На правах рукописи

КУЛИКОВ Илья Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ СОЗДАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

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

Научный руководитель:	кандидат технических наук, профессор **Селифонов Валерий Викторович** (Московский Государственный Университет Машиностроения «МАМИ»)
Официальные оппоненты:	**Ютт Владимир Евсеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (МАДИ), зав. кафедрой «Электротехника и электрооборудование»
	Горелов Василий Александрович, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), профессор кафедры «Колесные машины»
Ведущая организация:	**ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»** **(ИжГТУ им. М.Т. Калашникова)**

Защита состоится « 21 » декабря 2016 г. в 14 ^{00} часов
на заседании диссертационного совета Д 217.014.01 при ФГУП «НАМИ», по адресу: 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2.

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

Автореферат разослан « 19 » октября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент
e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru

Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Комбинированные энергоустановки (КЭУ) являются одной из интенсивно развивающихся технологий повышения энергетической эффективности автомобильного транспорта и снижения его вредного воздействия на окружающую среду. Они представляют собой системы, комбинирующие двигатель внутреннего сгорания (ДВС) с компонентами электрического привода, буферным накопителем энергии (например, батареей аккумуляторов) и узлами механической трансмиссии. КЭУ обеспечивает снижение расхода топлива и выбросов токсичных веществ тепловым двигателем за счет его временного выключения с движением автомобиля на электрической тяге, а при включенном ДВС – за счет его работы в режимах повышенного КПД и сниженных концентраций токсичных веществ.

Решение задач исследования и разработки автомобилей с КЭУ требует достаточно глубокого понимания технологии КЭУ, которое возможно только при наличии теоретического и экспериментального инструментариев. Виртуальные исследовательские средства, базирующиеся на математических моделях, являются неотъемлемой частью теоретического инструментария разработчиков и исследователей автомобилей с КЭУ. Всестороннее исследование КЭУ виртуальными средствами подразумевает моделирование механических и электрических компонентов энергоустановки, динамики автомобиля, тормозной системы, динамики и сцепных свойств колес. Создание таких комплексных моделей автомобилей с КЭУ стало практиковаться относительно недавно; существует ряд открытых, обсуждаемых вопросов, которые связаны с выбором подходов к моделированию тех или иных компонентов КЭУ и автомобиля, способов их реализации на ЭВМ, а также с экспериментальным подтверждением адекватности моделей.

Экспериментальное исследование серийных автомобилей с КЭУ затруднено, поскольку алгоритмы управления энергоустановок неизвестны, а возможности измерений при испытаниях полнокомплектных автомобилей ограничены. Для решения этих проблем могут быть использованы средства идентификации ненаблюдаемых переменных. Они представляют собой т.н. виртуальные датчики и виртуальные модели, дублирующие физические объекты. Существует необходимость их адаптации применительно к автомобилям с КЭУ.

За последние пятнадцать лет в автомобильной отрасли существенное развитие получили технологии виртуально-физических испытаний. Их использование при разработке автомобильных энергоустановок, сохраняя все возможности и преимущества лабораторных испытаний, позволяет воспроизводить работу энергоустановки в условиях движения автомобиля, которые в традиционных подходах реализуются только при его испытаниях на дороге. Существует определенный дефицит работ, посвященных анализу и научному обоснованию способов создания виртуально-физических средств испытаний автомобилей, в том числе с КЭУ, который целесообразно восполнять.

Целью работы является создание усовершенствованного инструментария исследования и разработки автомобилей с КЭУ на основе технологий виртуально-физических испытаний. Для этого необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику создания виртуально-физических систем, позволяющих проводить идентификацию режимов работы компонентов энергоустановки по экспе-

риментальным данным и расширяющих функциональные возможности испытаний энергоустановок в лабораторных условиях на агрегатных стендах.

2. Разработать математические модели компонентов КЭУ и автомобиля, которые позволяют исследовать потоки мощности в КЭУ и работу системы рекуперации совместно с тормозной системой.

3. Разработать и опробовать способ исследования системы рекуперации автомобиля с тяговым электроприводом по комплексу показателей энергоэффективности и тормозных свойств с использованием средств виртуально-физического моделирования.

4. Разработать и опробовать способ исследования организации потоков мощности и энергоэффективности КЭУ с использованием средств виртуально-физического моделирования

5. Разработать и опробовать систему виртуально-физических испытаний, расширяющую функциональные возможности исследования энергоустановок на агрегатных стендах.

Научная новизна работы:

1. Разработана и проверена методика, вводящая обобщенный подход для синтеза виртуально-физических объектов, включающих автомобиль и его энергоустановку, посредством создания замкнутых систем автоматического регулирования, связывающих и синхронизирующих физическую и виртуальную части объекта исследования.

2. В рамках методики разработан и проверен новый способ динамической идентификации ненаблюдаемых входных переменных (крутящих моментов) энергоустановки и силового привода.

3. В рамках методики дано научное обоснование способа создания нагрузки в виртуально-физических испытаниях, предложен и практически реализован усовершенствованный способ создания виртуально-физических объектов для испытаний энергоустановок с несколькими силовыми агрегатами.

4. Созданы математические модели автомобилей с КЭУ, включающие автомобиль, колеса с шинами, силовой привод, тепловой и электрические двигатели, тяговую батарею. Модели отражают свойства КЭУ, характеризуемые переменными механической и электрической природы. Адекватность моделей подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными.

5. Предложен и проверен способ виртуально-физического исследования организации потоков мощности и энергоэффективности КЭУ с двухпоточной бесступенчатой трансмиссией (power-split).

6. Предложен и проверен способ виртуально-физического исследования систем рекуперации в отношении комплекса показателей энергоэффективности и тормозных свойств автомобиля.

7. Исследовано влияние используемых в модели динамики автомобиля физических параметров на качество идентификации режимов работы его энергоустановки (крутящих моментов на колесах). Определены наиболее существенные параметры, учет которых обеспечивает корректность идентификации.

Практическая значимость работы

1. Разработанные математические модели автомобиля, КЭУ и компонентов энергоустановок могут использоваться для проведения виртуальных испытаний, яв-

ляющихся частью процесса создания и исследования автомобилей с КЭУ и их систем управления. Характеристики, показатели работы и ограничения тяговой батареи являются ключевыми факторами при выборе компонентов КЭУ и разработке ее системы управления. Для решения этих задач в состав модели КЭУ включена модель тяговой батареи, которая позволяет адекватно воспроизводить наиболее значимые показатели ее работы – ток и напряжение – а также достаточно точно рассчитывать ее степень заряженности.

2. Предложенные способы идентификации режимов работы компонентов энергоустановок могут быть использованы для исследования организации потоков мощности в КЭУ, ее энергоэффективности и функционирования системы рекуперации экспериментальных и серийных автомобилей. Они также применимы для других исследований, требующих определения ненаблюдаемых крутящих моментов: исследование разгонной, тормозной и курсовой динамики автомобиля со срабатыванием таких систем активной безопасности, как АБС, система курсовой устойчивости и противобуксовочная система.

3. Разработанные способы создания и управления системами виртуально-физических испытаний позволяют объединить преимущества лабораторного, дорожного и вычислительного экспериментов. По сравнению с традиционными методами стендовых испытаний виртуально-физическая технология имеет следующие преимущества:

– воспроизведение нагрузки с имитацией произвольной массы автомобиля, не требующее использования инерционных элементов (маховиков);

– возможность испытывать энергоустановки с любым количеством силовых агрегатов или приводных осей/колес, в том числе механически не связанных;

– возможность испытывать энергоустановки с воспроизведением их работы в режимах движения автомобиля, характеризующихся влиянием таких факторов, как сцепление колес с опорной поверхностью, траектория движения, перераспределение нормальных реакций, профиль дороги.

