \cdot \sin \theta_{21} - R_{X22} \cdot \\ & \cdot \sin \theta_{22} - R_{X31} \cdot \sin \theta_{31} + R_{X32} \cdot \sin \theta_{32} - R_{X41} \cdot \sin \theta_{41} + \\ & + R_{X42} \cdot \sin \theta_{42}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Сумма проекций на ось OZ нормальных реакций i -го колеса в пятнах контакта ЭШ АЭСП с ББ диагностического стенда рассчитывается:

$$\sum R''_{Zi} = R_{Z12} \cdot \cos \theta_{12} + R_{Z22} \cdot \cos \theta_{22} + R_{Z11} \cdot \cos \theta_{11} + R_{Z21} \cdot \quad (2.27)$$

$$\cdot \cos \theta_{21} + R_{Z32} \cdot \cos \theta_{32} + R_{Z42} \cdot \cos \theta_{42} + R_{Z31} \cdot \cos \theta_{31} + \\ + R_{Z41} \cdot \cos \theta_{41}.$$

Сумма проекций на ось OZ усилий в i -м ограничителе, возникающих при перемещении кузова АЭСП, определяется в соответствии с выражением:

$$\sum F_{oi}''' = -F_{o1} \cdot \sin \theta_{oy1} - F_{o2} \cdot \sin \theta_{oy2} - F_{o3} \cdot \sin \theta_{oy3} - \\ - F_{o4} \cdot \sin \theta_{oy4}. \quad (2.28)$$

Угловое перемещение кузова АЭСП в плоскости XOZ относительно оси OY определяется по дифференциальному выражению вида:

$$J_y \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \sum (R'_{xi} \cdot z_i) + \sum (R'_{zi} \cdot z_i) + \sum (R'''_{xi} \cdot x_i) + \\ + \sum (R'''_{zi} \cdot x_i) + \sum (F'_{oi} \cdot z_{oi}) + \sum (F'''_{oi} \cdot x_{oi}) + \\ + \sum (F_{\Pi i} \cdot a) + \sum (F_{\Pi i} \cdot b); \quad (2.29)$$

где J_y – момент инерции АЭСП относительно оси OY ;

R'_{xi} , R'_{zi} и F'_{oi} – проекции на ось OX РКР, нормальных реакций в пятнах контакта i -го колеса АЭСП и усилий в i -х ограничителях перемещений кузова АЭСП соответственно;

x_i и z_i – плечи действия проекций на оси OZ и OX реакций в пятне контакта i -го колеса АЭСП соответственно;

R'''_{xi} , R'''_{zi} и F'''_{oi} – проекции на ось OZ РКР, нормальных реакций в пятнах контакта i -го колеса АЭСП и усилий в i -х ограничителях перемещений кузова АЭСП соответственно;

x_{oi} и z_{oi} – плечи действия проекций на оси OZ и OX усилий в i -х ограничителях перемещений кузова АЭСП соответственно;

$F_{\Pi i}$ – усилия в элементах подвески i -го колеса АЭСП;

a и b – расстояние от центра масс АЭСП до передней и задней осей соответственно.

Суммы моментов проекций на оси OX и OZ реализованных касательных реакций в пятне контакта i -го колеса, вызывающих угловое перемещение кузова относительно оси OY , определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} \sum (R'_{Xi} \cdot z_i) = & R_{X11} \cdot \cos \theta_{11} \cdot z_{11} + R_{X12} \cdot \cos \theta_{12} \cdot z_{12} + R_{X21} \cdot \\ & \cdot \cos \theta_{21} \cdot z_{21} + R_{X22} \cdot \cos \theta_{22} \cdot z_{22} - R_{X31} \cdot \cos \theta_{31} \cdot z_{31} - R_{X32} \cdot \\ & \cdot \cos \theta_{32} \cdot z_{32} - R_{X41} \cdot \cos \theta_{41} \cdot z_{41} - R_{X42} \cdot \cos \theta_{42} \cdot z_{42}; \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \sum (R''_{Xi} \cdot x_i) = & R_{X11} \cdot \sin \theta_{11} \cdot x_{11} - R_{X12} \cdot \sin \theta_{12} \cdot x_{12} + R_{X21} \cdot \\ & \cdot \sin \theta_{21} \cdot x_{21} - R_{X22} \cdot \sin \theta_{22} \cdot x_{22} + R_{X31} \cdot \sin \theta_{31} \cdot x_{31} - R_{X32} \cdot \\ & \cdot \sin \theta_{32} \cdot x_{32} + R_{X41} \cdot \sin \theta_{41} \cdot x_{41} - R_{X42} \cdot \sin \theta_{42} \cdot x_{42}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Суммы моментов проекций на оси OX и OZ нормальных реакций в пятне контакта i -го колеса, вызывающих угловое перемещение кузова АЭСП относительно оси OY , определяются в соответствии с формулами:

$$\begin{aligned} \sum (R'_{Zi} \cdot z_i) = & R_{Z12} \cdot \sin \theta_{12} \cdot z_{12} + R_{Z22} \cdot \sin \theta_{22} \cdot z_{22} - R_{Z11} \cdot \\ & \cdot \sin \theta_{11} \cdot z_{11} - R_{Z21} \cdot \sin \theta_{21} \cdot z_{21} - R_{Z32} \cdot \sin \theta_{32} \cdot z_{32} - \\ & - R_{Z42} \cdot \sin \theta_{42} \cdot z_{42} + R_{Z31} \cdot \sin \theta_{31} \cdot z_{31} + R_{Z41} \cdot \sin \theta_{41} \cdot z_{41}; \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \sum (R''_{Zi} \cdot x_i) = & R_{Z12} \cdot \cos \theta_{12} \cdot z_{12} + R_{Z22} \cdot \cos \theta_{22} \cdot z_{22} + \\ & + R_{Z11} \cdot \cos \theta_{11} \cdot z_{11} + R_{Z21} \cdot \cos \theta_{21} \cdot z_{21} - R_{Z32} \cdot \cos \theta_{32} \cdot z_{32} - \\ & - R_{Z42} \cdot \cos \theta_{42} \cdot z_{42} - R_{Z31} \cdot \cos \theta_{31} \cdot z_{31} - R_{Z41} \cdot \cos \theta_{41} \cdot z_{41}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Суммы моментов проекций на оси OX и OZ усилий в i -х ограничителях, вызывающих угловое перемещение кузова АЭСП относительно оси OY , рассчитываются по выражениям:

$$\begin{aligned} \sum (F'_{Oi} \cdot z_{Oi}) = & F_{O1} \cdot \cos \theta_{Oy1} \cdot z_{O1} + F_{O2} \cdot \cos \theta_{Oy2} \cdot z_{O2} - \\ & - F_{O3} \cdot \cos \theta_{Oy3} \cdot z_{O3} - F_{O4} \cdot \cos \theta_{Oy4} \cdot z_{O4}; \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\sum (F_{oi}''' \cdot x_{oi}) = -F_{o1} \cdot \sin \theta_{oy1} \cdot x_{o1} - F_{o2} \cdot \sin \theta_{oy2} \cdot x_{o2} + \\ + F_{o3} \cdot \sin \theta_{oy3} \cdot x_{o3} + F_{o4} \cdot \sin \theta_{oy4} \cdot x_{o4}. \quad (2.35)$$

Суммы моментов усилий в элементах подвески i -го колеса, вызывающих угловое перемещение кузова АЭСП относительно оси OY , определяются по формулам:

$$\sum (F_{\Pi i} \cdot a) = F_{\Pi 1} \cdot a + F_{\Pi 2} \cdot a; \quad (2.36)$$

$$\sum (F_{\Pi i} \cdot b) = F_{\Pi 3} \cdot b + F_{\Pi 4} \cdot b. \quad (2.37)$$

Нормальные реакции R_{zi1} и R_{zi2} в пятнах контакта i -го колеса с ЭШ с опорными поверхностями ББ рассчитываются в соответствии с представленными выражениями:

$$R_{zi1} = \begin{cases} C_{\text{Ш}} \cdot \Delta h_{Ci1} - d_{\text{Ш}} \cdot V_{HCi1}, & \text{если } \Delta h_{Ci1} > 0; \\ 0, & \text{если } \Delta h_{Ci1} \leq 0 \end{cases}; \quad (2.38)$$

$$R_{zi2} = \begin{cases} C_{\text{Ш}} \cdot \Delta h_{Ci2} - d_{\text{Ш}} \cdot V_{HCi2}, & \text{если } \Delta h_{Ci2} > 0; \\ 0, & \text{если } \Delta h_{Ci2} \leq 0 \end{cases}; \quad (2.39)$$

где $C_{\text{Ш}}$ – радиальная жесткость ЭШ;

$d_{\text{Ш}}$ – коэффициент демпфирования ЭШ;

$\Delta h_{Ci1}, \Delta h_{Ci2}$ – деформации ЭШ i -го колеса в радиальном направлении;

V_{HCi1}, V_{HCi2} – скорости деформации ЭШ i -го колеса.

Деформация ЭШ при их контакте с беговыми барабанами рассчитывается через геометрию положения колес автомобиля относительно СББ следующим образом:

$$\Delta h_{Ci1} = r_c + r_6 - L_{Ci1}; \quad (2.40)$$

$$\Delta h_{Ci2} = r_c + r_6 - L_{Ci2}; \quad (2.41)$$

где L_{Ci1}, L_{Ci2} – расстояния между центром оси вращения i -го колеса АЭСП и центрами осей вращения ББ диагностического стенда;

r_c – свободный радиус колеса АЭСП;

r_6 – радиус ББ диагностического стенда.

Расчет расстояния от центра оси вращения колеса АЭСП до центров осей вращения ББ диагностического стенда можно реализовать, применив следующие уравнения [29, 150, 154]:

$$L_{ci1} = \sqrt{(h_0 - Z_{ki})^2 + (0.5 \cdot l_w - X_{ki})^2}; \quad (2.42)$$

$$L_{ci2} = \sqrt{(h_0 - Z_{ki})^2 + (0.5 \cdot l_w + X_{ki})^2}; \quad (2.43)$$

где h_0 – начальное расстояние, при котором ЭШ касается ББ диагностического стенда, но деформация ЭШ при этом отсутствует;

Z_{ki}, X_{ki} – координаты центра оси вращения i -го колеса АЭСП;

l_w – межосевое расстояние между ББ диагностического стенда;

$$h_0 = \sqrt{(r_c + r_6)^2 - (0.5 \cdot l_w)^2}. \quad (2.44)$$

При деформации упругих элементов подвески АЭСП в них возникают усилия $F_{\Pi i}$. Их величину можно определить, используя формулу:

$$F_{\Pi i} = \Delta h_{\Pi i} \cdot C_{\Pi} - d_{\Pi} \cdot \frac{d\Delta h_{\Pi i}}{dt}; \quad (2.45)$$

где d_{Π} – коэффициент демпфирования упругих элементов подвески АЭСП;

$\Delta h_{\Pi i}$ – деформация упругих элементов подвески i -го колеса АЭСП;

C_{Π} – жесткость упругих элементов подвески АЭСП;

$\frac{d\Delta h_{\Pi i}}{dt}$ – скорость деформации упругих элементов подвески i -го колеса.

Кузов АЭСП закреплен к СББ при помощи ограничителей. При функционировании АЭСП на СББ в ограничителях возникают усилия F_o . Величину этих усилий можно рассчитать, используя уравнение:

$$F_{огр} = \Delta L_{огр} \cdot C_{огр} - d_{огр} \cdot \frac{d\Delta L_{огр}}{dt}; \quad (2.46)$$

где $d_{огр}$ – коэффициент демпфирования ограничителя перемещений кузова;

$\Delta L_{\text{огр}}$ – деформация упругих элементов ограничителя перемещений кузова АЭСП;

$C_{\text{огр}}$ – жесткость упругих элементов ограничителя перемещений кузова АЭСП;

$\frac{d\Delta L_{\text{огр}}}{dt}$ – скорость изменения деформации упругих элементов ограничителя перемещений кузова АЭСП.

Разработанное математическое описание дает возможность моделировать изменения параметров функционирования колеса с ЭШ при перемещениях АЭСП в процессе его функционирования на СББ.

2.3.2 Математическое описание взаимодействия ЭШ с ББ диагностического стенда

Колеса с 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 определения параметров функционирования ЭШ на опорных поверхностях ББ за основу была принята модель Дика А.Б. [71, 130].

Разработанные расчетные схемы дают возможность математически описать процесс функционирования ЭШ на ББ диагностического стенда в тяговом (рис. 2.5, А) и тормозном режимах (рис. 2.5, Б).

Уравнение динамики вращения ведущего колеса АЭСП, исходя из расчетной схемы (см. рис. 2.5, А), будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d\omega_k}{dt} = \frac{M_k - R_{x1} \cdot r_{k0_1} - R_{x2} \cdot r_{k0_2} - M_{jk} - M_{jc} - M_f}{J_k}; \quad (2.47)$$

где M_k – крутящий момент, подведенный к колесу от ЭСУ АЭСП;

R_{X1} и R_{X2} – РКР в пятнах контакта ЭШ с передним и задним ББ диагностического стенда соответственно;

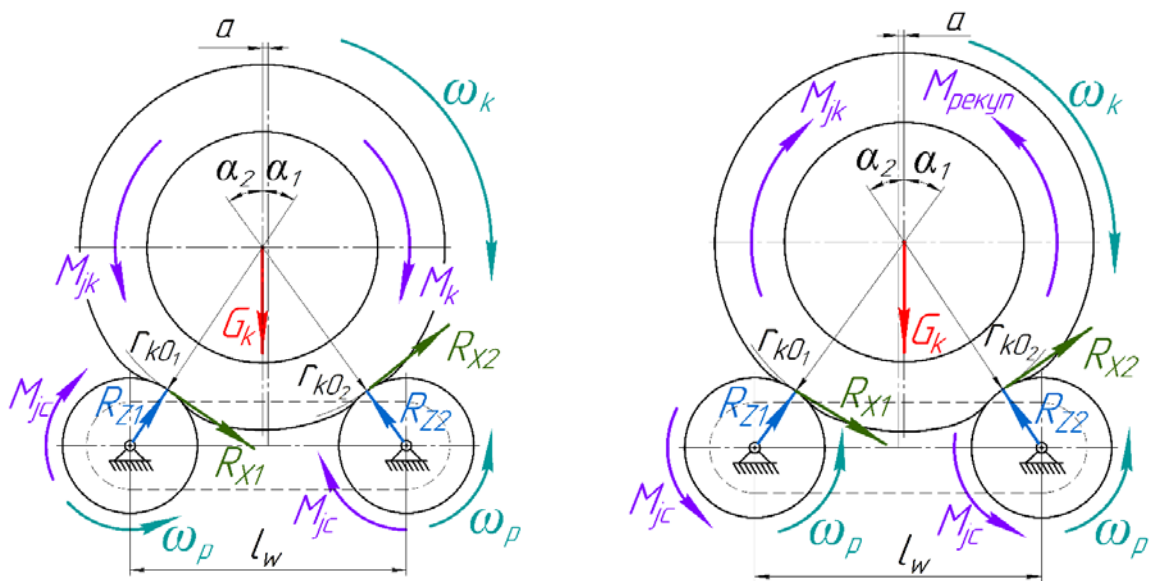
r_{k01} и r_{k02} – радиус колеса при взаимодействии с передним и задним ББ диагностического стенда соответственно;

M_{jk} – инерционный момент колеса с ЭШ;

J_k – момент инерции колеса с ЭШ;

M_{jc} – приведенный момент инерции маховых масс СББ;

M_f – момент сопротивления качению колеса с ЭШ.



А – тяговый режим взаимодействия Б – тормозной режим взаимодействия

Рисунок 2.5 – Схема сил при взаимодействии колес

Аналогичным образом в соответствии с расчетной схемой (см. рис. 2.5, Б) было составлено дифференциальное уравнение динамики вращения колеса с ЭШ в режиме торможения или режиме РЭ:

$$\frac{d\omega_k}{dt} = \frac{-M_T + M_{jk} + R_{X1} \cdot r_{k01} + R_{X2} \cdot r_{k02} + M_{jc} - M_f}{J_k}; \quad (2.48)$$

где M_T – тормозной момент на колесе АЭСП, возникающий в процессе торможения или в процессе РЭ.

Характеристика сцепления ЭШ с цилиндрической опорной поверхностью ББ диагностического стенда позволяет рассчитать значение РКР R_X по выражению:

$$R_{Xi} = \varphi_{max} \cdot R_{Zi} \cdot f(S); \quad (2.49)$$

где $f(S)$ – функция проскальзывания S ;

R_{Zi} – нормальная реакция i -го колеса АЭСП;

φ_{max} – максимальное значение коэффициента сцепления ЭШ с опорной поверхностью ББ диагностического стенда.

Функция проскальзывания ЭШ относительно опорной поверхности задается нормированными характеристиками ЭШ по максимальным значениям и может быть представлена следующим уравнением [71, 130]:

$$f(S) = \sin(A \cdot \operatorname{arctg}(B \cdot S)). \quad (2.50)$$

При этом коэффициенты, определяющие параметры проскальзывания ЭШ, A и B ЭШ можно определить, исходя из следующих формул:

$$A = \frac{\eta_S}{B}; \quad (2.51)$$

$$B = \frac{(1 + b_1^2) \cdot \operatorname{arctg}(b_1) - b_1}{K_Z \cdot (1 + b_1^2) - 1}. \quad (2.52)$$

Значения коэффициентов нормированной $f(S)$ диаграммы b_1 и K_Z вычисляются по уравнениям [71, 130]:

$$b_1 = \frac{\pi}{2 \cdot K_Z}; \quad (2.53)$$

$$K_Z = \frac{\pi - \arcsin(f_0)}{\eta_S}; \quad (2.54)$$

где f_0 – коэффициент снижения фрикционных свойств ЭШ в заблокированном

состоянии, который может быть рассчитан в соответствии с уравнением:

$$f_{\phi} = \frac{R_b}{R_{\phi max}}; \quad (2.55)$$

где R_b – РКР колеса АЭСП в заблокированном состоянии;

$R_{\phi max}$ – максимально возможная по сцеплению РКР.

В зависимости от режима функционирования колеса проскальзывание определяется по следующим выражениям. В режиме разгона АЭСП:

$$S = 1 - \frac{\omega_k \cdot r_k}{\omega_{\phi\phi} \cdot r_{\phi\phi}}. \quad (2.56)$$

В режиме торможения или режиме РЭ:

$$S = 1 - \frac{\omega_{\phi\phi} \cdot r_{\phi\phi}}{\omega_k \cdot r_{k0}}; \quad (2.57)$$

где $\omega_{\phi\phi}$ и ω_k – угловые скорости ББ диагностического стенда и колеса соответственно.

В процессе функционирования колеса его радиус изменяется. Это вызвано перераспределением нагрузки между передней и задней осями АЭСП в процессе разгона или торможения. Изменение радиуса можно вычислить, используя уравнение:

$$r_{k0i} = r_c - R_{zi} \cdot c_2 - \sqrt{R_{zi} \cdot c_1}; \quad (2.58)$$

где c_1, c_2 – константы;

r_c – свободный радиус колеса АЭСП.

Максимальный реализованный момент по сцеплению M_{ϕ} может отличаться от момента, подводимого к колесу и находится из выражения:

$$M_{\phi} = R_x \cdot r_{k0}. \quad (2.59)$$

Момент сопротивления качению колеса M_f находится из выражения:

$$M_f = R_z \cdot r_{k0} \cdot f; \quad (2.60)$$

где f – коэффициент сопротивления качению.

Разработанное математическое описание колеса с ЭШ дает возможность выполнять расчет РКР на колесах АЭСП как в тяговом, так и в тормозном режимах, а также в режиме РЭ. Выше представленное описание учитывает кинематические и силовые параметры функционирования колеса с ЭШ.

2.3.3 Математическое описание крутильных колебаний в системе «АЭСП – СББ»

Для расчета крутильных колебаний в трансмиссии АЭСП при его функционировании на СББ была составлена кинематическая схема (рис. 2.6). В разработанной кинематической схеме учитываются: моменты инерции ЭД J'_1 , редуктора и дифференциала J'_2 , ведущих колес J'_3 , ББ диагностического стенда J'_4 и маховых масс стенда J'_5 , жесткости валов c'_1, c'_2 , полуосей c'_3 , ЭШ c'_4 и цепной передачи c'_5 . Также при расчете математической модели учитываются такие параметры, как передаточные отношения редуктора АЭСП u_T и цепной передачи u_M , реализованный момент по сцеплению M_f , момент сопротивления качению M_ϕ [154, 176, 177].

Представленная кинематическая схема была преобразована в парциальную схему (рис. 2.7). Данная схема, разделенная на участки, учитывает моменты инерции следующих элементов трансмиссии как АЭСП, так и СББ: J_1 – момент инерции ЭД и входного вала редуктора; J_2 – момент инерции выходного вала редуктора и дифференциала; J_3 – момент инерции полуоси и колеса с ЭШ; J_4 – момент инерции ББ диагностического стенда; J_5 – момент инерции маховых масс СББ. Формально такое преобразование соответствует линейному приведению координат кинематической схемы

модели, основным условием которого является сохранение кинетической и потенциальной энергии [154, 176, 177].

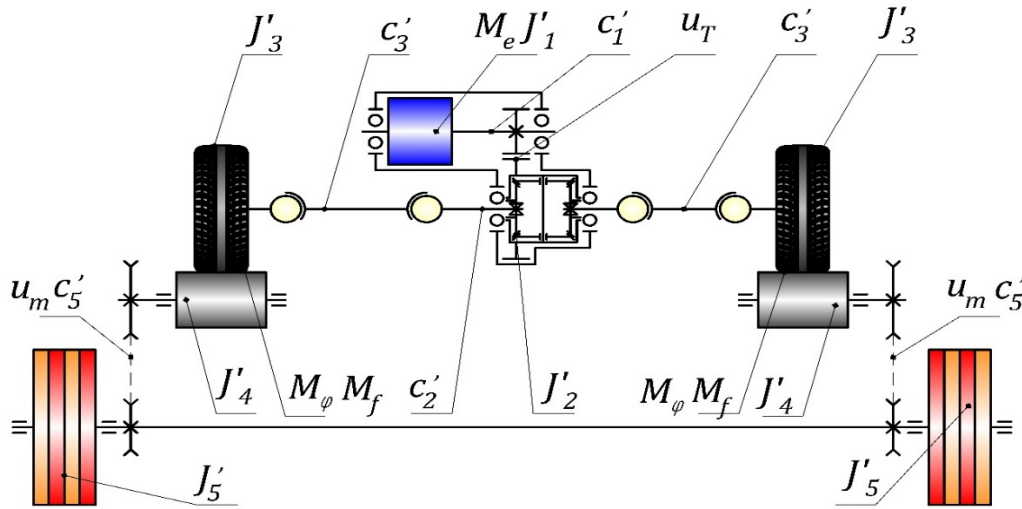


Рисунок 2.6 – Кинематическая схема для расчета крутильных колебаний

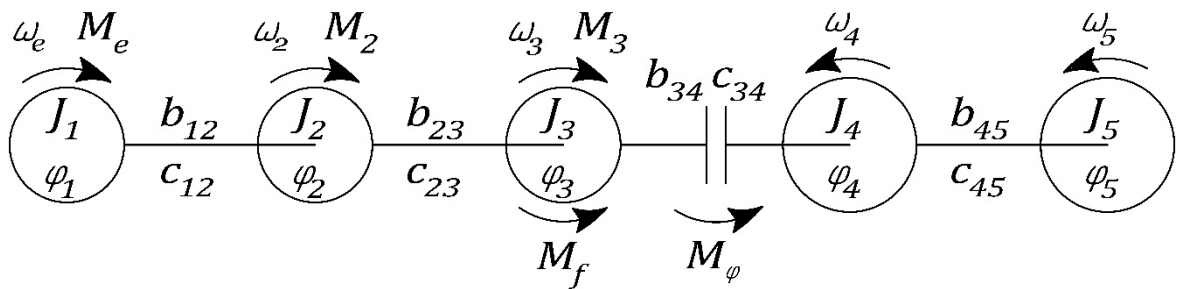


Рисунок 2.7 – Приведенная схема для описания крутильных колебаний
в системе «АЭСБ – СББ»

Также равными по величине приняты жесткости и коэффициенты демпфирования валов, расположенных с левой и правой сторон относительно продольной оси СББ. В общем виде моменты инерции в парциальной схеме были пересчитаны с учетом передаточных отношений трансмиссии:

$$J_1 = J'_1; J_2 = \frac{J'_2}{u_T}; J_3 = J'_3; J_4 = J'_4; J_5 = \frac{J'_5}{u_M}; \quad (2.61)$$

где u_M – передаточное отношение между ББ и маховыми массами диагностического стенда;

J_1 – момент инерции ЭД и входного вала редуктора;

J_2 – момент инерции выходного вала редуктора и дифференциала;

J_3 – момент инерции полуоси и колеса с ЭШ;

J_4 – момент инерции ББ диагностического стенда;

J_5 – момент инерции маховых масс СББ.

В математической модели принято допущение, что моменты инерции полуосей и колес с ЭШ J_3 , ББ J_4 и маховых масс J_5 , расположенных с левой и правой сторон АЭСП, равны по величине.

Расчет крутильных колебаний реализован системой дифференциальных уравнений, описывающих динамику вращения элементов трансмиссии АЭСП и СББ. Выражение, пригодное для описания динамики вращения ротора ЭД представлено в следующем виде [154, 176, 177]:

$$\frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = \frac{M_e}{J_1 + J_2 + 2 \cdot J_3}; \quad (2.62)$$

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{d\varphi_1}{dt} + \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} dt; \quad (2.63)$$

$$\varphi_1 = \varphi_1 + \frac{d\varphi_1}{dt} dt; \quad (2.64)$$

где φ_1 – угол поворота ротора ЭД.

Динамика вращения корпуса дифференциала реализована следующими дифференциальными уравнениями [154, 176, 177]:

$$\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = \frac{c_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - c_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - b_{12} \frac{d\varphi_2}{dt}}{J_2}; \quad (2.65)$$

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{d\varphi_2}{dt} + \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} dt; \quad (2.66)$$

$$\varphi_2 = \varphi_2 + \frac{d\varphi_2}{dt} dt; \quad (2.67)$$

где φ_2 – угол поворота дифференциала;

φ_3 – угол поворота ведущего колеса АЭСП;

b_{12} – коэффициент демпфирования вала, соединяющего ЭД и редуктор;

c_{12} – жесткость вала между ЭД и редуктором;

c_{23} – жесткость полуоси.

Динамика вращения ведущих колес АЭСП реализована следующими дифференциальными уравнениями [154, 176, 177]:

$$\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = \frac{c_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - c_{34} \cdot (\varphi_3 - \varphi_4) - b_{23} \frac{d\varphi_3}{dt} - F_f \cdot r_{k0}}{J_3}; \quad (2.68)$$

$$\frac{d\varphi_3}{dt} = \frac{d\varphi_3}{dt} + \frac{d^2\varphi_3}{dt^2} dt; \quad (2.69)$$

$$\varphi_3 = \varphi_3 + \frac{d\varphi_3}{dt} dt; \quad (2.70)$$

где φ_4 – угол поворота ББ;

b_{23} – коэффициент демпфирования полуоси;

c_{34} – жесткость колеса с ЭШ.

Передача крутящего момента от ведущего колеса к ББ и маховым массам СББ и наоборот возможна лишь при действии продольных реакций между шиной и опорными поверхностями СББ, величина которых ограничивается реализованным моментом по сцеплению:

$$R_{x1i} = \varphi_{max} \cdot R_{z1i} \cdot f(s); \quad (2.71)$$

где φ_{max} – максимальный коэффициент сцепления;

R_{z1i} – нормальная реакция ББ диагностического стенда на действие нормальной нагрузки на ведущее колесо АЭСП.

Динамика вращения ББ диагностического стенда реализована следующими дифференциальными уравнениями [154, 176, 177]:

$$\frac{d^2\varphi_4}{dt^2} = \frac{R_{x1}r_6 - F_f r_{k0}}{J_4}; \quad (2.72)$$

$$\frac{d\varphi_4}{dt} = \frac{d\varphi_4}{dt} + \frac{d^2\varphi_4}{dt^2} dt; \quad (2.73)$$

$$\dot{\varphi}_4 = \varphi_4 + \frac{d\varphi_4}{dt} dt; \quad (2.74)$$

где φ_5 – угол поворота маховых масс;

b_{45} – коэффициент демпфирования цепной передачи между ББ и маховыми массами СББ;

F_f – сила сопротивления качению;

f – коэффициент сопротивления качению колес АЭСП;

R_{x1} – РКР, действующая в пятне контакта ведущих колес с ББ;

r_{k0} – радиус качения колеса АЭСП;

r_b – радиус ББ диагностического стенда.

Динамика вращения маховых масс СББ описана следующими дифференциальными уравнениями [154, 176, 177]:

$$\frac{d^2\varphi_5}{dt^2} = \frac{c_{45} \cdot (\varphi_4 - \varphi_5) - b_{45} \frac{d\varphi_5}{dt}}{J_5}; \quad (2.75)$$

$$\frac{d\varphi_5}{dt} = \frac{d\varphi_5}{dt} + \frac{d^2\varphi_5}{dt^2} dt; \quad (2.76)$$

$$\varphi_5 = \varphi_5 + \frac{d\varphi_5}{dt} dt; \quad (2.77)$$

где c_{45} – жесткость цепной передачи между ББ и маховыми массами СББ.

Разработанное математическое описание дает возможность выполнять расчет крутильных колебаний, возникающих в трансмиссии как АЭСП, так и СББ, а также учитывать влияние крутильных колебаний на процесс функционирования АЭСП на СББ.

2.3.4 Математическое описание ЭСП автомобиля

Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (СДПМ) является основой ЭСП автомобиля, который приводит его в движение. Наиболее часто используемые модели СДПМ могут быть рассчитаны во вращающейся системе координат dq . В этом случае параметры ЭД задаются значениями

проекций индуктивности L_{sd} и L_{sq} и потокосцепления ψ_{sd} и ψ_{sq} для этих двух координат. Значения активного сопротивления фазной обмотки статора ЭД R_S указывается для всех трех обмоток А, В, С одинаковым. Такой метод достаточно прост в реализации, но не позволяет использовать модель ЭД с целью сопоставления ДП с параметрами ТС СДПМ. Причина этого заключается в невозможности указания характеристик, например, для отдельно взятой статорной обмотки. Учитывая этот факт, было принято решение применить метод расчета характеристик СДПМ в невращающихся координатах ABC . Немаловажным является тот факт, что данная модель позволяет рассчитать не только крутящий момент M_e на роторе СДПМ в тяговом режиме, но и генерируемые им напряжение и ток в режиме РЭ. Построение системы управления СДПМ реализовано во вращающихся координатах. При этом выполняется процедура преобразования координат $ABC \Rightarrow dq$ и $dq \Rightarrow ABC$ [19, 77, 78, 183, 185]. Схема, поясняющая структуру описываемого ЭСП, отображена на рисунке 2.8.

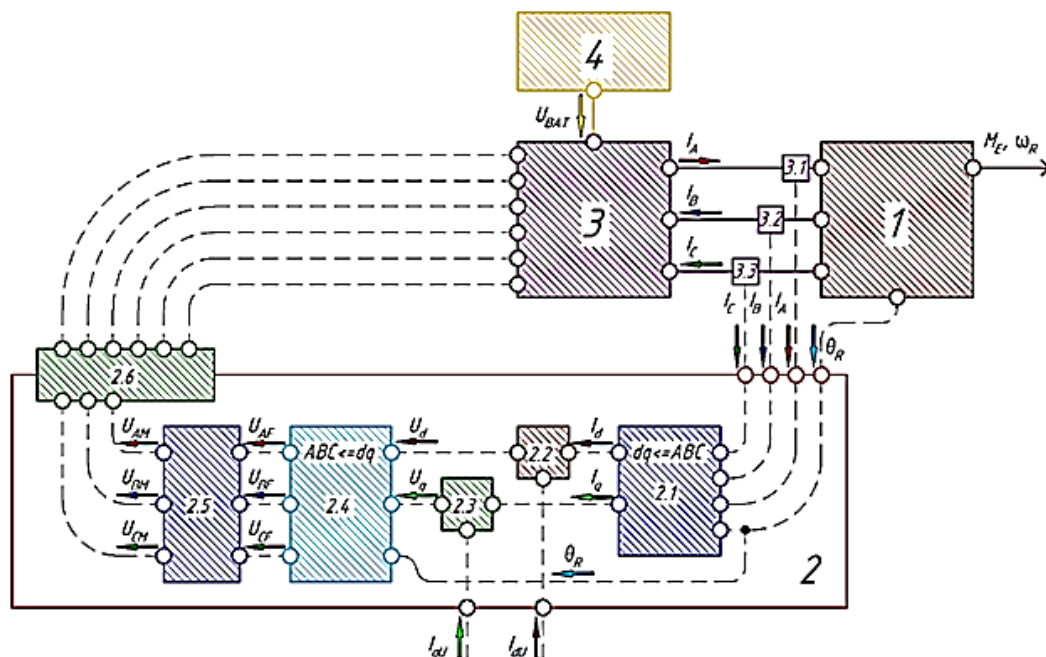


Рисунок 2.8 – Структурная схема математической модели ЭСП автомобиля

1 – электродвигатель; 2 – блок управления; 2.1 и 2.4 – преобразователи координат; 2.2 и 2.3 – регуляторы токов; 2.5 – формирователь способа модуляции; 2.6 – блок широтно-импульсной модуляции

При вращении ротора ЭД как в тяговом, так и в рекуперативном режимах в фазных обмотках статора будут наводиться противоЭДС E_A , E_B , E_C , которые оказывают прямое влияние на выходные характеристики ЭД (рис. 2.9).

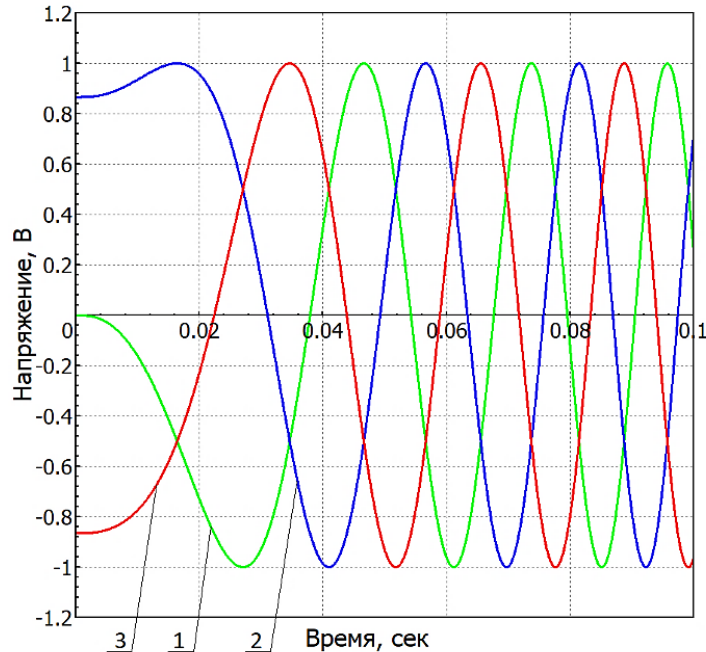


Рисунок 2.9 – Единичные формы ЭДС

1 – единичная форма ЭДС E_{1A} фазы A; 2 – единичная форма ЭДС E_{1B} фазы B; 3 – единичная форма ЭДС E_{1C} фазы C

Для их определения рассчитываются единичные функции форм ЭДС, которые являются зависимостями от угла поворота поля Θ_E , имеющими единичную амплитуду. Для фаз A, B, C эти функции обозначаются в виде E_{1A} , E_{1B} , E_{1C} и определяются из выражений [19, 77, 78, 183, 185]:

$$E_{1A} = \sin(\Theta_E + \delta_A); \quad (2.78)$$

$$E_{1B} = \sin(\Theta_E + \delta_B); \quad (2.79)$$

$$E_{1C} = \sin(\Theta_E + \delta_C); \quad (2.80)$$

где Θ_E – угол поворота поля статора ЭД;

δ_A , δ_B , δ_C – угол сдвига фаз A, B и C соответственно.

$$\Theta_E = \Theta_R \cdot Z_P; \quad (2.81)$$

где Θ_R – угол поворота ротора ЭД;

Z_P – количество полюсов статора ЭД.

