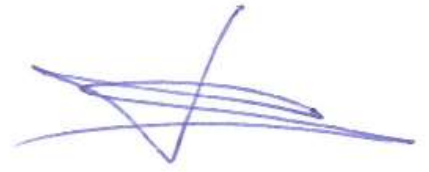


На правах рукописи



БОКАРЕВ Александр Игоревич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО
РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2018

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации - Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ)».

Научный руководитель

кандидат технических наук
Семикин Сергей Николаевич

Официальные оппоненты:

Овсянников Евгений Михайлович
д.т.н., профессор, профессор кафедры
«Электротехника», ФГБОУ ВО «Московский
политехнический университет»

Бузунов Николай Викторович
к.т.н., инженер Научно-исследовательского
института специального машиностроения,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)»

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический
университет (МАДИ)»**

Защита состоится «19» сентября 2018 г. в 14⁰⁰ часов
на заседании диссертационного совета Д 217.014.01 при ФГУП «НАМИ» по
адресу: 125438, г. Москва, Автомоторная ул., д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте
www.nami.ru по ссылке: <http://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью
организации, просим направлять по вышеуказанному адресу, ученому секретарю
диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru

Автореферат разослан «04» июня 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день автомобильный транспорт является одним из основных потребителей углеводородных источников энергии, что формирует общую проблему повышения эффективности силовых агрегатов автотранспортных средств.

Одним из трендов мирового автомобилестроения является применение комбинированных энергетических установок (КЭУ) с электрическими трансмиссиями. Наиболее распространенный тип электрической трансмиссии - индивидуальный регулируемый электропривод (ИРЭ) с электронным управлением через «CAN» интерфейс.

Тенденция использования ИРЭ заставляет решать задачи эффективной реализации электрической энергии. На данный момент уровень технического совершенства области электромашиностроения достиг высоких результатов, однако использование данных результатов в автомобилестроении является недостаточным. Максимальная эффективность может быть достигнута за счёт адаптации системы управления к условиям работы электропривода ведущих колес автотранспортных средств. Таким образом, становится актуальной задача индивидуального управления отдельными приводами колес в зависимости от дорожных условий движения.

Цель исследования - повышение эффективности индивидуального регулируемого электропривода за счёт построения оптимального алгоритма управления для условий эксплуатации автотранспортного средства в городском цикле на различном дорожном покрытии.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- проведение анализа исследований в области возможных технических решений повышения эффективности электрических трансмиссий автотранспортных средств, используемых при разработке алгоритмов и законов управления потоками мощности колес для автотранспортных средств с ИРЭ;
- разработка математической модели движения автотранспортного средства с ИРЭ по твердой опорной поверхности с описанием процессов в пятне контакта колеса;
- разработка математической модели алгоритма управления ИРЭ;
- разработка методики сравнительной объективной оценки эффективности электропривода автотранспортного средства;
- проведение сравнительных теоретических исследований эффективности алгоритмов управления крутящими моментами с использованием средств имитационного моделирования и комплекса разработанных математических моделей;
- разработка системы виртуально-физических испытаний, предусматривающей совместное использование комплекса разработанных математических моделей и стендового оборудования для испытания электромашин;
- проведение сравнительных виртуально-физических испытаний по анализу эффективности алгоритмов управления ИРЭ.

Объект исследования - двухконтурный индивидуальный регулируемый электропривод.

Методы исследования. Теоретический и экспериментальный, основанный на использовании основных положений теории автомобилей, методов математического моделирования и вычислительной математики. Теоретическое исследование проведено с использованием пакета «SIMULINK» программного комплекса

«MATLAB». Экспериментальное исследование проведено на универсальном испытательном стенде в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» для испытаний КЭУ с использованием системы виртуально-физических испытаний, которая предусматривает совместное использование комплекса математических моделей и стендовое оборудование для испытания электромашин. Степень достоверности результатов эксперимента обуславливается использованием тарированных, поверенных и аттестованных комплексов, измерительных приборов и оборудования.

Научная новизна диссертационной работы:

- разработан алгоритм работы противобуксовочной системы (ПБС) за счёт управления величиной тока двухконтурного ИРЭ для регулирования крутящих моментов на ведущих колесах без реактивного воздействия рабочей тормозной системы;

- разработана методика сравнительной оценки эффективности электропривода автотранспортного средства с использованием систем виртуально-физических испытаний;

- разработан типовой городской дорожный цикл в комбинации с вероятностным распределением типов дорожных покрытий для оценки эффективности алгоритмов управления ИРЭ автотранспортного средства.

Практическая ценность диссертационной работы:

- реализована система виртуально-физических испытаний, которая предусматривает совместное использование комплекса математических моделей и стендового оборудования ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» для испытания электромашин;

- реализовано экспериментальное исследование характеристик эффективности ИРЭ автотранспортного средства с использованием технологий программно-аппаратного моделирования «HILS» (hardware in the loop simulation);

- разработано отладочное программное обеспечение нагрузочных преобразователей и тяговых электроприводов для проведения калибровочных работ и контроля характеристик электроприводов в ходе испытаний.

На защиту выносятся:

- комплекс математических моделей для анализа эффективности алгоритмов управления электроприводом автотранспортного средства;

- математическая модель и структурная блок-схема алгоритма управления ИРЭ;

- методика сравнительной объективной оценки эффективности электропривода автотранспортного средства;

- система виртуально-физических испытаний, которая предусматривает совместное использование комплекса разработанных математических моделей и стендовое оборудование;

- результаты сравнительных теоретических исследований эффективности алгоритмов управления ИРЭ с использованием комплекса разработанных математических моделей и средств имитационного моделирования;

- результаты сравнительных виртуально-физических испытаний по анализу эффективности алгоритмов управления ИРЭ.

Реализация работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» и ОАО «КАМАЗ» при создании колесных машин, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушаны и обсуждены:

- на третьей научно-технической конференции «Технологическая платформа, экологически чистый транспорт, зеленый автомобиль» (Россия, г. Москва, 2014 г.);
- на 86-й международной научно-технической конференции АИИ «Конструктивная безопасность автотранспортных средств» (Россия, г. Дмитров, 2014 г.);
- на 89-й международной научно-технической конференции АИИ «Автомобилестроение России: новые вызовы» (Россия, г. Москва, 2015 г.);
- на финале II всероссийского конкурса молодых специалистов автомобильной отрасли «Форсайт авто» 2016 (Россия, г. Санкт-Петербург, 2016 г.);
- на IV международной заочной научно-практической конференции «Современные проблемы теории машин» (Россия, г. Новокузнецк, 2016 г.);
- на 95-й международной научно-технической конференции АИИ «Конструктивная безопасность АТС» (Россия, г. Дмитров, 2016 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ в научных журналах, сборниках и изданиях, из которых 4 - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав основного текста, общих выводов и рекомендаций, заключения и списка использованных источников. Объем диссертационной работы изложен на 158 страницах машинописного текста, включающих 90 рисунков, 18 таблиц и списка использованных источников из 106 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены и проанализированы мировой и отечественный опыт в области разработки КЭУ, электромобилей, ИРЭ, опыт в области повышения активной безопасности автотранспортных средств, которые определяют цель и основные задачи исследования. Большой вклад в развитие данных работ внесли отечественные и зарубежные исследователи, ученые, в том числе: Б.Н. Белоусов, С.Б. Шухман, М.С. Высоцкий, В.Г. Бутылин, В.В. Селифонов, А.А. Эйдинов, В.А. Горелов, С.В. Бахмутов, О.И. Гируцкий, В.Е. Ютт, Е.Е. Баулина, М.М. Жилейкин, В.А. Петрушов, В.Ф. Кутенев, Г.О. Котиев, В.А. Л.Л. Гинцбург, Е.М. Овсянников, В.А. Шинкаренко, А.В. Мирошниченко, А.В. Келлер, А.М. Сайкин, И.А. Фисенко, К.Е. Карпухин, И.А. Куликов, Jörnсен Reimpell, Manfred Burckhardt, Bert Breuer, Karlheinz H. Bill, Bernd Heißing, Stefan Gies, Metin Ersoy, Ahmet Okyay, Armin Arnold aus Pyrbaum, Daniel Wallner, Jakub Prokes, Magnus Rau, Marcel Revfi, Michael Unterreiner, Thomas Krüger, Ingo Weber и многие другие.