Разработанные способы виртуально-физических испытаний позволяют заменить бóльшую часть отладочных дорожных испытаний автомобиля с КЭУ лабораторными, при этом значительно увеличивая объем испытаний, осуществимый в единицу рабочего времени. Таким образом, процесс исследования или разработки энергоустановки существенно ускоряется, становится дешевле и эффективнее.

Реализация результатов работы:

1. Результаты исследования автомобиля с КЭУ на базе серийного электромобиля, описанные в главе 5, использовались при выполнении прикладного научного исследования, проводившегося при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки РФ, соглашение № 14.576.21.0031, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57614X0031;

2. Способ идентификации крутящих моментов на колесах автомобиля, описанный в главах 3 и 5, а также математическая модель динамики автомобиля и сцепных свойств колеса, описанная в главе 5 и в приложении А к диссертации, использовались при выполнении научно-исследовательской работы по государственному контракту № 14412.0859999.20.003 в рамках ФЦП «Повышение безопасности дорожного движения в 2013-2020 гг.» при финансовой поддержке государства в лице Минпромторга РФ;

3. Система виртуально-физических испытаний и результаты исследований, описанные в главе 7 и в приложении А к диссертации, использовались при выполнении работ по государственному контракту «Создание полноприводного грузового автомобиля типа 6х6 с комбинированной энергоустановкой, соответствующего перспективным международным требованиям по экологии, безопасности, энергоресурсосбережению и утилизации» №12411.0810200.20.В26 от 24.07.2012 г.

4. Различные модификации разработанных моделей автомобиля с КЭУ использовались в ряде работ ФГУП «НАМИ», МГТУ/МГМУ «МАМИ» (в наст. время Московский Политехнический Университет) и НИИ Автоэлектроники.

Методы исследования. Теоретические исследования основаны на методах теоретической механики, теории автомобиля, теории автоматического управления, теории электротехники, математического моделирования и вычислительной математики. Экспериментальные исследования основаны на методах проведения лабораторных и дорожных испытаний и методах обработки результатов испытаний.

Объекты исследования: экспериментальный автомобиль с КЭУ на базе серийного электромобиля; серийный автомобиль с КЭУ; серийная КЭУ грузового автомобиля.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика создания виртуально-физических объектов (систем) для разработки и исследования КЭУ и оснащенных ими автомобилей с использованием в качестве средств синхронизации замкнутых систем автоматического регулирования, связывающих виртуальную и физическую части исследуемого объекта.
2. Способ идентификации ненаблюдаемых входных переменных (крутящих моментов) агрегатов и силового привода, входящих в энергоустановку.
3. Математические модели автомобиля, КЭУ и компонентов КЭУ.
4. Способ исследования системы рекуперации с использованием виртуально-физического моделирования.
5. Способ исследования потоков мощности и энергоэффективности КЭУ с двухпоточной бесступенчатой трансмиссией с использованием виртуально-физического моделирования.
6. Способ исследования и разработки КЭУ с помощью испытаний виртуально-физического объекта на базе агрегатного стенда.

Степень достоверности результатов работы. Достоверность результатов, полученных в данной работе, подтверждается сопоставлением данных математического моделирования с результатами экспериментальных исследований трех объектов: автомобиля с КЭУ на базе электромобиля, серийного автомобиля с КЭУ и серийной КЭУ грузового автомобиля. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием метрологически поверенного измерительного оборудования на специализированных дорогах и испытательных стендах.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на международных научно-технических конференциях Ассоциации автомобильных инженеров (НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ», 2009-2016 гг., МГТУ «МАМИ» 2010-2011 гг.), на международной конференции «Энергоэффективный транспорт будущего» (МГМУ «МАМИ», 2012 г.), на конференции технологической платформы «Зеленый автомобиль» (ФГУП «НАМИ», 2014 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ: 9 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 2 патента на изобретение, 1 учебное пособие, 2 публикации SAE Technical Paper.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, общих результатов и выводов, списка литературы и одного приложения. Общий объем работы составляет 195 страниц без приложения, включая 102 рисунка и 6 таблиц. Библиография работы содержит 142 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы – совершенствования инструментария исследования и создания автомобилей с КЭУ. Дана краткая характеристика существующих средств и сформулированы задачи, которые необходимо решать для их развития. Представлены цель и задачи работы, научная новизна, практическая ценность и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ технологии КЭУ и основных функций этих энергоустановок. Определены две функции КЭУ, исследование и разработка которых требует создания усовершенствованных инструментов: организация потоков мощности в КЭУ; рекуперативно-механическое торможение (т.е. совместная работа системы рекуперации и тормозных механизмов) в аспектах энергоэффективности и тормозных свойств автомобиля. Проанализированы работы, посвященные исследованиям автомобилей с КЭУ с точки зрения этих функций.

Определены переменные КЭУ и автомобиля, которые должны рассчитываться моделями, входящими в разрабатываемый инструментарий. Показано, что существенное значение имеют электрические переменные тяговой батареи – сила тока и напряжение. При исследовании систем рекуперативно-механического торможения должна использоваться модель автомобиля, отражающая его динамику с учетом проскальзывания и сцепных свойств колес.

Проведен анализ виртуальных и физических инструментов, которые могут использоваться для разработки и исследований автомобилей с КЭУ. Охарактеризованы недостатки, которые имеют существующие средства и подходы. При исследованиях серийных автомобилей с КЭУ существуют две основные проблемы: ограниченные возможности измерений (в частности, крутящих моментов силовых агрегатов) и отсутствие информации об алгоритмах управления КЭУ.

В традиционных методах лабораторных испытаний масса автомобиля имитируется с помощью маховика, что обуславливает ряд неудобств, в частности при необходимости воспроизведения разной загрузки автомобиля. Кроме того, традиционные методы имеют ограниченные возможности с точки зрения воспроизведения режимов движения автомобиля: они не позволяют имитировать движение автомобиля с проскальзыванием колес, а также курсовое движение.

Во второй главе проанализированы средства, с помощью которых более эффективно решаются или могут быть решены задачи исследования автомобилей с КЭУ, описанные в главе 1. Ими являются технологии виртуально-физических испытаний. Рассмотрены два вида виртуально-физических систем. Первые – это т.н. наблюдатели, которые могут использоваться для идентификации неизмеряемых переменных. Наиболее распространенные наблюдатели идентифицируют переменные состояния. Относительно новый тип – наблюдатели неизмеряемых входных пере-

менных, к которым в случае силовых агрегатов относятся крутящие моменты. Приводятся примеры использования этих наблюдателей, анализируется работа, показывающая их применение для идентификации крутящих моментов на колесах автомобиля. Отмечаются недостатки используемого похода и необходимость их устранения с помощью альтернативной структуры наблюдателя.

Системы второго типа воспроизводят объект частично физически, а частично – виртуально. В виртуальной части используются модели, работающие в реальном времени. Проанализирована практика виртуально-физических испытаний, вводящаяся Глобальными Техническими Правилами №4 для сертификации большегрузных автомобилей с КЭУ на соответствие требованиям экологических классов. Правила предлагают два подхода к организации испытаний. В первом физической частью является только блок управления КЭУ, а сама КЭУ и автомобиль моделируются. Во втором подходе проводятся испытания физической КЭУ на агрегатном стенде с имитацией автомобиля с помощью виртуальной модели. Нагрузка, соответствующая ускоренному или замедленному движению, создается без использования маховика. Вместо этого используется управление моментом динамометра с помощью модели динамики автомобиля и замкнутой системы автоматического регулирования. Системы этого типа начали разрабатываться в конце 1970-х гг. Рядом фирм (General Motors, Horiba, Ford) были получены патенты на подобные системы, основные из которых анализируются в диссертации. Их развитием за последние 15 лет стали системы с расширенной функциональностью, которые позволяют на агрегатных стендах воспроизводить режимы движения автомобиля, характеризующиеся проскальзыванием колес, сцепными свойствами опорной поверхности и траекторией курсового движения. Проанализированы патенты фирм Horiba, AVL и Porsche, описывающие системы этого типа. Отмечается малое число научных публикаций по данной теме, обосновывающих способы построения систем и создания нагрузки, и связанные с этим некорректные описания расчета нагрузочных режимов. В результате анализа сделаны выводы о необходимости создания усовершенствованного инструментария виртуально-физических испытаний, адаптированного для исследований и разработки автомобилей с КЭУ. В конце главы сформулированы цель и задачи работы.