Мгновенные ЭДС E_A , E_B и E_C в фазах ЭД можно определить, используя единичные функции формы ЭДС, в соответствии с выражениями [19, 77, 78, 183, 185]:

$$E_A = \psi_F \cdot Z_P \cdot \omega_R \cdot E_{1A}; \quad (2.82)$$

$$E_B = \psi_F \cdot Z_P \cdot \omega_R \cdot E_{1B}; \quad (2.83)$$

$$E_C = \psi_F \cdot Z_P \cdot \omega_R \cdot E_{1C}; \quad (2.84)$$

где ψ_F – амплитуда потокосцепления между ротором ЭД и фазной обмоткой;
 ω_R – угловая скорость вращения ротора ЭД.

Скорость вращения поля ω_e зависит от количества полюсов Z_P статора ЭД и рассчитывается по выражению:

$$\omega_E = \omega_R \cdot Z_P. \quad (2.85)$$

Мгновенные значения токов I_A , I_B , I_C , протекающих в фазных обмотках, складываются из двух величин – токов $I_{A\psi}$, $I_{B\psi}$, $I_{C\psi}$, вызванных в обмотке статора ЭД вращением ротора, и токов I_{AU} , I_{BU} , I_{CU} , вызванных в обмотке статора управляющим линейным напряжением инвертора, и рассчитываются в соответствии с выражениями [19, 77, 78, 183, 185]:

$$I_A = I_{A\psi} + I_{AU}; \quad (2.86)$$

$$I_B = I_{B\psi} + I_{BU}; \quad (2.87)$$

$$I_C = I_{C\psi} + I_{CU}. \quad (2.88)$$

Токи $I_{A\psi}$, $I_{B\psi}$, $I_{C\psi}$, вызванные в обмотках A, B, C статора вращением ротора ЭД, рассчитываются по формулам:

$$I_{A\psi} = \left(\frac{k}{Ts+1} \right) \cdot (E_B + E_C - 2E_A); \quad (2.89)$$

$$(2.90)$$

$$\begin{aligned} I_{B\psi} &= \left(\frac{k}{T_S + 1} \right) \cdot (E_C + E_A - 2E_B); \\ I_{C\psi} &= \left(\frac{k}{T_S + 1} \right) \cdot (E_A + E_B - 2E_C); \end{aligned} \quad (2.91)$$

где T_S – постоянная времени инерционного звена первого порядка;

k – коэффициент усиления инерционного звена первого порядка, описывающий сопротивление обмоток статора ЭД [19, 77, 78, 183, 185]:

$$T_S = \frac{L_{\phi i} - L_{\phi\phi i}}{R_{\phi i}}; \quad (2.92)$$

$$k = \frac{1}{3R_{\phi i}}; \quad (2.93)$$

где $R_{\phi i}$ – активное сопротивление i -й фазной обмотки статора ЭД;

$L_{\phi i}$ – индуктивность i -й фазной обмотки статора ЭД;

$L_{\phi\phi i}$ – взаимная индуктивность двух фазных обмоток статора ЭД.

Токи I_{AU} , I_{BU} , I_{CU} , вызванные в обмотках A , B , C статора управляющими напряжениями инвертора U_A , U_B , U_C , поступающими на вход фаз A , B , C , определяются по выражениям:

$$I_{AU} = \left(\frac{k}{T_S + 1} \right) \cdot (2U_A - U_B - U_C); \quad (2.94)$$

$$I_{BU} = \left(\frac{k}{T_S + 1} \right) \cdot (2U_B - U_C - U_A); \quad (2.95)$$

$$I_{CU} = \left(\frac{k}{T_S + 1} \right) \cdot (2U_C - U_A - U_B); \quad (2.96)$$

где U_A , U_B , U_C – напряжения, поступающие от инвертора на вход фаз A , B , C относительно общей точки внешнего источника питания.

Крутящий момент M_e , развиваемый ЭД на роторе, может быть определен по следующей формуле:

$$M_e = \frac{I_A \cdot E_A + I_B \cdot E_B + I_C \cdot E_C}{\omega_R}. \quad (2.97)$$

Выражение (2.97) позволяет рассчитывать не только крутящий момент на роторе СДПМ, но и тормозной момент в режиме рекуперации энергии.

Скорость ротора СДПМ определяется выражением [19, 77, 78, 183, 185]:

$$\omega_R = \frac{1}{J} \cdot \int (M_e - M_c) dt; \quad (2.98)$$

где M_c – нагрузочный момент;

J – момент инерции подвижных частей ЭСП.

Управление крутящим моментом M_e на роторе СДПМ осуществляется блоком электронного управления (ЭБУ) 2 (см. рис. 2.8), в состав которого входят преобразователи координат 2.1 и 2.4, фильтрующий элемент (на схеме не указан), регуляторы токов 2.3 и 2.2, формирователь способа модуляции (ФСМ) 2.5, а также блок широтно-импульсной модуляции (ШИМ) 2.6.

Рассчитанные значения фазных токов I_A, I_B, I_C , поступающих от обмоток статора ЭД на вход преобразователя координат, представляют ступенчатые графики синусоидальной формы, которые необходимо обработать фильтрующим элементом для последующего преобразования. Математическое описание фильтрующего элемента представлено инерционным звеном первого порядка индивидуально для каждого тока фазных обмоток статора, где в качестве постоянной времени T выступает постоянная времени RC -цепи фильтра [19, 77, 78, 183, 185].

Для качественного управления крутящим моментом M_e на роторе ЭД необходимо использовать вращающуюся систему координат с осями dq . Такой метод управления более прост в реализации по сравнению с методом управления в невращающейся системе координат ABC . Преобразование из одной системы координат в другую было реализовано за счет преобразований Кларк и Парка. Преобразования $ABC \Rightarrow dq$ осуществляются по формулам:

$$I_d = \left(\frac{I_B - I_C}{\sqrt{3}} \right) \cdot \sin \theta_E + I_A \cdot \cos \theta_E; \quad (2.99)$$

$$I_q = \left(\frac{I_B - I_C}{\sqrt{3}} \right) \cdot \cos \theta_E - I_A \cdot \sin \theta_E; \quad (2.100)$$

где I_d, I_q – векторы токов, направленные соответственно вдоль осей d и q .

Максимальный ток ЭД I_{qmax} нуждается в принудительном ограничении. При этом крутящий момент M_e на роторе СДПМ не должен выходить за пределы установленной предельной величины. При отсутствии ограничений появляется вероятность механического повреждения ЭД. Определить ограничение тока можно по выражению [19, 77, 78, 183, 185]:

$$I_{qmax} = \frac{I_{nom} \cdot M_{max}}{M_{nom}}; \quad (2.101)$$

где I_{nom} – номинальный ток ЭД;

M_{max} – максимальный крутящий момент на роторе ЭД;

M_{nom} – номинальный крутящий момент на роторе ЭД.

Наибольший крутящий момент M_e на роторе СДПМ будет достигнут в том случае, когда угол между итоговым вектором тока I статора и вектором потокосцепления ψ_f будет стремиться к 90° . При этом вектор тока I_q должен быть в своем максимальном значении, т. к. именно этот вектор влияет на величину крутящего момента M_e на роторе СДПМ. Вектор тока I_d необходимо поддерживать в значении близком к нулю. Реализация этого условия достигается за счет использования регуляторов пропорционально-интегральных (РПИ) токов в направлении осей dq . РПИ тока для каждой оси роторной системы координат настраиваются отдельно. РПИ 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 [19, 77, 78, 183, 185]:

$$U_d = k_{pd} \cdot (I_{dU} - I_d) + k_{id} \cdot \int (I_{dU} - I_d) dt; \quad (2.102)$$

$$U_q = k_{pq} \cdot (I_{qU} - I_q) + k_{iq} \cdot \int (I_{qU} - I_q) dt; \quad (2.103)$$

где $k_{pd}, k_{pq}, k_{id}, k_{iq}$ – коэффициенты пропорциональной p и интегральной i составляющих регулятора;

I_{dU}, I_{qU} – величина устанавливаемого тока по оси d и q соответственно.

Выходные напряжения U_d и U_q , поступающие с РПИ, подвергаются обратному преобразованию в неподвижную систему координат ABC и в последующем будут использованы для формирования сигналов управления ключами инвертора U_{AM}, U_{BM}, U_{CM} . Обратное преобразование напряжений реализуется в соответствии с выражениями:

$$U_{AF} = U_d \cdot \cos \theta_E - U_q \cdot \sin \theta_E; \quad (2.104)$$

$$U_{BF} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (U_q \cdot \cos \theta_E + U_d \cdot \sin \theta_E) - \frac{U_{AF}}{2}; \quad (2.105)$$

$$U_{CF} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (U_q \cdot \cos \theta_E + U_d \cdot \sin \theta_E) - \frac{U_{AF}}{2}; \quad (2.106)$$

где U_{AF}, U_{BF}, U_{CF} – напряжения в системе координат ABC , используемые для формирования сигналов управления ключами инвертора.

Для полного использования напряжения ТВБ U_{BAT} при работе СДПМ необходимо применять алгоритм ФСМ управления ключами инвертора. Данный алгоритм ФСМ основан на синхронном добавлении к гармоническим входным напряжениям U_{AF}, U_{BF}, U_{CF} периодического сигнала треугольной формы, зависящего от их фазы (рис. 2.10) [19, 77, 78, 183, 185].

Таким образом сигналы, поступающие на блок ШИМ, рассчитываются по формулам:

$$U_{AM} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(U_{AF} - \frac{U_{min} + U_{max}}{2} \right); \quad (2.107)$$

$$U_{BM} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(U_{BF} - \frac{U_{min} + U_{max}}{2} \right); \quad (2.108)$$

$$U_{CM} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(U_{CF} - \frac{U_{min} + U_{max}}{2} \right); \quad (2.109)$$

где U_{min} и U_{max} – минимальное и максимальное значения U_{AF}, U_{BF}, U_{CF} .

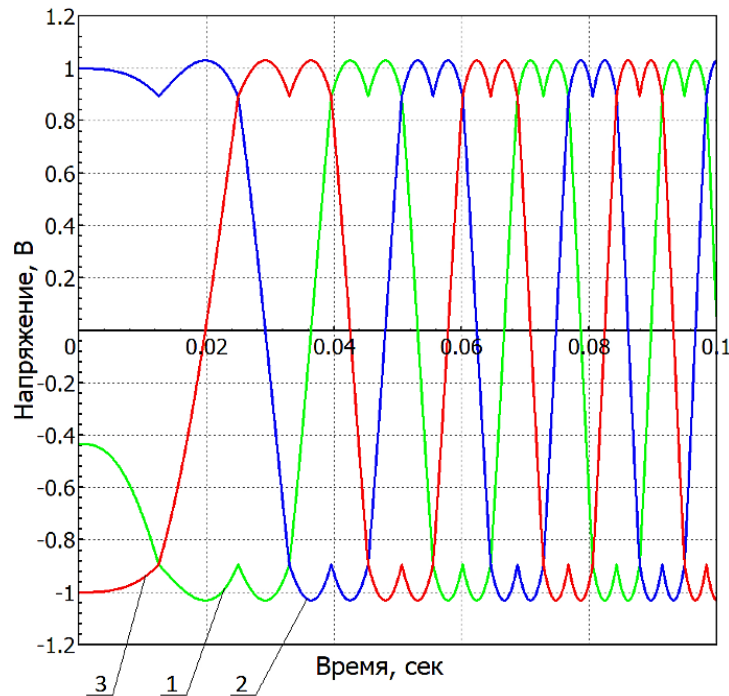


Рисунок 2.10 – Сигнал ФСМ

1 – сигнал ФСМ U_{AF} фазы А; 2 – сигнал ФСМ U_{BF} фазы В; 3 – сигнал ФСМ U_{CF} фазы С

Сигналы U_{AM} , U_{BM} , U_{CM} поступают на вход блока ШИМ (рис. 2.11, А), представляющий собой набор логических компараторов 1, инверторов 2, а также реле задержки 3. В этом блоке значения U_{AM} , U_{BM} , U_{CM} сравниваются с опорным периодическим треугольным сигналом заданной частоты n_{PWM} и амплитудой U_{PWM} , равной ± 1 (рис. 2.11, Б). Перед этим значения U_{AM} , U_{BM} , U_{CM} делятся на величину U_{BAT} .

Если в случае сравнения управляющий сигнал U_{im} будет выше опорного сигнала U_{PWM} , то на верхние ключи инвертора отдаются сигналы U_1 , U_3 , U_5 включения – логическая единица. Иначе – логический ноль. Нижние ключи управляются инвертированными сигналами U_2 , U_4 , U_6 управления верхних ключей. С целью недопущения одновременного срабатывания верхних и нижних ключей одной фазы инвертора в блоке предусмотрена задержка по времени включения τ для каждого управляющего сигнала [19, 77, 78, 183, 185].

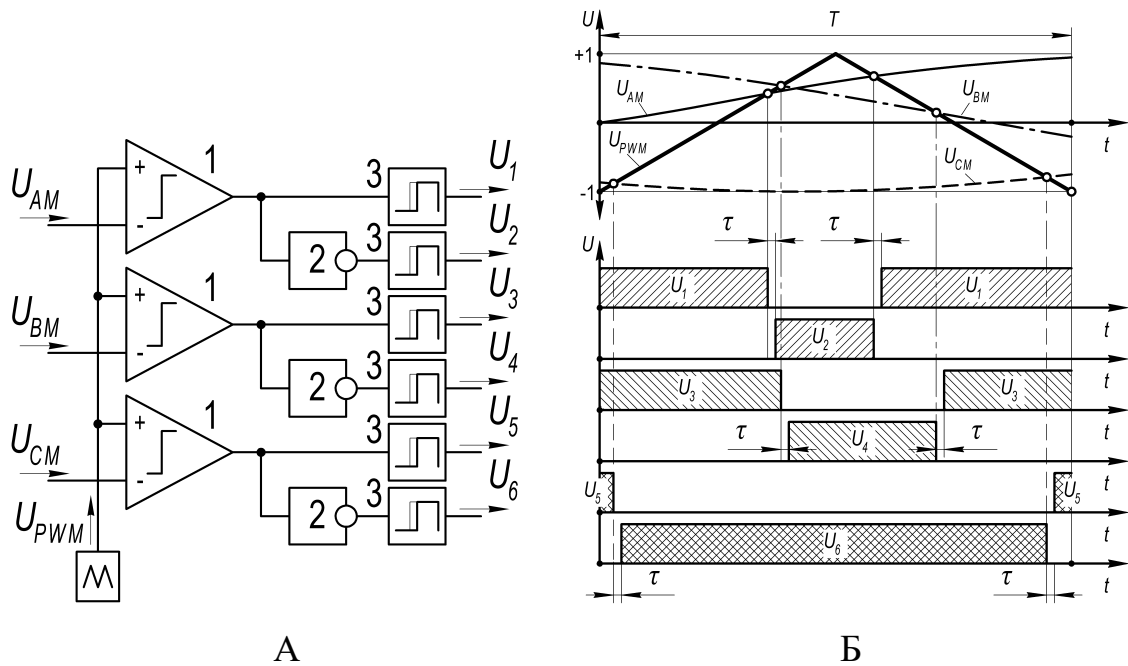


Рисунок 2.11 – Блок ШИМ

А – устройство блока ШИМ; Б – выходные сигналы с блока ШИМ

Каждый период ШИМ подразделяется на два временных участка. Первый из них подразумевает время подключения фазной статорной обмотки к положительному полюсу источника питания, второй – время подключения фазной статорной обмотки к отрицательному полюсу источника питания. Изменение соотношения этих участков времени внутри периода ШИМ позволяет управлять средним значением напряжений U_A , U_B , U_C , прикладываемого к обмотке статора. Изменение продолжительности участков времени реализуется за счет сигналов U_{AM} , U_{BM} , U_{CM} , которые, в свою очередь, рассчитываются на основе токов в фазных обмотках статора ЭД. Таким образом реализуется обратная связь процесса регулирования крутящего момента на роторе СДПМ, что дает возможность формировать трехфазную систему статорных токов I_A , I_B , I_C и средних напряжений различной частоты и амплитуды [19, 77, 78, 183, 185].

Последовательность управляющих сигналов с определенной длительностью формирует блок ШИМ. При этом управляющее напряжение

принимает пульсирующий сигнал с периодом T_{PWM} и заполнением высокого уровня напряжения Δ_{PWM} (рис. 2.12).

Методы ШИМ могут быть аналоговыми – полученными за счет применения аналоговых сравнивающих типы сигналов устройств – компараторов или цифровыми, в которых формирование осуществляется на программном уровне. Современные блоки ШИМ – цифровые, но для понимания принципа работы этого блока рассмотрим аналоговый метод формирования управляющего сигнала [19, 77, 78, 183, 185].

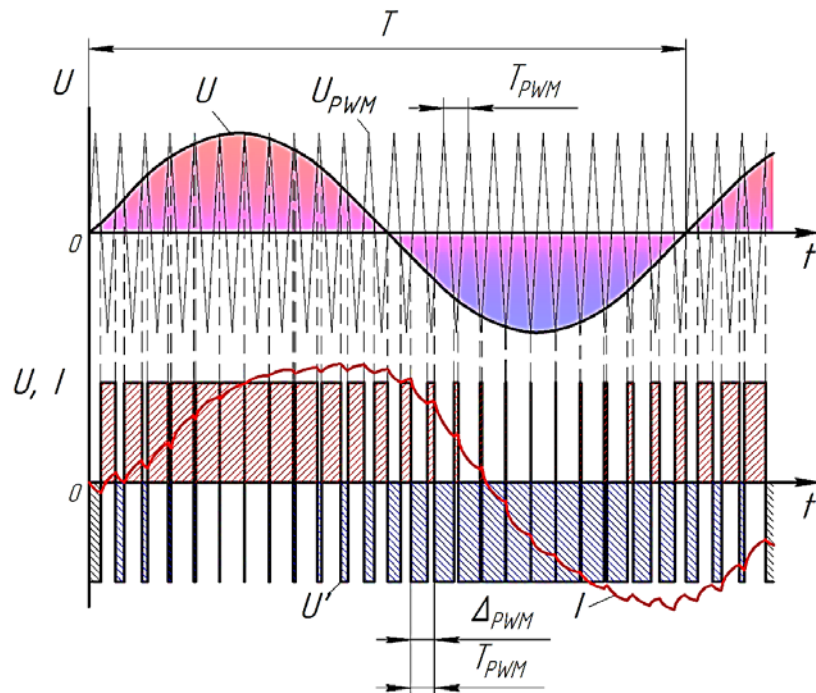


Рисунок 2.12 – Реализация принципа работы ШИМ

T – период модулируемого сигнала; T_{PWM} – период опорного сигнала; U – напряжение модулируемого сигнала; U_{PWM} – напряжение опорного сигнала; U' – сформированное управляющее напряжение; I – сформированный управляющий ток; Δ_{PWM} – заполнение напряжения высокого уровня

Непосредственно преобразование постоянного напряжения в переменное осуществляется инвертором (рис. 2.13). Инвертор – устройство, состоящее из силовых полупроводниковых ключей, используемое для обеспечения непрерывного управления процессом функционирования ЭД.

Полупроводниковые силовые элементы, используемые в процессе преобразования напряжения, могут быть выполнены в виде электронных ключей – транзисторов типов *IGBT*, *BJT*, *MCT*, *MOSFET*, *SIT* или тиристоров.

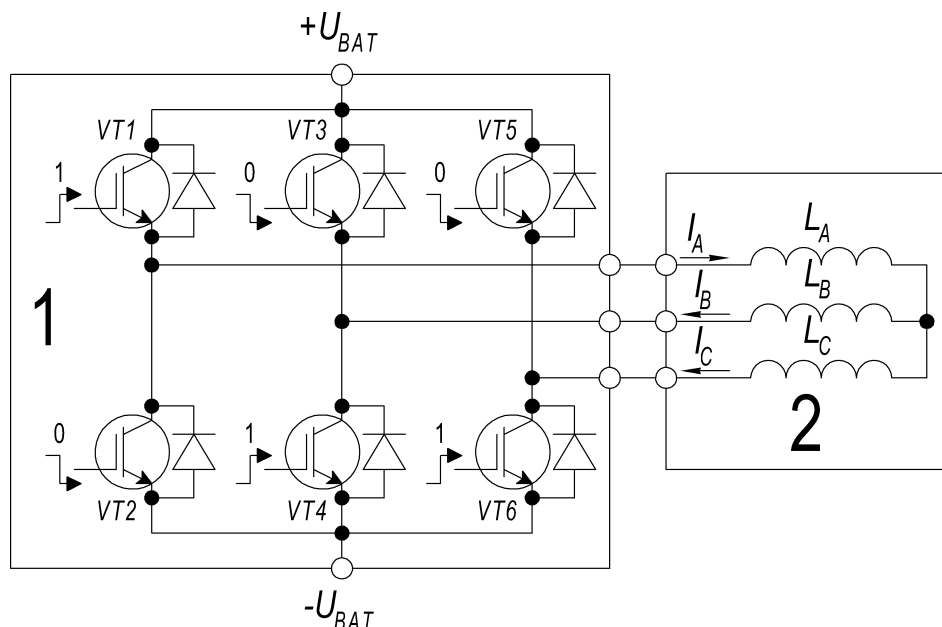


Рисунок 2.13 – Схема соединения трехфазного мостового инвертора с ЭД

1 – инвертор; 2 – электродвигатель СДМП

Для управления тяговым ЭД в ЭСП автомобиля чаще всего применяются двухуровневые инверторы напряжения. Такая топология преобразователя представляет собой соединение двух силовых полупроводниковых ключей на фазу: для фазы *A* это ключи VT_1 и VT_2 , для фазы *B* – VT_3 и VT_4 , для фазы *C* – VT_5 и VT_6 . Пара транзисторов, связанная через обмотки с другой парой транзисторов, образует мост, по которому может протекать ток. Поэтому иногда можно встретить название инверторов – мостовые инверторы. Управляющий сигнал для верхних VT_1 , VT_3 и VT_5 и нижних VT_2 , VT_4 и VT_6 силовых ключей связан. Его задачей является генерация двух возможных состояний выходного фазного напряжения U_A . В технической литературе порядковые номера ключей могут иметь другой порядок обозначения. Ключи VT_1 , VT_3 и VT_5 называют «верхним плечом» инвертора, а ключи VT_2 , VT_4 и VT_6

называют «нижним плечом». Верхнее плечо инвертора соединяется с положительным выводом высоковольтной батареи $+U_{BAT}$, нижнее плечо подключается к отрицательному выводу $-U_{BAT}$. Обмотки двигателя подключаются к местам соединения ключей верхнего и нижнего плеч. Как уже отмечалось ранее, максимальное выходное фазное напряжение U_A определяется значением постоянного напряжения звена постоянного тока U_{BAT} [19, 77, 78, 183, 185].

Инвертор обладает достаточно простым принципом работы. Рассмотрим формирование напряжения на фазе A . Для установки напряжения высокого уровня на фазе A на входы ключей инвертора $VT_1 \dots VT_6$ подаются сигналы от блока ШИМ. При этом ключи VT_1 , VT_4 и VT_6 переключаются в открытое состояние. А VT_2 , VT_3 и VT_5 – в закрытое. Из схемы видно, что при открытии одного из двух противоположных ключей, другой из них закрывается. При описанной комбинации управляющих сигналов фазное напряжение обмотки A приравнивается $U_A = \left(\frac{2}{3}\right) U_{BAT}$. В таком случае фазные напряжения обмоток B и C – $U_B = U_C = -(1/3)U_{BAT}$. Линейное напряжение между фазами A и B соответствует величине U_{BAT} .

При таких напряжениях токи в обмотках будут протекать по следующим направлениям: в обмотку A ток I_A будет втекать; в обмотки B и C – токи I_B и I_C вытекать.

Если управлять включением транзисторов инвертора с определенной последовательностью и изменять длительность включений и отключений, то можно сформировать на обмотках статора ступенчатое изменение напряжений, которое будет по эффективному значению аналогично синусоидальному напряжению.

Разработанное математическое описание дает возможность выполнять расчет параметров работы ЭСП автомобиля при его функционировании на СББ.

2.4 Алгоритм расчета ТСД АЭСП при его функционировании на СББ

Аналитическое исследование влияния изменения параметров ЭСП автомобиля на основные эксплуатационные параметры его функционирования на СББ нуждалось в разработке управляющего алгоритма (рис. 2.14).

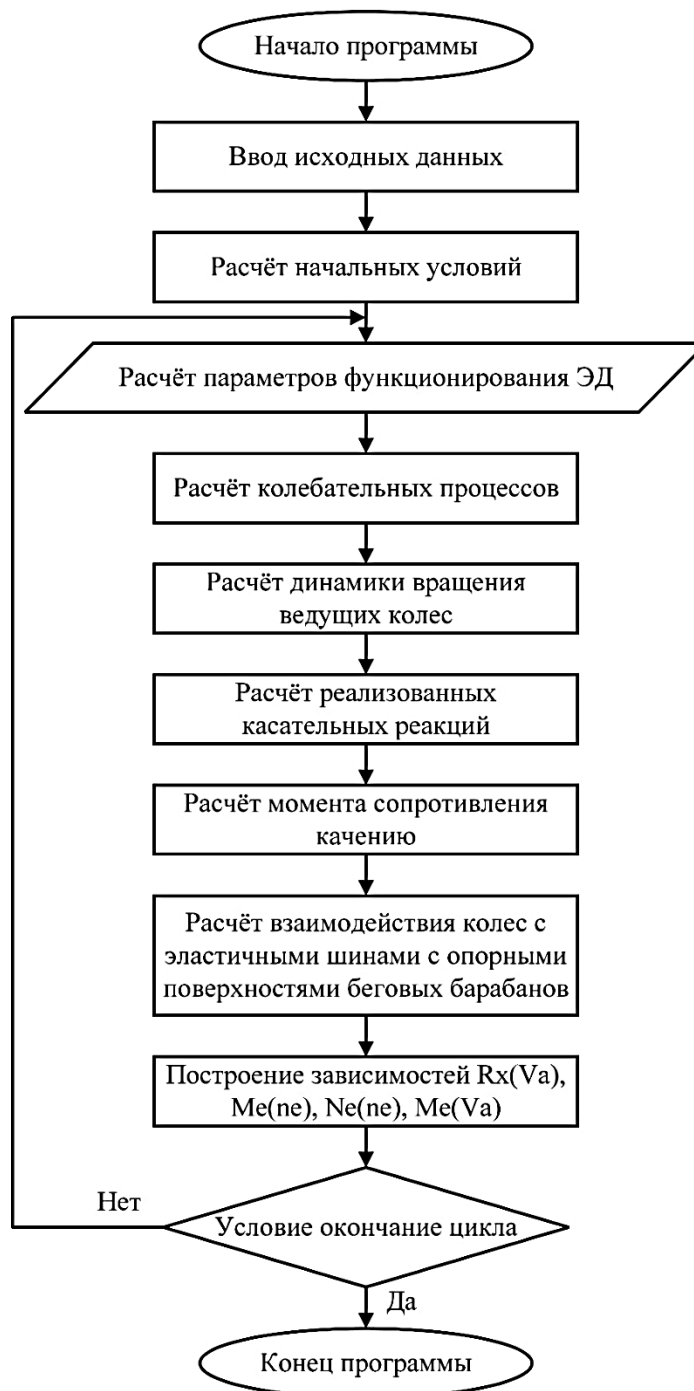


Рисунок 2.14 – Алгоритм расчета параметров функционирования системы «АЭСП – СББ»

Данный алгоритм запатентован 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., которое представлено в приложении 1 [116]. Разработанный алгоритм состоит из следующего перечня операций.

1. Ввод исходных данных. На данном этапе задаются следующие величины: константы; геометрические и физические параметры АЭСП (колесная база, колея, масса, координаты центра масс); геометрические и физические параметры колес АЭСП (ширина и высота профиля ЭШ, посадочный диаметр, момент инерции колеса, жесткость и коэффициент демпфирования ЭШ); геометрические и физические параметры СББ (радиус ББ, расстояние между осями вращения ББ, передаточные отношения в элементах конструкции СББ, моменты инерции маховых масс СББ, жесткости и коэффициенты демпфирования элементов трансмиссии СББ); параметры и условия взаимодействия ЭШ и ББ диагностического стенда (максимальный коэффициент сцепления ЭШ с опорной поверхностью, коэффициент изменения сцепных свойств ЭШ в блоке); параметры функционирования ЭД (максимальный крутящий момент на роторе ЭД, максимальная мощность ЭД, максимальная частота вращения ротора ЭД, коэффициент управления ЭСП); параметры трансмиссии АЭСП (передаточное число редуктора; жесткости, демпфирующие коэффициенты и моменты инерции элементов трансмиссии).

2. Решение уравнений для расчета начальных условий цикла (распределение веса по осям АЭСП, нормальные реакции в пятнах контакта ЭШ с опорными поверхностями ББ, деформации ЭШ, коэффициенты модели ЭШ Дика А.Б., приведенные моменты инерции элементов трансмиссии АЭСП и СББ с учетом передаточных чисел).

3. Вычисление уравнений для определения параметров функционирования ЭД. На данном этапе выполняется расчет следующих

параметров: крутящий момент, развиваемый на роторе ЭД; мощность ЭД; угловое ускорение и скорость вращения ротора ЭД.

4. Решение уравнений, моделирующих процессы крутильных колебаний в трансмиссии АЭСП и СББ (угловые ускорения, частоты вращения и углы закручивания элементов трансмиссии АЭСП и СББ).

5. Решение уравнений, моделирующих процесс функционирования колеса с ЭШ (проскальзывание колес с ЭШ относительно опорных поверхностей ББ диагностического стенда, параметры модели ЭШ Дика А.Б., нормальные реакции и РКР в пятнах контакта ЭШ с опорными поверхностями ББ диагностического стенда, реализованный момент по сцеплению, момент сопротивления качению колес).

6. Процедура вывода результатов расчета математической модели в виде графических зависимостей основных параметров функционирования АЭСП на СББ и их значений.

Разработанный алгоритм дает возможность проводить исследования процесса функционирования АЭСП на СББ и рассчитывать его основные эксплуатационные параметры, а именно ТДС.

2.5 Методы определения областей нахождения ДП

2.5.1 Распознавание ТС АЭСП при контроле их ТС на СББ

Эффективный контроль ТС динамических объектов целесообразно выполнять на основе измерения и анализа фазовых динамических характеристик – зависимостей выходного параметра ОД от входного параметра. Для АЭСП в качестве выходных параметров удобно рассматривать их ТДС, например, крутящий момент M_e и мощность ЭД N_e , крутящий момент на ведущих колесах M_k , ток I_{BAT} , отдаваемый и потребляемый ТВБ или ток I_e и напряжение U_e , потребляемые и вырабатываемые ЭД. При этом в качестве

входных параметров могут быть использованы такие величины, как частота вращения ротора ЭД ω_e или скорость движения АЭСП V_a [140, 149, 152].

На характер протекания динамических фазовых характеристик (ДФХ) агрегатов ЭСП автомобилей влияют параметры их ТС. При изменении значений параметров ТС агрегатов ЭСП их ДФХ имеют различную форму. Их совмещение в одном графике генерирует области локальных диагнозов (ЛД), представленные на рисунке 2.15.

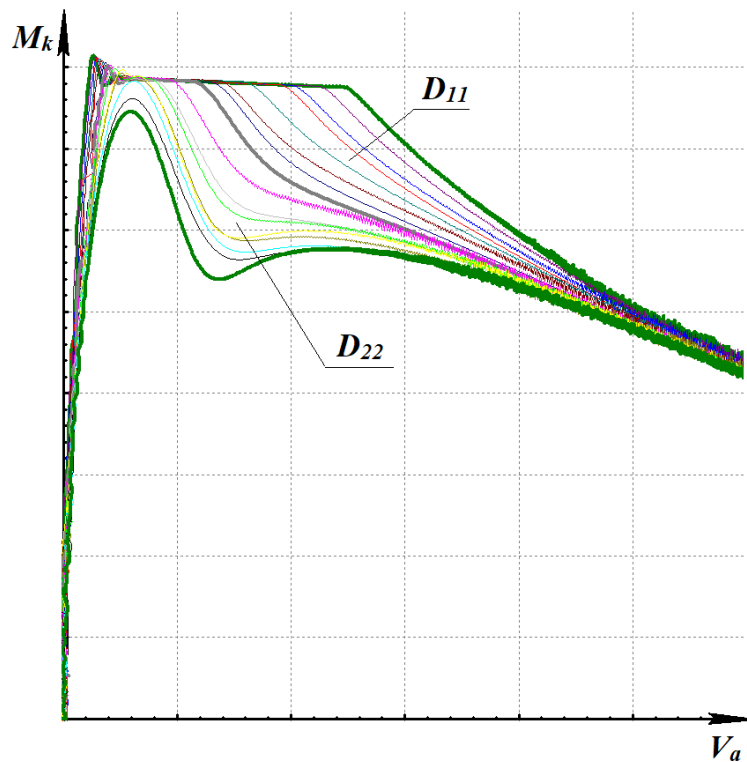


Рисунок 2.15 – Пример области ЛД

В соответствии с принятой научной гипотезой применение сгенерированных ДФХ дает возможность оценивать ТС агрегатов ЭСП автомобиля и определять конкретные их неисправности. Сделать это возможно за счет содержащейся в области D_{jq} ДФХ информации, характеризующей величину определенного параметра ТС. При этом индекс j – номер области ЛД, которая образуется при изменении значения параметра ТС агрегатов ЭСП автомобиля [140, 149, 152].

Индекс q может равняться либо 1, либо 2. Индексом 1 обозначают области ЛД ДФХ агрегатов ЭСП автомобиля с допустимыми значениями параметра ТС. Значением 2 обозначаются области ЛД ДФХ агрегатов ЭСП автомобилей с параметрами ТС, не соответствующими допустимым пределам. Автомобиль, ЭСП которого имеет такую ДФХ, признается неисправной.

Контроль ТС агрегатов АЭСП по данной гипотезе должен реализовываться с использованием ДФХ. Процедура контроля ТС заключается в последовательной проверке участков полученных ДФХ. В этом случае контролируется их принадлежность к области исправных или не исправных состояний агрегатов ЭСП. По результатам анализа АЭСП признается исправным, если все участки ДФХ находятся внутри областей ЛД, соответствующих исправным состояниям. Если хотя бы одна точка полученной ДФХ будет находиться вне области исправных состояний, то АЭСП признается неисправным [140, 149, 152].

Распознавание ТС агрегатов АЭСП с использованием ДФХ целесообразно реализовывать через метод наибольших сечений (НС).

2.5.2 Распознавание ТС АЭСП на основе метода НС

Суть метода НС при распознавании ТС агрегатов АЭСП заключается в переводящем решении двумерной задачи с неоднозначными реализациями к одномерной задаче с однозначной зависимостью ДП от параметра ТС.

В каждой области ЛД ДФХ необходимо определить диагностические участки. Диагностические участки должны характеризоваться максимальной чувствительностью к изменениям параметров ТС агрегатов АЭСП. Для этого в области ЛД требуется провести секущую параллельно одной из осей по их НС. Отрезок этой секущей, ограниченный крайними ДФХ, будет являться диагностическим участком. Пересечение ДФХ с этой секущей позволит определить ДП ТС агрегатов АЭСП, а также их нормативные значения [140, 149, 152].

На диагностическом участке, т. е. в НС, необходимо задать допустимое значение ДП. Полученная ДФХ в таком случае будет определять либо принадлежность значения параметра ТС к допустимой величине, либо его выход за пределы допустимых значений. В этом случае ТС ОД определяется как неисправное. ДП будет являться абсцисса точки пересечения ДФХ с диагностическим участком, проходящим через НС данной области ЛД.

Определение нормативных значений ДП на диагностическом участке, таких как начальный норматив K_n , допустимый норматив K_d и предельный норматив K_p , показано на рисунке 2.16.