Обозначена проблема исследования - недостаточный опыт в области адаптации системы управления электропривода на эффективную реализацию энергии на ведущих колесах в условиях разного коэффициента сцепления шин с дорожным покрытием. При проектировании автотранспортных средств с индивидуальным приводом ведущих колес остро затрагиваются вопросы эффективной реализации энергии электроприводом и согласование потоков мощности контуров к ведущим колёсам. В рамках данной проблемы проведены следующие исследования:

- проведён анализ компоновочных схем автотранспортных средств с КЭУ и электромобилей;

- проведен анализ существующих подходов при разработке систем распределения потоков мощности по ведущим колёсам;
- проведён анализ технических решений повышения эффективности электроприводов;
- проведён анализ состояния вопроса теоретических и практических исследований в области разработки алгоритмов работы ПБС на автотранспортных средствах с ИРЭ. Наибольшей эффективностью и работоспособностью обладают алгоритмы управления электроприводом, построенные на регулировании непосредственно крутящих моментов, которые обладают наибольшим быстродействием в сочетании с векторной системой управления электромашиной по технологии прямого управления моментом.

На основании проведённой аналитической работы обоснован метод исследования, заключающийся в использовании виртуально-физических систем, обозначен объект исследования, составлена цель диссертационного исследования и в соответствии с целью работы определен перечень основных задач исследования. Объектом исследования является физическая часть виртуально-физической системы - двухконтурный ИРЭ. В качестве электромашин двухконтурного ИРЭ обоснованно выбраны синхронные электромашины с постоянными магнитами «YASA-400» по следующим причинам:

- наличие векторной системы управления по типу управления непосредственно крутящими моментами, обладающей максимальным быстродействием среди всех систем управления электромашинами;
- высокая производительность (номинальный крутящий момент 220 [Н·м]; максимальная мощность 150 [кВт]; максимальная частота вращения 7500 [об/мин]) при малой массе электромашины 22 [кг] и минимальных габаритах 280x75 [мм];
- электромашины «YASA-400» разрабатывались для сферы автомобилестроения, рекомендованы производителем «YASA motors» для применения на классах автотранспортных средств В и D в соответствии с классификацией по Европейской Конвенции и используются на электромобилях «eO PP100», «Illini Formula Electric», «Jaguar C-X75», «Koenigsegg Regera», «Lola Le Mans Prototype» и другие.

Во второй главе для исследования эффективности алгоритмов управления электроприводом на основании анализа применимости выбранного электропривода к классам и категориям автотранспортных средств, принято решение использовать в качестве виртуальной части виртуально-физической системы следующие массово-габаритные параметры автотранспортного средства: полная масса составляет 2170 [кг] при распределении веса между передней и задней осями 51/49 %, привод - передний, размерность шин 225/45R18, передаточное число редуктора между электромашиной и колесом 7,4.

В соответствии с выбранными параметрами виртуального автотранспортного средства, поставленными задачами исследования и общими принципами построения математических моделей разработана математическая модель движения автотранспортного средства с тремя степенями свободы с приводом на передние колеса (см. рисунок 1).

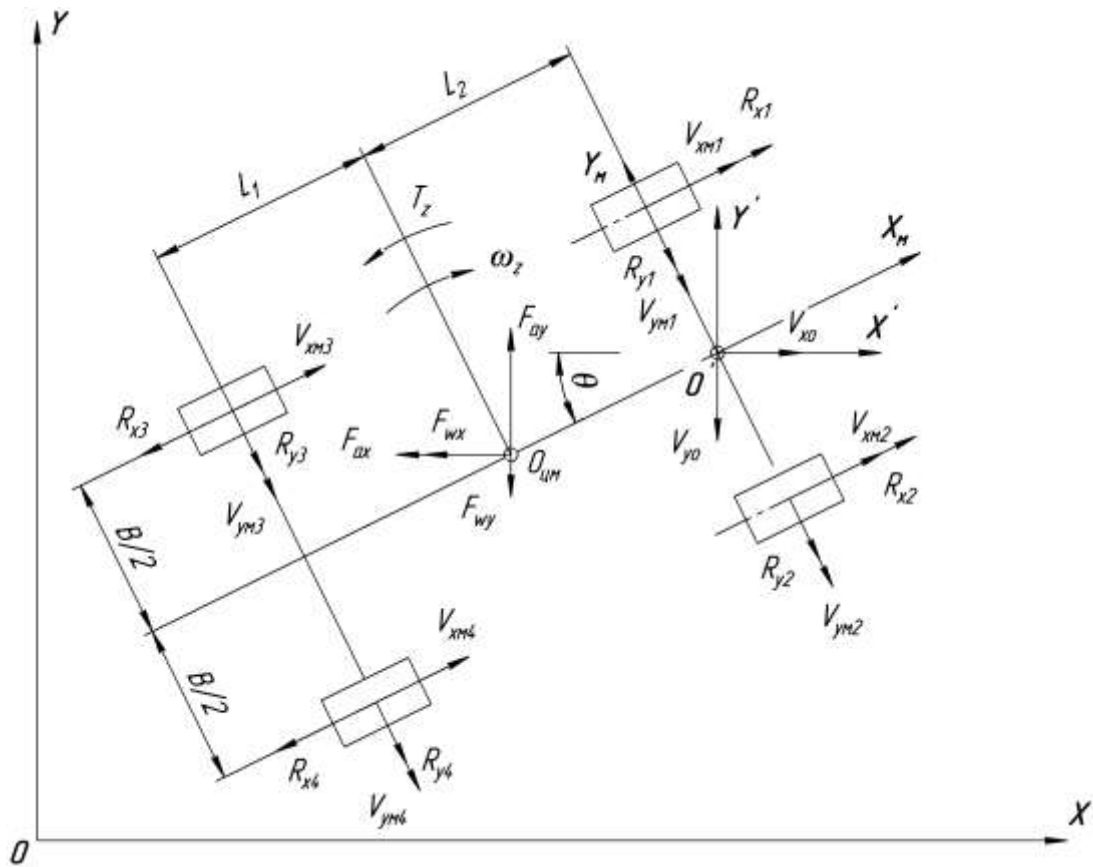


Рисунок 1 - Расчётная схема математической модели движения автотранспортного средства с тремя степенями свободы (привод колес - передний)

Система уравнений динамики движения корпуса автотранспортного средства согласно расчётной схеме, приведённой на рисунке 1, следующая:

$$\begin{aligned}
 \frac{G_a}{g} \cdot \ddot{x}_{O'} &= (R_{x1} + R_{x2} - R_{x3} - R_{x4}) \cdot \cos(\theta) + (R_{y1} + R_{y2} + R_{y3} + \\
 &+ R_{y4}) \cdot \sin(\theta) - F_{ax} - F_{wx}, \\
 \frac{G_a}{g} \cdot \ddot{y}_{O'} &= -(R_{x1} + R_{x2} - R_{x3} - R_{x4}) \cdot \sin(\theta) - (-R_{y1} - R_{y2} - \\
 &- R_{y3} - R_{y4}) \cdot \cos(\theta) - F_{ay} + F_{wy}, \\
 J_{O'M} \cdot \ddot{\theta} &= (R_{x1} - R_{x2} - R_{x3} + R_{x4}) \cdot \frac{B}{2} + (-R_{y3} - R_{y4}) \cdot (L_1 + L_2) + \\
 &+ ((F_{ax} + F_{wx}) \cdot \sin(\theta) + (F_{ay} - F_{wy}) \cdot \cos(\theta)) \cdot L_2, \\
 J_{O'M} &= J_{zO_{цм}} + \frac{G_a}{g} \cdot L_2^2,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где: $x_{O'}$ и $y_{O'}$ - координаты точки O' , прикреплённой к автотранспортному средству в неподвижных координатах, [м];