В третьей главе предлагается обобщенный подход к созданию виртуально-физических систем, адаптированный для исследования и разработки автомобилей с КЭУ. Он состоит в синхронизации виртуальной и физической частей с помощью замкнутых систем автоматического регулирования (САР). Первым способом его применения является создание виртуальных систем-наблюдателей. Для обоснования этого способа проводится обобщение прямой задачи динамики движения автомобиля при заданном скоростном режиме (ездовом цикле) с обеспечением этого режима регулятором педали акселератора (или крутящего момента двигателя), компенсирующим отклонение текущей скорости модели от скорости, заданной циклом. Обобщение заключается в том, что вместо скорости цикла используется экспериментально полученный сигнал, характеризующий работу того или иного компонента энергоустановки, а регулятор, уравнивая с этим сигналом соответствующую переменную модели, управляет влияющей на нее входной переменной – как правило, крутящим моментом одного из силовых агрегатов энергоустановки. Пример построения системы-наблюдателя по этому принципу показан на рисунке 1. Объектом исследования (испытаний) является автомобиль с КЭУ параллельной схемы, которая включает

ДВС и электромашину (ЭМ), связанные общей механической трансмиссией, а также тяговую батарею.

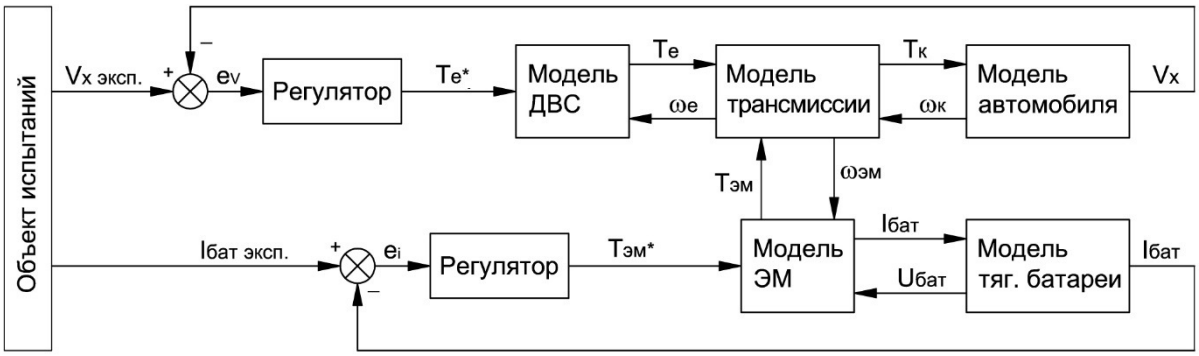


Рисунок 1 – Система идентификации (наблюдатель) неизмеряемых крутящих моментов силовых агрегатов на примере КЭУ параллельной схемы

Для расчета параметров движения автомобиля и работы КЭУ, реализованных в эксперименте, требуется идентификация двух переменных, которые не измеряются при испытаниях – крутящих моментов ДВС (T_e) и электромашины ($T_{ЭМ}$). Для этого к их моделям присоединяются регуляторы, управляющие сигналами задания моментов (T_e^* и $T_{ЭМ}^*$). В свою очередь, сигналами задания для регуляторов являются измеренные датчиками скорость автомобиля ($V_{x,эксп.}$) и сила тока тяговой батареи ($I_{бат,эксп.}$). Обратными связями служат соответствующие переменные ($V_{x.}$ и $I_{бат}$), рассчитываемые блоками модели. Работа регуляторов приводит в движение модель, которая рассчитывает момент на колесах автомобиля ($T_к$), угловые скорости валов ДВС (ω_e), электромашины ($\omega_{ЭМ}$) и колес автомобиля ($\omega_к$), а также напряжение батареи ($U_{бат}$).

Аналогичная система предложена для идентификации крутящих моментов на колесах автомобиля с использованием в качестве сигналов идентификации их угловых скоростей, записываемых датчиками во время дорожных испытаний автомобиля.

Вторым способом применения синхронизации виртуального и физического объектов с помощью САР является создание систем стендовых испытаний, в которых эти части составляют единый объект – виртуальный автомобиль с физической энергоустановкой. На рисунке 2 приведена схема такой системы для испытаний энергоустановки с одним силовым агрегатом.

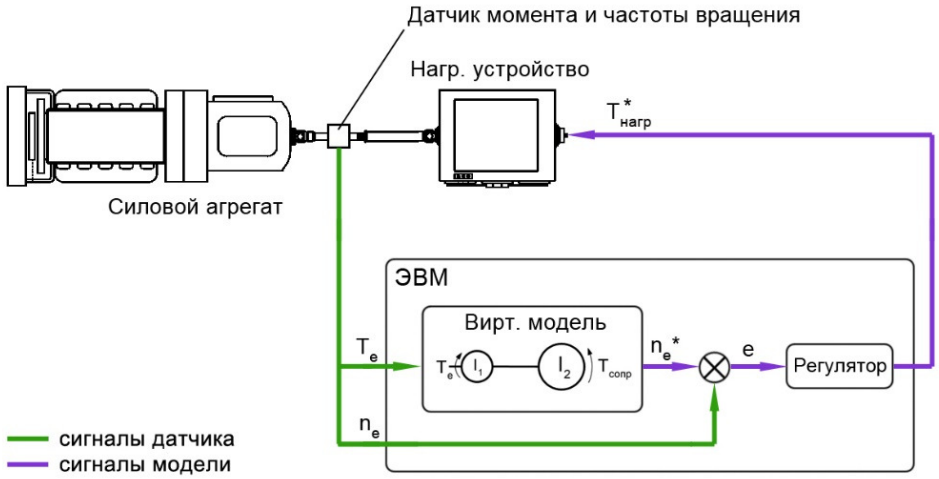


Рисунок 2 – Система виртуально-физических испытаний на базе агрегатного стенда

Имитация нагрузочного режима силового агрегата осуществляется динамометром. Датчик момента и частоты вращения устанавливается в месте, где заканчивается физическая часть объекта испытаний и начинается виртуальная. Для корректного моделирования физическая часть должна полностью располагаться до места установки датчика. Динамометр и все устройства, согласующие режим нагрузки, должны быть установлены после датчика. Исходным действием, приводящим систему в работу, является начало вращения вала силового агрегата после поступления управляющего сигнала (например, нажатия на педаль акселератора). В это время виртуальная часть системы неподвижна, и частота вращения ее вала n_e^*, являющегося «продолжением» вала силового агрегата, равна нулю. Вращение физического вала создает ошибку $e = n_e^* - n_e$. Она передается в регулятор динамометра, который рассчитывает компенсирующий ее момент $T_{нагр}^*$. Этот момент создается нагружающим устройством на валу силового агрегата и измеряется датчиком. Затем он в виде сигнала T_e передается в виртуальную модель, которая начинает движение. Таким образом, создается замкнутая система с информационно-силовым взаимодействием, синхронизирующим виртуальную и физическую части объекта испытаний.