Ордината данной секущей будет соответствовать некоторому значению тяговой силы M_{kd} абсциссы точек $V[n]$, $V[d]$, $V[p]$ будут соответствовать начальным, допустимым и предельным значениям ДП на данном участке ЛД [140, 149, 152].

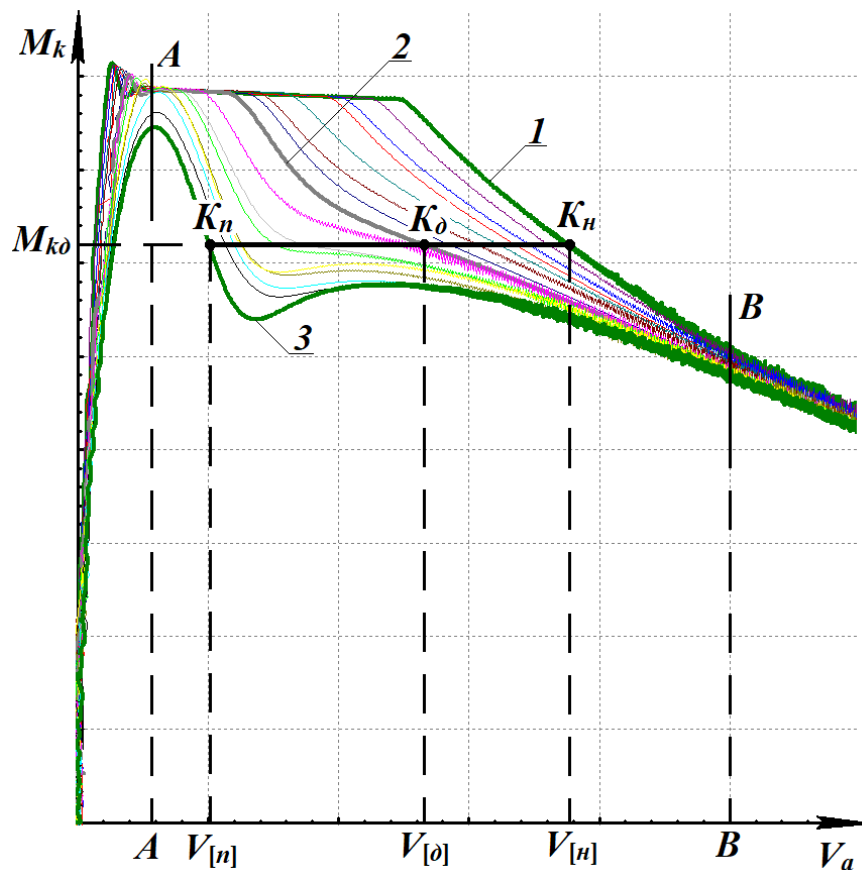


Рисунок 2.16 – Выявление областей ЛД

Начальный норматив определяется по ДФХ 1. При этом ТС агрегатов АЭСП соответствует нормативам и требованиям, установленным предприятием-изготовителем. Пересечение секущей с данным участком ДФХ образует точку K_n , абсцисса которой $V[n]$ будет являться начальным значением ДП [140, 149, 152].

Параметр ТС АЭСП, агрегаты которого достигли допустимого значения по требованиям технической документации, характеризуется отрезком ДФХ 2. Пересечение данного участка ДФХ с секущей образует точку K_d , абсцисса которой $V[d]$ является допустимым значением ДП для данного параметра ТС на данном участке ЛД.

Параметр ТС АЭСП, агрегаты которого достигли предельной величины, характеризуется ДФХ 3. Пересечение данного участка ДФХ с секущей образует точку K_p , абсцисса которой $V[p]$ будет характеризовать предельное значение ДП.

Для определения принадлежности любого участка $|AB|$ ДФХ агрегатов АЭСП к той или иной области ЛД используются условия:

$$V_a(k_x) \leq V_a(k_d), |AB| \in D_{j1}; \quad (2.110)$$

$$V_a(k_x) > V_a(k_d), |AB| \in D_{j2}; \quad (2.111)$$

где $V_a(k_d)$ – значение допустимого норматива ДП на участке ЛД $|AB|$;

$V_a(k_x)$ – значение ДП на участке $|AB|$ полученной для АЭСП ДФХ.

Если в процессе анализа ДФХ в данной области ЛД выполняется условие $V_a(k_x) \leq V_a(k_d)$, то j -й параметр ТС в норме. В ином случае считается, что данный ДП находится вне нормального состояния. Постановка заключения о ТС агрегатов АЭСП будет реализована через последовательный анализ его ДФХ в каждой области ЛД D_{jq} . Если участки ДФХ лежат в областях D_{j1} , то АЭСП определяется исправным. Если хотя бы один участок ДФХ соответствует области D_{j2} , то ТС АЭСП определяется как неисправное. При этом индекс j характеризует конкретную неисправность ОД.

2.5.3 Метод постановки диагноза на основе ДМ

Структурная схема применения метода постановки диагноза на основе диагностической матрицы (ДМ) изображена на рисунке 2.17. ДМ дает возможность поставить диагноз о ТС агрегатов АЭСП на основе определения неисправностей через их связи с ДП. Она составляется для наиболее вероятных ТС агрегатов ЭСП автомобиля[140, 149, 152].

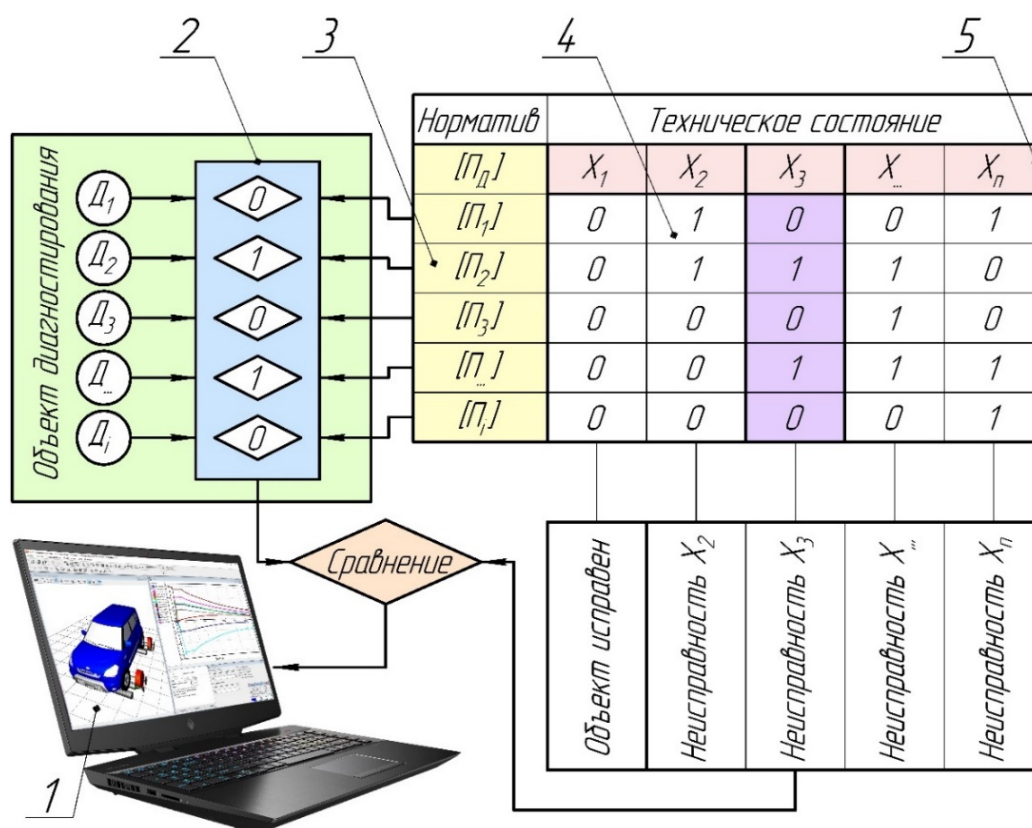


Рисунок 2.17 – Структурная схема использования ДМ в процессе контроля ТС агрегатов АЭСП

1 – персональный компьютер; 2 – пороговое устройство; 3 – нормативные допустимые значения для измеренных диагностических параметров $П_1 \div П_i$; 4 – диагностическая матрица; 5 – индексы технического состояния объекта диагностирования $X_1 \div X_i$

Для каждого возможного состояния $X_1 \div X_n$ в ДМ содержатся столбцы с определенными наборами единиц и нулей. Эти наборы характеризуют конкретного ТС агрегатов ЭСП автомобиля. Ноль ставится в том случае, если при данном ТС измеренное значение ДП не выходит за пределы его нормативного значения. Единица ставится в случае, если при данном ТС измеренное значение ДП выходит за пределы его диагностического норматива [140, 149, 152].

Для обеспечения возможности постановки диагноза необходимо соблюдать выполнение условия $i \geq n$.

2.6 Выводы по второй главе диссертации

1. Впервые 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.

2. 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. Разработана структурная схема процесса функционирования автомобилей с электрическим силовым приводом на стенде с беговыми барабанами, позволяющая выявлять и анализировать причинно-следственные связи между элементами исследуемой системы.

4. Разработаны теоретические предпосылки, позволяющие определять показатели процесса функционирования автомобилей с электрическим силовым приводом при контроле его тягово-динамических свойств на стенде с беговыми барабанами.

Разработанные теоретические предпосылки позволяют устанавливать функциональные зависимости основных эксплуатационных параметров автомобиля с электрическим силовым приводом от параметров технического состояния его агрегатов в процессе их контроля на стенде с беговыми барабанами.

3 Методики экспериментальных исследований

Реализация на практике теоретических предпосылок метода определения ТС агрегатов АЭСП при контроле их ТДС на СББ невозможна без оптимального сочетания аналитического и экспериментального исследований. Выбор методик экспериментальных исследований характеризует качество получения результатов. Анализ полученных в ходе исследований результатов во многом зависит от выбранных методик их обработки.

Достичь положительного эффекта в аналитическом исследовании можно при подтверждении адекватности разработанной математической модели. Она заключается в сравнении расчетных данных с результатами реального процесса функционирования АЭСП на СББ при проведении экспериментальных исследований.

В свою очередь экспериментальные исследования процесса функционирования АЭСП на СББ при контроле ТС его агрегатов выполнялись по разработанной методике. Для реализации этой методики было спроектировано и изготовлено исследовательское оборудование. Оно применялось для задания ТР, а также для регистрации параметров исследуемого процесса. В данной главе были приняты или разработаны 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:
 - *тяговый режим;*
 - *тяговый режим с нагрузкой;*
 - *движение с постоянной скоростью;*

- *свободный выбег;*
- *рекуперативное торможение;*
- 5) методика оценки адекватности математической модели.

Для проверки адекватности разработанной математической модели были проведены испытания процесса функционирования АЭСП при контроле его ТДС на СББ. Данные, полученные в ходе выполнения экспериментальных исследований, сравнивались с результатами, полученными в процессе аналитического исследования процесса разгона АЭСП на СББ.

3.1 Методика экспериментального исследования процесса функционирования АЭСП на СББ

Разработанная методика представляет собой комплекс последовательных и взаимосвязанных операций, направленных на обеспечение возможности безопасного проведения экспериментального исследования стендовым методом, и соответствует следующим требованиям, необходимым для исследования процесса функционирования АЭСП на СББ. Разработанная методика была внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО ИРНИТУ на кафедре «Автомобильный транспорт» и на таких предприятиях как АО «ГАРО-ТРЕЙД» г. Великий Новгород, ООО «ФРИТРЕЙН» г. Екатеринбург, ООО «СТО Браво» г. Иркутск, что подтверждается актами внедрения результатов проведенного исследования (Приложение 3).

1. Тестовое воздействие на ОД на ГПС. Тестовое воздействие должно соответствовать типовым режимам функционирования АЭСП в условиях эксплуатации, обоснование которых приведены во второй главе диссертации:

- тяговый режим;
- тяговый режим с нагрузкой;
- движение с постоянной скоростью;
- свободный выбег;
- рекуперативное торможение.

2. Измерительные системы СББ должны обеспечивать контроль силовых, кинематических и электрических параметров, характеризующих исследуемый процесс. При проведении испытаний необходимо выполнять измерение следующих параметров:

- время разгона t_p и время выбега АЭСП t_b , с;
- путь разгона S_p и путь выбега АЭСП S_b , м;
- сила тяги на ведущий колесах R_x , Н;
- ток I_{BAT} , отдаваемый ТВБ при разгоне и потребляемый при рекуперативном торможении, А;
- фазные токи I_A , I_B , I_C , потребляемые ЭД в режиме разгона АЭСП и отдаваемые в режиме рекуперативного торможения, А;
- скорость движения АЭСП V_a , имитируемая на СББ, м/с.

3. Управляющие системы СББ должны обеспечивать тестовое воздействие, реализующее исследуемый процесс.

4. Программное обеспечение СББ должно осуществлять обработку регистрируемых параметров с последующей постановкой диагноза.

Методика выполнения экспериментального исследования процесса функционирования АЭСП на СББ состоит из следующего перечня этапов.

Этап № 1. Подготовительные операции

1. При помощи диагностического сканера проверить наличие ошибок в ЭБУ АЭСП. Если выявлено наличие аномалий, необходимо устранить их.

2. Проконтролировать соответствие размерности, типа, степени износа ЭШ, установленных на АЭСП, к требованиям завода-изготовителя.

3. Проконтролировать давление воздуха в ЭШ АЭСП на соответствие требованиям, установленным заводом-изготовителем. При обнаружении несоответствия контролируемого параметра довести его до нормы.

4. Подключить систему измерения электрических параметров АЭСП к высоковольтным проводам, соединяющим ТВБ с инвертором и инвертор с ЭД.

5. Запустить аппаратуру управляющей и измерительных систем СББ.

6. Выполнить прогрев СББ и его систем (не менее 10 мин).
7. Установить давление сжатого воздуха в пневмосистеме СББ на уровне 0,6 МПа.
8. Поднять выталкиватели колес АЭСП на СББ.
9. Установить расстояние между блоками ББ диагностического стенда, соответствующее колесной базе АЭСП.
10. Установить АЭСП на ББ диагностического стенда всеми колесами.
11. Опустить выталкиватели колес АЭСП.
12. Проконтролировать соосность продольных осей СББ и АЭСП. При выявлении несовпадения осей запустить АЭСП и выравнивать его на СББ путем холостого проворачивания ведущими колесами ББ со скоростью не более 5 км/ч.
13. Зафиксировать АЭСП на СББ при помощи 8 стяжных ремней во избежание продольного, поперечного и углового перемещения АЭСП в процессе проведения испытаний.
14. Подключить систему измерения электрических параметров АЭСП к СББ.
15. Прогреть ЭШ, трансмиссию, ЭСП и элементы ВВЦ АЭСП, а также трансмиссию СББ, путем плавного разгона и удержания скорости 25–30 км/ч в течение 60 секунд.

Этап № 2.1. Экспериментальное исследование (тяговый режим)

1. На пульте управления СББ активировать программу с записью контролируемых параметров.
2. Перевести селектор в позицию «D».
3. Разогнать АЭСП до скорости 30 км/ч путем плавного полного нажатия на педаль управления ЭСП. Время полного нажатия педали должно быть в пределах 1,5–2 сек.
4. Удерживать скорость в течение 5 сек., регулируя степень воздействия на педаль управления ЭСП.

5. Выполнить остановку АЭСП путем выбега за счет прекращения воздействия на педаль управления ЭСП.

6. Перевести селектор в позицию «Р».

7. Выполнить запись и сохранить результаты измерений.

8. Повторить пункты 2–7, изменяя максимальную скорость разгона до 60 и 90 км/ч.

Этап № 2.2. Проведение испытаний АЭСП в тяговом режиме с нагрузкой

9. Перевести селектор в позицию «D».

10. Установить момент сопротивления ЭДТ СББ до 100 Нм.

11. Разогнать АЭСП до скорости 30 км/ч путем плавного полного нажатия на педаль управления ЭСП. Обеспечить время полного нажатия на педаль за 1,5–2 сек.

12. Удерживать скорость в течение 5 сек., регулируя степень воздействия на педаль управления ЭСП.

13. Выполнить остановку АЭСП путем свободного выбега за счет прекращения воздействия на педаль управления ЭСП.

14. Перевести селектор в позицию «Р».

15. Выполнить запись и сохранить результаты измерений.

16. Повторить пункты 9–15, изменяя момент сопротивления ЭДТ СББ до 400 Нм дискретно с шагом в 100 Нм.

Этап № 2.3. Проведение испытаний в режиме движения АЭСП с постоянной скоростью

17. Перевести селектор в позицию «D».

18. Разогнать АЭСП до скорости 30 км/ч путем полного нажатия на педаль управления ЭСП.

19. Удерживать заданную скорость, регулируя степень воздействия на педаль управления ЭСП.

20. Нагрузить ЭСП автомобиля путем увеличения момента сопротивления ЭДТ дискретно до 400 Нм с шагом 100 Нм.

21. Увеличивая воздействие на педаль управления ЭСП, компенсировать сопротивление ЭДТ СББ для удержания заданной скорости.

22. Отключить ЭДТ.

23. Выполнить остановку АЭСП путем выбега за счет прекращения воздействия на педаль управления ЭСП.

24. Перевести селектор в позицию «Р».

25. Выполнить запись и сохранить результаты измерений.

26. Повторить пункты 17–25, изменяя максимальную скорость разгона до 60 и 90 км/ч.

Этап № 2.4. Проведение испытаний в режиме свободного выбега АЭСП

27. Перевести селектор в позицию «D».

28. Разогнать АЭСП до скорости 60 км/ч путем полного нажатия на педаль управления АЭСП.

29. Удерживать скорость в течение 5 секунд, регулируя степень воздействия на педаль управления ЭСП.

30. Отключить ЭД от трансмиссии АЭСП путем переключения селектора в положение «N».

31. Дождаться снижения скорости движения АЭСП до 5 км/ч без воздействия на тормозную систему АЭСП.

32. Произвести полную остановку колес путем при помощи тормозной системы.

33. Перевести селектор в позицию «Р».

34. Выполнить запись и сохранить результаты измерений.

Этап № 2.5. Проведение испытаний в режиме рекуперативного торможения АЭСП

35. Перевести селектор в позицию «В».

36. Разогнать АЭСП до скорости 60 км/ч путем полного нажатия на педаль управления ЭСП.

37. Удерживать скорость в течение 5 секунд, регулируя степень воздействия на педаль управления ЭСП.

38. Выполнить остановку АЭСП путем рекуперативного торможения за счет прекращения воздействия на педаль управления ЭСП.

39. Выполнить сохранение измеренных результатов в памяти компьютера.

Этап № 3. Окончание испытаний

1. Выполнить сравнение измеренных параметров с их нормативными значениями.

2. Поставить диагноз, используя ДМ.

3. Отключить систему измерения электрических параметров АЭСП от СББ.

4. Освободить АЭСП от стяжных ремней.

5. Заблокировать ББ диагностического стенда от вращения.

6. Осуществить выезд АЭСП с ББ диагностического стенда.

7. Разблокировать ББ диагностического стенда.

8. Отключить управляющую и измерительную аппаратуру систем СББ.

9. Отключить систему измерения электрических параметров ЭСП от ВВЦ автомобиля.

**3.2 Обоснование требований к оборудованию для реализации
методик экспериментального исследования
процесса функционирования АЭСП на СББ**

Анализируя возможности существующих СББ с точки зрения возможности задания ТР, описанных во второй главе диссертации, можно сделать вывод о том, что значительная часть современного стендового оборудования, используемого для контроля ТС автомобилей, разработана в последние десятилетия прошлого века. Подавляющая часть СББ была сконструирована для контроля ТС традиционных автомобилей. Ни один из разработанных стендов не способен одновременно реализовывать контроль и силовых, и инерционных параметров процесса функционирования автомобилей. Это свидетельствует об их непригодности для контроля ТС агрегатов АЭСП.

Силовые СББ позволяют измерять тяговые силы только на двух ведущих колесах оси одновременно, т. е. суммарно для оси в целом. Данная особенность исключает возможность контроля ТС агрегатов АЭСП с индивидуальными мотор-колесами. Инерционные СББ по причине их конструктивных особенностей вообще не способны измерять силы на колесах автомобилей. Такие методы контроля ТС крайне неэффективны для АЭСП [158].

В настоящее время не существует конструкций СББ, технические, технологические и метрологические возможности которых могли бы обеспечить эффективный контроль ТС агрегатов АЭСП путем измерения их ТДС на должном уровне и обеспечивать задание ТР, представленных во второй главе диссертации.

Наиболее значимым вопросом является выбор нагружающего устройства, поскольку именно от него зависит возможность задания ТР. Для реализации неустановившихся режимов разгона, рекуперативного торможения и свободного выбега АЭСП необходимо использовать инерционные маховые массы СББ. В то же время измерительные системы СББ обязательно должны обеспечивать возможность контроля сил на колесах диагностируемого автомобиля. Стоит отметить, что действие сил на ведущих колесах АЭСП при функционировании в режимах свободного выбега и рекуперативного торможения будет иметь противоположное направление по сравнению с тяговым режимом функционирования АЭСП. Соответственно, системы измерения СББ должны обеспечивать возможность измерения разнонаправленных сил, действующих на колесах автомобиля [158].

В то же время реализация установившихся режимов функционирования АЭСП на СББ невозможна без применения силового нагружающего устройства. По функциональным и нагружающим свойствам оптимальным устройством считается ЭДТ. Современные микроконтроллеры вполне способны обеспечивать регулирование его тормозного момента M_T с целью обеспечения в полной мере требуемого тестового воздействия на агрегаты АЭСП.

Таким образом, одним из требований к конструкции СББ для контроля ТС агрегатов АЭСП является его универсальность и гибридность, совмещающие в себе основные преимущества как силовых, так и инерционных СББ [158].

Контроль ТС агрегатов АЭСП путем измерения ТДС целесообразно выполнять на ГПС. Необходимость выполнения этого требования обуславливается наличием в современных АЭСП различных электронных систем помощи водителю, таких как противобуксовочная система. При использовании стендового оборудования с опорным устройством для одной оси автомобиля интеллектуальные системы помощи водителю будут оказывать существенное влияние на функционирование ЭСП автомобиля, поскольку в этом случае будет наблюдаться значительная разница между частотами вращения передних и задних колес автомобиля. Применение одноосных СББ не позволит получить корректные данные о ТДС АЭСП. Для выполнения эффективного контроля ТС агрегатов АЭСП без воздействия со стороны интеллектуальных систем автомобиль должен функционировать так же, как в реальных дорожных условиях, т. е. все его колеса должны вращаться с одинаковой частотой. Реализовать такие условия функционирования АЭСП возможно, только если ББ диагностического стенда будут вращаться всегда синхронно, т. е. они должны быть кинематически жестко связаны между собой. Поэтому вторым требованием к конструкции СББ является обеспечение возможности одновременного функционирования всех колес АЭСП также, как в реальных дорожных условиях [158].

Наиболее информативным ДП при контроле ТДС является сила тяги на колесах автомобиля. Измеряя тяговые силы на каждом колесе, можно дать оценку работы ЭСП, в том числе и каждого индивидуального мотор-колеса АЭСП, не только в тяговом режиме, но и в режиме РЭ. Зная величину силы тяги и частоту вращения колес, можно вычислить мощность, подведенную к колесам от ЭСП для разгона, удержания постоянной скорости или рекуперативного торможения автомобиля ЭД. Чтобы дать оценку качества функционирования ЭСП целесообразно измерять ток, отдаваемый ТВБ и

потребляемый ЭД. Поэтому еще одним требованием к стенду является возможность измерения всех перечисленных ДП одновременно при контроле ТС агрегатов АЭСП [158].

На основании вышеизложенного были сформулированы требования к ТР контроля ТС агрегатов АЭСП, а также к конструкции СББ.

1. СББ должен обеспечивать следующие режимы функционирования АЭСП: тяговый режим, тяговый режим с нагрузкой, режим движения с постоянной скоростью, режим свободного выбега и режим рекуперативного торможения, в том числе обеспечивать возможность совмещения и комбинирования этих режимов.

2. Гибридная конструкция СББ должна совмещать в себе преимущества силовых и инерционных СББ с возможностью измерения сил на каждом колесе АЭСП индивидуально. В качестве нагружающего устройства в конструкции СББ необходимо использовать как инерционные маховые массы для имитации тяговых режимов, режимов свободного выбега и рекуперативного торможения, так и силовое нагружающее устройство (например, ЭДТ) для обеспечения режимов движения с постоянной скоростью.

3. СББ должен обеспечивать возможность функционирования АЭСП аналогично режимам, характерным для реальных дорожных условий.

4. ББ диагностического стенда должны иметь жесткую кинематическую связь, обеспечивающую их вращение с одинаковой угловой скоростью.

5. СББ должен обеспечивать возможность измерения скорости вращения каждого колеса АЭСП индивидуально.

6. СББ должен обеспечивать возможность измерения действующих на колесах АЭСП сил, в том числе разнонаправленных.

7. СББ должен обеспечивать возможность измерения силы тока, потребляемого ЭСП автомобиля при его функционировании.

В процессе контроля ТС агрегатов АЭСП за счет измерения ТДС необходимо обеспечивать тестовые воздействия, включающие тяговый режим, тяговый режим с нагрузкой, режим движения с постоянной скоростью, режим

свободного выбега, а также режим рекуперативного торможения. Измерение силовых параметров на каждом колесе автомобиля является самым эффективным и информативным решением.

Проводить контроль ТС агрегатов АЭСП целесообразно на СББ, способных измерять разнонаправленные силы на колесах транспортного средства, скорость вращения колес, а также силу тока в цепи между ТВБ и ЭД.

Конструкция СББ должна обеспечивать функционирование всех колес АЭСП также, как в реальных дорожных условиях, т. е. ББ диагностического стенда необходимо кинематически связывать между собой.

Для обеспечения комбинированного тестового воздействия СББ должен иметь гибридную конструкцию, совмещающую в себе достоинства инерционных и силовых СББ.

3.3 Оборудование для реализации методик экспериментального исследования процесса функционирования АЭСП на СББ

Вышеперечисленные требования легли в основу спроектированного и изготовленного ГПС (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Внешний вид ГПС ИРНТУ с АЭСП KIA Soul EV

Конструкция разработанного ГПС защищена патентом на полезную модель: Патент на полезную модель № 199093 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13. Гибридный универсальный полноопорный стенд для контроля технического состояния колесных транспортных средств (см. приложение 1) [115]. Схема разработанного и изготовленного с участием автора ГПС ИРНИТУ отображена на рис. 3.2.

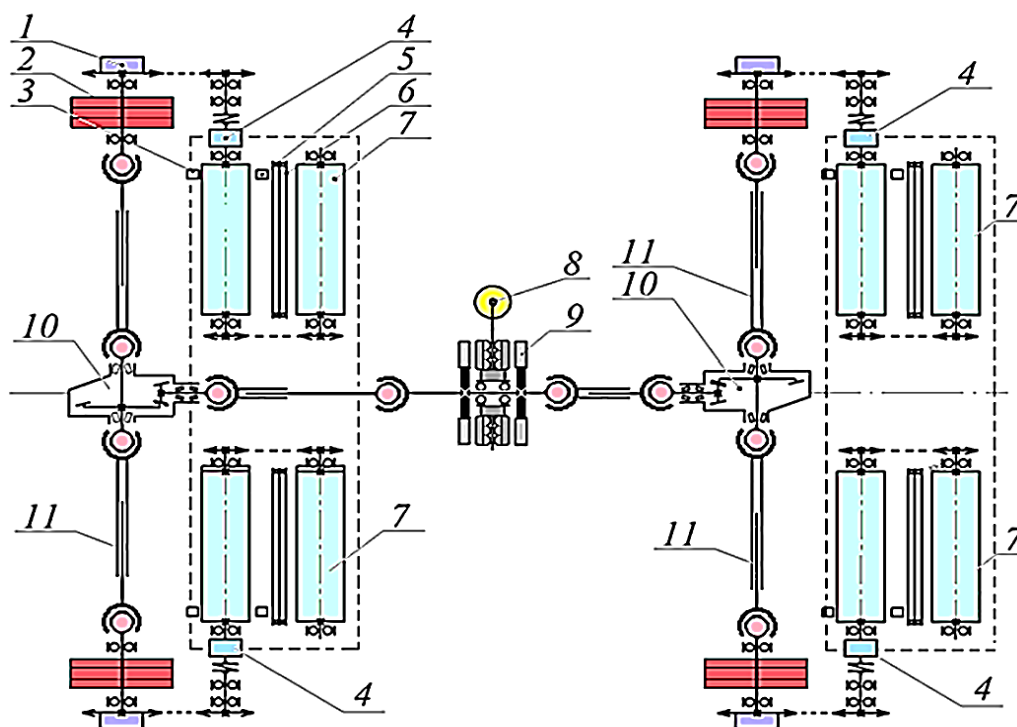


Рисунок 3.2 – Структура ГПС ИРНИТУ для контроля ТС агрегатов АЭСП:

1 – муфта; 2 – маховик; 3 – индуктивный преобразователь скорости барабанов; 4 – силоизмерительный датчик; 5 – индуктивный преобразователь скорости вращения следящих роликов; 6 – ролик следящей системы; 7 – барабаны; 8 – тензометрический преобразователь усилия электродинамического тормоза; 9 – электродинамическое нагружающее устройство; 10 – редуктор; 11 – карданная передача

ГПС ИРНИТУ состоит из двух автономных и подвижных относительно друг друга блоков. В каждом из блоков установлены ББ 7, выполняющие роль опорного устройства для колес автомобиля. Задний блок ББ имеет возможность продольного перемещения для изменения межосевого

расстояния ГПС в соответствии с колесной базой контролируемого автомобиля. ББ 7 кинематически связаны с маховыми массами 2 через цепные передачи. В конструкции ГПС применен способ разгона колес и ББ 7 от ЭСП автомобиля. При этом маховые массы 2 являются аккумуляторами энергии ГПС при имитации режимов разгона и выбега автомобиля [114, 115, 117, 118].

Передний и задний блоки ББ ГПС кинематически соединены между собой карданными валами 11 и редукторами 10, что позволяет автомобилю функционировать также, как в реальных дорожных условиях. Между блоками ББ установлен ЭДТ 9 с датчиком измерения усилия сопротивления 8. Наличие ЭДТ 9 позволяет создавать дополнительную нагрузку на ЭСП автомобиля как в режиме разгона, так и в режиме при неизменной скорости.

Эксплуатационные параметры вышеописанного ГПС ИРНТУ размещены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Эксплуатационные параметры ГПС ИРНТУ

Характеристика	Единица измерения	Значение
Максимальная масса автомобиля	кг	3500
Колесная база автомобилей	мм	2450–2950
Максимальная мощность силовой установки автомобиля	кВт	100
Максимальная скорость, имитируемая на стенде	км/ч	100
Момент инерции маховых масс	кг/м ²	4 х 4,25
Радиус ББ	м	0,105
Максимальная измеряемая реализованная касательная реакция	Н	5000
Электрическая мощность, потребляемая стендом	кВт	5
Относительная погрешность измерения РКР	%	2,37
Относительная погрешность измерения имитируемой скорости	%	0,72

К основным преимуществам и особенностям разработанного ГПС можно отнести следующее:

1) наличие бесконтактных магнитострикционных датчиков (БМСД) дает возможность измерения разнонаправленных силовых параметров индивидуально на каждом колесе автомобиля, что позволяет контролировать ТС агрегатов АЭСП как с одним ЭД, так и с индивидуальными электрическими мотор-колесами;

2) наличие маховых масс дает возможность задавать неустановившееся тестовое воздействие; это позволяет имитировать тяговые режимы, режимы свободного выбега и рекуперативного торможения АЭСП;

3) наличие ЭДТ позволяет задавать установившийся ТР; это дает возможность имитировать движение автомобиля с постоянной скоростью, в том числе с нагрузкой;

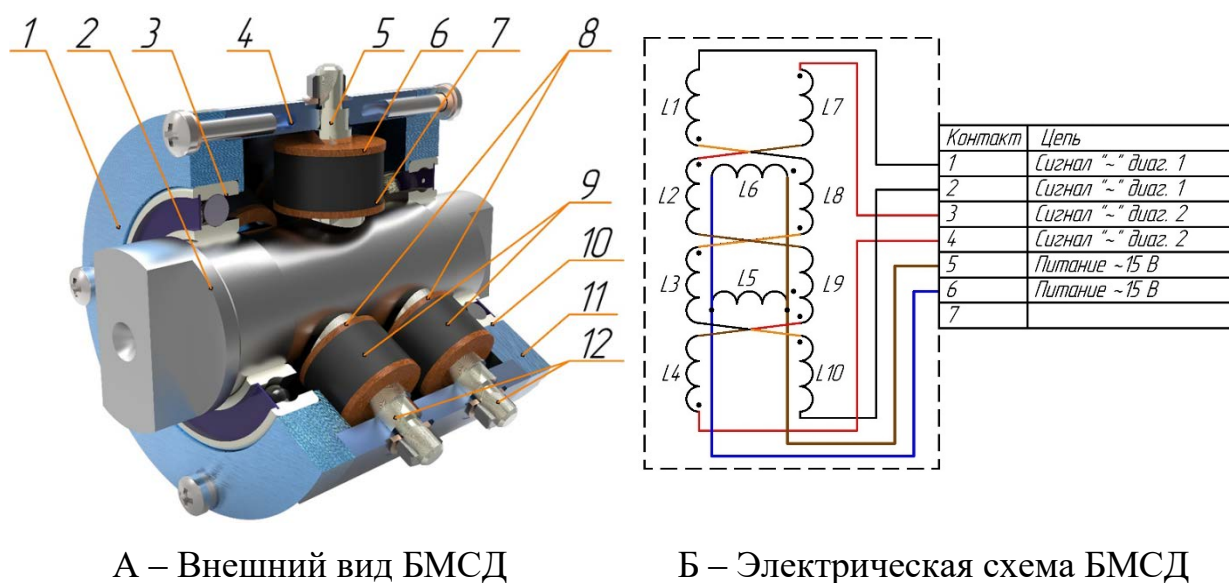
4) наличие датчиков тока позволяет выполнять измерение параметров функционирования ЭСП, что дает возможность оценивать его ТС.

3.3.1 Система измерения силовых параметров функционирования АЭСП

Измерение силовых параметров функционирования колес АЭСП на ГПС выполняется бесконтактным методом при помощи БМСД 4 (см. рис. 3.2) [114, 186, 192].

Процесс функционирования БМСД (рис. 3.3) основывается на явлении магнитострикции. Оно заключается в изменении магнитного поля вокруг магнитопровода при его деформации.

При воздействии скручивающего момента на вал, который является магнитопроводом, в нем возникают касательные напряжения. Возникающие в магнитопроводе напряжения максимальны на его поверхности и уменьшаются по мере приближения к его центру [114, 186, 192].