θ - координата угла поворота подвижной системы координат $X'O'Y_M$, жёстко связанной с автотранспортным средством, относительно неподвижной, [°];

$J_{O'M}$ - момент инерции автотранспортного средства вокруг вертикальной оси относительно т. O' , [кг · м²];

$J_{zO_{цм}}$ - момент инерции автотранспортного средства вокруг вертикальной оси относительно т. $O_{цм}$, центра масс автотранспортного средства, [кг · м²];

R_{xi} - проекции касательных реакций в пятне контакта i -го колеса на ось $X_m(Y_m)$ подвижной системы координат, [Н];

R_{yi} - проекции боковых реакций в пятне контакта i -го колеса на ось $X_m(Y_m)$ подвижной системы координат, [Н];

F_{ax} и F_{ay} - составляющие силы веса, действующие на автотранспортное средство при движении по косоугору, [Н];

F_{wx} и F_{wy} - составляющие силы аэродинамического сопротивления движению автотранспортного средства, [Н];

B - колея автотранспортного средства, [м];

L_1 и L_2 - координаты положения центра масс автотранспортного средства относительно базы автотранспортного средства, [м].

Математическая модель колесного движителя определяется блоком уравнений:

$$\begin{aligned} J_k \cdot \dot{\omega}_{k1} &= M_{k1} - R_{z1} \cdot r_{d1} \cdot (f_1 - \varphi_{x1}), \\ J_k \cdot \dot{\omega}_{k2} &= M_{k2} - R_{z2} \cdot r_{d2} \cdot (f_2 - \varphi_{x2}), \\ J_k \cdot \dot{\omega}_{k3} &= R_{x3} \cdot r_{d3} - R_{z3} \cdot f_2 \cdot r_{d3}, \\ J_k \cdot \dot{\omega}_{k4} &= R_{x4} \cdot r_{d4} - R_{z4} \cdot f_4 \cdot r_{d4}, \end{aligned} \quad (2)$$

где: J_k - момент инерции колес i -ой оси, [кг · м²];

M_{ki} - крутящий момент на колёсах i -ой оси, [Н · м];

R_{zi} - вертикальная реакция i -го колеса, [Н];

ω_{ki} - угловая скорость i -го колеса, [1/с];

r_{di} - динамический радиус i -го колеса, [м];

f_i - коэффициент сопротивления качению i -го колеса;

φ_{xi} - коэффициент сцепления в продольном направлении i -го колеса.

Разработанная математическая модель описывает поведение автотранспортного средства в динамике с учетом имитации ИРЭ управляемого различными способами. В частности, данная математическая модель используется для оценки эффективности алгоритмов управления ИРЭ, но также может использоваться для анализа систем курсовой устойчивости (СКУ), а также для решения достаточно широкого круга других задач в комплексе с моделями других математических блоков. На рисунке 2 представлена блок-схема математической модели, выполненной на электронно-вычислительной машине (ЭВМ) в пакете «SIMULINK» программного комплекса «MATLAB».

Описан общий принцип работы алгоритма управления электроприводом, который заключается в следующих положениях:

1) При движении автотранспортного средства в условиях малых сил сопротивления запрограммирован алгоритм выравнивания крутящих моментов по колёсам - «дорожный» режим;

2) При движении автотранспортного средства в условиях повышенных сил сопротивления запрограммирована функция принудительного включения алгоритма адаптивного асимметричного регулирования крутящих моментов по колёсам - «внедорожный» режим.

3) Поддержание предельного крутящего момента электромашин в условиях низкого коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием осуществляется за счёт алгоритма работы ПБС.

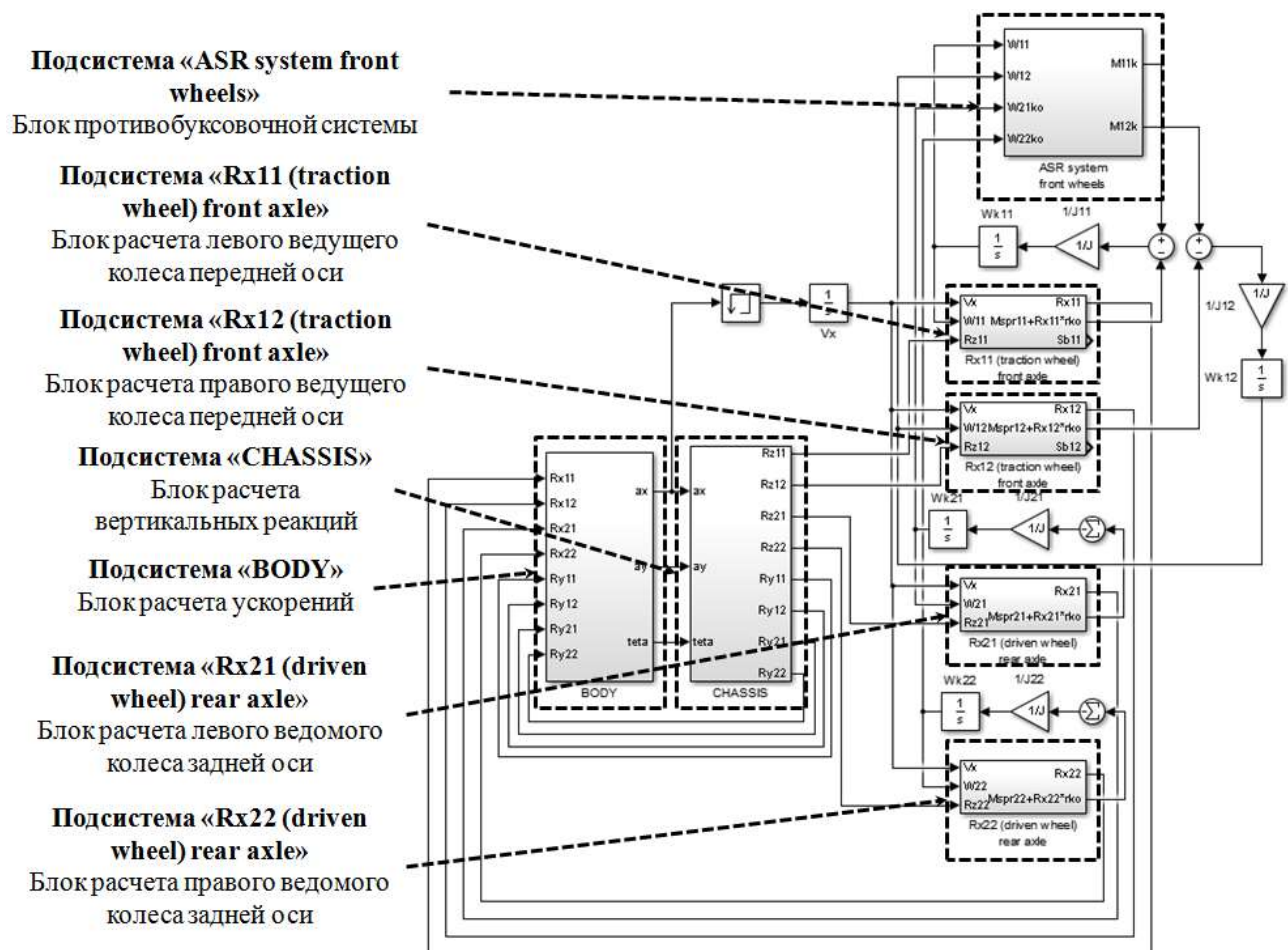


Рисунок 2 - Верхний уровень математической модели движения переднеприводного автотранспортного средства с тремя степенями свободы

Алгоритм работы ПБС построен по способу регулирования непосредственно крутящих моментов колес. Изменение управляющего тока электромашин «YASA-400» влияет на изменение крутящего момента на колесе и, наоборот, в случае режима чрезмерного проскальзывания колеса падение крутящего момента характеризуется падением управляющего тока электромашин в электрической цепи. Поэтому связь построена на регулировании крутящих моментов через управляющий ток в инверторах электромашин ИРЭ. Для объяснения алгоритма работы ПБС разработана структурная блок-схема - см. рисунок 3. Последовательность работы алгоритма следующая:

1) Шаг №1. Водитель задает управляющее воздействие с помощью педали акселератора, меняя угол «а» [°] - угол наклона педали. В зависимости от сигнала нажатия на педаль акселератора система управления может изменять мощность, потребляемую электроприводом, от 0 % до 100 %.