Выполнен анализ принципа создания нагрузки. При допущении абсолютной жесткости валов испытываемого агрегата и нагружающего привода равновесие моментов физического агрегата, нагружающего привода и привода виртуальной модели в месте установки датчика записывается следующим образом:

$$T_e = T_{нагр.} + M_{j,нагр.} = M_{j,мод.} + M_{сопр,мод.}$$

где $M_{j,нагр.}$ – инерционный момент нагружающего привода; $M_{j,мод.}$ – инерционный момент виртуального объекта, являющегося «продолжением» физического; $M_{сопр,мод.}$ – момент сопротивления, действующий на виртуальный объект.

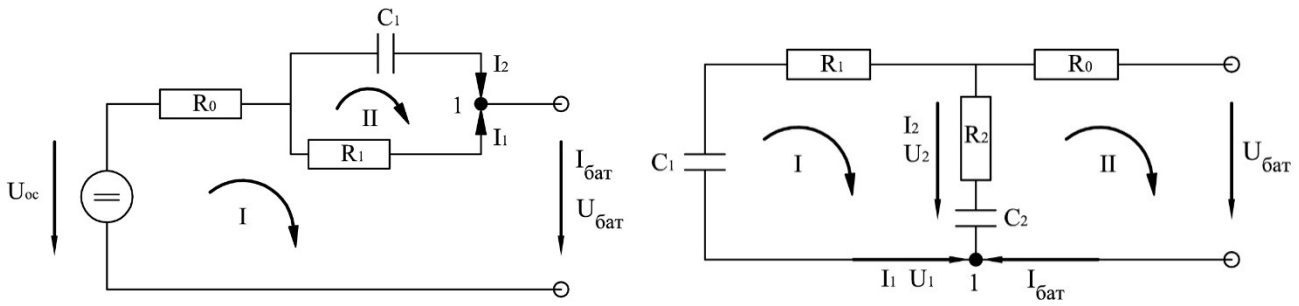
В зависимости от выбранного типа модели виртуального объекта $M_{j,мод.}$ может представлять инерцию автомобиля (модель без учета проскальзывания колес) или инерцию колес (модель с учетом проскальзывания). $M_{сопр,мод.}$ в первом случае, как правило, является моментом сил сопротивления равномерному движению автомобиля, а во втором случае – суммой моментов касательной реакции и сопротивления качению. Инерция нагружающего привода может не соответствовать инерции виртуального объекта. Разница между ними автоматически компенсируется регулятором динамометра с помощью момента $T_{нагр.}$.

Описано использование систем этого типа для испытаний энергоустановок с несколькими силовыми агрегатами. $M_{сопр,мод.}$ определяется касательной реакцией, которая задается в функции проскальзывания колеса. Проскальзывание осуществляет связь между виртуальной частью привода (угловая скорость колеса) и моделью автомобиля (скорость автомобиля). Таким образом, общая для всех приводов модель автомобиля связывает все силовые агрегаты энергоустановки и согласует их нагрузочные режимы.

В четвертой главе описан выбор математических моделей компонентов автомобиля и КЭУ, которые являются универсальными для различных исследований. Сложность этих компонентов и нецелесообразность в рамках моделирования авто-

мобиля с КЭУ отражать их внутренние процессы обуславливают необходимость анализа способов моделирования и их обоснованного выбора.

Рассмотрено моделирование тяговых батарей КЭУ с помощью электрических схем замещения. Входной переменной схемы замещения является сила тока нагрузки, а выходной – напряжение батареи. На рисунке 3 представлены две схемы замещения с динамическими звеньями, которые обеспечивают высокое качество воспроизведения переходных процессов и малые погрешности по напряжению (менее 0.5%).



а) б)

Рисунок 3 – Схемы замещения тяговой батареи. а – схема Тевенéна; б – схема фирмы Saft

На схемах по правилам Кирхгофа обозначены: узлы и направления тока в них; контуры и направления их обхода. Составлены математические описания схем:

а) $\begin{cases} (R_1 C_1)\cdot \dot{U}_1 = I_{бат}\cdot R_1 - U_1 \\ U_{бат} = U_{OC} - I_{бат} R_0 - U_1 \end{cases}$ б) $\begin{cases} [C_1(R_1+R_2)]\cdot \dot{U}_1 = U_2 - U_1 - I_{бат} R_2 \\ [C_2(R_1+R_2)]\cdot \dot{U}_2 = U_1 - U_2 - I_{бат} R_1 \\ U_{бат} = (U_1 R_2 + U_2 R_1)/(R_1+R_2) - I_{бат}(R_0 + R_1 R_2 / [R_1+R_2]) \end{cases}$

Сопротивления, напряжения и емкости с цифровыми индексами соответствуют обозначениям на схемах. U_{OC} в схеме а) – напряжение разомкнутой цепи (без нагрузки).

Для корректного расчета степени заряженности батареи SOC (State of Charge) необходимо учитывать ее КПД. Адекватный для практических задач результат дает расчет КПД по мощности потерь на внутреннем сопротивлении, определяемой законом Джоуля-Ленца: $P_{бат,потери} = I_{бат}^2 \cdot R_{вн}$, где внутреннее сопротивление $R_{вн}$ – множитель при $I_{бат}$ в уравнении для $U_{бат}$. Используя эту мощность, можно записать следующие выражения для расчета КПД батареи и ее степени заряженности:

$$\eta_{бат} = \frac{|U_{бат}\cdot I_{бат}|^{\mathrm{sgn}(I_{бат})}}{(|U_{бат}\cdot I_{бат}| + \mathrm{sgn}(I_{бат})\cdot P_{бат,потери})^{\mathrm{sgn}(I_{бат})}} \qquad SOC = SOC_0 + \frac{100\%}{3600\cdot Q_0}\int I_{бат}\cdot \eta_{бат}^{\mathrm{sgn}\, I_{бат}}\, dt$$

где функция $\mathrm{sgn}(I_{бат})$ используется для учета режимов разряда ($\mathrm{sgn}(I_{бат}) = +1$) и заряда ($\mathrm{sgn}(I_{бат}) = -1$) батареи; SOC_0 – начальная степень заряженности батареи; Q_0 – номинальная зарядная емкость батареи (А·ч).

Параметры схем замещения были идентифицированы по экспериментальным данным, полученным при испытаниях КЭУ, которые описаны в главе 7. На рисунке 4 показан пример результатов моделирования работы батареи при испытаниях КЭУ в режиме ездового цикла в сопоставлении с измерениями ($I_{бат}, U_{бат}$) и оценкой SOC, записанными системой мониторинга батареи BMS (battery management system).

Выбраны модели тепловых и электрических двигателей в виде характеристик, которые отражают связь между управляющим сигналом и откликом на него (крутящим моментом), а также энергетическую эффективность двигателя. Показана возможность дополнять модель двигателя динамическим звеном для имитации временной характеристики его отклика на управляющий сигнал.