А – Внешний вид БМСД

Б – Электрическая схема БМСД

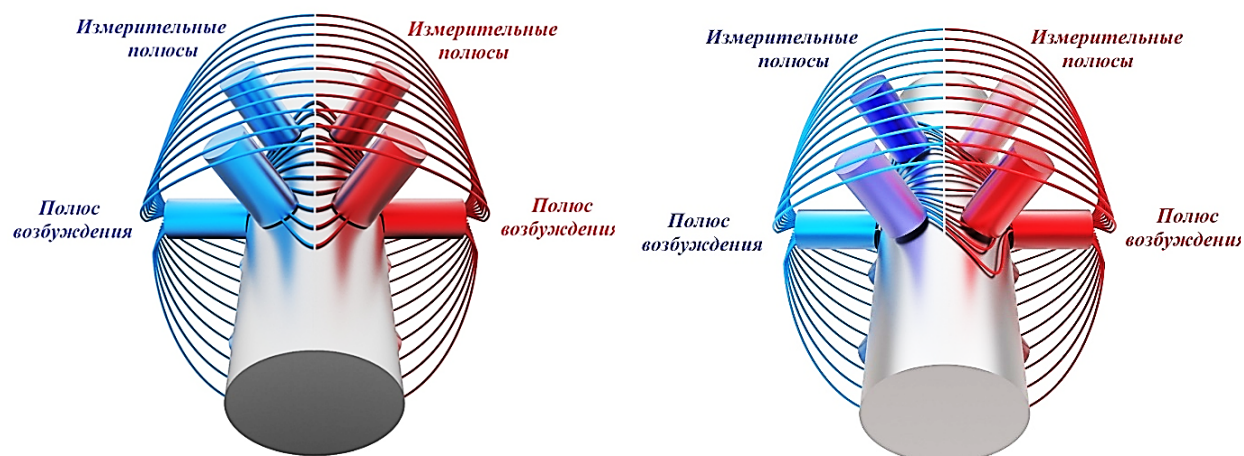
Рисунок 3.3 – БМСД измерения силовых параметров функционирования АЭСП

1, 11 – крышка корпуса; 2 – магнитопровод (вал); 3, 10 – шариковые подшипники; 4 – ярмо; 5, 12 – сердечники намагничивающих и измерительных катушек; 6, 8 – корпуса намагничивающих и измерительных катушек; 7, 9 – обмотки намагничивающих и измерительных катушек; $L1, L8, L3, L10$ – измерительные катушки первой диагонали; $L7, L2, L9, L4$ – измерительные катушки второй диагонали; $L5, L6$ – намагничивающие катушки

Изначально, когда скручивающий момент на магнитопроводе отсутствует, его магнитные сопротивления на всех участках равны друг другу. Соответственно, магнитное поле вокруг вала распределяется равномерно (рис. 3.4, А) [114, 186, 192].

В момент воздействия на вал скручивающего момента происходит его деформация. Она вызывает изменение магнитных сопротивлений вдоль главных линий напряжений. Изменение магнитных сопротивлений под измерительными полюсами приводит к смещению магнитного потока. Это приводит к возникновению уравнивающего магнитного потока в ярмах измерительных магнитопроводов. Изменение магнитных потоков в полюсах измерительных магнитопроводов и на валу (рис. 3.4, Б) приводит

к изменению ЭДС, индуктируемых в измерительных обмотках, и к разбалансировке на измерительной схеме. Напряжения обеих измерительных обмоток выпрямляются и сравниваются с помощью дифференциальной измерительной схемы (рис. 3.5).



А – картина распределения магнитного поля при отсутствии на валу крутящего момента

Б – картина распределения магнитного поля при воздействии на вал крутящего момента

Рисунок 3.4 – Принцип работы БМСД

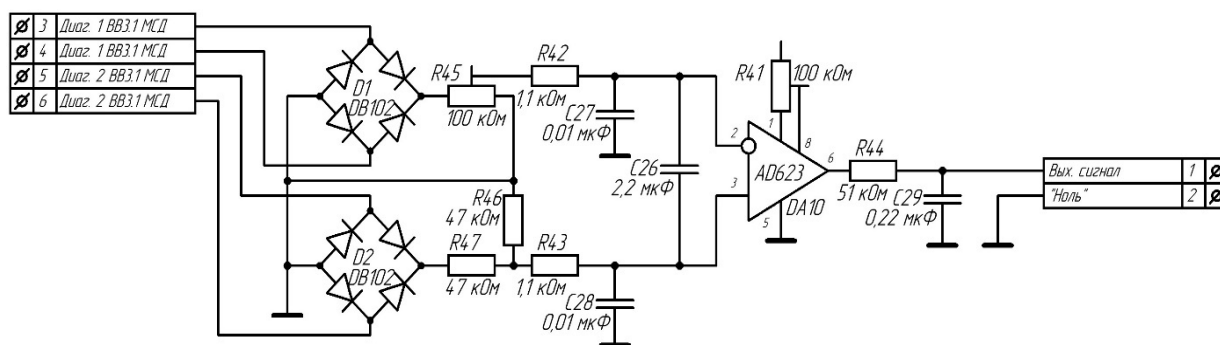


Рисунок 3.5 – Дифференциальная измерительная схема с усилителем сигнала БМСД

В результате этого на сопротивлении нагрузки появляется напряжение, пропорциональное приложенному крутящему моменту, что позволяет измерять силовые параметры функционирования АЭСП на СББ.

Были проведены дополнительные исследования [186, 192], позволившие снизить погрешности измерений при использовании БМСД. Результаты исследований были защищены патентом на полезную модель: Патент на полезную модель № 198516 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/28. бесконтактный измеритель для силового тормозного роликового стенда (см. приложение 1) [114].

3.3.2 Система силового нагружения АЭСП

Для реализации установившихся ТР с целью имитации движения АЭСП при постоянной скорости, а также для создания дополнительной нагрузки на ЭСП автомобиля при его разгоне в тяговом режиме было принято решение использовать ЭДТ 9 в конструкции ГПС (см. рис. 3.2).

Принцип работы ЭДТ, внешний вид которого приведен на рисунке 3.6, заключается в использовании вихревых токов для создания тормозного момента, оказывающего дополнительную нагрузку на ЭСП автомобиля.



Рисунок 3.6 – ЭДТ нагружающей системы ГПС

Для регулирования степени воздействия ЭДТ была разработана плата управления, принципиальная схема которой приведена на рисунке 3.7.

Плата управления построена на микроконтроллере *Arduino NANO*, на который посылается сигнал ШИМ от ПК. Микроконтроллер обрабатывает зарегистрированный сигнал и через оптопару U_2 управляет симистором VS_1 . Через этот симистор реализовано питание ЭДТ. Это позволяет регулировать степень воздействия ЭДТ на процесс функционирования АЭСП на СББ.

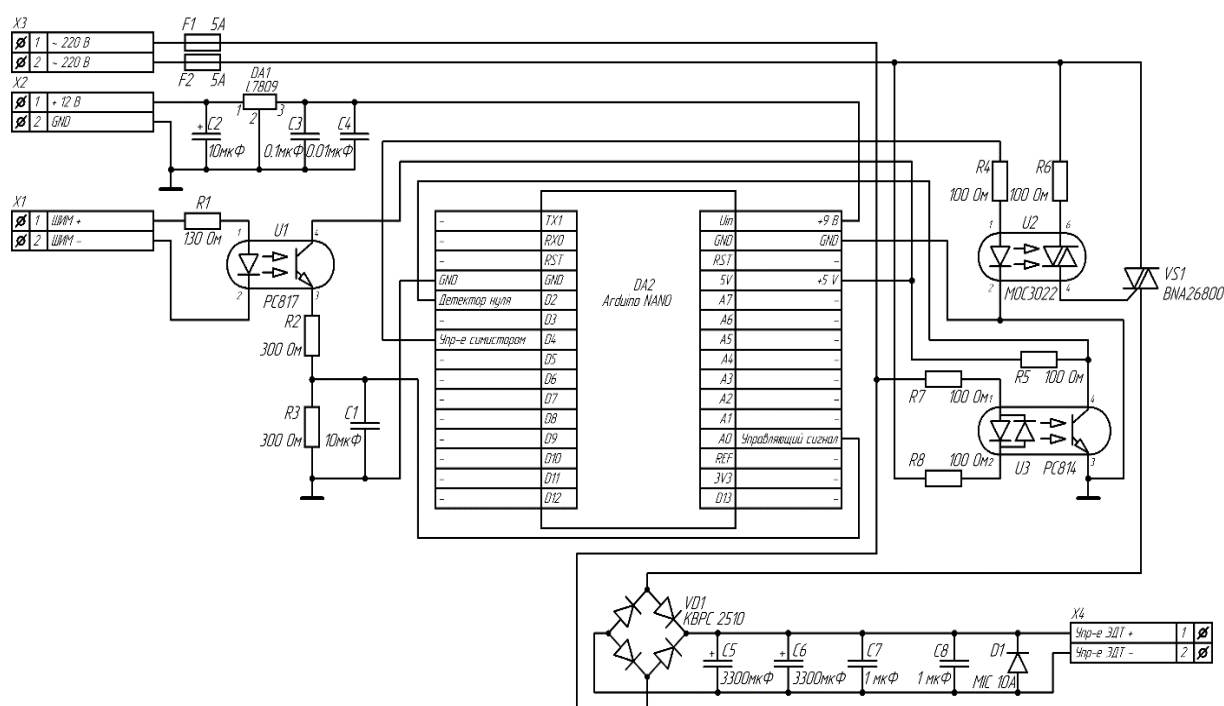


Рисунок 3.7 – Плата управления ЭДТ

Измерение усилия сопротивления ЭДТ реализовано через тензометрический датчик балочного типа, закрепленного на раме стенда (рис. 3.8).

Корпус электродинамического тормоза, установленный балансирно, соединен с датчиком при помощи тяги. При подаче на электродинамический тормоз напряжения, возникающие во вращающихся дисках вихревые токи создают реактивный момент, пропорциональный сопротивлению, оказываемому электродинамическим тормозом на процесс функционирования АЭСП на стенде.

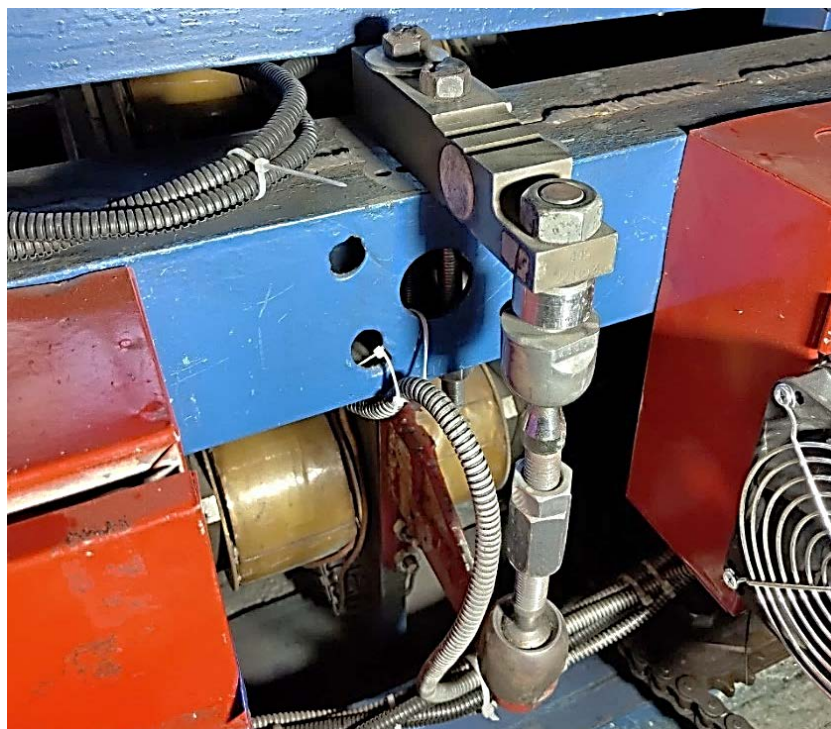


Рисунок 3.8 – Датчик измерения усилия сопротивления ЭДТ

Разработанная система нагружения АЭСП позволяет дискретно устанавливать заданную нагрузку на ЭСП контролируемого автомобиля при его испытаниях на ГПС ИРНТУ.

3.3.3 Система измерения скоростных параметров функционирования АЭСП

Измерение скоростных параметров функционирования АЭСП на ГПС ИРНТУ осуществляется несколькими датчиками. Во-первых, происходит измерение частоты вращения ББ 7, реализуемое датчиками 3. Во-вторых, датчиками 5 выполняется измерение частоты вращения роликов следящей системы (РСС) 6 (см. рис. 3.2). Датчики 3 и 5 (рис. 3.9), имеют идентичную конструкцию, работают на основе эффекта Холла и были изготовлены самостоятельно.



А – индуктивный преобразователь,
измеряющий вращение ББ

Б – индуктивный преобразователь,
измеряющий вращение РСС

Рисунок 3.9 – Индуктивные преобразователи, измеряющие скорости
вращения элементов ГПС

Рассмотрим работу датчика, регистрирующего скоростные параметры, на основе стального РСС. В зоне работы датчика Холла в поверхности РСС имеются отверстия, равномерно распределенные по его окружности. Выходной сигнал используемого датчика находится в одном из двух положений. Верхнее или нижнее положение выходного сигнала датчика изменяется в зависимости от зазора между торцом датчика и металлической поверхностью РСС или ББ.

При вращении РСС напротив торца датчика может находиться либо металлическая поверхность РСС, либо отверстие, что приводит к изменению зазора между торцом датчика и металлической поверхностью вращающего РСС. В результате датчик генерирует импульсы прямоугольной формы. Частота импульсов прямо пропорциональна частоте вращения ББ или РСС.

Для обработки сигнала от индуктивных преобразователей была разработана и изготовлена плата (рис. 3.10).

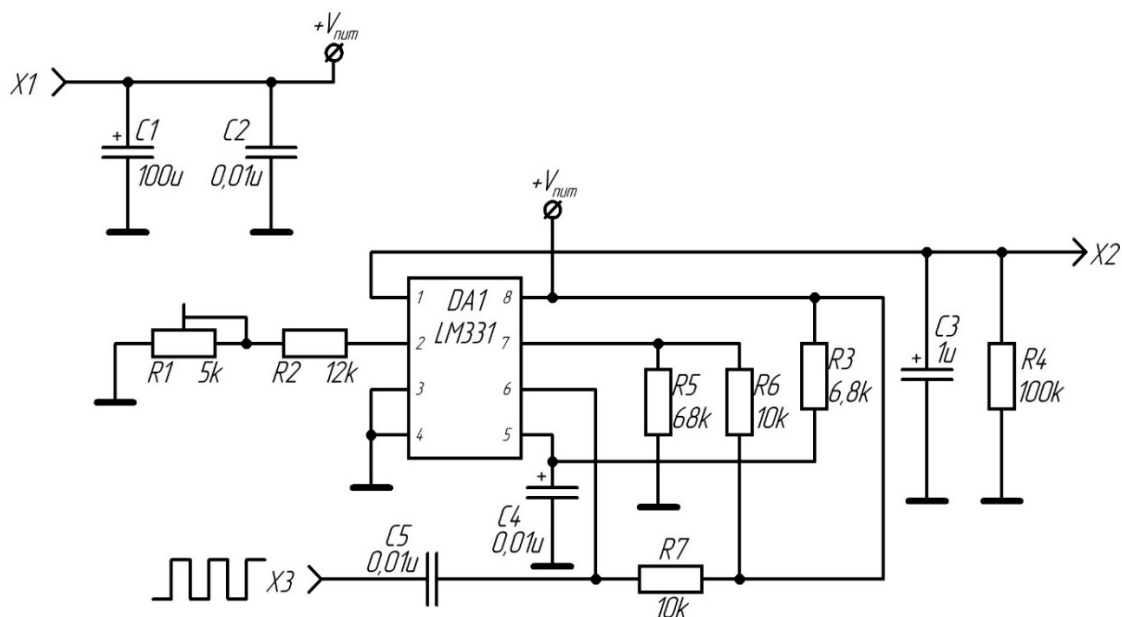


Рисунок 3.10 – Плата преобразования сигнала датчика Холла

Разработанная плата работает по принципу преобразования частоты в напряжение. На вход X_3 платы поступают прямоугольные импульсы с датчика Холла с частотой, прямо пропорциональной частоте вращения РСС или ББ. Микросхема DA_1 преобразует полученный от измерителя частотный сигнал в напряжение постоянной величины. Частота входного сигнала строго определяет уровень этого напряжения. Последующая обработка выходного сигнала с платы реализуется в программном обеспечении на ПК.

3.3.4 Система измерения параметров функционирования ЭСП автомобиля

Ключевым моментом для выполнения эффективного контроля ТС агрегатов АЭСП является возможность измерения параметров функционирования его ЭСП. Для реализации этого требования была разработана система, позволяющая измерять ток, потребляемый агрегатами ЭСП.

Разработанная система измерения параметров функционирования ЭСП автомобиля позволяет регистрировать токи, протекающие по высоковольтным

проводам ЭСП. Рассматриваемая система содержит в своем составе четыре токоизмерительных датчика, спроектированных и изготовленных самостоятельно (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Разработанные токоизмерительные датчики системы измерения параметров функционирования ЭСП

Ток, проходящий по проводнику, порождает внутри и вокруг него магнитное поле. На основе прямого измерения возникающего магнитного поля основан принцип работы представленных токоизмерительных датчиков. Конструкция разработанного датчика представляет собой разъемный ферромагнитный сердечник, являющийся магнитопроводом, в разрезе которого установлен датчик Холла. Ток в магнитопроводе, вызывает окружающее его магнитное поле. Величина этого поля прямо пропорциональна току, проходящему по проводнику. Разъемная конструкция датчика позволяет измерять параметры функционирования ЭСП без отключения ВВЦ питания ЭД и иных агрегатов ЭСП, т. е. без разрыва цепи питания.

ЭДС датчика Холла прямо пропорциональна полю, соответственно, по измерениям ЭДС датчика Холла можно косвенно измерить ток в проводнике, при этом форма протекающего в проводнике тока не имеет значения. Она может быть синусоидальной, треугольной, прямоугольной и прямой. Другими словами,

разработанный токоизмерительный датчик, работающий на эффекте Холла, позволяет проводить измерения постоянного тока. Преимуществом датчика Холла является то, что его ЭДС меняет знак при изменении направления магнитного поля. Это явление позволяет использовать разработанные датчики не только для измерения величины проходящего в проводнике тока, но и для определения направления его движения.

Данная особенность делает разработанные токоизмерительные датчики универсальными и позволяет использовать их как для измерения фазных токов I_A , I_B , I_C , протекающих между инвертором и ЭД, так и тока I_{BAT} , протекающего между ТВБ и инвертором.

3.4 Методика планирования экспериментального исследования

Результаты экспериментальных исследований во многом зависят от большого количества случайных факторов. При проведении стендовых испытаний – непараллельность осей АЭСП и СББ, перекачивание колес по ББ диагностического стенда, в измерительных системах и аппаратуре могут наблюдаться помехи, сбои и т. д. В этой связи очень важен вопрос однородности полученных данных. Повышение количества наблюдений при выполнении экспериментальных исследований является максимально эффективным способом повышения точности.

Чтобы знать количество опытов, необходимого и достаточного для обеспечения заданного уровня точности, выполняли расчет по установленным зависимостям [36, 59, 70, 104]. Для расчета задавали значение надежности H и относительной ошибки Δ_o , взятой в долях стандарта σ [36, 59, 70, 104].

Данная методика применима в случае, когда заранее известна дисперсия наблюдений σ^2 . Если же дисперсия заранее не известна, то для определения количества наблюдений можно воспользоваться методом проверки статистических гипотез [36, 59, 70, 104].

В соответствии с выбранной методикой для обеспечения требуемого уровня точности δ_m перед проведением испытаний необходимо определить

минимальное число испытаний n . Для этого необходимо сравнивать величину среднеквадратичного отклонения ε с заданным уровнем точности [36, 59, 70, 104]:

$$\delta_m \geq \varepsilon; \quad (3.1)$$

Уровень заданной точности можно рассчитать по формуле [33]:

$$\delta_m = \beta \cdot \bar{x}; \quad (3.2)$$

где $\beta = 0,05$ – коэффициент, учитывающий долю погрешности относительного среднего значения измеряемого параметра $\bar{x}$.

При этом математическое ожидание интересующего нас параметра вычисляли на основе известной формулы [36, 59, 70, 104]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (3.3)$$

где x_i – значение интересующего нас параметра при i -м измерении;

n – количество измерений.

Дисперсию интересующего нас параметра определяли по следующей формуле [36, 59, 70, 104]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i^n (\bar{x} - x_i)^2. \quad (3.4)$$

Среднеквадратическое отклонение ε наблюдаемых параметров вычисляется по следующей зависимости [36, 59, 70, 104]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot t(\gamma, n-1) \cdot \sigma; \quad (3.5)$$

где γ – доверительная вероятность;

t – коэффициент, определяемый по таблицам распределения Стьюдента.

Определение числа испытаний согласно данной методике производится в следующем порядке: проводят n экспериментальных исследований, определяют статистические параметры δ_m , $\bar{x}$, ε , σ и проверяют выполнение условия (3.1). Дополнительные испытания необходимо последовательно выполнять, пока не произойдет выполнение неравенства (3.1).

3.5 Методика калибровки систем измерения оборудования

Метрологические характеристики стендового оборудования определяют точность измерения силовых, скоростных и прочих параметров функционирования АЭСП на СББ. От точности измеренных параметров зависит корректность постановки диагноза ОД при контроле его ТС. Для обеспечения корректности проведения испытаний и минимизации ошибок, связанных с измерением параметров функционирования АЭСП, необходимо выполнять калибровку систем измерения ГПС.

Корректное проведение испытаний невозможно без наличия функциональных взаимосвязей между уровнем выходного сигнала системы измерения и регистрируемой ей физической величиной, которую получают в ходе калибровки. Линейная зависимость изменения уровня измеряемой физической величины от выходного уровня сигнала является наиболее предпочтительной.

Для определения графика, устанавливающего алгебраическую связь между измеряемым в ходе эксперимента параметром Y_i и показаниями прибора X_i следует проделать следующие действия:

- 1) выявить минимальную и максимальную величину, измеряемого в ходе эксперимента параметра;
- 2) выявить количество предельных уровней измеряемого в ходе эксперимента параметра (с учетом его увеличения и снижения);
- 3) включить измерительную систему ГПС и прогреть ее в течение 15 мин.;

4) последовательно с заданной дискретностью варьировать величину измеряемого в ходе эксперимента параметра;

5) при каждом установленном значении измеряемого в ходе эксперимента параметра выполнять измерение сигнала на выходе измеряющей его системы;

6) результаты устанавливаемых и измеренных значений параметра занести в таблицу «Microsoft Excel» (см. табл. 3.2);

7) на программном уровне построить точечный график с маркерами (см. рис. 3.12), определить функциональную зависимость $y = f(x)$ и уровень достоверности аппроксимации R^2 по формуле (3.8);

Таблица 3.2 – Таблица калибровочных значений системы измерения

Устанавливаемое значение физической величины	Величина, зарегистрированная системой измерения					Средняя величина регистрируемого значения
	1	2	3	...	n	
Y_1	X_{11}	X_{21}	X_{31}		X_{n1}	$\bar{X}_1$
Y_2	X_{12}	X_{22}	X_{32}		X_{n2}	$\bar{X}_2$
...	...	...	...		...	
Y_{i-1}	X_{1i-1}	X_{2i-1}	X_{3i-1}		X_{ni-1}	$\bar{X}_{i-1}$
Y_i	X_{1i}	X_{2i}	X_{3i}		X_{ni}	$\bar{X}_i$
Y_{i+1}	X_{1i+1}	X_{2i+1}	X_{3i+1}		X_{ni+1}	$\bar{X}_{i+1}$
...	...	...	...		...	
Y_2	X_{12}	X_{22}	X_{32}		X_{n2}	$\bar{X}_2$
Y_1	X_{11}	X_{21}	X_{31}		X_{n1}	$\bar{X}_1$

8) на основе установленной алгебраической связи между измеряемым в ходе эксперимента параметром Y_i и показаниями прибора X_i определить величину коэффициента перевода регистрируемого параметра (в виде напряжения) в величину измеряемого в ходе эксперимента параметра.

Аппроксимация экспериментальных данных (зависимость $Y_i = f(X_i)$) была выполнена в программной среде «Microsoft Excel» при помощи линии

тренда. Построение такой линии линейного типа реализуется методом наименьших квадратов. Использование этого метода дает возможность получить более точную зависимость, пригодную для описания полученных данных.

Представить это математически возможно, используя выражение:

$$Y = k \cdot X; \quad (3.6)$$

где k – коэффициент, характеризующий наклон линии тренда к оси OX .

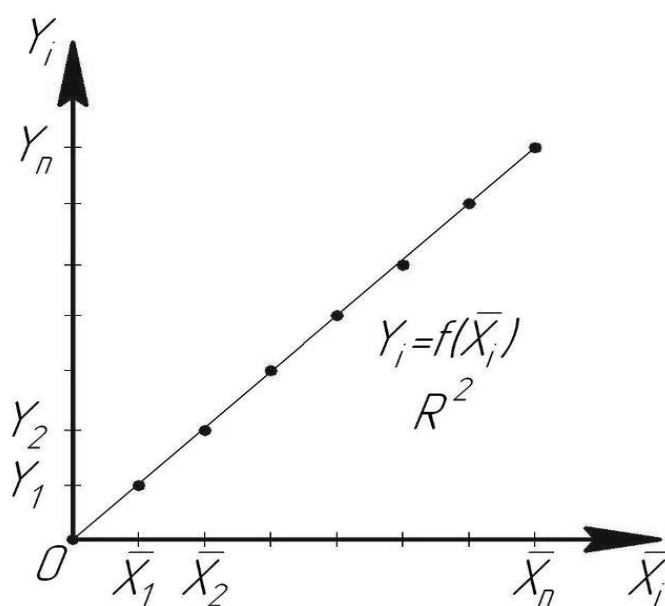


Рисунок 3.12 – Калибровочный график зависимости измеряемой физической величины Y_i от показаний прибора $\bar{X}_i$ системы измерения

Коэффициент k несложно рассчитать по представленному выражению [178, 231]:

$$k = \frac{n \cdot (\sum X \cdot Y) - (\sum X) \cdot (\sum Y)}{n \cdot (\sum (X^2)) - (\sum X)^2}; \quad (3.7)$$

где n – количество точек, составляющих линию.

Уровень достоверности аппроксимации R^2 (коэффициент детерминации) рассчитывался на основе сравнения значений, получаемых

на линии тренда, с фактическими значениями Y по следующей зависимости [104]:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}; \quad (3.8)$$

где SSE – остаточная сумма квадратов разности между прогнозируемым (оценочным) значением Y_i и фактическим значением $\hat{Y}_i$;

SST – общая сумма квадратов [104].

Остаточная и общая суммы квадратов вычисляются по формулам [104]:

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2; \quad (3.9)$$

$$SST = \left(\sum Y_i^2 \right) - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}. \quad (3.10)$$

Варьирование коэффициента R^2 происходит в диапазоне от 0 до 1. Если R^2 равно нулю, то полученная линия тренда непригодна для вычислений значений Y . Когда же R^2 стремится к единице, такая линия тренда максимально точно описывает зависимость.

Для оценки относительной погрешности систем измерения использовалось выражение вида:

$$\Delta = \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{\max}} \cdot 100\%; \quad (3.11)$$

где $\Delta Y_{\max}$ – наибольшая разница между рядами наблюдений сигналов;

$Y_{\max}$ – наибольшее из значений для ряда наблюдений сигналов.

Согласно Техническому регламенту «О безопасности колесных транспортных средств», относительная погрешность измерения не должна превышать при определении в процентах для тормозного и тягового моментов $\pm 3\%$. Относительная погрешность угловых скоростей беговых барабанов и колес автомобилей настоящим документом не регламентируется, однако для обеспечения качества диагностики погрешность этих параметров не должна превышать уровня в 3% .

3.5.1 Методика калибровки системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП

При проведении калибровки системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП на ГПС был использован калибровочный рычаг с набором эталонных грузов. Установленный на зафиксированный ББ калибровочный рычаг позволяет дискретно задавать на валу БМСД усилие, эквивалентное усилию, развиваемому колесом АЭСП при его разгоне или рекуперативном торможении на СББ. Усилие, задаваемое калибровочным рычагом, регистрируется БМСД, обрабатывается системой измерения, после чего поступает в персональный компьютер для анализа.

Получение калибровочной зависимости измеряемой силы R_x , действующей в пятне контакта ЭШ с ББ диагностического стенда, от величины регистрируемого системой измерения напряжения U_{Rx} БМСД осуществляется в следующей последовательности операций.

1. Зафиксировать ББ от вращения путем установки стопорного пальца в паз промежуточной опоры (рис. 3.13).
2. Закрепить калибровочный рычаг 1 на ББ путем установки рычага на квадратный шип с торца ББ (рис. 3.14).
3. Установить калибровочный рычаг 1 в горизонтальное положение путем вращения регулировочной шпильки 3 с целью минимизации влияния веса калибровочного устройства на показания системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП. Для соблюдения условия горизонтальности калибровочного рычага необходимо использовать лазерный уровень.
4. Сбалансировать калибровочный рычаг в горизонтальном положении путем изменения положения компенсационного груза 2 с целью полного исключения влияния веса калибровочного устройства на показания системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП. В случае отклонения калибровочного рычага от горизонтального положения повторить пункт 3.

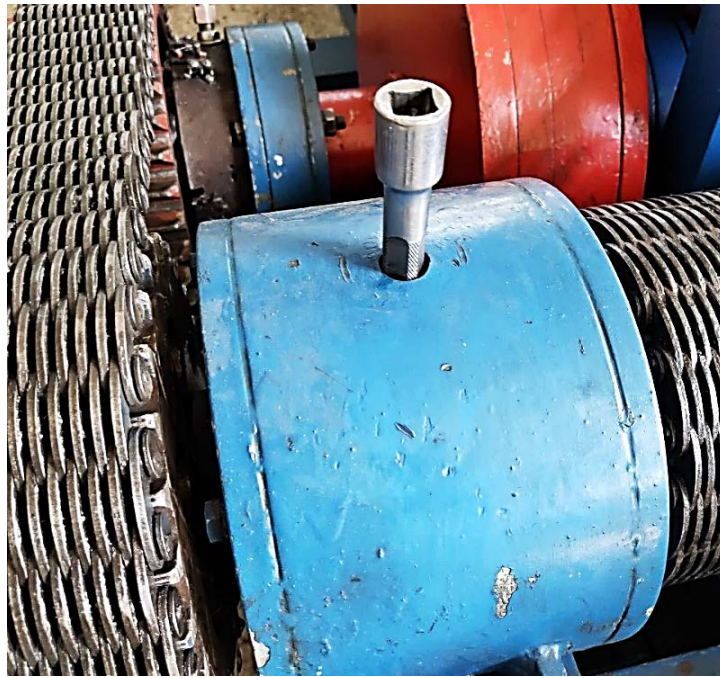
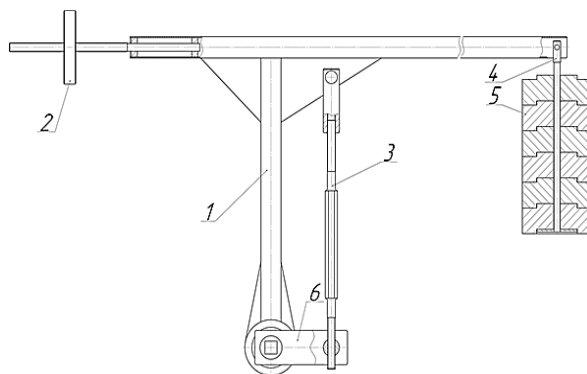


Рисунок 3.13 – Стопорный палец, установленный в паз
в промежуточной опоре ББ

5. Включить систему измерения силовых параметров функционирования АЭСП и прогреть ее в течении 20 минут с целью стабилизации показаний системы.



А – схема механического
калибровочного устройства



Б – механическое калибровочное
устройство, установленное на стенде

Рис. 3.14 – Механическое калибровочное устройство

6. На персональном компьютере активировать программный продукт фирмы *L-Graph* для работы аналого-цифрового преобразователя.

7. В программном обеспечении активировать канал измерения силовых параметров функционирования АЭСП для калибруемого БМСД.

8. При нулевой величине нагрузки на валу БМСД установить нулевое значение выходного сигнала U_{Rxi} при помощи балансировочного резистора R_{45} (см. рис. 3.5).

9. Зарегистрировать начальное значение выходного сигнала системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП путем включения записи сигнала в программном обеспечении с последующей постановкой записи на паузу через 3 секунды.

10. Дискретно увеличить усилие на валу БМСД путем установки одного эталонного груза 5 на подвес 4 калибровочного рычага 1 (см. рис. 3.14).

11. Зарегистрировать изменившееся значение выходного сигнала системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП путем продолжения записи сигнала и последующей постановкой на паузу через 3 секунды.

12. Увеличить усилие на валу БМСД до значения, эквивалентного силе в пятне контакта ЭШ с ББ диагностического стенда до величины 6000 Н, путем повторения пунктов 10–11.

13. Дискретно уменьшить усилие на валу БМСД путем снятия 1 эталонного груза с подвеса калибровочного рычага.

14. Зарегистрировать изменившееся значение выходного сигнала системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП путем продолжения записи сигнала и последующей постановкой на паузу через 3 секунды.

15. Уменьшить усилие на валу БМСД до нулевого значения путем повторения пунктов 13–14.

16. Остановить запись выходного сигнала системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП.

17. Сохранить результаты измерений (см. график на рис. 3.15).

18. Демонтировать калибровочный рычаг с шипа квадратного сечения с торца ББ.

19. Демонтировать стопорный палец из паза промежуточной опоры ББ.

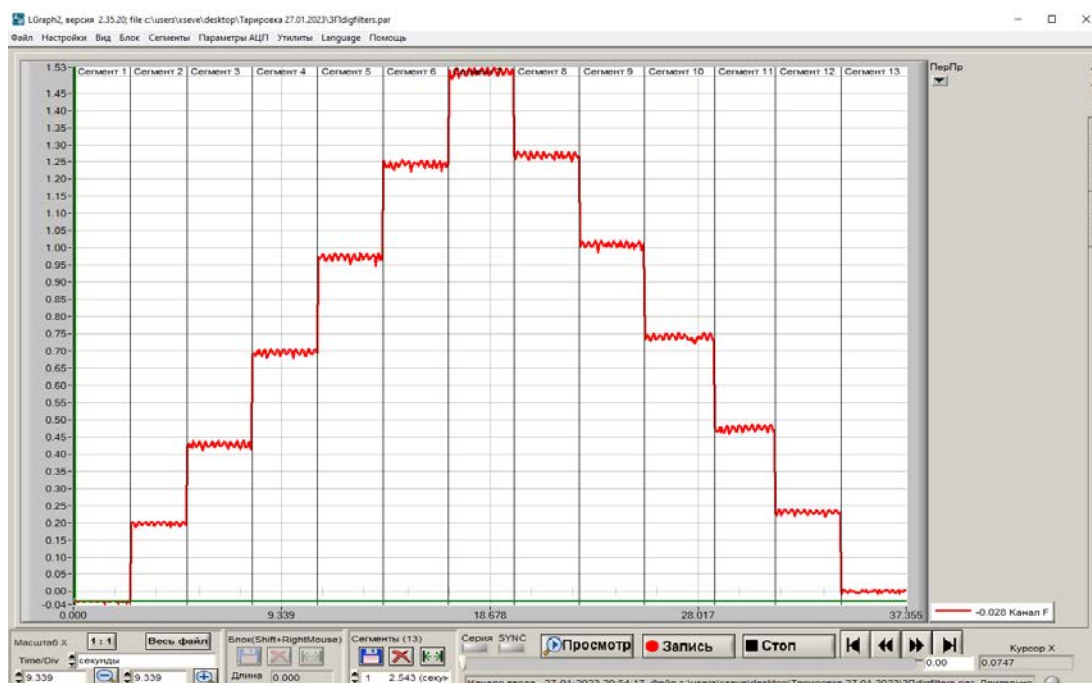


Рисунок 3.15 – Запись зарегистрированного сигнала калибровки системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП

20. Измеренные калибровочные значения системы измерения силовых параметров АЭСП занести в табл. 3.2.

21. Используя калибровочные значения системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП, построить тарифовочный график аналогичный, показанному на рис. 3.12.

22. Рассчитать коэффициент k_i (см. формулу 3.6), необходимый для расчета силы в пятне контакта ЭШ с ББ диагностического стенда, с использованием выходного сигнала системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП.

23. Определить приведенную погрешность измерения силовых параметров функционирования АЭСП на стенде по формуле (3.11).

24. Повторить пункты 1–23 для всех БМСД системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП.

Полученные в процессе калибровки всех БМСД системы измерения силовых параметров функционирования АЭСП зависимости позволят в любой момент проведения испытаний определять силы, действующие в пятнах контакта ЭШ АЭСП с ББ диагностического стенда.