2) Шаг №2. Угол наклона педали «а» в свою очередь в системе управления задает входное воздействие на электронный блок управления электроприводом - изменение управляющего тока $I_{\text{зу}}(\text{ВЫХ})$ [А], регулирование которым приводит к регулированию крутящего момента электропривода.

3) Шаг №3. Для работы алгоритма входной сигнал в виде крутящего момента i -ой электромашин $M_{\text{э}i}$ и выходные сигналы в виде частот вращения i -ых ведущих ω_{ki} [1/с] и j -ых ведомых колес ω_{kj} [1/с] поступают в блок расчёта параметров X_i и Y_i . Параметр Y_i представляет собой отношение фактического крутящего момента i -ой электромашин $M_{\text{э}i}$ [Н·м] к номинальному значению крутящего момента

электромашины $M_{ном}$ [Н·м]. Параметр X_i представляет собой коэффициент буксования.

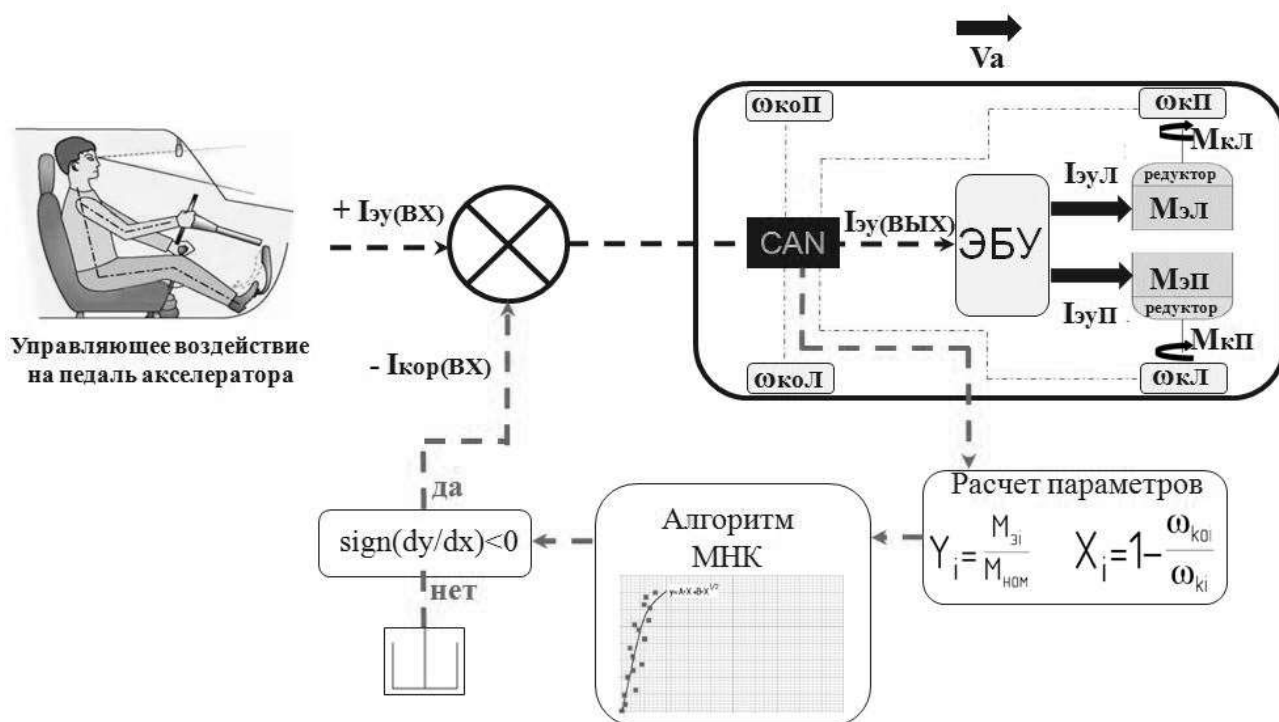


Рисунок 3 - Схема алгоритма работы ПБС

$I_{у(ВХ)}$ - значение управляющего тока на входе, [А]; $I_{у(ВЫХ)}$ - значение управляющего тока на выходе, [А]; $I_{кор(ВХ)}$ - корректирующее значение управляющего тока на входе, [А]; $I_{уЛ}$ - значение управляющего тока на правой и левой электромашинах соответственно, [А]; $\omega_{кoi}$ - частота вращения ведомых правых и левых колес соответственно, [1/с]; ω_{ki} - частота вращения ведущих правых и левых колес соответственно, [1/с]; M_{ki} - крутящий момент ведущих правых и левых колес соответственно, [Н·м]; $M_{эi}$ - крутящий момент правой и левой электромашин соответственно, [Н·м]; МНК - метод наименьших квадратов; ЭБУ - электронный блок управления

4) Шаг №4. Создается искусственная зависимость между параметрами Y_i и X_i с помощью метода наименьших квадратов (МНК) - проводится вычисление значений аппроксимирующей функции y_i на базе значений Y_i и X_i , полученных на предыдущем шаге. Искусственная зависимость параметров Y_i и X_i необходима для анализа и регулирования управляющего сигнала (ток в электрической цепи) на следующем шаге. В качестве шаблона аппроксимирующей функции выбрана функция $y = A \cdot x + B \cdot x^2$ (патент №EP0630786A1 компании «Siemens»), которая позволяет минимизировать ошибку F в сравнении с полиномными функциями. Коэффициенты A и B находятся путем решения системы уравнений, содержащую уравнения частных производных ошибки F по коэффициентам A и B и равенство этих уравнений 0. Качество регулирования определяется величиной ошибки F (принято $F \leq 0,001$).

5) Шаг №5. При приложении управляющего сигнала в определённый момент времени в зависимости от дорожных условий может произойти режим буксования колеса, который характеризуется вынужденным падением параметра Y_i (вследствие снижения крутящего момента на колесе) и резким увеличением параметра X_i (колесо начинает пробуксовывать - коэффициент буксования увеличивается) - наблюдается

перегиб аппроксимирующей функции. Граница между допустимым диапазоном изменения параметра алгоритма X_i (коэффициент буксования) и недопустимым определяет оптимальное значение, при котором можно реализовать предельное значение крутящего момента электромашины $M_{пред}$ для определенных дорожных условий. Для определения данной границы применяется условие $sign(dy/dx) < 0$ - анализ знака производной dy/dx . При положительном знаке перегиб функции отсутствует, а при отрицательном - произошёл перегиб. Если условие выполняется (колесо буксует), то система управления принимает значение управляющего тока электромашины с предыдущего шага $I_{эу}(i-1)$ за предельное значение $I_{эпред}$ для текущих дорожных условий. Данное управление позволяет поддерживать значение предельного крутящего момента $M_{пред}$ электромашины для определённых дорожных условий, в случае если водитель не снижает управляющее воздействие на педаль акселератора. Невыполнение условия $sign(dy/dx) < 0$ означает, что предел по сцеплению колеса с дорожным покрытием не достигнут, и значение коэффициента буксования находится в допустимом диапазоне.

Таким образом, алгоритм работы ПБС осуществляется через управление током в инверторах электромашин ИРЭ без реактивного воздействия рабочей тормозной системы, что является научной новизной диссертационной работы. Ниже приведена иллюстрация математической модели ПБС (см. рисунок 4) в виде подсистемы нижнего уровня, разработанная в пакете «SIMULINK» программного комплекса «MATLAB».