Наиболее распространенная эмпирическая модель сцепных свойств шины в продольном направлении представляет собой зависимость коэффициента сцепления φ_x от проскальзывания колеса S_x, называемую $\varphi - S$ диаграммой. Проведен анализ способов их описания, представленных в литературе. Выбрана модель Magic Formula (автор H. Pacejka), которая аппроксимирует касательную реакцию тригонометрической функцией следующего вида:

$$R_x = D\sin\left[C \cdot arctg\{B \cdot S_x - E(B \cdot S_x - arctg(B \cdot S_x))\}\right]$$

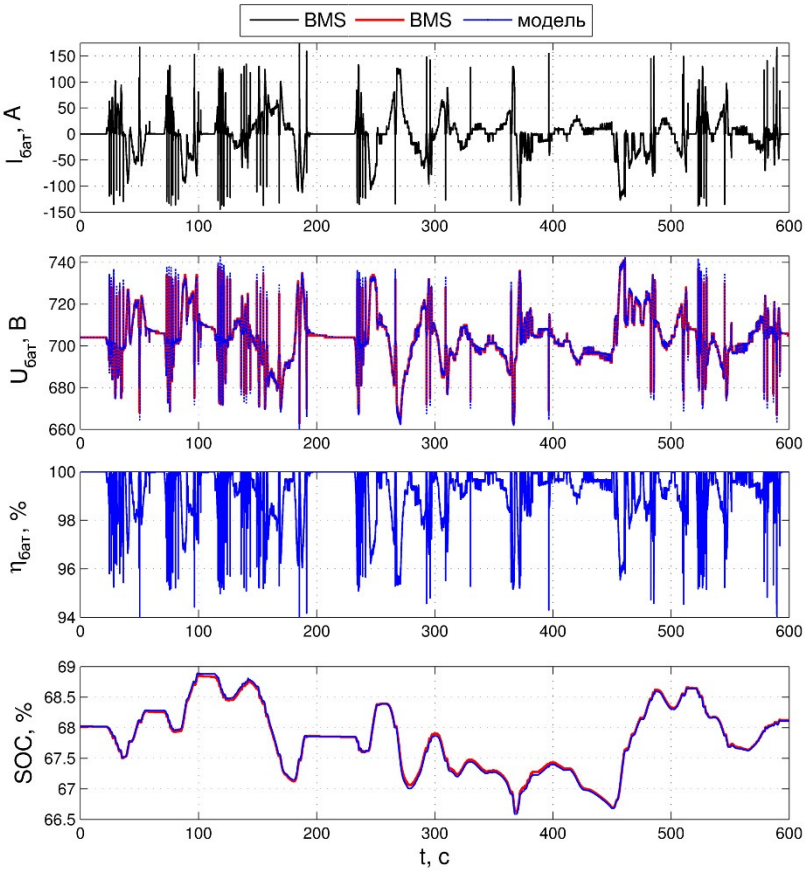


Рисунок 4 – Экспериментальные и расчетные показатели работы тяговой батареи КЭУ в ездовом цикле

Коэффициенты D, B, C и E идентифицируются по экспериментальным данным. D представляет собой произведение максимального коэффициента сцепления и нормальной реакции опорной поверхности: $\varphi_{\max} R_z$.

Модель Magic Formula удобна для аппроксимации и идентификации $\varphi - S$ диаграмм, поскольку позволяет задавать их форму варьированием двух-трех коэффициентов, дифференцированно влияющих на геометрические параметры кривых (величину максимума коэффициента сцепления, наклоны кривой на участках устойчивой и неустойчивой работы шины и т.д.), а посредством последних – на динамические характеристики модели автомобиля (максимальное реализуемое ускорение/замедление, интенсивность нарастания ускорения/замедления). Это позволяет быстро и с минимальными усилиями идентифицировать $\varphi - S$ диаграммы по результатам относительно простых испытаний автомобиля.

В пятой главе описано исследование автомобиля, оснащенного системой рекуперативно-механического торможения. Объектом исследования являлся серийный электромобиль ВАЗ 1817 Ellada (рисунок 5), оснащенный в рамках научно-исследовательской работы ФГУП «НАМИ» двигатель-генераторной установкой, увеличивающей пробег на одной зарядке батареи. Задачей исследования было

определение по результатам дорожных испытаний автомобиля режимов работы компонентов, задействованных при замедлении: батареи, тягового электропривода, тормозных механизмов. Экспериментальные исследования проводились совместно с отделением безопасности автомобиля НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ». При испытаниях не выполнялось измерений силовых факторов в приводе колес, в связи с чем исследование подразумевало использование описанной в главе 3 методики создания виртуальной модели-наблюдателя, позволяющей идентифицировать неизмеряемые переменные.

Рисунок 5 – Объект исследования – автомобиль с системой рекуперативно-механического торможения

Для определения параметров модели был выполнен ряд предварительных испытаний. Проведены дорожные испытания «выбег», в результате обработки которых были определены силы сопротивления равномерному движению автомобиля. Выполнено взвешивание автомобиля с последующим расчетом координат центра масс.

Разработана модель динамики автомобиля, которая состоит из массы автомобиля, движущейся прямолинейно по горизонтальной дороге, вращающихся масс передних и задних колес (две массы) и вращающейся массы привода передних колес. На рисунке 6 представлены расчетные схемы колеса и автомобиля, использованные для составления уравнений динамики.

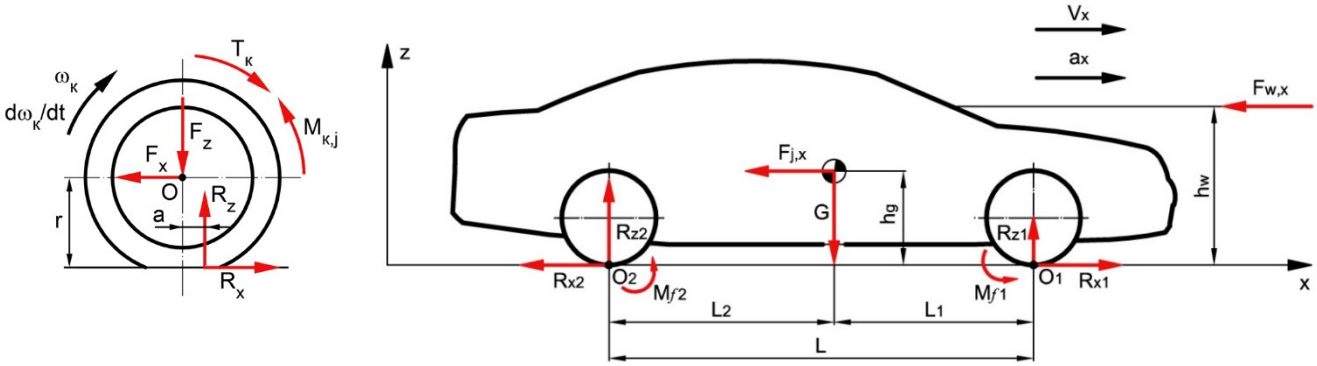


Рисунок 6 – Расчетные схемы для составления уравнений динамики колеса и автомобиля

Уравнения динамики передних ведущих колес вместе с приводом, включающим электродвигатель, задних ведомых колес и автомобиля образуют следующую систему:

$$\begin{cases} \left[n_{к1} I_к + I_{ЭМ} \cdot u_0^2\right] \cdot \dot{\omega}_{к1} = T_{ЭМ} \cdot u_0 - T_{торм1} - (R_{z1} \cdot \varphi_{x1} + R_{z1} f_1 + F_{тр}) \cdot r \\ \left[n_{к2} I_к\right] \cdot \dot{\omega}_{к2} = (R_{z2} \cdot \varphi_{x2} - R_{z2} f_2) \cdot r - T_{торм2} \\ M \cdot a_x = M \cdot \dot{V}_x = R_{z1} \cdot \varphi_{x1} - R_{z2} \cdot \varphi_{x2} - F_{w,x} \end{cases}$$

где $I_{ЭМ}$ и $I_к$ – моменты инерции ротора электромашины и колеса автомобиля соответственно; $n_к$ – число колес; u_0 – передаточное число главной передачи; $T_{торм}$ – момент, создаваемый тормозными механизмами; R_z – нормальная реакция; f – коэффициент сопротивления качению; $F_{тр}$ – сопротивление механической трансмиссии; r

– динамический радиус колеса; a_x – продольное ускорение автомобиля; M – масса автомобиля; $F_{w,x}$ – сила аэродинамического сопротивления. Индекс «1» обозначает переменные передних колес, а «2» – задних.