3.5.2 Методика калибровки системы измерения скоростных параметров функционирования АЭСП

Выявление функциональных связей между частотами вращения РСС и уровнями выходных сигналов измерения скоростных параметров функционирования АЭСП реализовано через калибровку указанных систем. Проведение калибровки выполняется с использованием эталонного цифрового тахометра, погрешность измерения которого должна быть на порядок меньше погрешности измерения калибруемой системы. Для калибровки системы измерения скоростных параметров функционирования АЭСП на СББ был применен цифровой тахометр *DT-2234C+*, (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 – Внешний вид цифрового тахометра *DT-2234C+*

Получение калибровочной зависимости частоты вращения РСС измерения скоростных параметров функционирования АЭСП на ГПС от выходного сигнала рассматриваемой системы осуществляется в следующем порядке.

1. На РСС необходимо нанести через равное расстояние друг от друга белые метки, необходимые для работы цифрового тахометра.
2. Установить АЭСП колесами на ББ диагностического стенда.
3. Закрепить АЭСП стяжными ремнями к раме ГПС для обеспечения безопасности проведения процедуры калибровки.
4. Включить систему измерения скоростных параметров функционирования АЭСП и прогреть ее 20 мин.
5. Запустить АЦП путем активации на персональном компьютере программного обеспечения *LGraph*.
6. В программном обеспечении активировать канал измерения скоростных параметров функционирования АЭСП для калибруемого датчика частоты вращения РСС.
7. Запустить ЭСП автомобиля.
8. Установить и поддерживать скорость вращения колес АЭСП на уровне $10 \text{ км/ч} \pm 1 \text{ км/ч}$ за счет ЭСП автомобиля.
9. Разместить эталонный цифровой тахометр указанной модели напротив РСС таким образом, чтобы он находился напротив белых меток перпендикулярно поверхности РСС на расстоянии $200 \text{ мм} \pm 30 \text{ мм}$.
10. Записать показания системы измерения скоростных параметров функционирования АЭСП путем нажатия кнопки «запись» с последующей постановкой на паузу через 3 секунды.
11. Зарегистрировать частоту вращения РСС путем нажатия кнопки «*Test*» на цифровом тахометре.
12. Записать полученные данные в таблицу (см. табл. 3.2) калибровки датчика частоты вращения РСС измерения скоростных параметров функционирования АЭСП.
13. Увеличить скорость вращения ведущих колес АЭСП на 10 км/ч .
14. Повторить пункты 9–13 до достижения скорости вращения колес АЭСП равной 80 км/ч .
15. Дискретно уменьшить скорость вращения колес АЭСП на стенде

на 10 км/ч до полной остановки, записывая показания цифрового тахометра и системы измерения скоростных параметров функционирования АЭСП, повторяя пункты 9–12.

16. После полной остановки АЭСП снять страховочные стяжные ремни.

17. Осуществить выезд АЭСП с ББ диагностического стенда.

18. Рассчитать калибровочный коэффициент k_i (см. формулу 3.6), необходимый для расчета скорости вращения колеса, имитируемой на СББ, с использованием выходного сигнала системы измерения скоростных параметров функционирования АЭСП.

19. Определить приведенную погрешность измерения скоростных параметров функционирования АЭСП на стенде по формуле (3.11).

20. Повторить пункты 1–19 для всех датчиков частоты вращения РСС, а также для датчиков частоты вращения ББ диагностического стенда.

Полученные в процессе калибровки всех датчиков системы измерения скоростных параметров функционирования АЭСП зависимости позволят в любой момент проведения испытаний определять скорости вращения каждого колеса АЭСП, а также позволят рассчитывать проскальзывание в каждом пятне контакта ЭШ с ББ диагностического стенда.

3.6 Методика оценки погрешностей измерения

Одной из основных характеристик эффективности систем измерения является их погрешность. Погрешность Δ измерения системы называют абсолютной. Её устанавливают по формуле [104]:

$$\Delta = x - x_u. \quad (3.12)$$

где x – показания измеряемого параметра измерительной системой;

x_u – реальное значение измеряемого параметра

Относительная погрешность δ системы измерения равна выраженному в процентах отношению погрешности Δ , называемой

абсолютной, к реальному значению этого параметра [104]:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_u} \cdot 100 \%. \quad (3.13)$$

Погрешность средств измерения оценивается метрологическими характеристиками. К таким характеристикам можно отнести следующее. Во-первых, погрешности первичных преобразователей (БМСД, датчиков частоты вращения РСС и ББ). Во-вторых, погрешности плат преобразования и усиления. В-третьих, погрешности аналого-цифрового преобразования.

К наиболее значимым погрешностям АЦП Δ_c при регистрации параметров исследуемого процесса относят следующие величины: погрешность коэффициента усиления; температурную погрешность; погрешность квантования; погрешность, связанную со смещением нуля [104]. При этом следует не забывать о динамических погрешностях Δ_d . Данный параметр отображает неточности, связанные с частотой дискретизации.

Общая погрешность Δ_Σ аналого-цифрового преобразования рассчитывали по выражению [104]:

$$\Delta_\Sigma = \Delta_c + \Delta_d. \quad (3.14)$$

Дисперсию общей погрешности Δ_Σ определяли как сумму дисперсий двух составляющих - статической σ_c^2 и динамической σ_d^2 [104]:

$$\sigma_\Sigma^2 = \sigma_c^2 + \sigma_d^2. \quad (3.15)$$

Зная минимальную A_{min} и максимальную A_{max} амплитуды измеряемых сигналов, а также число разрядов АЦП n , задавали шаг квантования h [104]:

$$h = \frac{(A_{max} - A_{min})}{2^n}. \quad (3.16)$$

Погрешность дискретизации при известном шаге h определяется как его половина [104]:

$$\Delta_h = \frac{h}{2}. \quad (3.17)$$

Спектр шума входного сигнала при известной частоте дискретизации f_1 определяется из выражения [104]:

$$\omega_{\text{кв}}(\omega) = \frac{h^2}{f_1}. \quad (3.18)$$

Статическая погрешность складывается из низкочастотной и высокочастотной составляющей. Первая составляющая статической погрешности определяется по выражению [104]:

$$\Delta = \bar{\Delta} - A_0; \quad (3.19)$$

где A_0 – эталонная величина амплитуды сигнала на входе;

$\bar{\Delta}$ – математическое ожидание итоговой погрешности.

Среднеквадратическое отклонение σ определяет вторую составляющую статической погрешности и может быть определена по формуле [104]:

$$\sigma = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{j=1}^n (Y_j^2 - \bar{\Delta}); \quad (3.20)$$

где Y_j – выборка значений выходной координаты при входном сигнале A при $j = 1, 2, m$.

Величину Δ в множестве аргументов A вычисляли как среднее арифметическое Δ_i величин в i - точках [104]:

$$\Delta = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta_i. \quad (3.21)$$

Среднеквадратическое значение оценки погрешности рассчитывается по выражению [104]:

$$\sigma_{\Delta} = \frac{\sigma_{\Delta_i}}{\sqrt{n}} \quad (3.22)$$

Дисперсия образцового сигнала вычисляется следующим образом [104]:

$$\sigma_{\Delta_i} = \sqrt{\frac{\sigma_0^2 + \sigma^2}{m}}; \quad (3.23)$$

где m – объем выборки;

σ_0^2 – дисперсия образцового сигнала.

Расчет значения дисперсии результирующей погрешности АЦП можно выполнить в соответствии с выражением [104]:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{2^{2n+2}} + \frac{\alpha_T^2 \cdot T^2 \cdot p}{3} \right); \quad (3.24)$$

где α_T – коэффициент;

ν_{max} – максимальная частота изменения входного сигнала.

Для расчета коэффициента α_T использовали уравнение [104]:

$$\alpha_T = 2\pi \cdot \nu \sqrt{1 + \sqrt{2}}_{max}. \quad (3.25)$$

Определение величины динамической погрешности σ_d^2 целесообразно выполнить по выражению [104]:

$$\sigma_d^2 = \frac{(A_{max} - A_{min})^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot \nu_{max} \cdot T \cdot p)^2}{36}. \quad (3.26)$$

Последняя составляющая погрешности определяется по формуле [104]:

$$\Delta_{nm} = A_{max} \cdot \nu_{max} \cdot t_{nm}; \quad (3.27)$$

где t_{nm} – задержка по времени от начала отсчета.

В соответствии с представленной методикой была проведена оценка погрешности используемого АЦП типа *E14-140*. По результатам выполненных расчетов можно судить о пригодности данного оборудования к проведению исследований, поскольку погрешность преобразования сигналов не превысила 0,1 %.

3.7 Методика анализа адекватности математической модели

Основным требованием, позволяющим выполнять имитационное моделирование исследуемого процесса и многовариантные виртуальные эксперименты, является высокий уровень соответствия результатов эксперимента и расчетов. Эти расчеты осуществляли при помощи созданной автором имитационной математической модели процесса функционирования АЭСП на СББ.

Анализ адекватности разработанной математической модели было решено выполнить по известной методике с использованием критерия *F*-распределения (критерий Фишера) [36, 59, 70, 104]. Параметры АЭСП и СББ, закладываемые в математическую модель, соответствовали параметрам реального стендового оборудования, используемого в экспериментальных исследованиях.

В процессе определения адекватности разработанной математической модели было выполнено сравнение результатов расчета с данными, полученным в ходе реальных экспериментальных исследований процесса функционирования АЭСП на СББ. Дисперсия $S_{\text{воспр}}^2$ воспроизводимости массива n_m определяется для каждого эксперимента в соответствии с формулой [36, 59, 70, 104]:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{1}{n_m - 1} \sum_{i=1}^{n_s} (y_i - \bar{y})^2; \quad (3.28)$$

где n_s – количество проведенных экспериментов;

y_i – значения измеряемого параметра массива в i -м опыте;

$\bar{y}$ – математическое ожидание измеряемого параметра.

Следующим шагом необходимо рассчитать выборочное среднее значение по представленному уравнению [36, 59, 70, 104]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_9} y_i. \quad (3.29)$$

Дисперсию адекватности S_x^2 для оценки уровня рассеивания результатов аналитических исследований в их сравнении с результатами экспериментальных исследований вычисляли по формуле [36, 59, 70, 104]:

$$S_x^2 = \frac{1}{N - K} \sum_{j=1}^N (y_c - y_c^k)^2; \quad (3.30)$$

где N – число параметров, полученных в эксперименте;

K – число коэффициентов, аппроксимирующих аналитическую характеристику;

y_c – c -я величина параметра в эксперименте;

y_c^k – c -е рассчитанное значение параметра.

Величину критерия Фишера или F -распределения, пригодную для анализа адекватности математической модели, определяли как частное от деления дисперсии адекватности на дисперсию воспроизводимости [36, 59, 70, 104]:

$$F_p = \frac{S_x^2}{S_{\text{воспр}}^2}. \quad (3.31)$$

При этом число степеней свободы v_1 и v_2 критерия определялось из выражений [36, 59, 70, 104]:

$$\begin{cases} v_1 = n_9 - 1 \\ v_2 = N - K \end{cases} \quad (3.32)$$

Для того, чтобы получить убедительное доказательство адекватности математической модели, необходимо чтобы величина рассчитанного критерия F_p было меньше его значения $F_{(v_1, v_2, \%)}^m$, определенного по таблицам [36, 59, 70, 104]:

$$F_p > F_{(v_1, v_2, \%)}^m. \quad (3.33)$$

Чтобы узнать табличные значения критерия F -распределения $F_{(v_1, v_2, 5\%)}^m$ вначале устанавливали 5 %-й уровень значимости, [36, 59, 70, 104]. Основываясь на неравенстве (3.32), был выполнен анализ адекватности разработанной математической модели. Он реализован через сравнение расчетного значения F -критерия со значением, полученным по таблицам. Невыполнение условия свидетельствует о необходимости отладки модели. В случае, если условие выполняется, разработанную модель можно считать достаточно адекватной.

3.8 Выводы по материалам третьей главы

1. Разработанная методика и реализующее ее диагностическое оборудование для проведения стендовых испытаний автомобилей с электрическим силовым приводом впервые позволяют контролировать тягово-динамические свойства автомобилей с электрическим силовым приводом при их функционировании на стенде с беговыми барабанами в реальном времени. Методика обеспечивает уникальную возможность проведения стендовой диагностики автомобилей с электрическим силовым приводом. Она также обеспечивает высокую оперативность, информативность диагностики автомобилей с электрическим силовым приводом на стенде с беговыми барабанами и стабильность тестовых воздействий.

2. Разработанный и изготовленный при участии автора гибридный полноопорный стенд с беговыми барабанами позволяет:

– задавать стабильные как установившиеся, так и неуставившиеся тестовые воздействия на автомобиль с электрическим силовым приводом при

его функционировании в стендовых условиях, соответствующие типовым режимам функционирования автомобилей с электрическим силовым приводом в дорожных условиях, в том числе режимы свободного выбега и рекуперативного торможения;

– измерять, преобразовывать, численно и графически отображать значения силовых и скоростных параметров функционирования автомобилей с электрическим силовым приводом, в том числе параметров энергопотребления электрического силового привода.

3. Представленные в данной главе методики позволяют выполнять тарировку систем измерения силовых и скоростных параметров его эксплуатационных свойств.

4. Предложенные методики позволяют выполнять планирование экспериментальных исследований и оценку адекватности разработанной имитационной математической модели процесса функционирования автомобиля с электрическим силовым приводом на стенде с беговыми барабанами.

4 Результаты исследования

Экспериментальные исследования процесса функционирования АЭСП в стендовых условиях осуществлялись в соответствии с методиками, представленными в третьей главе диссертации. Аналитические исследования процесса функционирования АЭСП на СББ были проведены, основываясь на теоретическом материале, представленном во второй главе данной работы. Сравнение результатов математических расчетов с полученными экспериментальными данными позволило провести оценку адекватности имитационной математической модели системы «АЭСП – СББ». Разработан, экспериментально проверен и апробирован метод контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ, основанный на использовании ДМ и управляющего алгоритма.

4.1 Результаты аналитического исследования процесса функционирования АЭСП на СББ

В процессе решения поставленных задач были проведены аналитические исследования процесса функционирования АЭСП на СББ. В процессе моделирования использованы параметры автомобиля *KIA Soul EV* с ЭСП. Трансмиссия АЭСП представлена двухступенчатым цилиндрическим редуктором. Передаточное число в редукторе постоянно и не меняется в процессе эксплуатации.

Для выявления аналитических зависимостей при моделировании процесса функционирования АЭСП на СББ в расчетах были использованы исходные данные, приведенные в приложении 2.

Моделирование осуществлялось в программном комплексе «Универсальный механизм» версии 9.0.0.49 64bit. Расчет проводился численным методом интегрирования «*Park*», тип решения уравнений – «Прямой метод (*RSM*)», шаг интегрирования – 0,00001 с, шаг представления результатов – 0,001 с. В процессе аналитического исследования проводились

многовариантные расчеты с изменением параметров ТС агрегатов АЭСП при его функционировании на СББ. Были исследованы изменения основных эксплуатационных свойств АЭСП от изменения потокосцепления ψ ЭД; сопротивления фаз R_i ЭД; сопротивления R_{BAT} цепи подключения ТВБ; диссипации $d_{тр}$ в трансмиссии АЭСП.

Результаты проведенного многовариантного аналитического исследования процесса функционирования АЭСП на СББ при изменении ТС его ЭД силового привода за счет снижения потокосцепления ψ ЭД представлены на рисунке 4.1.

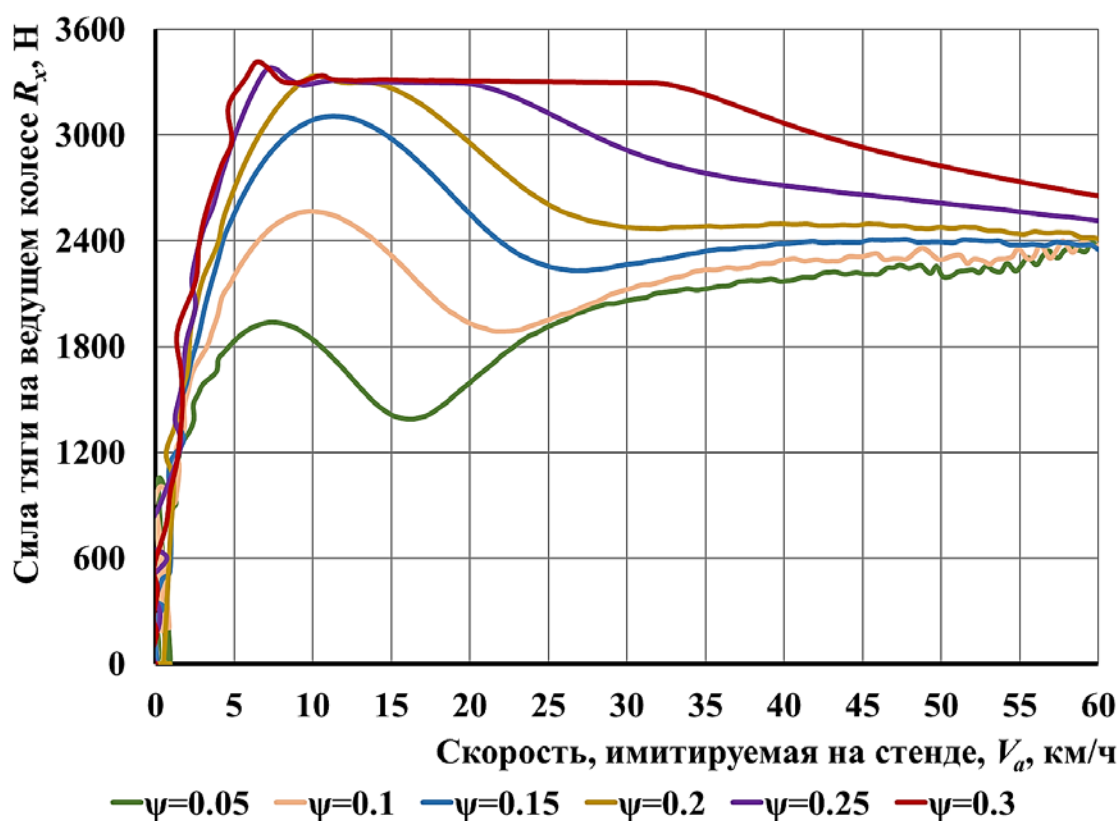


Рисунок 4.1 – Зависимость силы тяги R_x на ведущих колесах АЭСП от скорости V_a , имитируемой на стенде, в режиме разгона АЭСП при изменении потокосцепления ψ ЭД

Изменение потокосцепления ψ ЭД выполнено дискретно с 0,3 до 0,05 Вб с шагом 0,05 Вб. Наиболее информативной и пригодной для контроля ТС ЭСП автомобиля при его разгоне на СББ является зависимость силы тяги R_x

на ведущих колесах АЭСП от скорости V_a , имитируемой на СББ, которую целесообразно использовать в качестве ДП. Анализ полученных результатов наглядно демонстрирует тот факт, что максимальной чувствительностью рассматриваемый ДП обладает при имитируемой на СББ скорости $V_a = 16$ км/ч. При этом снижение потокосцепления ψ ЭД с 0,3 до 0,05 Вб в процессе разгона АЭСП на СББ вызывает снижение силы тяги на ведущих колесах АЭСП на 58,8 %.

Результаты проведенного многовариантного аналитического исследования процесса функционирования АЭСП на СББ при изменении ТС его силового привода за счет увеличения сопротивления обмоток статора R_i ЭД представлены на рисунке 4.2.

При моделировании процесса разгона АЭСП на СББ сопротивление обмоток статора R_s увеличивалось на величину добавочного сопротивления ΔR_s . Значение добавочного сопротивления обмоток статора ЭД ΔR_s изменялось дискретно. Диапазон изменений установлен от минимальной величины 0 до максимальной 0,5 Ом. Шаг изменения был задан величиной 0,1 Ом. Анализ зависимости мощности N_e , развиваемой ЭД АЭСП от тока I , потребляемого инвертором, наглядно демонстрирует снижение ТДС АЭСП при увеличении сопротивления обмоток статора R_s . Для определения ТС ЭСП автомобиля целесообразно использовать ток I , потребляемый инвертором, при достижении силы тяги $R_x = 2670$ Н на колесе АЭСП. В данном случае достигается максимальная чувствительность выявленного ДП к изменению ТС агрегатов контролируемого АЭСП. При анализе полученных результатов можно сделать вывод о том, что увеличение добавочного сопротивления обмоток статора ΔR_s от 0 до 0,5 Ом вызывает снижение развиваемой ЭД эффективной мощности N_e на 58,3 % при силе тяги на колесах $R_x = 2670$ Н.

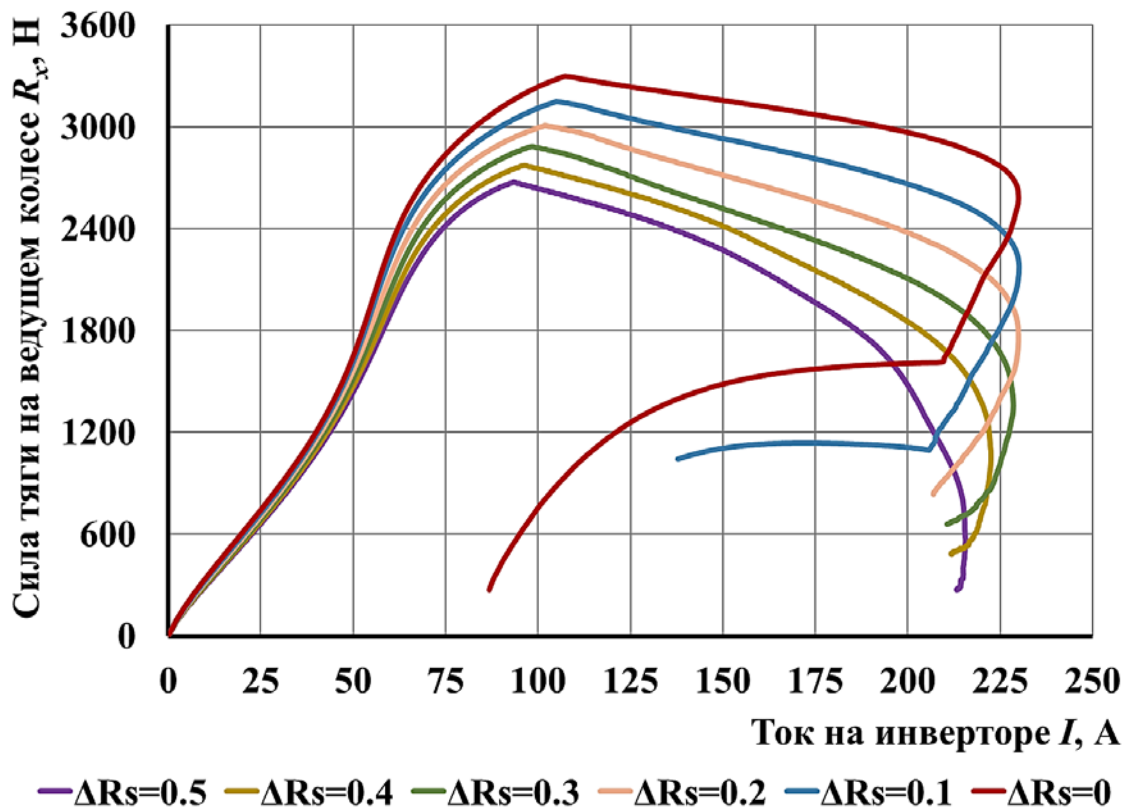


Рисунок 4.2 – Зависимость силы тяги R_x на ведущих колесах АЭСП от потребляемого тока I при увеличении величины сопротивления R_s двух фаз ЭД

Результаты проведенного многовариантного аналитического исследования процесса функционирования АЭСП на СББ при изменении ТС трансмиссии автомобиля за счет увеличения диссипации $d_{тр}$ представлены на рисунке 4.3 и в таблице 4.1.

Изменение диссипации $d_{тр}$ в трансмиссии АЭСП выполнено дискретно от 0 до $0,45 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$. Шаг изменения был задан $0,05 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$. Наиболее пригодными и информативными для выполнения контроля ТС агрегатов АЭСП в режиме свободного выбега является зависимость силы R_x , затрачиваемой на вращение трансмиссии, а также время свободного выбега t_v , необходимое для остановки АЭСП на СББ.

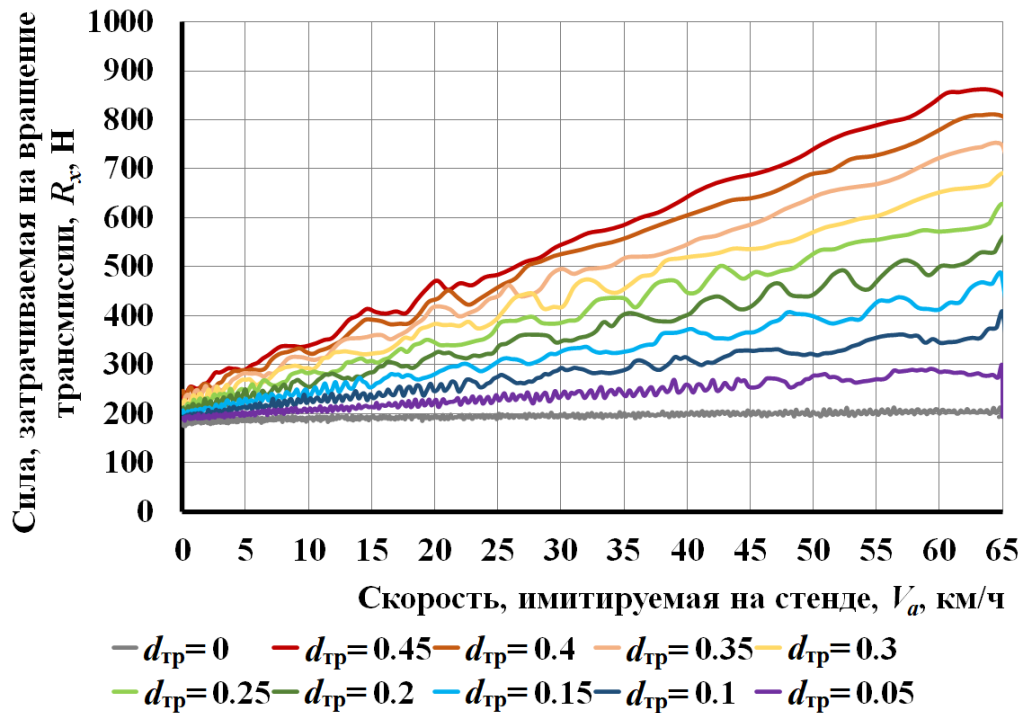


Рисунок 4.3 – Зависимость силы R_x , затрачиваемой на вращение трансмиссии, от скорости V_a , имитируемой на СББ, в режиме свободного выбега со скорости 60 км/ч при изменении диссипации $d_{тр}$ в трансмиссии АЭСП

Таблица 4.1 – Результаты аналитического исследования функционирования АЭСП на СББ в режиме свободного выбега при изменении ТС его трансмиссии

№ расчета	$d_{тр}, \frac{Н \cdot м \cdot с}{рад}$	$t_6, с$
1	0	35,01
2	0,05	17,16
3	0,1	11,64
4	0,15	8,81
5	0,2	7,17
6	0,25	5,98
7	0,3	5,51
8	0,35	4,52
9	0,4	4,01
10	0,45	3,62

Анализ полученных в результате аналитического исследования данных свидетельствует о том, что при увеличении диссипации $d_{тр}$ в трансмиссии АЭСП от 0 до $0,45 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}}{\text{рад}}$ вызывает увеличение силы R_x , затрачиваемой на вращение трансмиссии АЭСП, с 199 до 853 Н, что свидетельствует о возрастании R_x в 4,29 раза в режиме свободного выбега АЭСП на СББ со скорости 60 км/ч. При этом время свободного выбега t_b АЭСП уменьшается с 35,01 до 3,62 с, т. е. сокращается в 9,67 раза. Данные параметры достаточно чувствительны к изменению ТС трансмиссии АЭСП, что позволяет их использовать в качестве ДП.

Результаты выполненного многовариантного аналитического исследования процесса функционирования АЭСП при изменении ТС ВВЦ подключения ТВБ за счет увеличения сопротивления R_{BAT} в цепи представлены на рисунке 4.4.

При выполнении моделирования процесса разгона АЭСП в тяговом режиме на СББ сопротивление R_{BAT} цепи подключения ТВБ увеличивалось на величину добавочного сопротивления ΔR_{BAT} . Величина добавочного сопротивления ΔR_{BAT} изменялось дискретно. Диапазон изменения был установлен от минимального значения 0 до максимального значения 0,4 Ом. При этом шаг изменения был задан 0,05 Ом. Анализ рассчитанной зависимости напряжения ТВБ U_{BAT} от скорости V_a , имитируемой на СББ, при разгоне АЭСП показывает значительное снижение уровня напряжения ТВБ U_{BAT} на малой скорости (3–8 км/ч). Это объясняется тем, что в данном диапазоне ЭСП автомобиля стремится развить максимальный крутящий момент M_e на роторе ЭД. При дальнейшем увеличении скорости V_a происходит повышение уровня напряжения ТВБ U_{BAT} , поскольку крутящий момент на роторе ЭД начинает снижаться. Увеличение уровня добавочного сопротивления ΔR_{BAT} с 0 Ом до 0,4 Ом в режиме разгона АЭСП на СББ приводит к снижению уровня напряжения ТВБ U_{BAT} на 44,5 %.

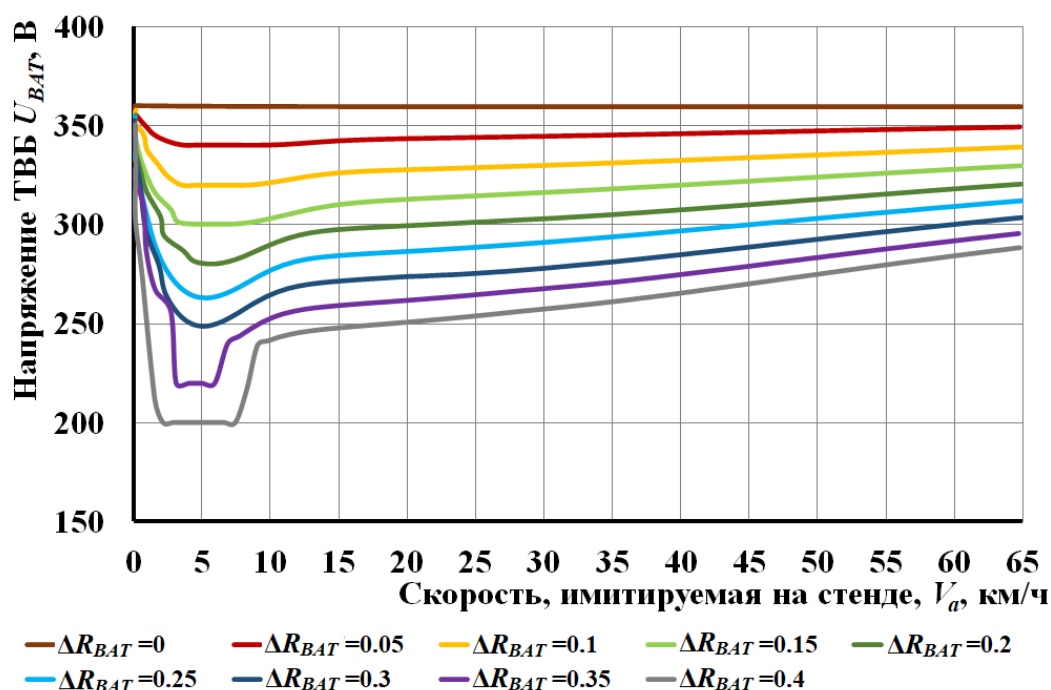


Рисунок 4.4 – Зависимость напряжения ТВБ U_{BAT} от скорости V_a , имитируемой на СББ, в режиме разгона АЭСП при изменении сопротивления R_{BAT} цепи подключения ТВБ

Проведенные многовариантные аналитические исследования процесса функционирования АЭСП на СББ при изменении параметров его ТС позволили выявить ДП, чувствительные к изменению ТС АЭСП, его систем и агрегатов, что подтверждает возможность эффективного контроля ТС агрегатов АЭСП стендовым методом.

4.2 Результаты экспериментального исследования

Для проведения экспериментальных исследований процесса функционирования АЭСП на СББ использовался легковой автомобиль *KIA Soul EV*, оснащенный ЭСП мощностью $N_e = 80$ кВт и максимальным крутящим моментом $M_e = 280$ кВт. Экспериментальные исследования процесса функционирования АЭСП на СББ выполнялись в соответствии с методиками, представленными в третьей главе диссертации. При проведении испытаний на АЭСП были установлены колеса с ЭШ *Nexen N'Blue HD*

размерности 205/60R16 92H. Давление в ЭШ АЭСП было доведено до уровня, рекомендуемого заводом-изготовителем, и составляло 0,23 МПа. Уровень заряда ТВБ перед началом испытаний составлял 95–100 %. При экспериментальном исследовании измерялись следующие параметры функционирования АЭСП: сила тяги R_x в режиме разгона АЭСП; скорость V_a , имитируемая на СББ; ток I , потребляемый инвертором; фазные токи I_A , I_B , I_C , потребляемые ЭД. В режиме свободного выбега сила R_x характеризовала силу, затрачиваемую на вращение трансмиссии АЭСП, а в режиме рекуперативного торможения – тормозную силу рекуперативного торможения АЭСП. По результатам испытаний полученные данные сохранялись в персональном компьютере для последующей обработки.

Результаты процесса функционирования АЭСП при разгоне в тяговом режиме представлены на рисунках 4.5, 4.6. На осциллограмме 4.5 приведены графики изменения силы тяги R_x на ведущих колесах АЭСП KIA Soul EV и скорости V_a , имитируемой на СББ.

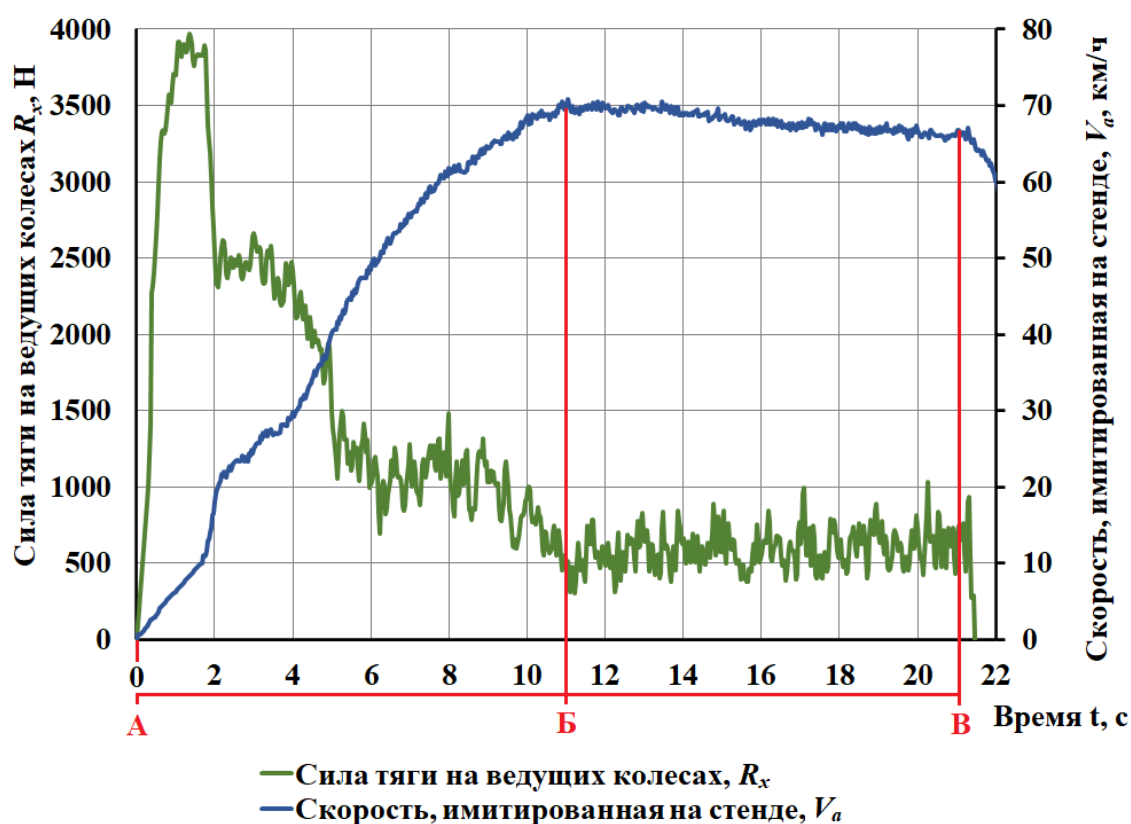


Рисунок 4.5 – Осциллограмма процесса функционирования АЭСП KIA Soul EV на СББ в режимах разгона и удержания скорости

Полученная осциллограмма характеризуется двумя ярко выраженными участками. Участок А-Б, который начинается с 0 и заканчивается на 11 с, характеризуется постоянным увеличением скорости V_a , поскольку в указанный промежуток времени проводился разгон АЭСП на СББ. Неравномерное увеличение скорости V_a в промежутке с 1,6 по 2,4 с объясняется буксованием колес АЭСП относительно ББ диагностического стенда.