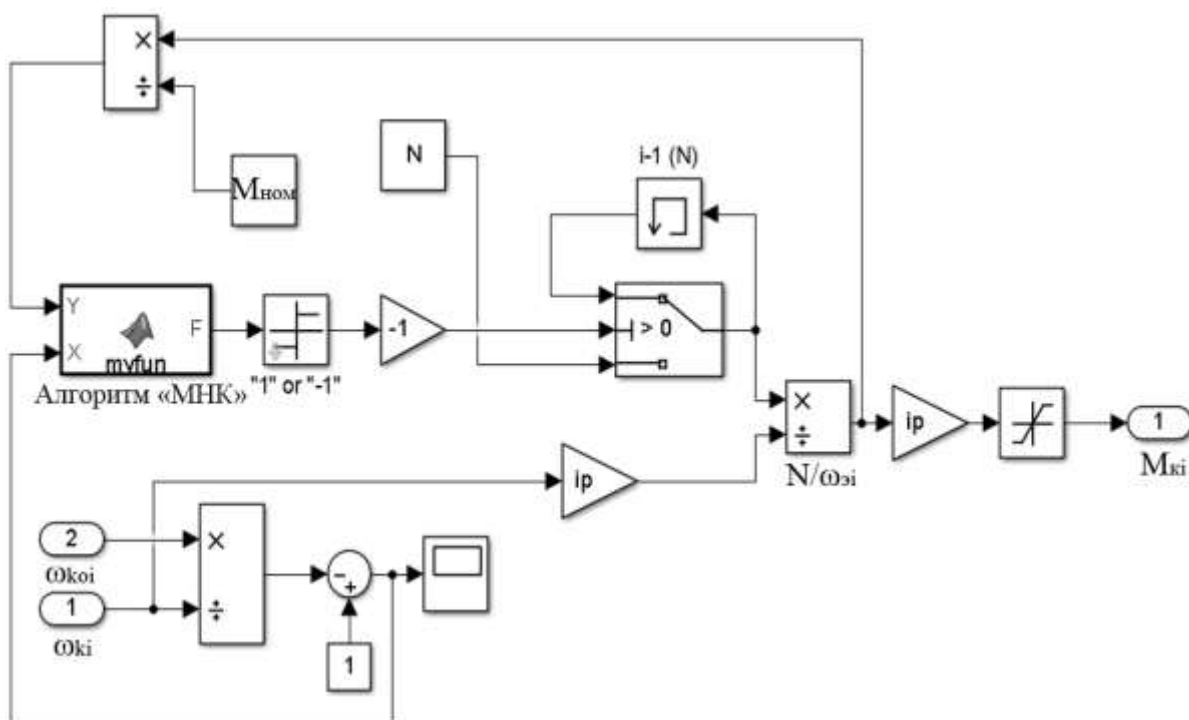


Рисунок 4 - Подсистема нижнего уровня, разработанная в пакете «SIMULINK» программного комплекса «MATLAB» (математическая модель алгоритма ПБС)

N – мощность электромашины, [Вт]; i_p – передаточное число колёсного редуктора

Для анализа эффективности алгоритмов управления ИРЭ разработана методика, которая позволяет протестировать систему автоматического регулирования и рассчитать критерии эффективности:

1) Разрабатывается режим движения автотранспортного средства, который должен максимально обеспечивать адекватность условий проведения численного

эксперимента с реальными условиями эксплуатации автотранспортного средства или придерживаться общепринятых типовых условий испытаний.

2) Проводится теоретический анализ алгоритмов управления ИРЭ в среде имитационного моделирования с использованием разработанного комплекса математических моделей автотранспортного средства и его агрегатов. Виртуальные испытания позволяют определить и отработать основные ошибки алгоритмов управления ИРЭ. Оценочным критерием эффективности алгоритма при проведении теоретического анализа является следующий показатель:

$\eta_{\Sigma k}$, % - суммарный средний КПД колеса в тяговом режиме за цикл:

$$\eta_{\Sigma ki} = \frac{M_{kCPi} - M_{fCPi}}{M_{kCPi}} \cdot \frac{\omega_{kOCPj}}{\omega_{kCPi}} = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{ki}) - \sum_{i=1}^n (M_{fi})}{\sum_{i=1}^n (M_{ki})} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (\omega_{kOj})}{\sum_{i=1}^n (\omega_{ki})}, \quad (3)$$

где: M_{fCPi} - i -ые моменты сопротивления в силовых контурах «п» (правый) и «л» (левый) соответственно, [Н·м];

ω_{ki} - i -ые частоты вращения в силовых контурах «п» (правый) и «л» (левый) соответственно приведенные к колесу, [1/с];

ω_{kOj} - j -ые частоты вращения ведомых колес, [1/с].

3) Разрабатывается виртуально-физическая система, которая предусматривает совместное использование комплекса разработанных математических моделей и оборудования, являющимся стендовым аналогом ИРЭ автотранспортного средства.

4) Проводятся виртуально-физические испытания алгоритмов управления ИРЭ. Оценочными критериями эффективности алгоритмов являются следующие показатели:

$\eta_{\Sigma k}$, % - суммарный средний КПД колеса в тяговом режиме за цикл (см. формулу 3);

$\eta_{\Sigma CPэл}$, % - суммарный средний КПД системы электроприводов в тяговом режиме за цикл:

$$\eta_{\Sigma CPэл} = \frac{N_{мехCPi}}{N_{элCPi}} = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{эмi} \cdot \omega_{эмi})}{\sum_{i=1}^n (U_{эмi} \cdot I_{эмi})}, \quad (4)$$

где: $N_{мехCPi}$ - средняя механическая мощность электропривода в силовых контурах правом «п» и левом «л» соответственно [Вт];

$N_{элCPi}$ - средняя электрическая мощность электропривода в силовых контурах правом «п» и левом «л» соответственно [Вт];

$M_{эмi}$ - i -ые крутящие моменты в силовых контурах правом «п» и левом «л» соответственно, [Н·м];

$\omega_{эмi}$ - i -ые частоты вращения в силовых контурах правом «п» и левом «л» соответственно, [1/с];

$U_{эмi}$ - напряжение в электрической цепи электромашин в контурах правом «п» и левом «л» соответственно, [В];

$I_{эмi}$ - токи в электрической цепи электромашин в силовых контурах правом «п» и левом «л» соответственно, [А].

$\eta_{\Sigma общий}$, % - общий суммарный КПД системы в тяговом режиме за цикл:

$$\eta_{\Sigma общий} = \eta_{\Sigma ki} \cdot \eta_{\Sigma CPki} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где: $\eta_{\Sigma ki}$ - i -ый суммарный средний КПД колеса в тяговом режиме за цикл;

$\eta_{\Sigma CPki}$ - i -ый суммарный средний КПД системы электроприводов в тяговом режиме за цикл.

$E_{\Sigma CP}$ - затраты электрической энергии в тяговом режиме за цикл, [кВт·ч]:

$$E_{\Sigma CP} = E_{\Sigma CP} = \left(\sum_{i=1}^n (I_{\Delta Mi} \cdot U_{\Delta Mi}) \right) \cdot t_{\text{ц}}/n, \quad (6)$$

где: $I_{\Delta Mi}$ - ток в i -ой электрической цепи электромашин в контурах в контурах правом «П» и левом «Л» соответственно, [А];

$U_{\Delta Mi}$ - напряжение в i -ой электрической цепи электромашин в контурах в контурах правом «П» и левом «Л» соответственно, [В];

$t_{\text{ц}}$ - время цикла, [ч].

Разработанная методика может быть приспособлена и использована для оценки тяговой эффективности электрических трансмиссий, спроектированных по схемам как с индивидуальным регулированием подводимой мощности, так и с традиционным, и поэтому является научной новизной диссертационной работы.

В соответствии с методикой разработан режим движения автотранспортного средства - испытательный городской дорожный цикл в комбинации с вероятностным распределением типов дорожных покрытий (см. рисунок 5).