Нормальные реакции рассчитывались по условию мгновенного статического равновесия автомобиля. Для моделирования сцепных характеристик шин использовалась модель Magic Formula, коэффициенты которой идентифицировались по результатам испытаний автомобиля. Электрические показатели батареи рассчитывались ее моделью, основанной на схеме замещения Saft.

Средства измерения и сбора данных, использованные при испытаниях автомобиля, представлены на рисунке 7. Измерялись следующие переменные: скорость и ускорение автомобиля, угловые скорости колес. Кроме того, из системы BMS записывались переменные батареи: $I_{бат}, U_{бат}$ и SOC. При обработке результатов две записи совмещались.

Рисунок 7 – измерительное и регистрирующее оборудование для дорожных испытаний автомобиля. 1 – датчик скорости автомобиля; 2 – датчик угловой скорости колеса; 3 – датчик ускорений; 4 – система сбора и записи сигналов

При испытаниях на горизонтальной сухой дороге с асфальтобетонным покрытием выполнялся треугольный цикл, состоящий из фазы разгона автомобиля и следующей за ней фазы торможения с заданным замедлением. Максимальная скорость цикла составляла 80 км/ч. Средняя величина замедления увеличивалась от заезда к заезду, начинаясь с ~1 м/с^2 и достигая максимального значения, при котором срабатывала АБС. Рекуперация работала во всем диапазоне замедлений, но при срабатывании АБС отключалась.

Модели автомобиля и энергоустановки были реализованы на ЭВМ и совмещены со средствами идентификации, в качестве которых использовались следующие регуляторы: два регулятора крутящих моментов на колесах автомобиля и регулятор крутящего момента электродвигателя. В качестве сигналов задания, измеренных датчиками, и соответствующих сигналов обратной связи модели первые два регулятора использовали угловые скорости колес, а регулятор электродвигателя – силу тока батареи.

На рисунке 8 представлены результаты физического эксперимента и его моделирования. Выполнялось торможение со средним замедлением 5.15 м/с^2, при котором одновременно работала система рекуперации и тормозные механизмы. Создаваемые ими моменты были идентифицированы моделью-наблюдателем (момент ЭМ приведен к колесам). На первом сверху графике V_x обозначает скорость автомобиля и линейные скорости колес.

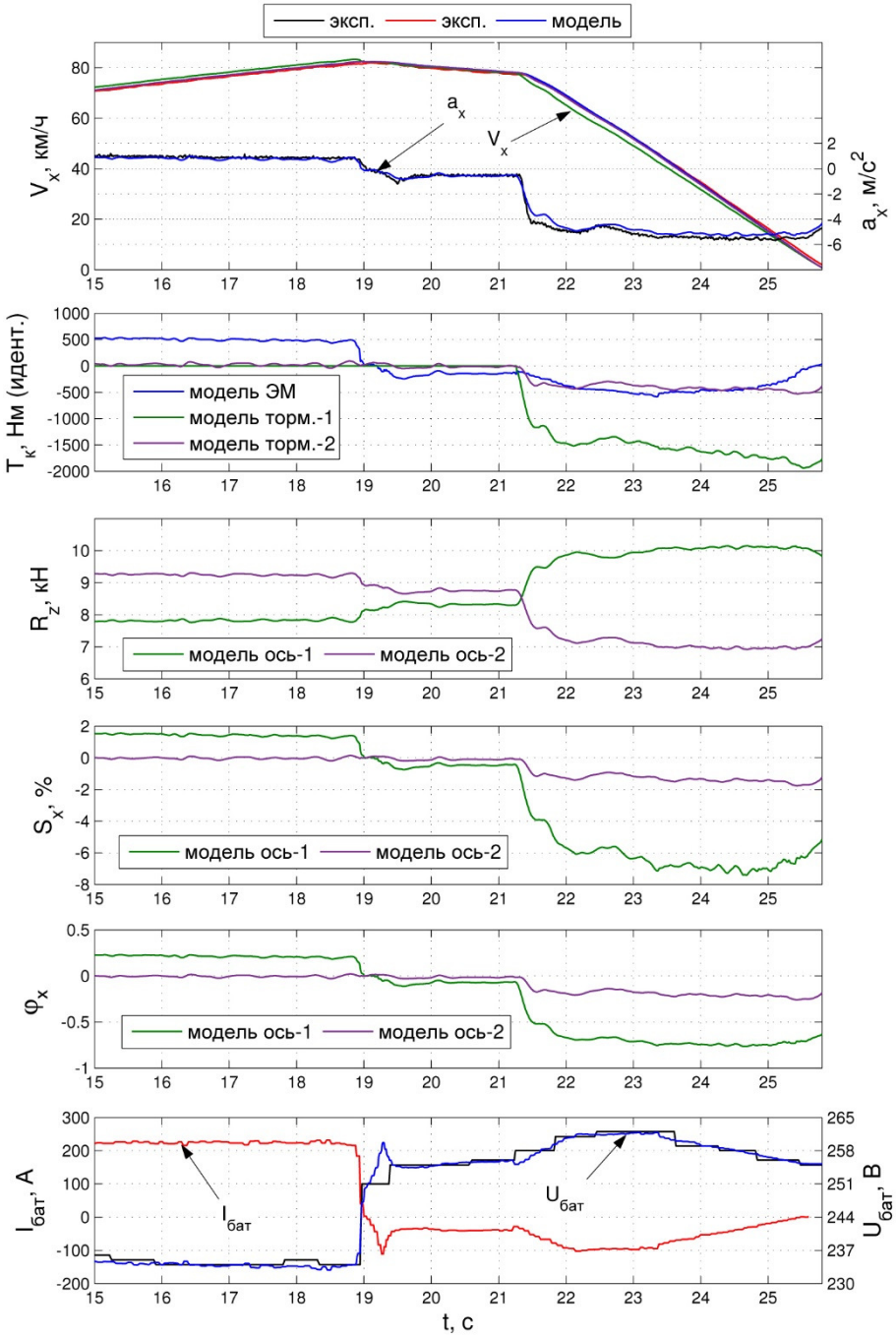


Рисунок 8 – Сопоставление результатов дорожного испытания автомобиля и воспроизводящего его вычислительного эксперимента с рекуперативно-механическим торможением

В шестой главе описано исследование потоков мощности и КПД КЭУ серийного автомобиля. Для исследования были использованы результаты испытаний автомобиля Toyota Prius (рисунок 9), проведенных научно-исследовательским центром Argonne National Laboratory (США). Информация, требуемая условиями использования данных испытаний, приведена в сноске[1]. КЭУ автомобиля Prius, называемая Toyota Hybrid System (THS), представляет собой двухпоточную электромеханиче-

[1] Used experimental data is from the Downloadable Dynamometer Database and was generated at the Advanced Powertrain Research Facility (APRF) at Argonne National Laboratory under the funding and guidance of the U.S. Department of Energy (DOE).

скую бесступенчатую трансмиссию. Разделение потоков мощности осуществляется посредством планетарного механизма, звенья которого соединены с валами ДВС и двух электромашин. Их взаимодействие образует два потока мощности – механический и электрический.

Рисунок 9 – Объект исследования: автомобиль с КЭУ Toyota Prius

Задачей исследования было определение режимов работы компонентов КЭУ: ДВС, двух электромашин и тяговой батареи. Испытания автомобиля были выполнены в лабораторных условиях на стенде с беговыми барабанами в режимах ездовых циклов. Крутящие моменты силовых агрегатов КЭУ не измерялись и, следовательно, должны были идентифицироваться с помощью модели-наблюдателя. Для этого не использовалась какая-либо информация об алгоритме управления КЭУ (в большинстве случаев алгоритмы серийных систем не раскрываются производителями).