Участок Б-В, начинающийся с 11 и заканчивающийся на 21 с, характеризуется практически стабильным уровнем скорости V_a , поскольку на данном этапе имитируется установившийся режим движения АЭСП на СББ. На последней секунде записи осциллограммы наблюдается снижение скорости V_a , обусловленное началом остановки АЭСП на СББ.

Резкий рост силы тяги R_x на колесах автомобиля в первые секунды разгона АЭСП на СББ обусловлен тем, что силовой привод автомобиля является электрическим. Внешняя скоростная характеристика ЭД подразумевает максимальное значение крутящего момента M_e на низкой частоте вращения n_e ротора. При дальнейшем разгоне АЭСП сила тяги R_x снижается, поскольку снижается и крутящий момент M_e на роторе ЭД. Колебания значений силы тяги R_x на протяжении всего процесса функционирования АЭСП объясняется возникновением в трансмиссии АЭСП и СББ крутильных колебаний. Крутильные колебания возникают по причине скручивания полуосей АЭСП и карданных валов СББ под нагрузкой; из-за наличия люфтов и зазоров в зубчатых соединениях редукторов СББ; из-за динамических колебаний цепных передач СББ.

При проведении экспериментальных исследований процесса функционирования АЭСП на СББ были получены осциллограммы параметров функционирования ЭСП при разгоне в тяговом режиме и режиме движения с постоянной скоростью. На осциллограмме 4.6 представлены графики изменения силы фазного тока I_A и тока на инверторе I . Токи фаз В и С на графике не приведены, поскольку их форма и амплитуда аналогичны току фазы А, но отличаются смещением по фазе на 120° . Анализ полученного

графика позволяет разделить его на три ярко выраженных участка. Участок с 0 по 5 с характеризуется резким ростом уровня тока I на инверторе, а также амплитуды фазного тока I_A . Это явление объясняется необходимостью развития ЭСП максимального крутящего момента M_e на роторе ЭД для разгона АЭСП.

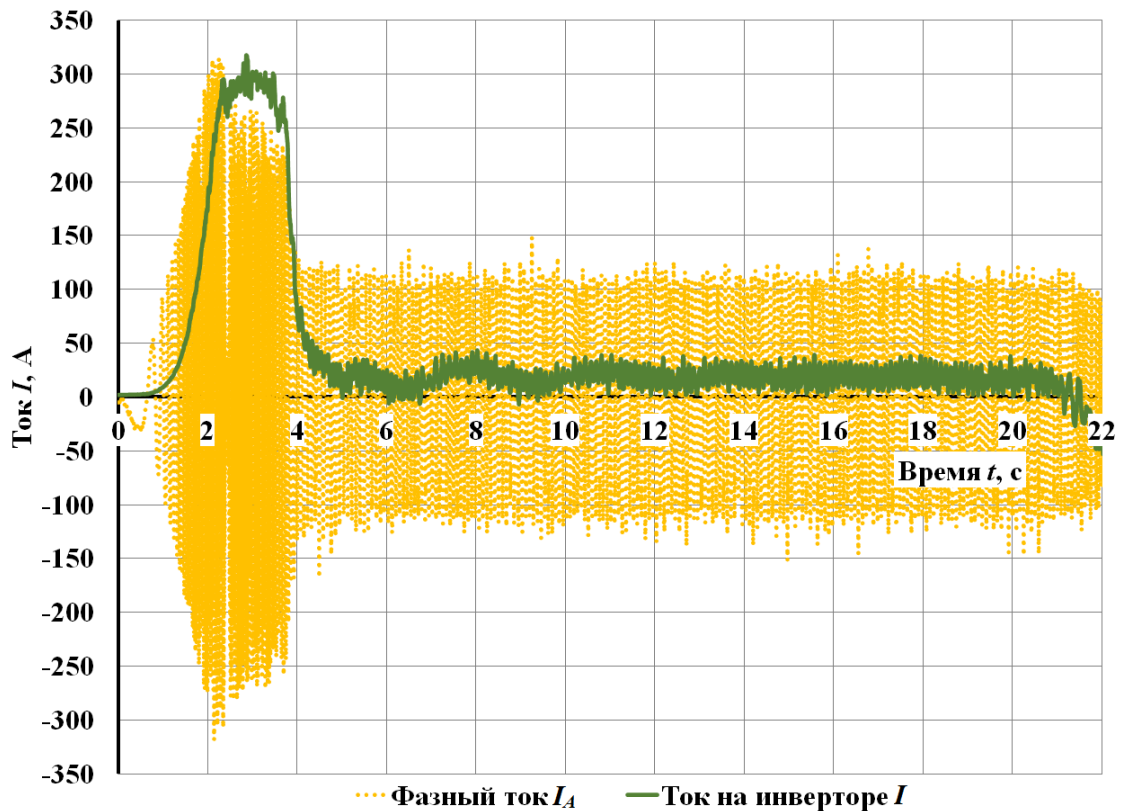


Рисунок 4.6 – Осциллограмма процесса функционирования ЭСП автомобиля *KIA Soul EV* на СББ в режимах разгона и удержания скорости

При дальнейшем разгоне амплитуда фазного тока I_A и тока I на инверторе снижаются, поскольку уменьшается и крутящий момент M_e , развиваемый ЭД. На 21 с наблюдается резкое снижение величины тока I на инверторе до нулевого значения с последующим снижением в отрицательную область. Это объясняется переходом АЭСП из тягового режима функционирования в режим рекуперативного торможения.

Были получены результаты экспериментального исследования процесса функционирования АЭСП *KIA Soul EV* на СББ при комбинированном тестовом

воздействии (рис. 4.7). На осциллограмме представлены графики изменения силы тяги R_x (силы рекуперативного торможения); мощности N_e , потребляемой ЭСП; скорости V_a , имитируемой на СББ; силы сопротивления ЭДТ F_u .

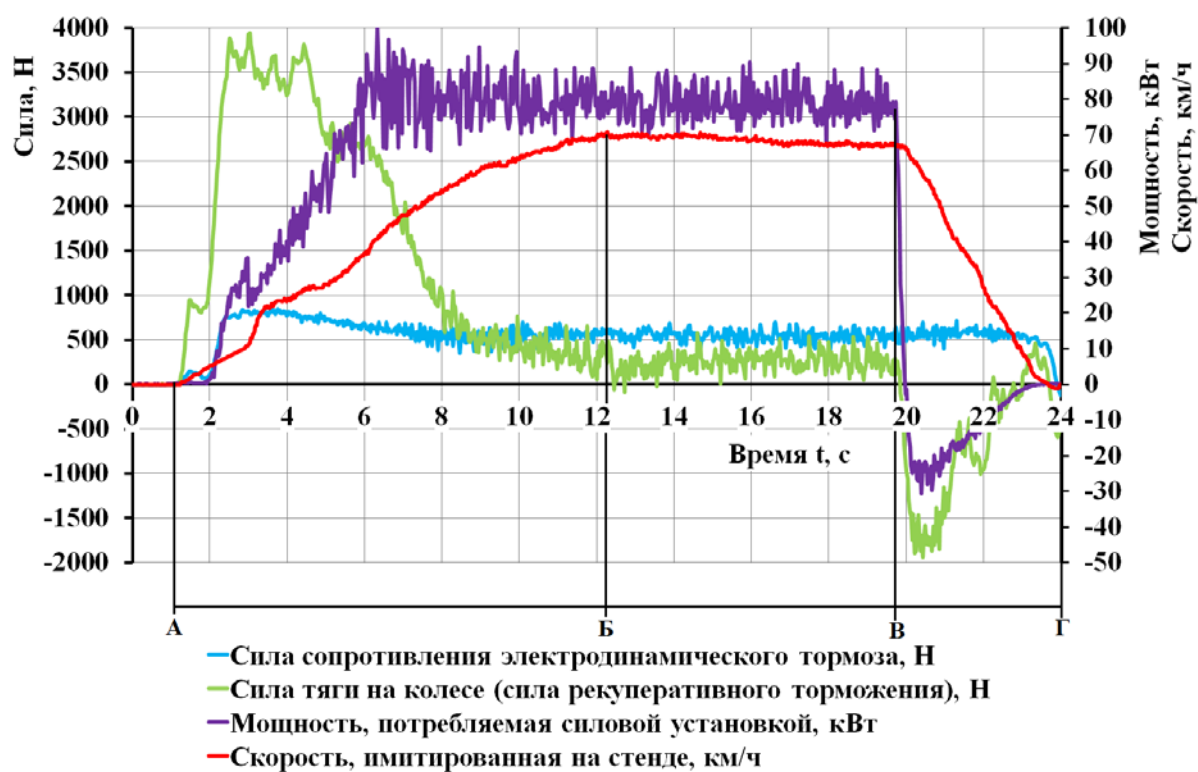


Рисунок 4.7 – Осциллограмма процесса функционирования АЭСП KIA Soul EV на СББ при комбинированном тестовом воздействии

В представленном экспериментальном исследовании было реализовано комбинированное тестовое воздействие, которое включало: тяговый режим функционирования АЭСП с нагрузкой (участок А-Б); режим движения с постоянной скоростью под нагрузкой (участок Б-В); режим рекуперативного торможения (участок В-Г). Нагрузка, создаваемая ЭДТ СББ, с учетом передаточных чисел в трансмиссии СББ эквивалентна нагрузке на ЭСП при движении автомобиля по дороге (в гору) с наклоном в 10° .

Проведенные экспериментальные исследования показали, что на СББ возможно контролировать ТС АЭСП, его систем и агрегатов за счет измерения основных параметров его функционирования и ТДС, а также

оценивать состояние ЭСП в режиме рекуперативного торможения. Результаты проведенного исследования убедительно показывают возможность комбинирования тестовых воздействий в процессе контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ.

4.3 Оценка адекватности разработанной математической модели процесса функционирования АЭСП на СББ

В соответствии с методикой, приведенной в третьей главе данной диссертации, была выполнена оценка адекватности разработанной имитационной математической модели процесса функционирования АЭСП на СББ при контроле его ТДС. Данная процедура позволила добиться большей точности и более полного соответствия результатов аналитического и экспериментального исследований.

Результаты аналитических расчетов процесса функционирования АЭСП на СББ при контроле ТС его агрегатов были сопоставлены с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований аналогичного процесса. Сравнение данных, полученных при проведении экспериментальных исследований, с результатами аналитических вычислений в разработанной имитационной математической модели было реализовано по критерию F -распределения. На рисунке 4.8 представлены результаты графического сравнения зависимостей силы тяги R_x на колесе АЭСП и скорости V_a , имитируемой на СББ, полученные при экспериментальном исследовании процесса и при его расчете в разработанной математической модели.

Расчетное значение критерия Фишера для силы тяги R_x на колесе АЭСП составило $F_p = 0,088$, при табличном значении $F_{(v1,v2,5\%)}^T = 2,83$ [100] и уровне значимости, равном 0,95. Значение критерия Фишера для скорости V_a , имитируемой на стенде, составило $F_p = 0,162$, при табличном значении $F_{(v1,v2,5\%)}^T = 2,35$ [100] и уровне значимости, равном 0,95.

Сравнение данных, полученных при проведении экспериментальных исследований, с результатами аналитических расчетов в разработанной имитационной математической модели свидетельствует о качественном совпадении характеристик процесса разгона АЭСП на СББ. Видна достаточно хорошая качественная сходимость значений силы тяги R_x на колесе АЭСП и скорости V_a , имитируемой на СББ.

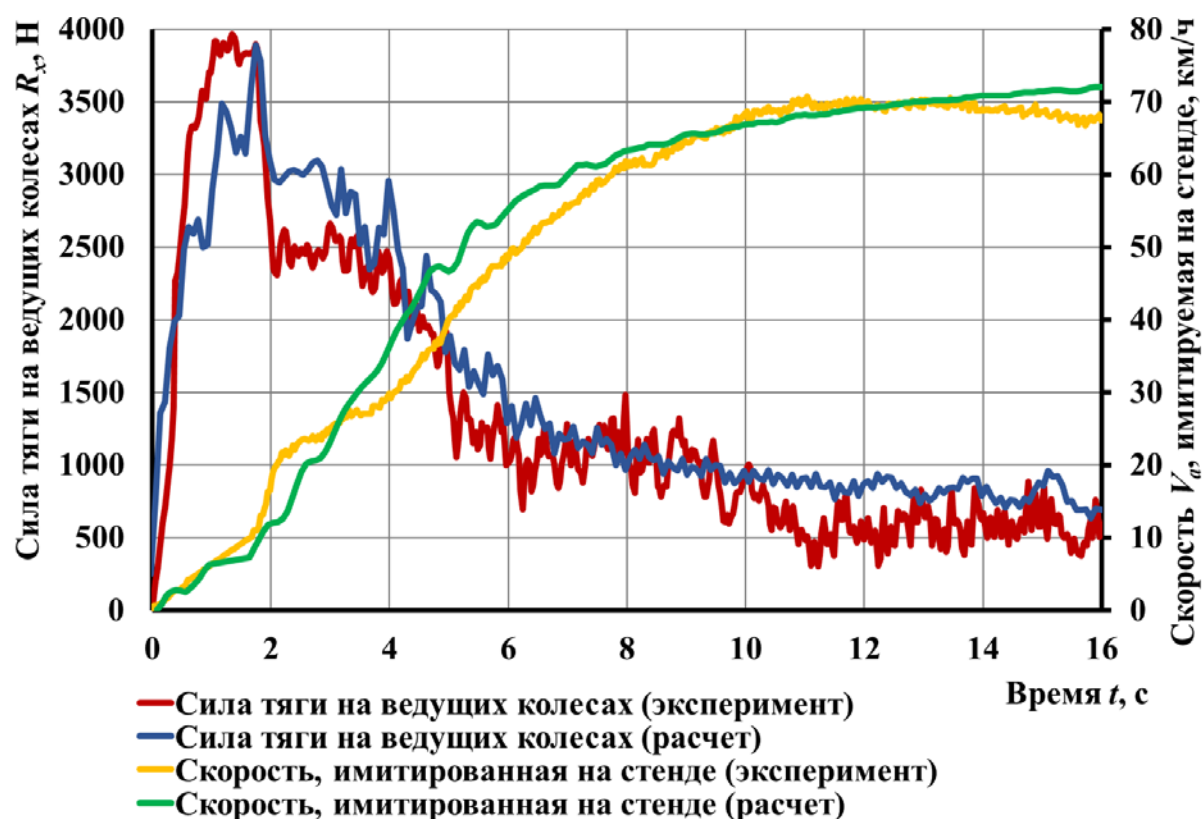


Рисунок 4.8 – Осциллограмма тестирования АЭСП KIA Soul EV
в режиме разгона до 70 км/ч на полноопорном стенде

Это убедительно показывает, что разработанная модель процесса функционирования АЭСП на СББ достоверно описывает реальные процессы функционирования АЭСП в стендовых условиях. Тем самым можно сказать, что математическая модель признана адекватной и пригодной для проведения аналитических исследований процесса функционирования АЭСП на СББ и позволяет выявлять зависимости изменения основных параметров функционирования АЭСП от параметров его ТС.

4.4 Определение ДП, характеризующих ТС АЭСП, в процессе функционирования АЭСП на СББ

Физические величины, обладающие информацией о параметрах ТС и связанные с ними, могут быть эффективно использованы для контроля ТС, при условии возможности их физического измерения. Данные величины называют ДП [142, 161].

ДП должны обладать рядом свойств:

1) чувствительность – определяется относительным изменением ДП в пределах всего диапазона наработки от номинального значения до наступления неисправного состояния [142, 161];

2) однозначность – оценивается отсутствием экстремума на функции изменения ДП [142, 161];

3) стабильность – определяется вариацией значений ДП при многократном измерении на объектах, имеющих одну и ту же величину соответствующего структурного параметра [142, 161];

4) информативность – характеризует достоверность диагноза, полученного в результате измерения значений ДП [142, 161].

Функциональные связи параметров ТС с ДП описываются уравнениями зависимости изменения значений ДП от значений параметров ТС ОД [31].

В соответствии с выявленными во второй главе теоретическими предпосылками при разработке метода контроля ТС агрегатов АЭСП для каждого из параметров ТС получены реализации. Был применен подход к установлению ДП, основанный на методе НС, переводящем решение двумерной задачи с неоднозначными реализациями к одномерной задаче с однозначной зависимостью ДП от параметра ТС, который дает возможность значительно повышать информативность и качество контроля. Области ЛД сформированы путем сопоставления реализаций, полученных при изменении параметров ТС агрегатов ЭСП автомобиля. В каждой области ЛД были проведены секущие по НС. В областях пересечения секущей с реализациями образуются ДП.

По результатам проведенных аналитических и экспериментальных исследований было принято решение использовать в качестве диагностических следующие параметры функционирования АЭСП: силу тяги R_x на колесе АЭСП в режиме разгона и движения с постоянной скоростью; силу рекуперативного торможения R_x в режиме рекуперативного торможения; силу R_x , затрачиваемую на вращение трансмиссии АЭСП, в режиме свободного выбега; скорость V_a , имитируемую на СББ; силу тока I на инверторе ЭСП; силу фазных токов I_A, I_B, I_C ЭД; время разгона t_p ; время t_b свободного выбега АЭСП.

4.4.1 Выявление функциональной связи потокосцепления ψ с силой тяги R_x на колесе АЭСП

Выявление функциональной связи потокосцепления ψ как параметра ТС ЭД с силой тяги R_x на колесе АЭСП как ДП реализовано следующим образом. При многовариантном аналитическом расчете процесса функционирования АЭСП на СББ было установлено, что при изменении потокосцепления ψ ЭД силового привода образуется область ЛД D_1 , отмеченная на рисунке 4.9. В области ЛД D_1 секущая АБ по НС проведена параллельно оси ординат и соответствует скорости, имитируемой на СББ, $V_a = 16$ км/ч.

Секущая АБ ограничена крайними реализациями, которые являются диагностическими участками для определения параметра ТС ЭД. Этим параметром принято потокосцепление ψ , характеризующее степень электромагнитного взаимодействия между ротором и статором ЭД.

Функциональная связь ординат точек пересечения реализаций с диагностическим участком секущей АБ с силой тяги R_x на колесе АЭСП характеризуется зависимостью:

$$R_x = -43379 \cdot \psi^2 + 22858 \cdot \psi + 351,3. \quad (4.1)$$

При этом значение коэффициента достоверности аппроксимации составляет $R^2 = 0,9985$.

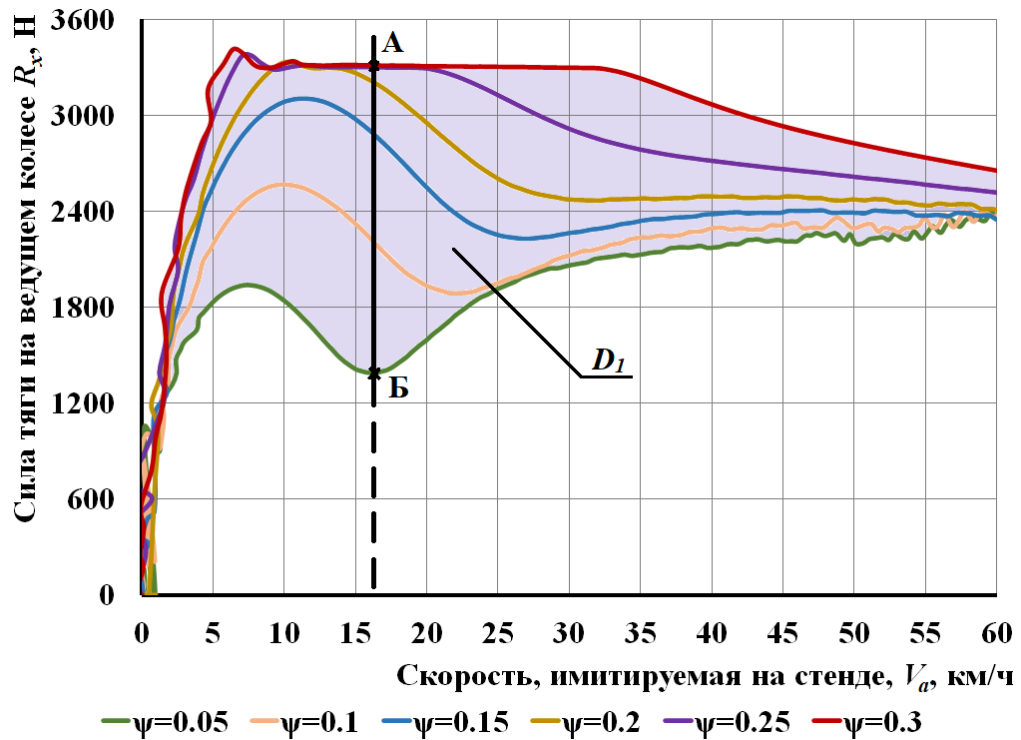


Рисунок 4.9 – Выявление функциональной связи между потокосцеплением ψ ЭД и силой тяги R_x на колесе АЭСП методом НС

Графически уравнение связи (4.1) ДП R_x с параметром ТС ЭД ψ при скорости $V_a = 16$ км/ч представлено на рисунке 4.10.

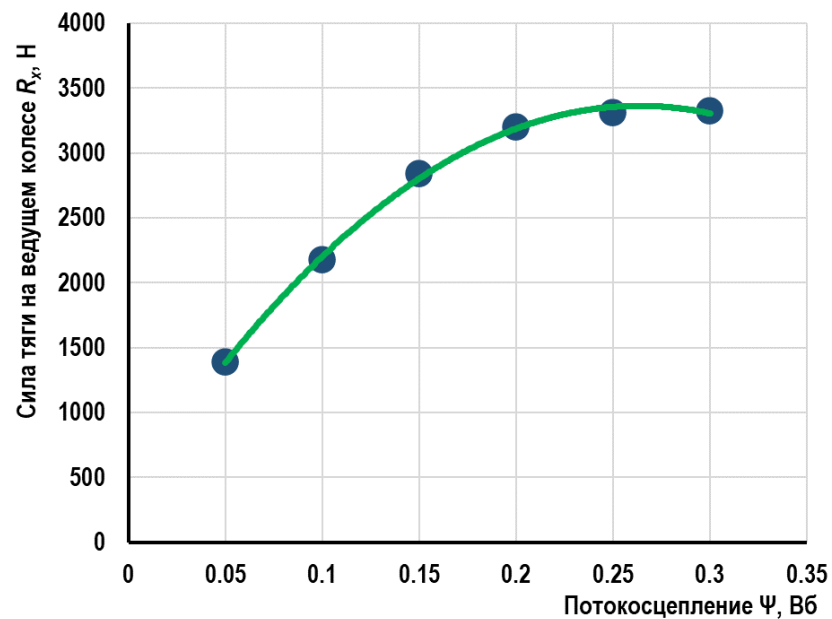


Рисунок 4.10 – Зависимость ДП R_x от параметра ТС ЭД ψ при скорости, имитируемой на СББ, $V_a = 16$ км/ч

4.4.2 Выявление функциональной связи тока I на инверторе с сопротивлением R_s обмоток статора ЭД

Выявление функциональной связи тока I на инверторе как параметра ТС ЭСП, с сопротивлением R_s обмоток статора ЭД как ДП реализовано следующим образом. При многовариантном аналитическом расчете процесса функционирования АЭСП на СББ было выявлено, что при увеличении добавочного сопротивления ΔR_s обмоток статора ЭД силового привода образуется область ЛД D_2 , отмеченная на рисунке 4.11. В области ЛД D_2 секущая АБ по НС проведена параллельно оси абсцисс и соответствует силе тяги на колесе АЭСП $R_x = 2670$ Н.

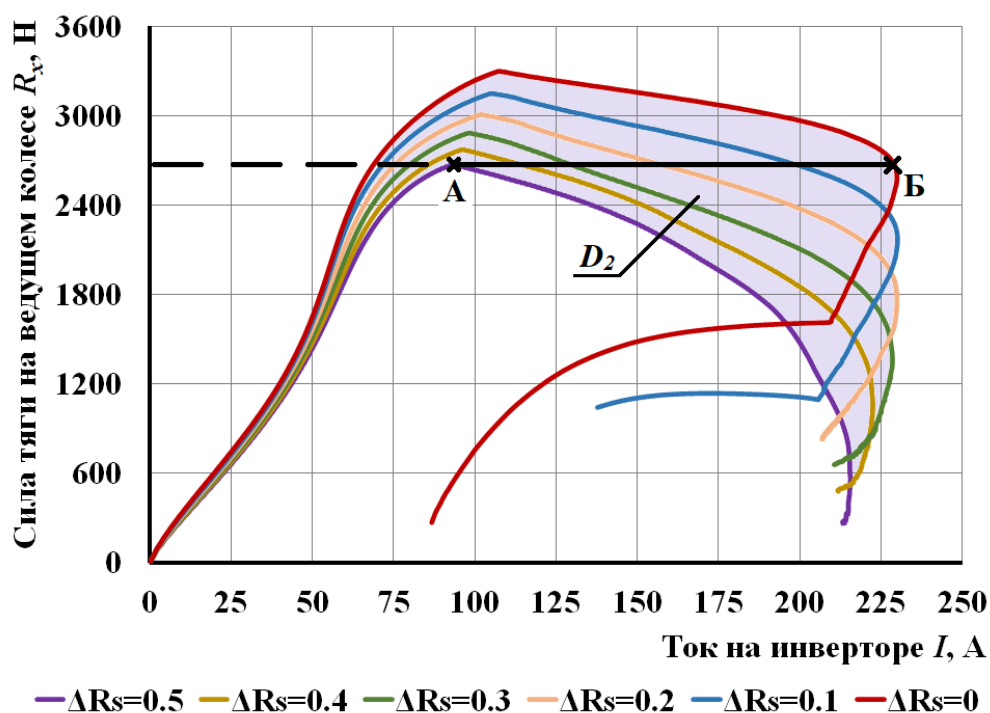


Рисунок 4.11 – Выявление функциональной связи между сопротивлением R_s обмоток статора ЭД и силой тока I на инверторе АЭСП методом НС

Секущая АБ ограничена крайними реализациями, которые являются диагностическими участками для определения параметра ТС ЭСП. Этим параметром принято сопротивление ΔR_s обмоток статора ЭД.

Функциональная связь абсциссы точек пересечения реализаций с диагностическим участком секущей АБ с силой тока I на инверторе АЭСП описывается зависимостью:

$$I = 239,91 \cdot R_s^2 - 391,8 \cdot R_s + 231,72. \quad (4.2)$$

При этом значение коэффициента достоверности аппроксимации равняется $R^2 = 0,9943$.

Графически уравнение связи (4.2) ДП I с параметром ТС ЭСП R_s при силе тяги на колесе АЭСП $R_x = 2670$ Н представлено на рисунке 4.12.

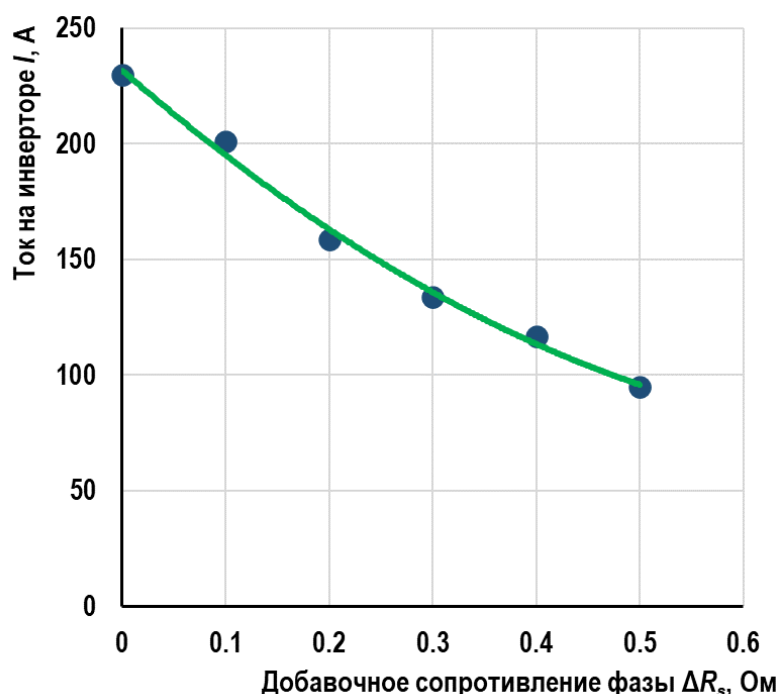


Рисунок 4.12 – Зависимость ДП I от параметра ТС ЭСП R_s
при силе тяги на колесе АЭСП $R_x = 2670$ Н

4.4.3 Выявление функциональной связи диссипации $d_{тр}$ трансмиссии АЭСП с силой R_x , затрачиваемой на вращение трансмиссии АЭСП

Выявление функциональной связи диссипации $d_{тр}$ как параметра ТС трансмиссии АЭСП с силой R_x , затрачиваемой на вращение трансмиссии АЭСП как ДП реализовано следующим образом. При многовариантном

аналитическом расчете процесса функционирования АЭСП на СББ было выявлено, что при изменении диссипации $d_{\text{тр}}$ трансмиссии АЭСП образуется область ЛД D_3 , отмеченная на рисунке 4.13. В области ЛД D_1 секущая АБ по НС проведена параллельно оси ординат и соответствует скорости, имитируемой на СББ, $V_a = 63$ км/ч.

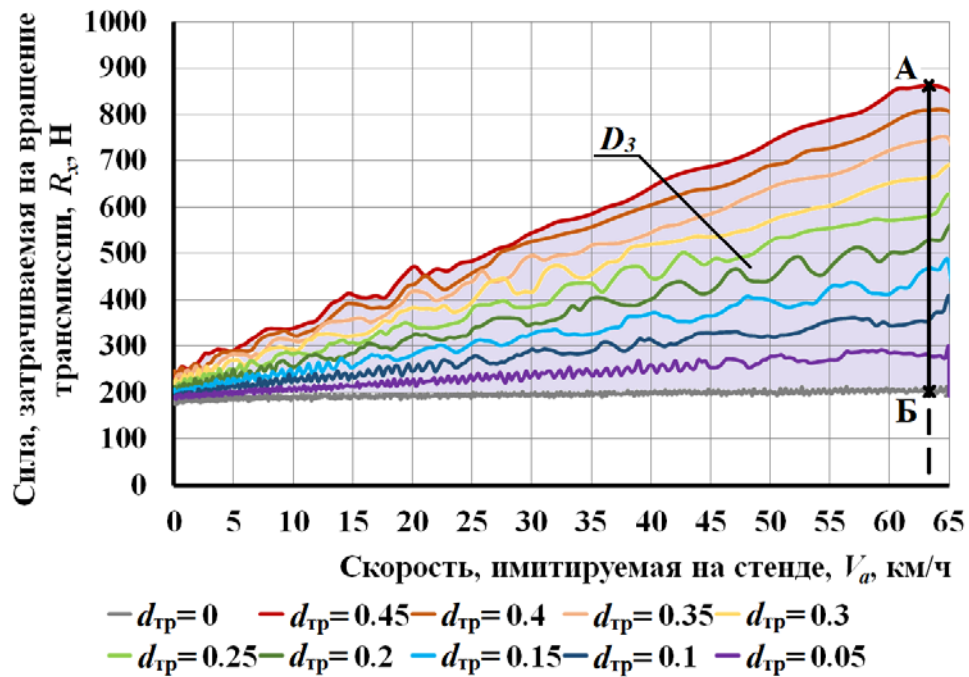


Рисунок 4.13 – Выявление функциональной связи между диссипацией $d_{\text{тр}}$ в трансмиссии АЭСП и силой R_x , затрачиваемой на вращение трансмиссии АЭСП, методом НС

Секущая АБ ограничена крайними реализациями, которые являются диагностическими участками для определения параметра ТС трансмиссии АЭСП. Этим параметром принята диссипация $d_{\text{тр}}$, характеризующая степень механических потерь в элементах трансмиссии АЭСП.

Функциональная связь абсцисс точек пересечения реализаций с диагностическим участком секущей АБ с силой R_x , затрачиваемой на вращение трансмиссии АЭСП, описывается зависимостью:

$$R_x = -738,76 \cdot d_{\text{тр}}^2 + 1807,2 \cdot d_{\text{тр}} + 197,17. \quad (4.3)$$

При этом значение коэффициента достоверности аппроксимации равняется $R^2 = 0,9986$.

Графически уравнение связи ДП R_x с параметром ТС $d_{тр}$ трансмиссии АЭСП при скорости $V_a = 63$ км/ч представлено на рисунке 4.14.

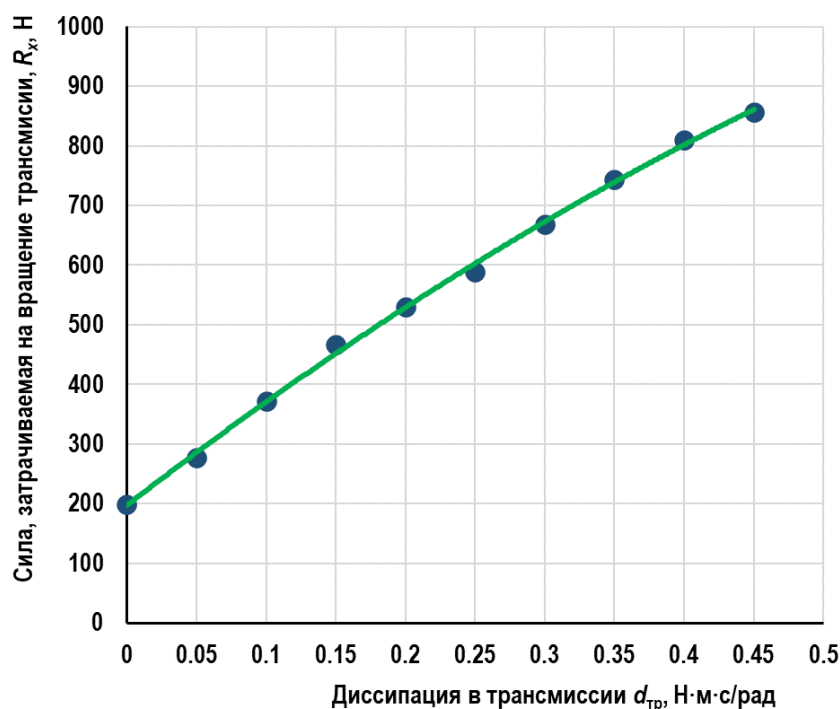


Рисунок 4.14 – Зависимость ДП R_x от параметра ТС трансмиссии АЭСП $d_{тр}$ при скорости, имитируемой на СББ, $V_a = 63$ км/ч

4.4.4 Выявление функциональной связи сопротивления R_{BAT} ВВЦ подключения ТВБ с напряжением U_{BAT} ТВБ

Выявление функциональной связи сопротивления R_{BAT} ВВЦ подключения ТВБ как параметра ТС АЭСП с напряжением U_{BAT} ТВБ как ДП реализовано следующим образом. При многовариантном аналитическом расчете процесса функционирования АЭСП на СББ было выявлено, что при увеличении добавочного сопротивления ΔR_{BAT} в ВВЦ подключения ТВБ образуется область ЛД D_4 , отмеченная на рисунке 4.15. В области ЛД D_4

секущая АБ по НС проведена параллельно оси ординат и соответствует скорости, имитируемой на СББ, $V_a = 5$ км/ч.