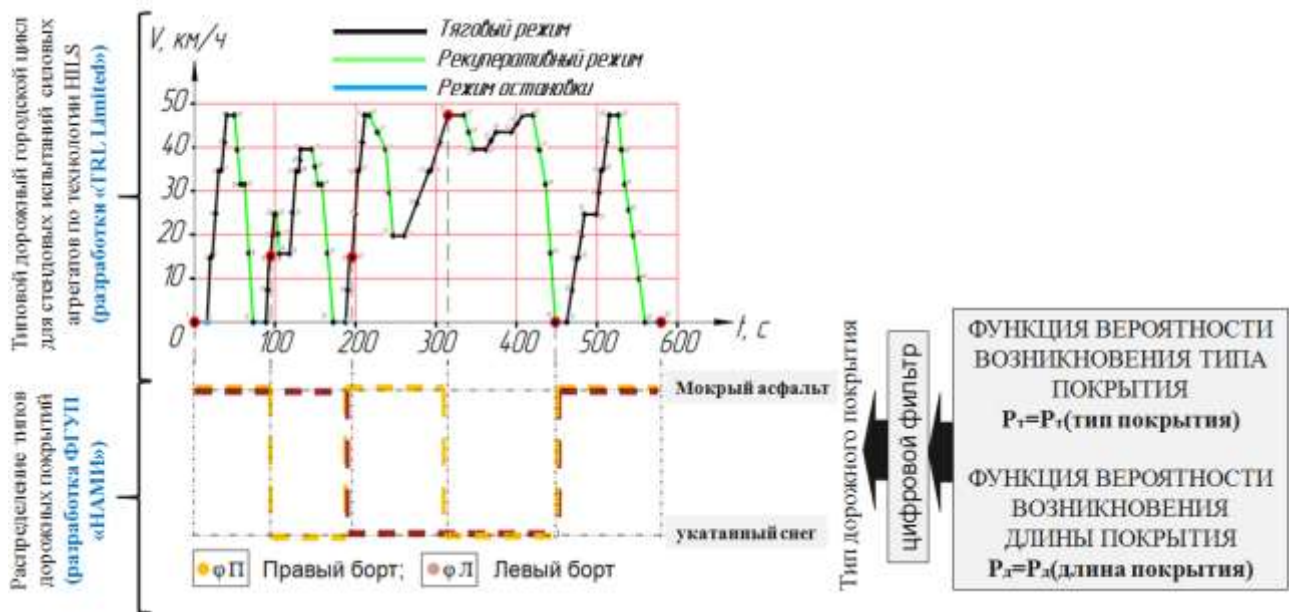


Рисунок 5 - График типового дорожного цикла «TRRL 1.1» в комбинации с вероятностным распределением типов дорожных покрытий

Тип дорожного цикла и статистические характеристики назначались на основании рекомендаций литературных источников в соответствии с выбранными параметрами модели автотранспортного средства и научно обоснованы в диссертационной работе. Разработанный режим движения является синтезом опытных статистических дорожных исследований лаборатории исследования транспорта «TRL limited» и вероятностного распределения типов дорожных покрытий («укатанный снег» и «лёд»), что в полной мере универсально описывает частный случай эксплуатации автотранспортного средства в городских условиях движения автомобильного потока на невысоких скоростях в условиях разного коэффициента сцепления шин с дорожным покрытием.

В третьей главе реализовано теоретическое исследование и описаны результаты виртуальных испытаний по оценке эффективности алгоритмов управления ИРЭ автотранспортного средства. В среде имитационного моделирования пакета «SIMULINK» программного комплекса «MATLAB» с помощью разработанного комплекса математических моделей реализованы и проанализированы следующие алгоритмы управления ИРЭ:

- способ управления №1 (СУ №1) - адаптивное регулирование крутящих моментов;
- способ управления №2 (СУ №2) - регулирование крутящих моментов по принципу работы свободный симметричный дифференциал (ССД);
- способ управления №3 (СУ №3) - регулирование крутящих моментов по принципу работы дифференциала повышенного трения (ДПТ) с постоянным трением (постоянный коэффициент блокировки 1,5);
- способ управления №4 (СУ №4) - регулирование крутящих моментов по принципу работы ДПТ с переменным трением (переменный коэффициент блокировки 1...1,5).
- способ управления №5 (СУ №5) - индивидуальное регулирование по сцепным свойствам.

Способы управления назначены на основании проведённого анализа алгоритмов и законов управления ИРЭ. Для каждого способа управления модель водителя обеспечивает регулирование мощности на уровне выше максимального предела по сцеплению для покрытия «укатанный снег». Оценочным критерием является суммарный средний КПД колеса в тяговом режиме за цикл, определяемый формулой 3.

Результаты виртуальных испытаний в виде суммарного среднего КПД колеса в тяговом режиме за цикл сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Результаты виртуальных испытаний

№ алгоритма	СУ №1	СУ №2	СУ №3	СУ №4	СУ №5
$\eta_{\Sigma k}$	0,96	0,79	0,90	0,90	0,85

Параметр прироста эффективности суммарного среднего КПД колеса в тяговом режиме за цикл для разработанного СУ №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов) определяется следующей формулой:

$$M\Phi_{cy\ №1} = \frac{(\eta_{\Sigma k\ СУ\ №1} - \eta_{\Sigma k\ СУ\ №i})}{\eta_{\Sigma k\ СУ\ №1}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где: $\eta_{\Sigma k\ СУ\ №1}$ - суммарный средний КПД колеса в тяговом режиме при регулировании крутящих моментов с использованием СУ №1;

$\eta_{\Sigma k\ СУ\ №i}$ - суммарный средний КПД колеса в тяговом режиме при регулировании крутящих моментов с использованием СУ №i.

Сравнительный анализ эффективности разработанного СУ №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов) в отношении суммарного среднего КПД колеса позволяет сделать вывод, что разработанный алгоритм управления ИРЭ повышает суммарный средний КПД колеса в тяговом режиме в диапазоне 6,2...17,7 % в сравнении с другими алгоритмами.

В четвёртой главе представлена разработанная система виртуально-физических испытаний с использованием технологий программно-аппаратного

моделирования «HILS» (hardware in the loop simulation). Согласно принципу создания виртуально-физических систем, описанному И.А. Куликовым, согласование нагрузочных режимов силовых агрегатов осуществляется общей для них математической моделью автотранспортного средства через механическую связь отдельных приводов колес и нагружающих устройств. Физическая часть виртуально-физической системы включает в себя испытательный стенд ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» для испытания электромашин, который является стендовым аналогом ИРЭ автотранспортного средства. Виртуальная часть виртуально-физической системы включает в себя разработанную математическую модель автотранспортного средства и модель водителя. Принципиальная архитектура системы виртуально-физических испытаний представлена на рисунке 6.