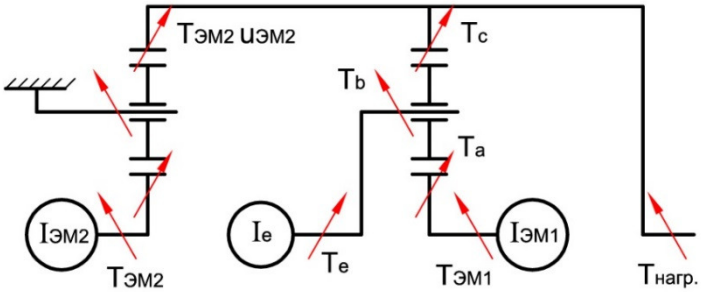


Рисунок 10 – Расчетная схема силового привода КЭУ Toyota Hybrid System

Для составления модели силового привода THS использовалась его расчетная схема, приведенная на рисунке 10. Индексы *a, b, c* обозначают солнечную шестерню, водило и эпицикл соответственно. ЭМ1 – электромашина, создающая реактивный момент на солнечной шестерне. ЭМ2 – тяговая электромашина. Крутящие моменты, создаваемые агрегатами КЭУ, и моменты на звеньях планетарного механизма показаны на схеме стрелками.

С использованием данной расчетной схемы и модели динамики прямолинейного движения автомобиля из главы 5, из которой было исключено проскальзывание колес, была составлена система уравнений, описывающая стендовую имитацию движения автомобиля и динамику силового привода КЭУ:

$$\begin{cases} I_e\dot{\omega}_e = T_e - T_b \\ I_{ЭМ1}\dot{\omega}_{ЭМ1} = T_{ЭМ1} - T_a \\ \omega_c = \left[(k+1)\omega_e - \omega_{ЭМ1}\right]/k \\ \dot{T}_c = c\left(\omega_c - \omega_к \cdot u_0\right) + \gamma\left(\dot{\omega}_c - \dot{\omega}_к \cdot u_0\right) \\ T_a = T_c / k \\ T_b = -T_c(k+1)/k \\ \left[M + \left(I_к n_{к1} + I_{ЭМ2}u_0^2 \cdot u_{ЭМ2}^2\right)/r_0^2\right]\cdot\dot{V} = (T_{ЭМ2}u_{ЭМ2} + T_c)u_0 / r_0 - T_{торм1} / r_0 - F_\psi \end{cases}$$

где k – конструктивный параметр планетарного ряда; r_0 – статический радиус колеса автомобиля; $u_{ЭМ2}$ – передаточное число планетарного редуктора электромашины

ЭМ2; c и γ – жесткость и коэффициент демпфирования выходного вала КЭУ; F_{ψ} – сумма сил сопротивления равномерному движению автомобиля.

Модель была реализована на ЭВМ и совмещена со средствами идентификации, в качестве которых использовались регуляторы крутящих моментов ДВС и двух электромашин. В качестве сигналов задания, измеренных датчиками, и соответствующих сигналов обратной связи модели регулятор ДВС использовал скорость автомобиля, регулятор ЭМ1 – частоту вращения вала ДВС, а регулятор ЭМ2 – силу тока батареи.

На рисунке 11 показаны результаты физического эксперимента в магистральном ездовом цикле (по процедуре сертификации автомобилей в США) и воспроизводящего его моделирования с идентификацией работы КЭУ.

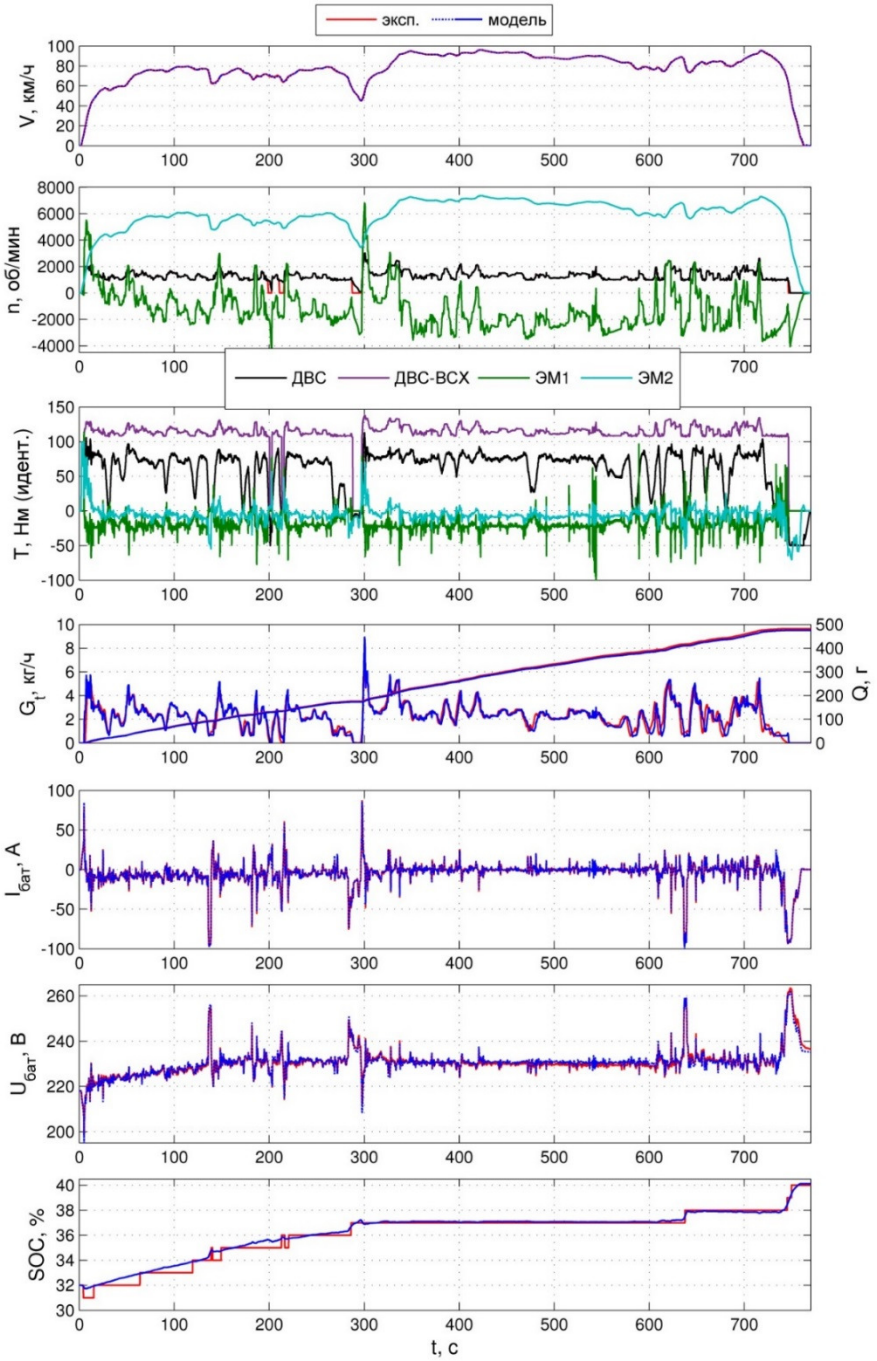


Рисунок 11 – Сопоставление результатов стендовых испытаний и вычислительного эксперимента с воспроизведением движения автомобиля и работы КЭУ в ездовом цикле

Кроме идентифицированного момента ДВС, на графике показан его момент по внешней скоростной характеристике (ДВС-ВСХ). На графиках также представлены мгновенный (G_t) и интегральный (Q) расходы топлива ДВС, измеренные расходомером при испытаниях и рассчитанные моделью. Путевой расход топлива автомобиля в цикле составил 3.94 и 3.85 л/100 км по измерениям и по модели соответственно. В конце цикла был получен положительный дисбаланс энергии батареи. Это означает, что часть израсходованного топлива использовалась не для движения автомобиля, а для зарядки батареи, и может быть использована в дальнейшем для движения на электротяге, что несколько уменьшит фактический показатель Q.