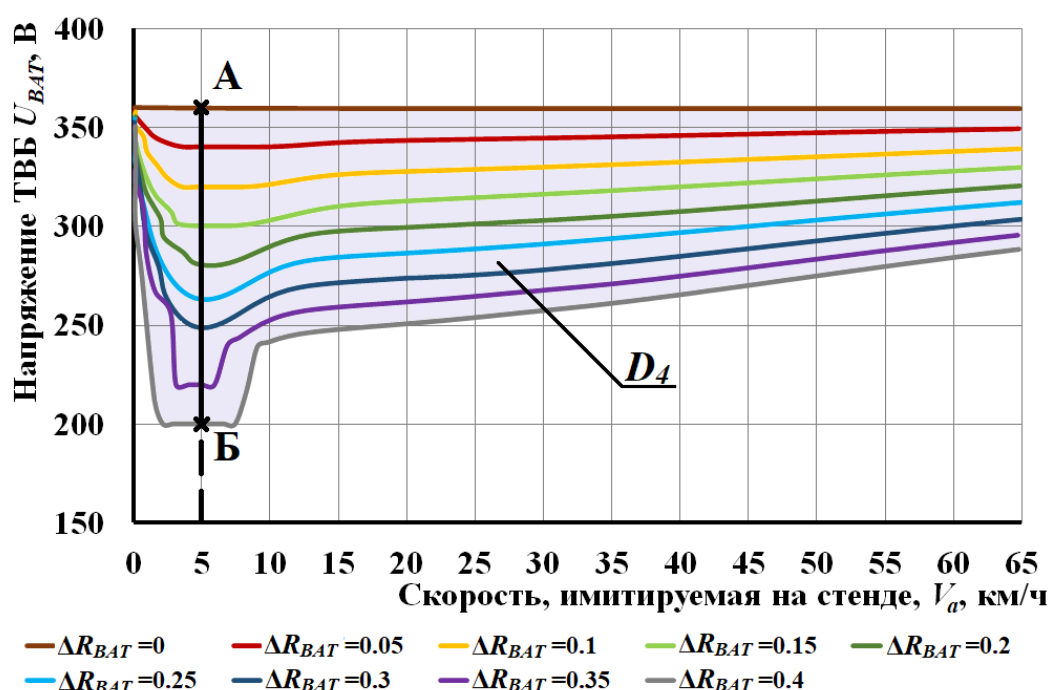


Рисунок 4.15 – Выявление функциональной связи между сопротивлением R_{BAT} ВВЦ подключения ТВБ и напряжением U_{BAT} методом НС

Секущая АБ ограничена крайними реализациями, которые являются диагностическими участками для определения параметра ТС АЭСП. Этим параметром принято сопротивление R_{BAT} , характеризующее состояние ВВЦ подключения ТВБ.

Функциональная связь ординат точек пересечения реализаций с диагностическим участком секущей АБ с сопротивлением R_{BAT} цепи подключения ТВБ описывается зависимостью:

$$U_{BAT} = -393,01 \cdot R_{BAT} + 360,31. \quad (4.4)$$

При этом значение коэффициента достоверности аппроксимации составило $R^2 = 0,9974$.

Графически уравнение связи (4.4) ДП U_{BAT} с параметром ТС АЭСП R_{BAT} при скорости $V_a = 5$ км/ч представлено на рисунке 4.16.

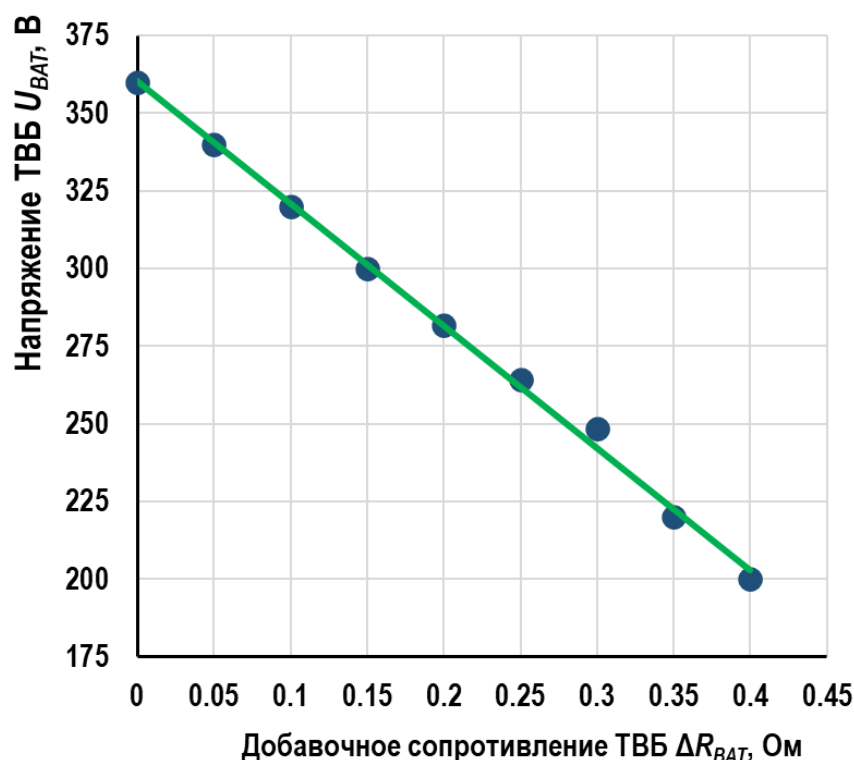


Рисунок 4.16 – Зависимость ДП U_{BAT} от параметра ТС АЭСП R_{BAT} при скорости, имитируемой на стенде, $V_a = 5$ км/ч

Полученные функциональные зависимости параметров ТС АЭСП от параметров его функционирования на СББ позволяют оценивать ТС АЭСП, его систем и агрегатов при заданных тестовых воздействиях.

4.5 Разработка метода контроля ТС агрегатов АЭСП при их функционировании на СББ

Осуществление контроля ТС сложного объекта, которым является любой АЭСП, по принципу «годен-не годен» реализуется за счет использования достаточно обширного количества ДП, определенных выше. Поэтому согласно теоретическим предпосылкам, описанным во второй главе диссертации, был разработан метод контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ, основанный на использовании ДМ.

Для определения ТС агрегатов АЭСП по полученным ДП была разработана ДМ, представленная на рисунке 4.17.

Метод контроля ТС агрегатов АЭСП, основанный на применении ДМ, позволяет фиксировать состояние объекта в зависимости от измеренных параметров его функционирования. Для управления разработанным методом контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ, а также для получения диагностической информации, ее анализа и заполнения данных в ДМ необходима разработка управляющего алгоритма.

Сформированный алгоритм управления методом контроля ТС агрегатов АЭСП, представленный на рисунке 4.18, позволяет выполнять контроль ТС АЭСП на СББ, в том числе количественно оценивать ТС их систем и агрегатов.

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

Рисунок 4.17 – ДМ постановки диагноза при контроле ТС агрегатов АЭСП KIA Soul EV на СББ

Согласно разработанному алгоритму, контроль ТС агрегатов АЭСП подразумевает выполнение следующих действий.

1. Подготовка СББ, которая заключается в его запуске и прогреве измерительных систем.

2. Установка АЭСП на СББ; закрепление его для обеспечения безопасности при проведении испытаний и подключение к его ЭСП системы измерения параметров его функционирования.

3. Задание ТР имитации тягового режима АЭСП и проведение испытания.

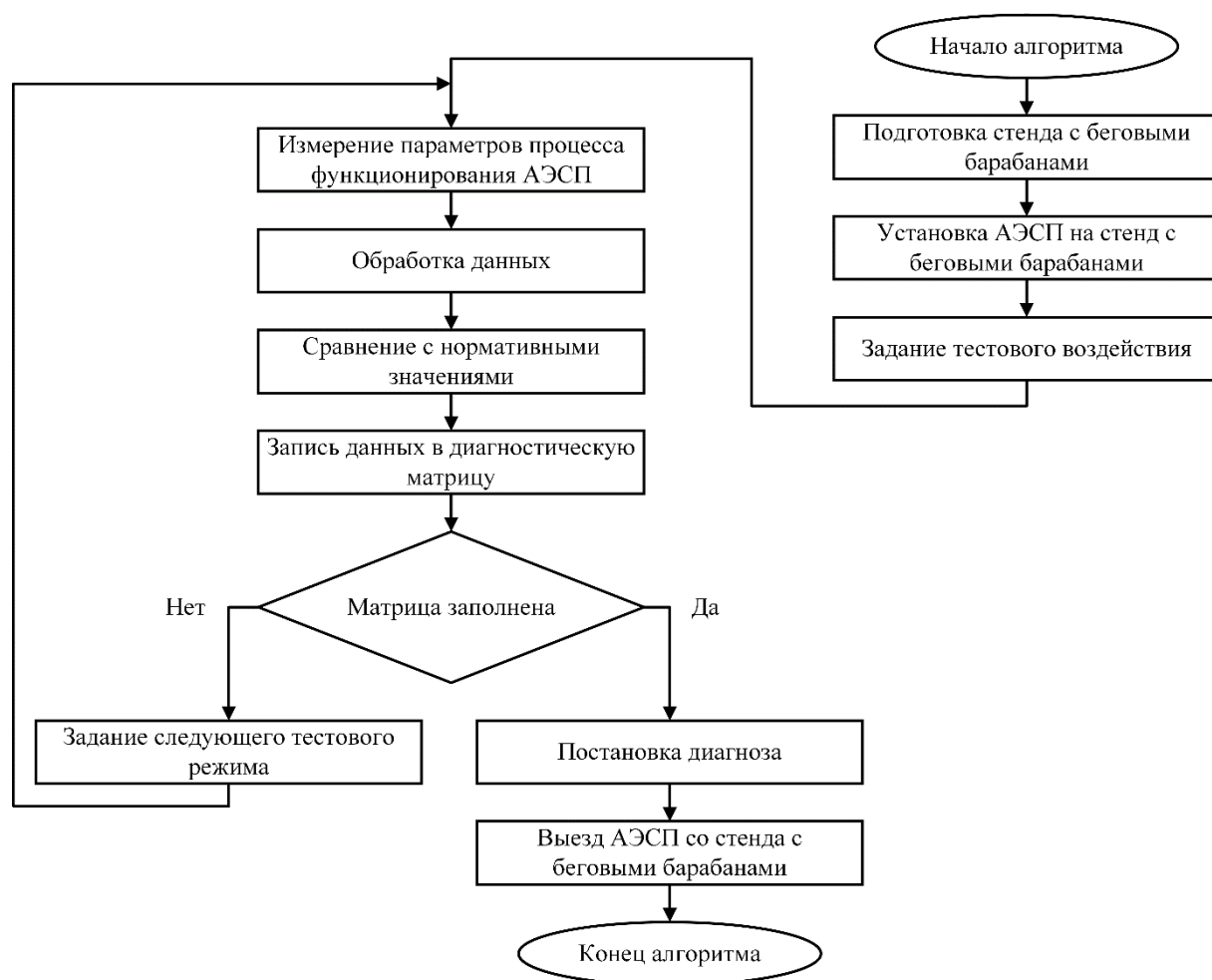


Рисунок 4.18 – Алгоритм контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ с использованием ДМ

4. Измерение основных эксплуатационных свойств АЭСП, в том числе параметров функционирования ЭСП.

5. Обработка измеренных значений параметров функционирования АЭСП на СББ.

6. Сравнение полученных после обработки данных с нормативными значениями.

7. Заполнение ДМ.

8. В случае, если ДМ не заполнена, задается следующий ТР и проводится очередной этап испытаний за счет повторения пунктов 3–7.

9. После заполнения ДМ определяется ТС автомобиля, а именно агрегатов его ЭСП, и устанавливается диагноз на основании сравнения полученных данных с нормативными значениями.

10. По завершении испытаний осуществляется выезд АЭСП со СББ.

Разработанная ДМ и алгоритм управления ею обеспечивают возможность количественного контроля ТС АЭСП на основе разработанного нового и совершенствования существующих методов контроля ТС агрегатов и систем АЭСП при их функционировании на СББ.

4.6 Выводы по четвертой главе диссертации

1. Впервые научно обоснован и экспериментально апробирован метод контроля технического состояния агрегатов автомобилей с электрическим силовым приводом на стенде с беговыми барабанами.

2. Математическое моделирование исследования процесса функционирования автомобиля с электрическим силовым приводом на стенде с беговыми барабанами при изменении параметров его технического состояния позволяет выявлять функциональные зависимости диагностических параметров, чувствительных к изменению технического состояния агрегатов автомобиля с электрическим силовым приводом, его систем и агрегатов, от параметров функционирования автомобиля с электрическим силовым приводом на стенде с беговыми барабанами, что подтверждает возможность эффективного контроля технического состояния агрегатов автомобилей с электрическим силовым приводом стендовым методом.

3. Проведенное сравнение аналитических и экспериментальных исследований процесса функционирования автомобиля с электрическим силовым приводом на стенде с беговыми барабанами по критерию Фишера позволило установить, что разработанная математическая модель системы «Автомобиль с электрическим силовым приводом – Стенд с беговыми барабанами» достоверно описывает результаты экспериментальных исследований.

4. Получены функциональные уравнения связей параметров технического состояния автомобилей с электрическим силовым приводом с параметрами его функционирования на стенде с беговыми барабанами, которые позволяют ставить диагноз и количественно оценивать техническое состояние автомобилей с электрическим силовым приводом при контроле технического состояния их агрегатов на стенде с беговыми барабанами.

5. 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 потокоцепления ψ электродвигателя электрического силового привода переднеприводного автомобиля категории М1 от 0,3 до 0,05 Вб, вызывает уменьшение 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 электрического силового 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 электрическим силовым приводом 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 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.

6. 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 разработанных 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.

5 Экономическая эффективность методика контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ при контроле их ТДС

Расчет экономического эффекта целесообразно производить по результатам внедрения разработанного метода контроля ТС агрегатов АЭСП на СББ при контроле их ТДС на станции технического обслуживания «СТО БРАВО» в г. Иркутске. Данное предприятие на постоянной основе совершенствует технологические процессы с целью сокращения стоимости обслуживания и ремонта автомобилей, а также затрат времени на выполнение этих работ. Значительное внимание предприятие уделяет новым методам диагностики и определения ТС как традиционных автомобилей, так и АЭСП. В этой связи годовой экономический эффект от внедрения предполагаемой методики контроля ТС агрегатов АЭСП определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \Pi - \Pi_i; \quad (5.1)$$

где Π и Π_i – годовые издержки по эксплуатации АЭСП, наблюдаемые, соответственно, при отсутствии и проведении i -го методики контроля ТС.

Годовые издержки при проведении i -й методики контроля ТС подсчитываются по формуле:

$$\Pi_i = \frac{t_r}{t_\phi} \cdot [(1 - \beta_i) \cdot A_i - \beta_i \cdot C_i + k_i \cdot B_i]; \quad (5.2)$$

где t_r – средняя величина годового пробега АЭСП;

t_ϕ – средний, фактически используемый ресурс ЭСП;

$(1 - \beta_i)$ – вероятность правильного диагностирования отказов ЭСП по i -й методике контроля ТС;

A_i – издержки, связанные с устранением отказов ЭСП;

β_i – вероятность диагностирования ложных отказов (ошибки первого рода) ЭСП по i -й методике;

C_i – издержки, связанные с устранением ложных отказов;

B_i – приведенные затраты на проведение одной элементарной проверки ЭСП по i -й методике контроля ТС;

k_i – среднее количество элементарных проверок ЭСП по i -й методике контроля ТС.

Формула (5.2) справедлива для случая, когда стоит задача установить состояние ЭСП автомобиля по принципу «работоспособен» или «неработоспособен». Средние издержки, связанные с устранением действительных или «ложных» отказов ЭСП автомобилей, определяются по выражению:

$$A_i(C_i) = C_{\text{пр}} + C_{\text{ап}} + C_{\text{р}} + C_{\text{ут}}; \quad (5.3)$$

где $C_{\text{пр}}$ – издержки, связанные с потерями от простоя АЭСП;

$C_{\text{ап}}$ – издержки, связанные со стоимостью исправных элементов ЭСП, используемых для замены неисправных;

$C_{\text{р}}$ – издержки, связанные со стоимостью ремонтных комплектов и проведением ремонтных воздействий;

$C_{\text{ут}}$ – издержки, связанные с утилизацией отбракованных элементов ЭСП, существенно возрастающие в случае необоснованной выбраковки работоспособных и ремонтпригодных элементов ЭСП.

Приведенные затраты на контроль ТС агрегатов ЭСП автомобилей по i -й методике рассчитываются в соответствии с выражением:

$$B_i = C_3 + C_a + T_p + E \cdot y; \quad (5.4)$$

где C_3 – заработная плата операторов-диагностов с начислениями;

C_a – отчисления на амортизацию средств диагностирования;

T_p – затраты на текущий ремонт средств диагностирования;

E – коэффициент нормативной эффективности, $E = 0,12$;

y – удельные капитальные затраты, приходящиеся на контроль ТС агрегатов ЭСП автомобилей.

Заработная плата персоналу, проводящему контроль ТС агрегатов АЭСП, может быть вычислена по уравнению:

$$C_3 = (T_{всп} + T_T + T_{и} + T_{д}) \cdot C_{чс} \cdot K_{д} \cdot K_{с} \cdot K_{м} \cdot K_{з} \cdot K_{п}; \quad (5.5)$$

где $T_{всп}$ – продолжительность вспомогательных работ;

T_T – продолжительность тестового воздействия;

$T_{и}$ – продолжительность измерения и регистрации ДП;

$T_{д}$ – продолжительность процедуры контроля ТС;

$C_{чс}$ – часовая тарифная ставка оператора-диагноста;

$K_{д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату;

$K_{с}$ – коэффициент, учитывающий начисление в фонд социального страхования;

$K_{м}$ – коэффициент, учитывающий начисление в фонд медицинского страхования;

$K_{з}$ – коэффициент, учитывающий начисление в фонд занятости;

$K_{п}$ – коэффициент, учитывающий начисление в пенсионный фонд.

Другие составляющие формулы (5.4) рассчитываются по выражениям:

$$C_a = \frac{Б \cdot a}{100 \cdot A_n}; \quad (5.6)$$

$$T_p = \frac{Б \cdot T_{тр}}{100 \cdot A_n}; \quad (5.7)$$

$$y = \frac{Б}{A_n}; \quad (5.8)$$

где $Б$ – балансовая стоимость средств диагностирования;

A_n – годовое число диагностирований;

$T_{тр}$ – нормы отчислений на амортизацию и текущий ремонт, 12 и 11 % соответственно.

Балансовая стоимость средств диагностирования, необходимых для реализации разработанной методики, составляет 2400 тыс. руб. Учитывая результаты экспериментальных исследований, приведенных в данной работе,

одной из составляющих величины экономического эффекта по предприятию «СТО БРАВО» является возврат работоспособных ЭСП в эксплуатацию. Расчет этой величины производится по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_r = N_1 \cdot C_{\text{ср}}; \quad (5.9)$$

где N_1 – количество ЭСП, возвращенных в эксплуатацию;

$C_{\text{ср}}$ – средняя стоимость работоспособной ЭСП.

Экономический эффект можно получить и за счет снижения трудоемкости выполнения процедуры определения ТС. Это способствует уменьшению времени простоя автомобиля при контроле ТС его ЭСП. При контроле ТС агрегатов АЭСП дорожным методом и при использовании сканера время уменьшения простоя составит:

$$t_{\text{упр}} = t_d \cdot N_{\text{па}}; \quad (5.10)$$

где t_d – снижение затрат времени на контроль ТС одного агрегата ЭСП;

$N_{\text{па}}$ – количество агрегатов ЭСП, по которым снижаются затраты времени на контроль их ТС.

Производственная проверка показала, что разработанная методика контроля ТС агрегатов ЭСП автомобилей на СББ и реализующее ее оборудование позволяют с высокой информативностью осуществлять контроль ТС АЭСП в условиях СТО (ошибки «пропуск отказа» снижены на 29 %, ошибки «ложная тревога» снижены на 17 %), на 13–20 % снижать трудоемкость поиска неисправного агрегата и сокращать время пребывания автомобиля в СТО на 12–32 %, что подтверждается актом внедрения результатов данного исследования на предприятии (см. приложение 3).

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.

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 электрической силовой установки;

- 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 установками, от параметров технического состояния их агрегатов и систем показывают, что:

- снижение потокосцепления ψ 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 электрического силового 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 электрическим силовым приводом категории М1 от 0 до $0,45 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ в режиме выбега с начальной скорости $V_a = 63 \text{ км/ч}$ 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 до 0,4 Ом приводит к снижению напряжения тяговой батареи U_{BAT} на 44 % при контроле в тяговом режиме на скорости $V_a = 5 \text{ км/ч}$.

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 разработанных 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.

6. 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 ее 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 % снижать 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 Браво» г. Иркутск.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматика и автоматизация производственных процессов / В.П. Автушко [и др.] ; под ред. Н.Ф. Метлюка. – Минск : Выш. шк., 1985. – 302 с.
2. Автоматический поиск неисправностей / А.В. Мозгалеvский [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1967. – 262 с.
3. Автомобиль. Основы конструкции : учебник для вузов / Н.Н. Вишняков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 304 с.
4. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобиля / Я.С. Агейкин. – М. : Машиностроение, 1981. – 232 с.
5. Айзенберг, Т.Б. Руководство к решению задач по теоретической механике / Т.Б. Айзенберг. – М. : Высш. шк., 1968. – 419 с.
6. Акимов, В.А. Сборник задач по теоретической механике / В.А. Акимов. – Минск : Технопринт, 2001. – 365 с.
7. Александров, Е.Б. Современные механизмы распределения мощности в трансмиссиях легковых автомобилей / Е.Б. Александров, А.А. Трикоз, С.В. Шеметов. – М. : ЩИИТЭИАВТОПРОМ, 1989. – 52 с.
8. Аллилуев, В.А. Техническая диагностика тракторов и сложных сельскохозяйственных машин на индустриальной основе : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / В.А. Аллилуев. – Л., 1983. – 448 с.
9. Альперович, И.Г. Экономика и динамика автомобиля с гидромuftой / И.Г. Альперович // Сборник научных трудов. Ч. 2.1. – М. : Изд-во НАМИ, 1949. – 51 с.
10. Антонов, А.С. Армейские автомобили: Теория : учебник для вузов / А.С. Антонов. – М. : Высш. шк., 1970. – 508 с.
11. Антонов, Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей / Д.А. Антонов. – М. : Машиностроение, 1978. – 216 с.

12. Антонов, И.Л. Избранные задачи по теоретической механике / И.Л. Антонов. – М. : [Б. и.], 1986. – 73 с.
13. Анхимюк, В.Л. Теория автоматического управления / В.Л. Анхимюк. – Минск : Высшая школа, 1979. – 286 с.
14. Аринин, И.Н. Диагностирование технического состояния автомобиля / И.Н. Аринин. – М. : Транспорт, 1978. – 176 с.
15. Аринин, И.Н. Техническая диагностика автомобилей / И.Н. Аринин. – М. : Транспорт, 1981. – 146 с.
16. Аринин, И.Н. Техническая диагностика АТС / И.Н. Аринин. – М. : Транспорт, 1981. – 146 с.
17. Арнольд, В.И. Математические методы классической механики / В.И. Арнольд. – М. : Наука, 1989. – 472 с.
18. Артоболевский, И.И. Механизмы в современной технике: справочное пособие : в 7 томах / И.И. Артоболевский. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1980. – Т. 4. – 592 с.
19. Астафьев, Е.А. Моделирование электропривода электромобиля с возможностью рекуперации электрической энергии / Е.А. Астафьев, А.Ю. Афанасьев // Развитие концепции современного образования в рамках научно-технического прогресса : сб. науч. тр. – Казань : ООО «СитИвент», 2020. – С. 121–130.
20. Астров, В.А. Коэффициент сцепления и степень шероховатости дорожного покрытия / В.А. Астров // Автомобильные дороги. – 1970. – № 10. – С. 22–24.
21. Афонин, С.А. Конструкция и диагностика неисправностей автоматических коробок передач иностранных легковых автомобилей. Практическое руководство / С.А. Афонин. – Батайск : Изд-во «ПОНЧИК», 2000. – 154 с.

22. Балабин, И.В. Автотракторные колеса. Справочник / И.В. Балабин, В.Г. Вазингер, Н.С. Петровский. – М. : Машиностроение, 1985. – 272 с.

23. Бахмутов, С.В. Расширение функциональных возможностей – необходимый шаг в развитии конструкции гибридных автомобилей / С.В. Бахмутов, А.В. Круташов, О.В. Маликов // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 6 (77). – С. 43–46.

24. Беляев, В.М. Автомобили. Испытания : учеб. пособие для вузов / В.М. Беляев, М.С. Высоцкий, Л.Х. Гилелес. – Минск : Высш. шк., 1991. – 187 с.

25. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М. : Наука, 1975. – 768 с.

26. Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 140 с.

27. Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 239 с.

28. Блехман, И.И. Механика и прикладная математика: логика и особенности прил. математики / И.И. Блехман, А.Д. Мышкис, Я.Г. Пановко. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Наука, 1990. – 365 с.

29. Бойко, А.В. Математическая модель для расчета нормальных и касательных напряжений в пятне контакта эластичной шины с дорогой и беговым барабаном диагностического стенда / А.В. Бойко // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 11 (70). – С. 128–131.

30. Бойко, А.В. Совершенствование методов диагностики тормозных систем автомобилей в условиях эксплуатации на силовых стендах с беговыми барабанами : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Бойко Александр Владимирович. – Иркутск, 2008. – 217 с.

31. Боровских, Ю.И. Устройство автомобиля / Ю.И. Боровских, М.В. Клеиников, А.А. Сабинин. – М. : Высш. шк., 1983. – 110 с.

32. Бортницкий, П.И. Тягово-скоростные качества автомобилей : справочник / П.И. Бортницкий, В.И. Задорожный – Киев : Вища школа, 1978. – 176 с.

33. Борц, А.Д. Диагностика технического состояния автомобиля / А.Д. Борц, Я.К. Закин, Ю.В. Иванов. – М. : Транспорт, 1979. – 160 с.

34. Бочаров, Н.Ф. Конструирование и расчет колесных машин высокой проходимости: Общие вопросы конструирования : учебник / Л.Ф. Жеглов, В.Н. Зузов, Н.Ф. Бочаров ; под общ. ред. Н.Ф. Бочарова, Л.Ф. Жеглова. – М. : Машиностроение, 1992. – 352 с.

35. Бражниченко, Н.А. Сборник задач по теоретической механике : учеб. пособие для втузов / Н.А. Бражниченко. – 4-е изд., испр. – М. : Высш. шк., 1986. – 479 с.

36. Бродский, В.В. Введение в факторное планирование эксперимента / В.В. Бродский. – М. : Наука, 1976. – 224 с.

37. Брюханов, А.Б. Электронные устройства автомобиля / А.Б. Брюханов. – М. : Транспорт, 1988. – 109 с.

38. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики : учебник для вузов : в 2 томах / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – 4-е изд., испр. – М. : Наука, 1985. – Т. 1. – 239 с.

39. Бухарин, Н.А. Исследование дифференциала с гидравлическим трением / Н.А. Бухарин, А.А. Малюков // Автомобильная промышленность. – 1963. – № 3. – С. 18–21.

40. Бухарин, Н.А. Тормозные системы автомобилей / Н.А. Бухарин. – М.-Л. : Машгиз, Ленинградское отделение, 1950. – 292 с.

41. Быков, Р.В. Полноприводные АТС: нужны ли им отключаемые мосты / Р.В. Быков, Г.Д. Драгунов, А.В. Келлер // Автомобильная промышленность. – 2003. – № 8. – С. 14–16.

42. Васильев, В. И. Интеллектуальные технологии в системах технического диагностирования / В. И. Васильев, Я. А. Борщенко // Вестник МАНЭБ. – 2006. – Т. 11, № 6. – С. 20-22.

43. Вахламов, В.К. Техника транспорта. Эксплуатационные свойства подвижного состава : конспект лекций / В.К. Вахламов, И.Н. Порватов. – М. : Изд-во МАДИ (ГТУ), 2002. – Ч. 1. – 70 с.

44. Вахламов, В.К. Техника транспорта. Эксплуатационные свойства подвижного состава : конспект лекций / В.К. Вахламов, И.Н. Порватов // МАДИ (ГТУ). – М, 2004. – Ч. 2. – 64 с.

45. Введение в техническую диагностику / Г.Ф. Верзаков [и др.]. – М. : Энергия, 1968. – 219 с.

46. Веденяпин, Г.В. Научные основы и методика построения систем технического ухода за тракторами : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Веденяпин Георгий Владимирович. – М., 1965. – 22 с.

47. Веденяпин, Г.В. Эксплуатация машинно-тракторного парка / Г.В. Веденяпин, Ю.К. Киртбая, М.П. Сергеев. – М. : Колос, 1968. – 342 с.

48. Веденяпин, Г.М. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.М. Веденяпин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1973. – 195 с.

49. Векуа, Н.П. Некоторые вопросы дифференциальных уравнений и приложения в механике / Н.П. Векуа. – М. : Наука, 1991. – С. 83–89.

50. Вильке, В.Г. Теоретическая механика : учеб. пособие / В.Г. Вильке. – М. : Изд-во МГТУ, 1991. – 235 с.

51. Гернер, В.С. Исследование режимов контроля эффективности действия тормозных механизмов : дис. ... канд. техн. наук / В.С. Гернер. – Харьков, 1970. – 153 с.

52. Гернет, М.М. Курс теоретической механики : учебник для вузов / М.М. Гернет. – 5-е изд., испр. – М. : Высш. шк., 1987. – 343 с.

53. Говорущенко, Н.Я. Диагностика технического состояния автомобилей / Н.Я. Говорущенко. – М. : Транспорт, 1970. – 254 с.
54. Говорущенко, Н.Я. Техническая эксплуатация автомобилей / Н.Я. Говорущенко. – Харьков : Вища школа, 1984. – 312 с.
55. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М. : Изд-во стандартов, 2005. – 58 с.
56. ГОСТ Р 51709-2001 Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 28 с.
57. ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Часть 1. Электромобили. – М. : Стандартиформ, 2012. – 24 с.
58. Государственная инспекция безопасности дорожного движения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gibdd.ru> (режим доступа: 25.07.2021).
59. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования эксперимента / Ю.П. Грачев. – М. : Пищевая промышленность, 1979. – 195 с.
60. Гредескул, А.Б. Динамика торможения автомобиля : дис. ... д-ра техн. наук / А.Б. Гредескул. – Харьков, 1963. – 271 с.
61. Грибенко, С.М. Диагностика и обслуживание автомобилей / С.М. Грибенко. – Ставрополь : Ставропольское книжное издательство, 1977. – 287 с.
62. Гришкевич, А.И. Автомобили. Конструкции, конструирование и расчет / А.И. Гришкевич. – Минск : Высшая школа, 1987. – 200 с.
63. Гришкевич, А.И. Автомобили. Теория : учебник для вузов / А.И. Гришкевич. – Минск : Высш. шк., 1986. – 208 с.

64. Гуревич, Л.В. Современные методы дорожных испытаний автомобильных антиблокировочных систем / Л.В. Гуревич. – М. : НИИАвтопром, 1978. – 100 с.

65. Гуревич, Л.В. Тормозное управление автомобиля / Л.В. Гуревич, Р.А. Меламуд. – М. : Транспорт, 1978. – 152 с.

66. Гурьянов, С.И. Повышение точности диагностирования тормозных свойств автопоездов на стенде / С.И. Гурьянов. // Диагностика автомобилей: III всесоюзная научно-техническая конференция : тезисы докладов. – Улан-Удэ, 1989. – С. 147–148.

67. Гуськов, В.В. Тракторы. Теория : учебник для вузов / В.В. Гуськов. – М. : Машиностроение, 1988. – 374 с.

68. Данилов, Б.А. Электронное оборудование иностранных автомобилей: Системы управления трансмиссией, подвеской и тормозной системой / Б.А. Данилов, Е.И. Титов. – М. : Транспорт, 1998. – 78 с.

69. Датчик силоизмерительный тензометрический 9035 ДСТ. Формуляр АЖЕ 2.320.013 ФО. ЗАО «Сибтензоприбор». – Топкинская гор. тип., 2001. – 6 с.

70. Джонсон, М. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / М. Джонсон, Ф.М. Лион. – М. : Мир, 1981. – 610 с.

71. Дик, А.Б. Описание характеристик проскальзывания тормозящего колеса / А.Б. Дик // Надежность и активная безопасность автомобиля : сб. науч. тр. – М. : Изд-во МАМИ, 1985. – С. 205–216.

72. Димов, Н.Н. Оценка возможности воспроизведения реальных режимов торможения автомобиля на стендах с беговыми барабанами : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.Н. Димов. – Харьков, 1987. – 20 с.

73. Динамика системы дорога–шина–автомобиль–водитель / А.А. Хачатуров [и др.] ; под ред. А.А. Хачатурова. – М. : Машиностроение, 1976. – 535 с.

74. Иларионов, В.А. Пространственная математическая модель для

исследования активной безопасности автомобиля / В.А. Иларионов, И.К. Пчелин // Исследование торможения автомобиля и работы пневматических шин : сб. науч. тр. – Омск : Изд-во СибАДИ, 1979. – С. 3–18.

75. Иларионов, В.А., Пространственная математическая модель для исследования активной безопасности автомобиля / В.А. Иларионов, И.К. Пчелин // Исследование торможения автомобиля и работы пневматических шин : сб. науч. тр. – Омск : Изд-во СибАДИ, 1979. – С. 25–41.

76. Иофинов, С.А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / С.А. Иофинов, Г.П. Лышко. – М. : Колос, 1984. – 351 с.

77. Калачев, Ю.Н. SimInTech: моделирование в электроприводе / Ю.Н. Калачев. – М. : ДМК Пресс, 2021. – 106 с.

78. Калачев, Ю.Н. Моделирование в электроприводе. Инструкция по пониманию / Ю.Н. Калачев. – М. : ДМК, 2019. – 90 с.

79. Карпухин, К. Е. Этапы развития транспортных средств на электрической тяге в России и мире / К. Е. Карпухин, В. Н. Кондрашов, А. С. Теренченко. – Москва : Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт "НАМИ", 2018. – 306 с.

80. Колесников, К.С. Сборник задач по теоретической механике : учеб. пособие для вузов / К.С. Колесников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1989. – 446 с.

81. Колчин, А.В. Методика определения оптимальной точности измерений при диагностировании тракторов и сельскохозяйственных машин / А.В. Колчин, В.М. Михлин // Тр. ГОСНИТИ. – 1980. – С. 9–11.

82. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей : учеб. пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – М. : Высш. шк., 1980. – 400 с.

83. Компания «Новгородский завод ГАРО» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.novgaro.ru> (дата обращения: 22.06.2022).

84. Котиков, Ю.Г. Разработка методологии системного анализа и имитационного моделирования объектов автомобильной техники и транспорта : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.10 / Ю.Г. Котиков. – СПб., 1995. – 46 с.

85. Краткий автомобильный справочник / А.Н. Позин [и др.]. – М. : АО «ТРАНСКОНСАЛТИНГ», НИИАТ, 1994. – 779 с.

86. Куликов, Н.К. Исследования динамики и экономики автомобиля / Н.К. Куликов. – М. : Машгиз, 1953. – 68 с.

87. Кулько, П.А. Государственный Технический осмотр. Проблемы и решения / П.А. Кулько, К.В. Ушаков // Автотранспортное предприятие. – 2005. – № 9. – С. 15–19.

88. Курзель, И.А. К вопросу о тяговом и топливно-экономическом расчете автомобиля с гидромеханической передачей / И.А. Курзель // Сб. науч. тр. НАМИ. – М., 1961, – С. 11–15.

89. Курзель, И.А. Расчет разгона системы с гидромеханическим трансформатором / И.А. Курзель // Вестник машиностроения. – 1968. – № 5. – С. 15–17.