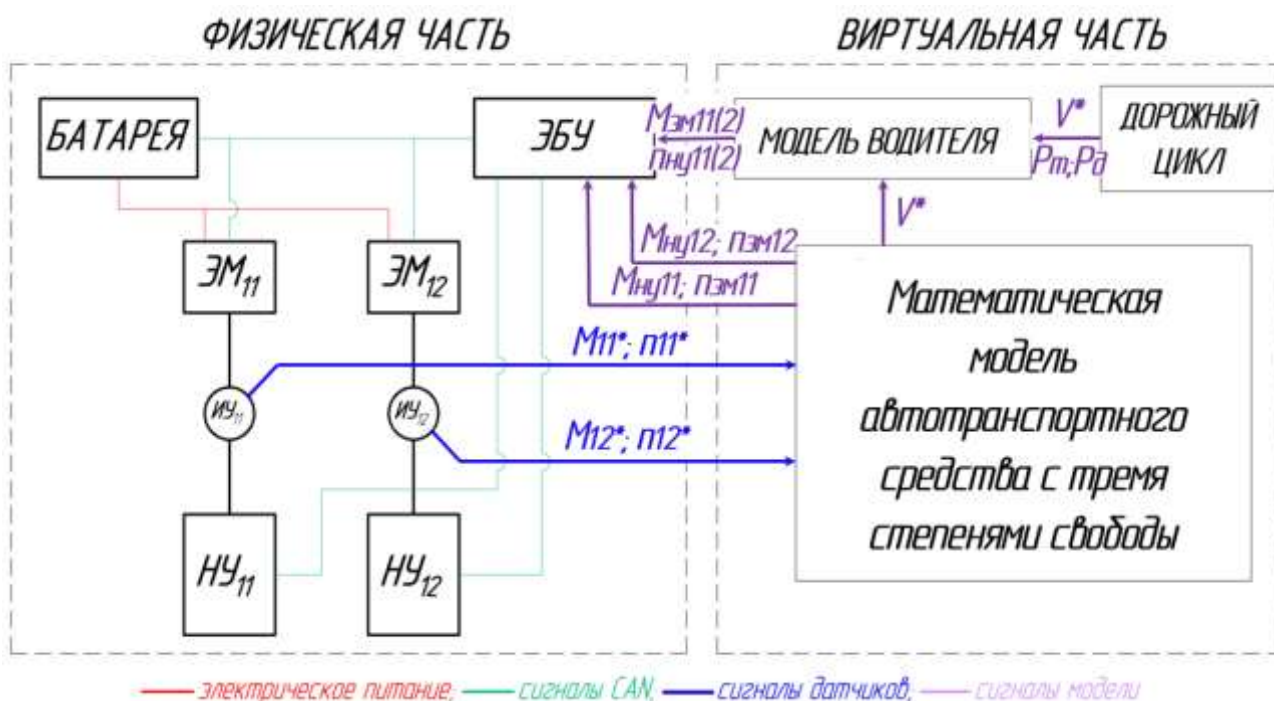
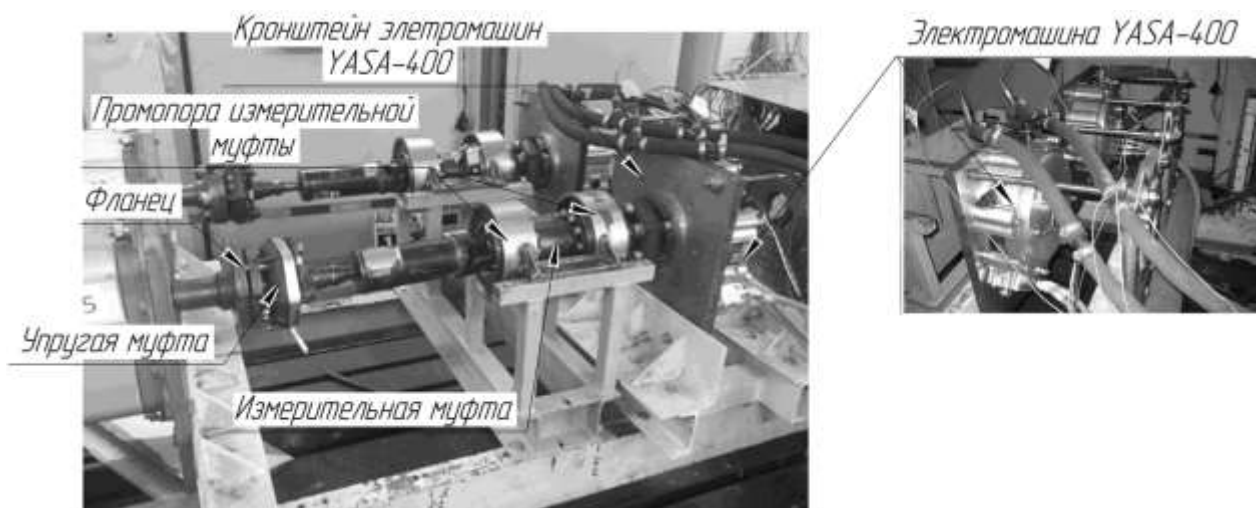


Рисунок 6 - Архитектура системы виртуально-физических испытаний
 НУ - нагружающее устройство; ИУ - измерительное устройство; ЭМ - электромашина; ЭБУ - электронный блок управления; М_{эм} - управляющий сигнал крутящего момента электромашин объекта исследования, [Н·м]; п_{эм} - управляющий сигнал частот вращения электромашин объекта исследования [1/с]; М_{ну} - управляющий сигнал крутящего момента нагружающих устройств [Н·м]; п_{ну} - управляющий сигнал частот вращения нагружающих устройств [1/с]; Р_т - тип покрытия; Р_д - длина покрытия, [м]

Стендовый аналог тягового привода ведущих колёс автотранспортного средства (см. рисунок 7) в соответствии с поставленными задачами разработан рабочей группой ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» в сотрудничестве с ОАО «КАМАЗ» при участии автора диссертации и использован для проведения эксперимента.



- а -



- б -

Рисунок 7 - Фотография испытательного стенда с установленными защитными элементами (а), фотография основных компонентов стенда (б)

Перечень измерительных параметров и датчиков:

- 1) $M_{кр}$, [Н·м] - крутящие моменты отдельных контуров (муфты М20С-500...1к).
- 2) $n_{дв}$, [об/мин] - частоты вращения отдельных контуров (импульсные бесконтактные датчики оборотов).
- 3) U_y , [В] - напряжения в электрической цепи (датчики «CV 3-2000»).
- 4) I_y , [А] - управляющие токи в электрической цепи (датчики «LTC 1000-SF/SP2»).
- 5) $T_{увх}$, [°С] - температуры электромашин на входе (термопары «ТХА-1199/41/2/80/3/12», «ТХА-1199/41/2/80/3/10» и «ТХА-1199/41/2/80/3/8»).
- 6) $T_{увх}$, [°С] - температуры электромашин на выходе (термопары «ТХА-1199/41/2/80/3/12», «ТХА-1199/41/2/80/3/10» и «ТХА-1199/41/2/80/3/8»).

Сигналы от всех датчиков поступают на многоканальную измерительно-анализирующую аппаратуру с программным обеспечением для измерения, регистрации и анализа данных. Дополнительно к указанной аппаратуре используется

комплекс «LabView» с программным обеспечением «SignalExpress» на базе «National Instruments».

В пятой главе проведены виртуально-физические испытания по анализу эффективности алгоритмов управления ИРЭ автотранспортного средства и описаны результаты, которые сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты расчёта оценочных критериев алгоритмов управления ИРЭ

№ алгоритма	СУ №1	СУ №2	СУ №3	СУ №4	СУ №5
$\eta_{\Sigma k}, \%$	95,95	78,69	89,60	89,54	84,37
$\eta_{\Sigma CP_{эл}}, \%$	68,48	60,83	61,10	66,57	57,98
$\eta_{\Sigma общий}, \%$	65,71	47,87	54,75	59,61	48,92
$E_{\Sigma CP}, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	99,66	107,28	107,01	101,56	110,12

Ниже приведен расчёт показателей, которые характеризуют сравнительную эффективность разработанного алгоритма СУ №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов):

1) $M\Phi_{cy, \text{№}1}, \%$ - параметр прироста эффективности суммарного среднего КПД колеса в тяговом режиме за цикл для разработанного СУ №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов) определяется формулой (7).

Вывод: разработанный СУ №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов) повышает суммарный средний КПД колеса в диапазоне 6,6...18,0 % в зависимости от алгоритма управления электроприводом.