90. Литвинов, А.С. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин // Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.

91. Лудченко, А.А. Основы технического обслуживания автомобилей / А.А. Лудченко. – Киев : Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 399 с.

92. Лукин, П.П. Конструирование и расчет автомобиля / П.П. Лукин, Г.А. Гаспарянц, В.Ф. Родионов. – М. : Машиностроение, 1984. – 374 с.

93. Лурье, М.И. Уточненный расчет динамики и экономичности разгона автомобиля / М.И. Лурье // Автомобильная промышленность. – 1959. – № 4. – С. 12–14.

94. Малюков, А.А. Научные основы стендовых испытаний автомобилей на активную безопасность : дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Малюков. – М., 1984. – 348 с.

95. Мирошников, Л.В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях / Л.В. Мирошников, А.П. Болдин, В.И. Пал. – М. : Транспорт, 1977. – 264 с.

96. Мирошников, Л.В. Методы и средства диагностики автомобилей / Л.В. Мирошников // Автомобильный транспорт. – 1970. – № 1. – страницы.

97. Мирошников, Л.В. Теоретические основы технической диагностики автомобилей : учеб. пособие / Л.В. Мирошников. – М. : Высш. шк., 1976. – 126 с.

98. Михлин, В.М. Методические указания по прогнозированию технического состояния машин / В.М. Михлин, А.А. Сельцер. – М. : Колос, 1972. – 216 с.

99. Михлин, В.М. Прогнозирование технического состояния машин / В.М. Михлин. – М. : Колос, 1976. – 287 с.

100. Михлин, В.М. Современные методы и средства технического диагностирования сельскохозяйственных машин / В.М. Михлин // Международный сельскохозяйственный журнал. – 1982. – № 1. – С. 55–58.

101. Михлин, В.М. Теоретические основы прогнозирования технического состояния тракторов и сельскохозяйственных машин : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук / В.М. Михлин. – М., 1972. – 40 с.

102. Модернизация комплекса для исследования процессов происходящих в пятне контакта эластичной шины / А.В. Бойко, О.С. Яньков, А.С. Марков, В.П. Халезов // Сборник статей 90-й международной научно-технической конференции «Автомобиль для Сибири и Крайнего Севера. Конструкция, эксплуатация, экономика» г. Иркутск, апрель, 2015 г. – с. 110–115.

103. Мозгалеvский, А.В. Техническая диагностика / А.В. Мозгалеvский, Д.В. Гаскаров. – М. : Высш. шк., 1975. – 207 с.

104. Монтгомери, Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери ; пер. с англ. – Л. : Судостроение, 1980. – 384 с.
105. Мороз, С.Э. Электроника в управлении автомобилем / С.Э. Мороз. – М. : Знание, 1985. – 64 с.
106. Научно-производственная фирма «МЕТА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.meta-gu.ru> (дата обращения: 16.08.2021).
107. Немчинов, М.В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобилей / М.В. Немчинов. – М. : Транспорт, 1985. – 231 с.
108. Нефедьев, Я.Н. Комплексная система активной безопасности АТС / Я.Н. Нефедьев // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 2. – С. 12–24.
109. Новый стенд конструкции ИрГТУ для проверки тормозных систем автомобилей / Е.М. Портнягин [и др.] // Вестник КГТУ. Сер. Транспорт. – 2006. – Вып. 43. – С. 389–393.
110. Оsepчугов, В.В. Автомобиль. Анализ конструкций и элементы расчета : учебник для вузов/ В.В. Оsepчугов, А.К. Фрумкин. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.
111. Павловский, М.А. Теоретическая механика: Динамика : учебник для техн. вузов / М.А. Павловский ; под общ. ред. М.А. Павловского. – Киев : Выща шк., 1990. – 479 с.
112. Панченко, В.И. Основы теории гидромеханических передач / В.И. Панченко. – М. : Машгиз, 1957. – 423 с.
113. Пат. 2241618 Российская Федерация, МПК7 B60T 17/22, G01L5/28. Испытательный стенд / Федотов А.И., Шульгин А.Н., Веретенин О.В., Мальцев А.С., Кобелев А.В., Портнягин Е.М. ; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. техн. ун-т. – № 2004103215/11 ; заявл. 04.02.2004 ; опубл. 10.12.2004, Бюл. № 34. – 3 с.
114. Пат. № 198516 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/28. бесконтактный измеритель для силового тормозного роликового стенда /

Федотов А.И., Яньков О.С., Чернышков А.С. ; заявитель ООО «Фритрейн». – № 2020113148 ; заявл. 26.03.2020 ; опубл. 14.07.2020.

115. Пат. № 199093 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13. Гибридный универсальный полноопорный стенд для контроля технического состояния колесных транспортных средств / Федотов А.И., Яньков О.С., Чернышков А.С. ; заявитель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – № 2020111732 ; заявл. 23.03.2020 ; опубл. 13.08.2020.

116. Пат. № 2021613529 Расчет параметров процесса функционирования электромобиля при контроле его тягово-динамических качеств на стенде с беговыми барабанами / Федотов А.И., Яньков О.С., Чернышков А.С. ; заявитель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – № 2021612484 ; заявл. 03.03.2021 ; опубл. 10.03.2021.

117. Пат. № 213401 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13, G01M 17/007. Стенд контроля технического состояния колесных транспортных средств с обгонной муфтой / Федотов А.И., Яньков О.С., Чернышков А.С. ; заявитель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – № 2022106787 ; заявл. 16.03.2022 ; опубл. 09.09.2022.

118. Пат. № 215729 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13. Гибридный стенд с планетарным балансирным редуктором для контроля технического состояния колесных транспортных средств / Федотов А.И., Яньков О.С., Чернышков А.С., Киселев П.А ; заявитель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – № 2022130297 ; заявл. 23.11.2022 ; опубл. 23.12.2022.

119. Петров, М.А. Работа автомобильного колеса в тормозном режиме / М.А. Петров. – Омск : Западно-Сибирское книжное издательство. Омское отделение, 1973. – 224 с.

120. Портнягин, Е.М. Метод контроля тормозной эффективности и устойчивости автомобилей с ABS при их диагностировании на роликовых

стендах : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Портнягин Евгений Михайлович. – Оренбург, 2009. – 207 с.

121. Потапов, А.С. Динамический метод диагностирования противобуксовочных систем автотранспортных средств на стендах с беговыми барабанами : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Потапов Антон Сергеевич. – Иркутск, 2011. – 260 с.

122. Проектирование полноприводных колесных машин : учебник для вузов : в 2 томах / Б.А. Афанасьев [и др.] ; под общей редакцией А.А. Полунгяна. – М. : Изд-во МГТУ, 1999. – Т. 1. – 486 с.

123. Прочность и долговечность автомобиля / Б.В. Гольд [и др.] ; под ред. Б.В. Гольда. – М. : Машиностроение, 1974. – 328 с.

124. Руководство пользователя «Универсальный механизм: Редактор структурных схем» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/24_um_blockeditor.pdf. (дата обращения: 13.10.2022).

125. Системы и компоненты транспортных средств WABCO. – Фирма WABCO, 2000. – 62 с.

126. Смирнов, Г.А. Теория движения колесных машин : учебник для вузов / Г.А. Смирнов. – М. : Машиностроение, 1990. – 309 с.

127. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учебник для вузов / Г.Г. Соколовский. – М. : Академия, 2006. – 265 с.

128. Солнцев, А.А. Анализ перспективы развития рынка электромобилей / А.А. Солнцев, Б.Т. Бейшенбаев, А.В. Панура // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2016. – № 3-2 (39). – С. 40–45.

129. Справочная система SimInTech «Электроприводы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://help.simintech.ru/#biblioteki_blokov/DIR_elektroprivody.html (дата обращения: 20.03.2023).

130. Степанов, А.Н. Метод последовательного диагностирования тормозной системы АТС с функционирующей ABS на одноплатформенном стенде с беговыми барабанами : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Степанов Алексей Николаевич. – Иркутск, 2010. – 184 с.

131. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем : учебник для техн. специальностей вузов / В.П. Тарасик. – Минск : Дизайн ПРО, 1997. – 623 с.

132. Тарасик, В.П. Теория движения автомобиля / В.П. Тарасик. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Изд-во БХВ, 2022. – 576 с.

133. Тарасик, В.П. Теория движения автомобиля / В.П. Тарасик. – СПб. : Изд-во БХВ, 2006. – 478 с.

134. Тарасик, В.П. Фрикционные муфты гидромеханических передач / В.П. Тарасик. – Минск : Наука и техника, 1973. – 320 с.

135. Теория и конструкция автомобиля / В.А. Илларионов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 368 с.

136. Терских, И.П. Научные основы функциональной диагностики (эксплуатационных параметров) машинно-тракторных агрегатов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Терских Иван Петрович. – Л., 1973. – 51 с.

137. Терских, И.П. Состояние, задачи и перспективы технической диагностики машин / И.П. Терских // Техническое обслуживание и диагностика тракторов : сб. науч. тр. – Иркутск, 1979. – С. 28–30.

138. Терских, И.П. Функциональная диагностика машинно-тракторных агрегатов / И.П. Терских. – Иркутск : Изд-во Ирк. ун-та, 1987. – 312 с.

139. Техническая эксплуатация автомобилей : учебник для вузов / под

ред. Г.В. Крамаренко. – М. : Транспорт, 1983. – 488 с.

140. Техническая эксплуатация автомобилей : учебник для вузов / под ред. Е.С. Кузнецова. – М. : Транспорт, 1991. – 413 с.

141. Технические средства диагностирования / В.П. Калявин [и др.]. – Л. : Судостроение, 1984 – 208 с.

142. Технические средства диагностирования: справочник / В.В. Ключев [и др.] ; под ред. В.В. Ключева. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.

143. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств». ТР ЕАЭС 018/2011.

144. Техническое диагностирование автомобилей / И.Н. Аринин [и др.]. – Ф. : Кыргызстан, 1978. – 164 с.

145. Токарев, А.А. Методы исследований тягово-скоростных свойств и топливной экономичности автомобилей / А.А. Токарев. – М. : Машиностроение, 1976. – 142 с.

146. Токарев, А.А. Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобилей / А.А. Токарев. – М. : Машиностроение, 1982 – 158 с.

147. Фалькевич, Б.С. Теория автомобиля / Б.С. Фалькевич. – М. : Машгиз, 1963. – 239 с.

148. Фаробин, Я.Е. Оценка эксплуатационных свойств автопоездов для международных перевозок / Я.Е. Фаробин, В.С. Щупляков. – М. : Транспорт, 1983. – 200 с.

149. Федоткин, И.В. Метод диагностирования гидродинамических передач автомобилей на инерционных стендах с беговыми барабанами / И.В. Федоткин. – Иркутск, 2010. – 170 с.

150. Федотов, А.И. Воспроизводимость результатов измерений параметров тормозной системы автомобиля на тормозном стенде с беговыми барабанами / А.И. Федотов, А.В. Бойко, А.С. Потапов // Повышение эффективности эксплуатации автотранспортных средств на основе

современных методов диагностирования : мат-лы междунар. науч.-практ. конф. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2007. – С. 26–32.

151. Федотов, А.И. Диагностика автомобиля : учебник для вузов / А.И. Федотов ; Иркутский государственный технический университет. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2012. – 467 с.

152. Федотов, А.И. Диагностика пневматического тормозного привода автомобилей на основе компьютерных технологий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Федотов Александр Иванович. – Новосибирск, 1999. – 506 с.

153. Федотов, А.И. Качение тормозящего колеса, нагруженного переменной нормальной нагрузкой / А.И. Федотов, А.Б. Дик // Активная и пассивная безопасность и надежность автомобиля : сб. науч. тр. – М. : Изд-во МАМИ, 1984. – С. 94–110.

154. Федотов, А.И. Математическая модель автомобиля для диагностирования его тяговых качеств / А.И. Федотов, А.В. Пелихов, А.Г. Кондратюков // Механизация сельхоз производства в начале XXI века : сб. науч. тр. – Новосибирск, 2001.

155. Федотов, А.И. Математическая модель большегрузного автопоезда для определения параметров пневматического тормозного привода автотранспортного средства / А.И. Федотов, А.В. Быков // Материалы региональной научно-методической конференции БГУ. – Улан-Удэ, 2000. – С. 65–68.

156. Федотов, А.И. Методика нормирования параметров разгона и выбега автомобиля с целью диагностирования тяговых качеств / А.И. Федотов, А.В. Пелихов // Материалы всероссийской научно-технической конференции ВСГТУ. – Улан-Удэ, 2003. – С. 90–94.

157. Федотов, А.И. О скоростных и силовых потерях в шинах ведущих колес АТС при их диагностировании на стендах с беговыми барабанами / А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.С. Чернышков // Энергоэффективность

автотранспортных средств: нанотехнологии, информационно-коммуникационные системы, альтернативные источники энергии : мат-лы Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием, Воронеж, 4–7 июня 2019 г. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2019. – С. 234–240.

158. 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.

159. Федотов, А.И. Обоснование конструкции стенда для контроля эффективности торможения автомобилей с АБС / А.И. Федотов, Е.М. Портнягин // Технические науки, технологии и экономика : мат-лы межрегион. науч.-практ. конф. – Чита : Изд-во ЧитГТУ, 2002. – Ч. IV. – С. 115–127.

160. Федотов, А.И. Основы теории эксплуатационных свойств автомобилей : учебник для аспирантов вузов / А.И. Федотов ; Иркутский национальный исследовательский технический университет. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2016. – 254 с.

161. Федотов, А.И. Повышение эффективности работы антиблокировочных систем при колебаниях нормальной нагрузки : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / Федотов Александр Иванович. – М., 1986. – 185 с.

162. Федотов, А.И. Проверка адекватности математической модели / А.И. Федотов, А.В. Быков // Актуальные проблемы АПК : мат-лы регион. науч.-практ. конф. – Иркутск : Изд-во ИрГСХА, 2002. – С. 87–88.

163. Федотов, А.И. Результаты процесса торможения автопоезда с пневматическим тормозным приводом в составе автомобиля КамАЗ-5320 и прицепа ГKB-8350 / А.И. Федотов, А.В. Быков, И.М. Григорьев //

Актуальные проблемы механизации сельского хозяйства : сб. науч. тр. регион. науч.-практ. конф. – Иркутск : Изд-во ИрГСХА, 2002. – С. 65–70.

164. Федотов, А.И. Устройство для оценки эффективности тормозов грузовых автомобилей марки ЗиЛ / А.И. Федотов, П.И. Русин // Информационный листок № 51-88. – Улан-Удэ : Бурятский ЦНТИ, 1988. – 4 с.

165. Федотов, А.И. Экспериментальное исследование динамических характеристик процесса торможения автопоезда / А.И. Федотов, А.В. Быков // Повышение качества и надежности транспортных и технологических машин : межвузовский сб. научн. тр. – Хабаровск : Изд-во ХГТУ, 2001. – С. 72–78.

166. Филькин, Н.М. Оптимизация параметров конструкции энергосиловой установки транспортной машины : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / Филькин Николай Михайлович. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2001. – 430 с.

167. Халилов, В.Р. Динамика классических систем : учебник для вузов / В.Р. Халилов, Г.А. Чижов. – М. : Изд-во МГУ, 1993. – 347 с.

168. Харазов, А.М. Диагностирование и эффективность эксплуатации автомобилей : учеб. пособие для СПТУ / А.М. Харазов. – М. : Высш. шк., 1986. – 63 с.

169. Харазов, А.М. Диагностирование и эффективность эксплуатации автомобилей : учеб. пособие для СПТУ / А.М. Харазов. – М. : Высш. шк., 1986. – С. 23–24.

170. Харазов, А.М. Диагностирование легковых автомобилей на станциях технического обслуживания / А.М. Харазов, Е.И. Кривенко. – М. : Высш. шк., 1982. – 272 с.

171. Харазов, А.М. Диагностическое обеспечение технического обслуживания и ремонта автомобилей : справ. пособие / А.М. Харазов. – М. : Высш. шк., 1990. – 208 с.

172. Харазов, А.М. Методы оптимизации в технической диагностике

машин / А.М. Харазов, С.Ф. Цвид. – М. : Машиностроение, 1983. – 132 с.

173. Харазов, А.М. Метрологическое обеспечение оборудования для диагностики автомобилей / А.М. Харазов, Л.И. Еремин, А.Г. Сергеев // Совершенствование технологии и оборудования для технического обслуживания автомобилей : мат-лы междунар. выставки «Авторемонт-78». – М., 1979. – 56 с.

174. Харазов, А.М. Оборудование и материалы для технического обслуживания и ремонта автомобилей / А.М. Харазов, Л.И. Еремин // Совершенствование технологии и оборудования для технического обслуживания автомобилей : мат-лы междунар. выставки «Авторемонт-78». – М., 1979. – 56 с.

175. Харазов, А.М. Современные средства диагностирования тягово-экономических показателей / А.М. Харазов. – М. : Наука, 1985.

176. Чернышков, А.С. Повышение качества контроля тягово-динамических свойств электромобилей на стендах с беговыми барабанами / А.С. Чернышков // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : сб. науч. тр., посвященный 85-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, по материалам 79-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 26–27 января 2021 г. – М. : Изд-во МАДИ, 2021. – С. 196–202.

177. Чернышков, А.С. Математическое моделирование процесса функционирования электромобиля 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 : сб. науч. тр. по материалам 80-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 25–26 января 2022 г. / под общей ред. А.А. Солнцева. – М. : Изд-во МАДИ, 2022. – С. 89–97.

178. Чернышков, А.С. Экспериментальное исследование метрологических характеристик магнитострикционных датчиков при изменении их конструктивных параметров / А.С. Чернышков, О.С. Яньков, Г.А. Безносков // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации : мат-лы 106-й Междунар. науч.-техн. конф., Иркутск, 23–26 апреля 2019 г. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2019. – С. 514–524.

179. Чудаков, Е.А. Динамические и экономические испытания автомобилей : учеб. пособие для автомобильных вузов / Е.А. Чудаков. – М.-Свердловск : Машгиз, 1944. – 132 с.

180. Чудаков, Е.А. Избранные труды / Е.А. Чудаков. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 463 с.

181. Чудаков, Е.А. Теория автомобиля / Е.А. Чудаков. – М. : Машгиз, 1950. – 344 с.

182. Экономическая эффективность новой техники и технологии в машиностроении / Под общ. ред. К.М. Великанова. – Л. : Машиностроение, 1981. – 56 с.

183. Яньков, О.С. Колесные транспортные средства с электрическим и гибридным приводом : учеб. пособие. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2022. – 246 с.

184. Яньков, О.С. Математическая модель взаимодействия колеса с опорной поверхностью роликов диагностического стенда в среде «Универсальный Механизм» / О.С. Яньков, А.С. Чернышков, П.А. Киселев [и др.] // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации : мат-лы 110-й Междунар. науч.-техн. конф., Иркутск, 02–04 июня 2021 г. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2021. – Т. 1. – С. 119–132.

185. Яньков, О.С. Математическая модель силовой установки электромобиля / О.С. Яньков, А.С. Чернышков // Грузовик. – 2022. – № 9. – С. 15–21.

186. Яньков, О.С. Совершенствование конструкции силоизмерительного магнитострикционного датчика тормозного стенда / О.С. Яньков, А.С. Чернышков // Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация : II Всерос. научно-практ. конф., Чита, 30–31 октября 2018 г. – Чита : Забайкальский государственный университет, 2018. – С. 53–59.

187. A novel intelligent method for fault diagnosis of electric vehicle battery system based on wavelet neural network / L. Yao [et al.] // Journal of Power Sources. – 2020. – Vol. 453.

188. ABS/ASR «D» – Антиблокировочная система для грузовых автомобилей и автобусов. – М. : Идеалстандарт ; WABCO, 1999. – 49 с.

189. Cartec – оборудование для автосервиса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cartec.ru> (дата обращения: 14.12.2020).

190. Dynamometer test of a rule-based discharge strategy for plug-in hybrid electric vehicles / V. Larsson [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, Iss. 11. – Pp. 141–146.

191. Ejsmont, J. Engineering method of tire rolling resistance evaluation / J. Ejsmont, W. Owczarzak // Measurement. – 2019. – Vol. 145. – Pp. 144–149.

192. 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, ICI2AE 2019, Irkutsk, 27 may 2019. – 2019. – Vol. 632. – P. 012025.

193. Experimental verification of small diameter rollers utilization in construction of roller test stand in evaluation of energy loss due to rolling resistance / M. Pexa [et al.] // Measurement. – 2020. – Vol. 152.

194. Fedotov, A. Circulation of Power During Braking of Tyre of Vehicle Wheel On Support Rollers of the Diagnostic Stand / A. Fedotov, S. Krivtsov, O. Yankov // *Advances in Engineering Research : International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018)*. – 2018. – Vol. 158. – Pp. 147–151.

195. Fedotov, A. Mathematical model of an electric car to diagnose its traction qualities on a chassis dynamometer / A. Fedotov, O. Yan'kov, A. Chernyshkov // *The VII International Scientific and Practical Conference: Information Technologies and Management of Transport Systems, ITMTS 2021, MATEC Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 341, 2021.

196. 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 oct. 2019. – 2020. – Vol. 157. – Khabarovsk : EDP Sciences, 2020. – P. 01021*.

197. Fiala E. Seitenkräfte am rollenden Luftreifen / E. Fiala // *VDI Zeitschrift*. – 1954. – Vol. 96. – S. 973–979.

198. Kiencke U., Daiss A. Estimation of Tyre Friction for Enhanced ABS-Systems: In *Proceedings of the AVEG'94*, 1994.

199. LGraph2. Руководство пользователя. – М., 2007. – 33 с.

200. Model based insulation fault diagnosis for lithium-ion battery pack in electric vehicles / Y. Wang [et al.] // *Measurement*. – 2019. – Vol. 131. – Pp. 443–451.

201. Model of Operation of Motor Vehicles Based on Monitoring of their Performance Characteristics / S. Vorobyov [et al.] // *Transportation Research Procedia*. – 2017. – Vol. 20. – Pp. 695–701.

202. Online multi-fault detection and diagnosis for battery packs in electric vehicles / Y. Kang [et al.] // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 259.

203. Pacejka, H.B. Some recent investigations into dynamics and frictional

behavior of pneumatic tires / H.B. Pacejka // *Physics of Tire traction: Theory and Experiment*. – N. Y.-L. : Springer, 1974. – Pp. 257–279.

204. Pacejka, H.B. *Tyre and Vehicle Dynamics* / H.B. Pacejka. – 3rd ed. – Elsevier : TU Delft, 2002. – 642 p.

205. Robust Fault Diagnosis of Sensor Faults in Power Converter used in Hybrid Electric Vehicle / I. Kleilat [et al.] // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51. – Pp. 326–331.

206. Volage fault diagnosis and prognosis of battery systems based on entropy and Z-score for electric vehicles / Z. Wang [et al.] // *Applied Energy*. – 2017. – Vol. 196. – Pp. 289–302.

207. 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. – Pp. 271–280.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021613529

**Расчёт параметров процесса функционирования
электромобиля при контроле его тягово-динамических
качеств на стенде с беговыми барабанами**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический
университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)* (RU)

Авторы: *Федотов Александр Иванович (RU), Яньков Олег
Сергеевич (RU), Чернышков Антон Сергеевич (RU)*



Заявка № 2021612484

Дата поступления 03 марта 2021 г.

Дата государственной регистрации

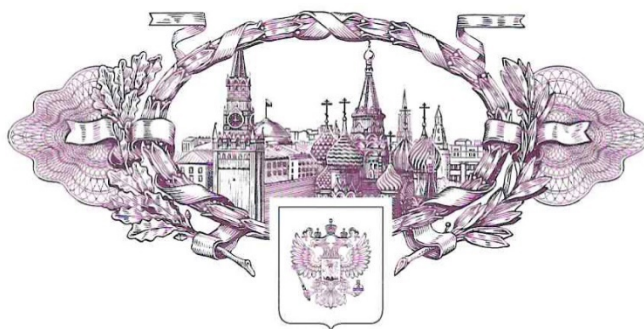
в Реестре программ для ЭВМ 10 марта 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFB5C00B1ACE59A40A2F08092E9A118
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 199093

**Гибридный универсальный полноопорный стенд для
контроля технического состояния колесных транспортных
средств**

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Иркутский национальный исследовательский технический
университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU)**

Авторы: **Федотов Александр Иванович (RU), Яньков Олег
Сергеевич (RU), Чернышков Антон Сергеевич (RU)**

Заявка № 2020111732

Приоритет полезной модели 23 марта 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 13 августа 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 23 марта 2030 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 198516

БЕСКОНТАКТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЛЯ СИЛОВОГО
ТОРМОЗНОГО РОЛИКОВОГО СТЕНДА

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
"Фритрейн" (RU)*

Авторы: *Федотов Александр Иванович (RU), Яньков Олег
Сергеевич (RU), Чернышков Антон Сергеевич (RU), Кузнецов
Николай Юрьевич (RU), Безносков Геннадий Анатольевич
(RU)*

Заявка № 2020113148

Приоритет полезной модели 25 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 14 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 26 марта 2030 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 213401

Стенд контроля технического состояния колесных транспортных средств с обгонной муфтой

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU)*

Авторы: *Федотов Александр Иванович (RU), Яньков Олег Сергеевич (RU), Холманских Максим Викторович (RU), Чернышков Антон Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022106787

Приоритет полезной модели 16 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 09 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 16 марта 2032 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 215729

**Гибридный стенд с планетарным балансирным
редуктором для контроля технического состояния
колесных транспортных средств**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Иркутский национальный исследовательский технический
университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ") (RU)*

Авторы: *Федотов Александр Иванович (RU), Яньков Олег
Сергеевич (RU), Чернышков Антон Сергеевич (RU), Кисилёв
Павел Алексеевич (RU)*

Заявка № 2022130297

Приоритет полезной модели 23 ноября 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 23 декабря 2022 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 23 ноября 2032 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14c40f0a94e6bd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 2.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



Исходные данные для расчета в математической модели

Параметр	Обозначение идентификатора	Единица измерения	Значение
Максимальная мощность ЭД	N_{e_max}	кВт	80
Максимальный крутящий момент на роторе ЭД	M_{e_max}	Нм	280
Максимальная частота вращения ротора ЭД	n_{e_max}	об/мин	10 200
Максимальный ток потребления ЭД	I_{ed_max}	А	400
Сопротивление обмотки ЭД	r_{s_ed}	Ом	0,001
Потокосцепление ЭД	ψ_{ed}	Вб	0,35
Количество пар полюсов ЭД	z_{ed}	шт	4
Сопротивление высоковольтной цепи	r_{e_ed}	Ом	0,0015
Индуктивность фазы ЭД	L_{ed}	Гн	0,0007
Единичная форма ЭДС ЭД	E_{ed}	–	1
Начальное напряжение ТВБ	U_{0_tvb}	В	360
Емкость ТВБ	Q_{tvb}	Ач	75
Экспоненциальное напряжение ТВБ	A_{tvb}	В	0,26422
Экспоненциальная емкость ТВБ	B_{tvb}	Ач	26,5487
Внутренне сопротивление ТВБ	R_{tvb}	Ом	0,0125
Постоянная поляризации ТВБ	K_{tvb}	В/Ач	0,0076
Жесткость шины	$c_{ш}$	Н/м	220 000
Коэффициент демпфирования шины	$d_{ш}$	Н·м·с/рад	815

Жесткость упругих элементов подвески	$c_{\text{п}}$	Н/м	650 000
Коэффициент демпфирования подвески	$d_{\text{п}}$	Н·м·с/рад	1130
Радиус бегового барабана	r_{bb}	м	0,105
Длина бегового барабана	l_{bb}	м	0,8
Расстояние между осями беговых барабанов	a_w	м	0,4
Максимальный коэффициент сцепления	φ_{max}	—	0,615
Коэффициент жесткости продольного проскальзывания	η	—	21
Коэффициент снижения фрикционных свойств шины в блоке	f_b	—	0,489
Свободный радиус колеса	r_s	м	0,305
Жесткость ограничительных стяжек	$c_{\text{ог}}$	Н/м	5 620 000
Коэффициент демпфирования ограничительных стяжек	$d_{\text{ог}}$	Н·м·с/рад	4800
Диссипация трансмиссии АЭСП	$d_{\text{тр}}$	Н·м·с/рад	0,01
Колея АЭСП	K_A	м	1,58
Колесная база АЭСП	B_A	м	2,57
Коэффициент сопротивления качению	f_0	—	0,018
Посадочный диаметр шины	$d_{\text{ш}}$	Дюйм	16
Ширина профиля шины	$b_{\text{ш}}$	м	205
Высота профиля шины	$h_{\text{ш}}$	%	60
Жесткость цепных передач стенда	$c_{\text{ц}}$	Н/м	$1 \cdot 10^9$
Коэффициент демпфирования цепных передач стенда	$d_{\text{ц}}$	—	3,25
Передаточное число трансмиссии АЭСП	$U_{\text{тр}}$	—	8,209



«Утверждаю»

Ректор ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

М.В. Корняков

о внедрении в учебный процесс кафедры «Автомобильный транспорт» института Авиамашиностроения и транспорта ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» результатов диссертационной работы Чернышкова Антона Сергеевича, выполненной на тему «Контроль технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами»

Комиссия в составе проректора по учебной работе ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» Смирнова В.В., директора института Авиамашиностроения и транспорта, профессора Пашкова А.Е., заместителя заведующего кафедрой «Автомобильный транспорт», доцента Колчина В.С. составили настоящий акт о внедрении и использовании теоретических материалов диссертационной работы Чернышкова А.С., в том числе методики контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами.

Методика позволяет выполнять диагностику и количественный контроль технического состояния агрегатов электрического силового привода при функционировании автомобилей на стендах с беговыми барабанами, что способствует повышению информативности и оперативности контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей, в процессе обучения во время лекционных и практических занятий по дисциплинам «Техническая диагностика колесных транспортных средств», «Основы теории силовых установок колесных транспортных средств», «Электрические и электронные системы колесных транспортных средств», «Колесные транспортные средства с электрическим и гибридным приводом», при подготовке студентов по направлению 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» института Авиамашиностроения и транспорта ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО ИРНИТУ

В.В. Смирнов

Директор института Авиамашиностроения
и транспорта, профессор

А.Е. Пашков

Заместитель заведующего кафедрой
«Автомобильный транспорт»

В.С. Колчин



«Утверждаю»

Генеральный директор
ООО «ФРИТРЕЙН»

Г.А. Безносков

«28» сентября 2023 г.

«Утверждаю»

Ректор ФГБОУ ВО ИРНИТУ,

М.В. Корняков

«12» октября 2023 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы аспиранта
кафедры «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный ис-
следовательский технический университет»
Чернышкова Антона Сергеевича

1. Наименование работы: Контроль технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами.
2. Наименования предприятия, где осуществляется внедрение: ООО «ФРИТРЕЙН».
3. Наименование организации, выполняющей научно-исследовательскую работу: ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, кафедра «Автомобильный транспорт».
4. Краткое описание работы: По итогам выполненной производственной проверки внедрена методика контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода на стенде с беговыми барабанами, основанная на выявленных зависимостях диагностических параметров от параметров технического состояния автомобилей с электрическими силовыми приводами, а также научно обоснованных тестовых режимах функционирования автомобилей с электрическими силовыми приводами на стендах с беговыми барабанами.
5. Заключение: Результаты диссертационной работы аспиранта Чернышкова Антона Сергеевича позволяют:
 - а. В процессе контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей снижать ошибки «пропуск отказа» на 29%, а ошибки «ложная тревога» на 17%;
 - б. Сокращать время пребывания автомобиля в СТО на 15-30% за счет сокращения времени контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей.

Технический директор
ООО «ФРИТРЕЙН»

М.В. Холманских

«28» сентября 2023 г.

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО ИРНИТУ,

А.М. Кононов

«11» октября 2023 г.



Общество с ограниченной ответственностью
ООО СТО Браво
 664005, г. Иркутск, ул. Дамбула 30А
 Телефон: +7(3952)63-00-00
 E-mail : stobravo@mail.ru
 Web : www.stobravo.ru



«Утверждаю»

Генеральный директор ООО «СТО БРАВО»

А.В. Лысенко

« 3 » октября 2023 г.



«Утверждаю»

Ректор ФГБОУ ВО ИРНИТУ

М.В. Корняков

« 5 » октября 2023 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы аспиранта
 кафедры «Автомобильный транспорт»
 ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический
 университет» Чернышкова Антона Сергеевича

1. Наименование работы: Контроль технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами.
2. Наименования предприятия, где осуществляется внедрение: ООО «СТО БРАВО», Иркутская область, 664005 г. Иркутск, ул. Дамбула, 30 «а».
3. Наименование организации, выполняющей научно-исследовательскую работу: ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, кафедра «Автомобильный транспорт», 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
4. Краткое описание работы: Результаты выполненной научно-исследовательской работы аспиранта ИРНИТУ Чернышкова А.С. прошли производственную проверку в ООО «СТО БРАВО». По её итогам внедрена методика контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода на стенде с беговыми барабанами;
5. Технико-экономические показатели, полученные от внедрения: Эффективность контроля технического состояния агрегатов силовых электрических установок автомобилей категории М1 в условиях СТО «БРАВО» показывает, что трудоемкость поиска неисправного агрегата с использованием разработанной методики на стенде с беговыми барабанами конструкции ИРНИТУ снижается на 13 – 20%, а время пребывания автомобиля в СТО сокращается на 12-32%.

Технический директор
 ООО «СТО БРАВО»

Рубцов А.И.

« 3 » октября 2023 г.

Проректор по научной
 работе ИРНИТУ

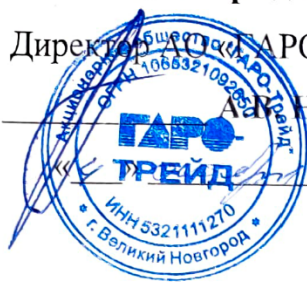
А.М. Кононов

« 5 » октября 2023 г.



«Утверждаю»

Директор АО «ГАРО - ТРЕЙД»



А.А. Николаёнок

2023 г.

«Утверждаю»

Ректор ФГБОУ ВО ИРНИТУ,



М.В. Корняков

« » 2023 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы аспиранта
кафедры «Автомобильный транспорт»
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический уни-
верситет» Чернышкова Антона Сергеевича

1. **Наименование работы:** Контроль технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами.
2. **Наименования предприятия, где осуществляется внедрение:** АО «ГАРО - ТРЕЙД», 173003, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 64.
3. **Наименование организации, выполняющей научно-исследовательскую работу:** ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, кафедра «Автомобильный транспорт», 664074 г. Иркутск, ул. Лермонтова 83.
4. **Краткое описание работы:** Результаты выполненной научно-исследовательской работы в виде методики контроля технического состояния агрегатов электрического силового привода на стенде с беговыми барабанами, прошли производственную проверку в АО «ГАРО-ТРЕЙД». По итогам выполненной производственной проверки внедрены:
 - а) Математическая модель, учитывающая процессы функционирования агрегатов силового электрического привода, динамические процессы в трансмиссии автомобиля и стенда, процессы взаимодействия эластичной шины с беговыми барабанами стенда, изменения технического состояния агрегатов и систем электрического силового привода автомобилей, используется при имитационном моделировании процессов диагностирования колесных транспортных средств с электрическими силовыми приводами на стендах с беговыми барабанами;
 - б) методика контроля технического состояния агрегатов электрическо-

го силового привода на стенде с беговыми барабанами рекомендована к внедрению.

Результаты научно-исследовательской работы аспиранта Чернышкова Антона Сергеевича позволяют значительно повышать эффективность разрабатываемых в АО «ГАРО-ТРЕЙД» методик и совершенствовать стендовые средства технического контроля агрегатов и систем колесных транспортных средств с электрическим силовым приводом.

Главный конструктор

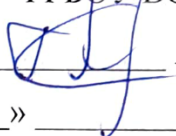
«ГАРО - ТРЕЙД»

 **Н.Ю. Брычин**

« 4 » 10 2023 г.

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО ИРНИТУ,

 **А.М. Кононов**

« ____ » ____ 2023 г.