2) $\mathcal{E}\Phi_{cy, \text{№}1}, \%$ - параметр прироста суммарного среднего КПД системы электроприводов в тяговом режиме за цикл для разработанного СУ №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов) определяется следующей формулой:

$$\mathcal{E}\Phi_{cy, \text{№}1} = \frac{(\eta_{\Sigma CP_{эл} \text{ СУ}\text{№}1} - \eta_{\Sigma CP_{эл} \text{ СУ}\text{№}i})}{\eta_{\Sigma CP_{эл} \text{ СУ}\text{№}i}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где: $\eta_{\Sigma CP_{эл} \text{ СУ}\text{№}1}$ - суммарный средний КПД электропривода в тяговом режиме при регулировании крутящих моментов с использованием СУ№1 (адаптивное регулирование крутящих моментов);

$\eta_{\Sigma CP_{эл} \text{ СУ}\text{№}i}$ - суммарный средний КПД электропривода в тяговом режиме при регулировании крутящих моментов с использованием СУ№i.

Вывод: разработанный СУ №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов) повышает суммарный средний КПД системы электроприводов в диапазоне 2,8...15,3 % в зависимости от алгоритма управления электроприводом. Сравнительный анализ затрат электрической энергии при работе электроприводов в тяговом режиме за цикл позволяет сделать вывод, что СУ №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов) снижает затраты электрической энергии в диапазоне 1,9...10,5 [кВт·ч] в зависимости от алгоритма управления электроприводом.

3) $O\Phi_{cy, \text{№}1}, \%$ - параметр прироста общего суммарного КПД системы в тяговом режиме за цикл для разработанного СУ №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов) определяется следующей формулой:

$$O\Phi_{cy, \text{№}1} = \frac{(\eta_{\Sigma общий \text{ СУ}\text{№}1} - \eta_{\Sigma общий \text{ СУ}\text{№}i})}{\eta_{\Sigma общий \text{ СУ}\text{№}1}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где: $\eta_{\Sigma\text{общий СУ}\#1}$ - общий суммарный КПД тяговой системы в тяговом режиме за цикл при регулировании крутящих моментов с использованием СУ№1 (адаптивное регулирование крутящих моментов).

$\eta_{\Sigma\text{общий СУ}\#i}$ - общий суммарный КПД системы в тяговом режиме за цикл при регулировании крутящих моментов с использованием СУ№i.

Вывод: разработанный СУ №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов) повышает общий КПД в диапазоне 9,3...27,1 % в зависимости от алгоритма управления электроприводом.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1) Проведён анализ исследований в области возможных технических решений повышения эффективности электропривода автотранспортного средства, применяемых при разработке алгоритмов и законов управления потоками мощности колес для автотранспортных средств с индивидуальным регулируемым электроприводом, который обосновывает наиболее значимое направление повышения эффективности электрических трансмиссий - адаптация алгоритма управления электроприводом на реализацию энергии на ведущих колёсах с минимальными потерями.

2) Для решения частной задачи по анализу алгоритмов управления индивидуальным регулируемым электроприводом разработан следующий комплекс математических моделей:

- математическая модель движения переднеприводного автотранспортного средства с тремя степенями свободы;

- математическая модель колёсного движителя, чтобы отразить процессы скольжения, буксования колеса и учета сцепных свойств эластичных колес.

3) Разработан алгоритм управления индивидуальным регулируемым электроприводом, который построен в соответствии со следующими положениями:

- при движении автотранспортного средства в условиях малых сил сопротивления запрограммирован режим выравнивания крутящих моментов по колёсам - «дорожный» режим;

- при движении автотранспортного средства в условиях повышенных сил сопротивления запрограммирована функция принудительного включения режима адаптивного асимметричного регулирования крутящих моментов по колёсам - «внедорожный» режим;

- поддержание предельного крутящего момента электромашин осуществляется за счёт алгоритма работы противобуксовочной системы. Реализация алгоритма работы противобуксовочной системы построена за счёт управления величиной тока двухконтурного индивидуального регулируемого электропривода для регулирования непосредственно крутящих моментов колёс без реактивного воздействия рабочей тормозной системы.

4) Разработана методика сравнительной объективной оценки эффективности электропривода автотранспортного средства с использованием систем виртуально-физических испытаний, которая рекомендуется для оценки электрических трансмиссий, спроектированных по схемам как с индивидуальным регулированием подводимой мощности, так и с традиционным.

5) Для оценки эффективности алгоритмов управления в условиях разного коэффициента сцепления шин с дорожным покрытием разработан частный режим

движения - типовой городской дорожный цикл в комбинации с вероятностным распределением типов дорожных покрытий.

6) Проведены виртуальные испытания по анализу эффективности алгоритмов управления индивидуальным регулируемым электроприводом с использованием разработанного частного режима движения автотранспортного средства. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что разработанный способ управления №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов) повышает суммарный средний коэффициент полезного действия колеса в диапазоне 6,2...17,7 %.

7) Для анализа эффективности алгоритмов управления индивидуальным регулируемым электроприводом разработана система виртуально-физических испытаний, предусматривающая использование технологий программно-аппаратного моделирования «HILS» (hardware in the loop simulation). Физическая часть виртуально-физической системы является стендовым аналогом индивидуального регулируемого электропривода автотранспортного средства, а виртуальная часть виртуально-физической системы содержит математическую модель автотранспортного средства и модель водителя.

8) Проведены виртуально-физические испытания по анализу эффективности алгоритмов управления индивидуальным регулируемым электроприводом с использованием разработанного частного режима движения виртуального автотранспортного средства и разработанной виртуально-физической системы.

9) Проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных значений крутящих моментов отдельных приводов правого и левого колес. Расхождение результатов теоретического и экспериментального исследования составило не более 5...10%.

10) Сравнительный анализ результатов испытаний позволяет сделать ряд основных выводов в пользу разработанного способа управления №1 (адаптивное регулирование крутящих моментов):

- суммарный средний коэффициент полезного действия колеса повышается в диапазоне 6,6...18,0 %;

- суммарный средний коэффициент полезного действия системы электроприводов повышается в диапазоне 2,8...15,3 %, а затраты электрической энергии при этом сокращаются в диапазоне 1,9...10,5 [кВт·ч] за цикл;

- общий коэффициент полезного действия системы повышается в диапазоне 9,3...27,1 %.

Результаты проведённого диссертационного исследования рекомендуются к использованию при разработке алгоритмов управления индивидуальным регулируемым электроприводом. Экспериментально доказано, что за счёт построения оптимального алгоритма управления с реализацией противобуксовочной системы для условий эксплуатации автотранспортного средства в городском цикле на различном дорожном покрытии обеспечиваются повышенные показатели эффективности индивидуального регулируемого электропривода.

11) Результаты диссертационной работы используются при создании колесных машин в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», ОАО «КАМАЗ» и подтверждаются соответствующими актами внедрения.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1) Бокарев А.И. Анализ устройств распределения мощности на автомобиле с комбинированной энергетической установкой с точки зрения энергетической эффективности» / А.И. Бокарев // Технология колесных и гусеничных машин, журнал №3, С. 50-55, 2014. **Издание входит в перечень ВАК.**

2) Бокарев А.И. Перспективы использования индивидуального регулируемого силового электропривода в системах активной безопасности / А.И. Бокарев // Журнал автомобильных инженеров, Журнал №7, С. 20-25, 2014. **Издание входит в перечень ВАК.**

3) Бокарев А.И. Применение технологии HILS в разработке энергоустановки гибридного автопоезда / И.А. Куликов, С.Н. Коркин, С.Н. Семикин, А.И. Бокарев // Труды НАМИ, Выпуск №257, С. 95-101, 2014. **Издание входит в перечень ВАК.**

4) Бокарев А.И. Универсальный исследовательский стенд для проведения испытаний комбинированных энергетических установок автомобилей / А.И. Бокарев, М.С. Денисенко, С.Н. Коркин, Д.В. Симоненков // Труды НАМИ, Выпуск №261, С. 173-184, 2015. **Издание входит в перечень ВАК.**

5) Бокарев А.И. Разработка математической модели контроллера ограничения проскальзывания ведущих колёс для использования на автомобиле с индивидуальным регулируемым силовым электроприводом колес передней оси / А.И. Бокарев // Материалы IV международной заочной научно-практической конференции «Современные проблемы теории машин», Выпуск №4(2), С. 11-19, 2016 г.