Идентифицированные режимные точки ДВС были сопоставлены с экспериментальными данными, опубликованными НТЦ Energies Nouvelles (Франция), которые были получены путем прямого измерения момента ДВС (рисунок 12). По результатам моделирования были рассчитаны мощности, развиваемые компонентами КЭУ, и ее КПД. Выявлены описанные в литературе режимы работы THS, в т.ч. с циркуляцией мощности.

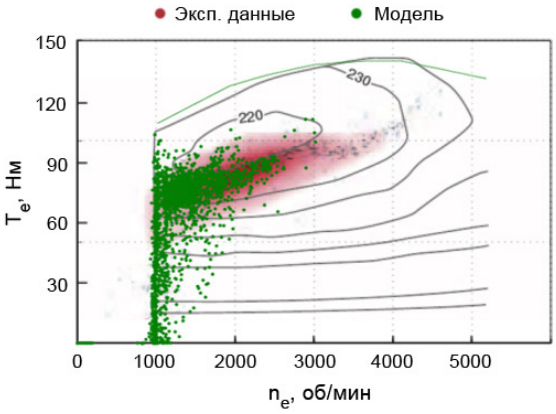


Рисунок 12 – Совмещение режимных точек ДВС, полученных экспериментально и идентифицированных при моделировании

В седьмой главе описано применение разработанной методики виртуально-физических испытаний для увеличения функциональных возможностей испытаний КЭУ на агрегатном стенде. Решение этой задачи подразумевает создание объекта, который состоит частично из физических компонентов, а частично – из виртуальных. Физической частью объекта испытаний является КЭУ, установленная в лаборатории на стенде, а виртуальной частью – автомобиль, для которого эта энергоустановка предназначена. Их информационно-силовые связи и синхронизация работы выполняются в реальном времени в соответствии со способом, описанным в главе 3.

Исследование осуществлялось в рамках работ, выполненных ФГУП «НАМИ» в качестве части проекта ПАО «КамАЗ» по созданию полноприводного грузового автомобиля с КЭУ. Схема энергоустановки представлена на рисунке 13.

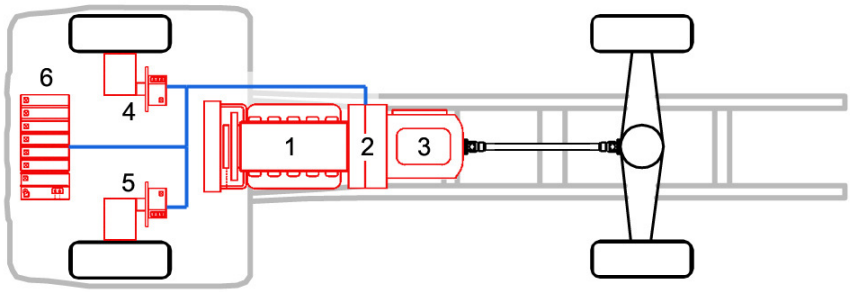


Рисунок 13 – Схема КЭУ грузового автомобиля. 1 – ДВС; 2 – модуль КЭУ; 3 – автоматическая коробка передач (АКП); 4, 5 – электромашины привода передних колес с согласующими редукторами; 6 – тяговая батарея

КЭУ построена по параллельной схеме на базе серийных компонентов фирмы ZF Friedrichshafen (ФРГ). Модулем КЭУ называется комбинация тяговой электромашины и автоматического сцепления, которое обеспечивает отсоединение ДВС от

трансмиссии для движения автомобиля на электротяге. Система управления КЭУ была разработана фирмой ZF.

Задачей научно-исследовательской работы являлось создание системы лабораторных стендовых испытаний, способной воспроизводить работу КЭУ в следующих режимах движения автомобиля: ездовые циклы; движение по дорогам с различными сцепными свойствами; курсовое (криволинейное) движение.

Система стендовых испытаний КЭУ была создана на базе лаборатории ФГУП «НАМИ». Были разработаны и смонтированы два нагрузочных стенда, на одном из которых размещалась энергоустановка, осуществляющая привод задних колес автомобиля (рисунок 14а), а на втором – электромашины привода передних колес (рисунок 14б). Силовое взаимодействие агрегатов КЭУ с виртуальной частью объекта испытания обеспечивалось нагружающими устройствами, которые представляли собой электрические машины. Они через датчики момента и частоты вращения были соединены с выходным валом АКП и с валами тяговых электромашин переднего привода. Между нагрузочными стендами располагалось электрооборудование КЭУ, включая тяговую батарею, а также система охлаждения электропривода.

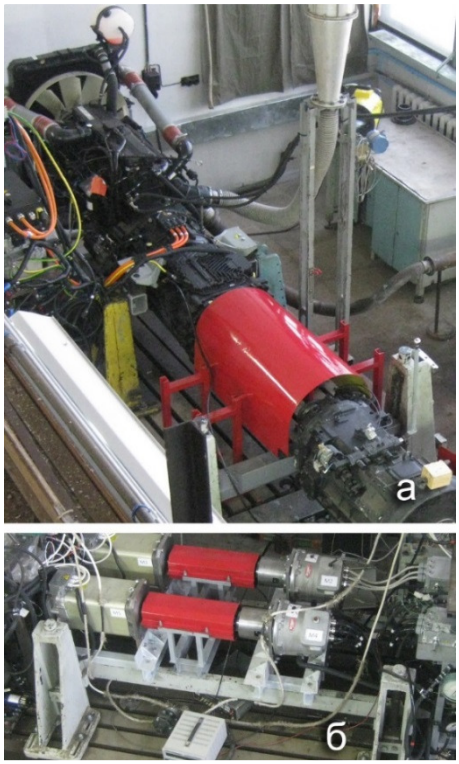


Рисунок 14 – Система стендовых испытаний КЭУ грузового автомобиля. а – нагрузочный стенд с энергоустановкой привода заднего моста;
б – нагрузочный стенд с электродвигателями привода передних колес

Автором были разработаны и реализованы на ЭВМ виртуальная модель автомобиля и средства ее взаимодействия с физической частью объекта испытаний: интерфейсы модели автомобиля с КЭУ и стендовым оборудованием; подсистемы, управляющие нагружающими устройствами; подсистемы сбора и обработки сигналов с датчиков стенда и из шины CAN энергоустановки.

Виртуальная часть объекта испытаний включала модель автомобиля и узлов механической трансмиссии, которые не вошли в состав физической части. Модель динамики автомобиля выбиралась в зависимости от типа выполняемого испытания. Для испытаний в ездовом цикле использовалась одномассовая модель без учета проскальзывания колес, описанная в главе 6. Для испытаний с моделированием движения по дорогам с различными сцепными свойствами использовалась модель, описанная в главе 5. Также была разработана модель, воспроизводящая курсовое движение автомобиля, которая описана в приложении А к диссертации.

С помощью созданной виртуально-физической системы проводились испытания двух типов:

– определение топливной экономичности автомобиля в ездовом цикле;

– воспроизведение движения автомобиля (в т. ч. курсового) с учетом сцепных свойств колес.

На рисунке 15 представлен фрагмент результатов испытания с моделированием сцепных свойств колес. На верхних графиках показаны: крутящие моменты, задаваемые системой управления КЭУ (запись из шины CAN) для ДВС (T_e) и электрома-

шины модуля КЭУ ($T_{ЭМ2}$), крутящий момент электромашин передних колес ($T_{ЭМ1}$* - суммарный крутящий момент двух электромашин, приведенный к условной главной передаче для сопоставления с моментом на главной передаче заднего моста); крутящий момент на выходном валу АКП, измеренный датчиком.

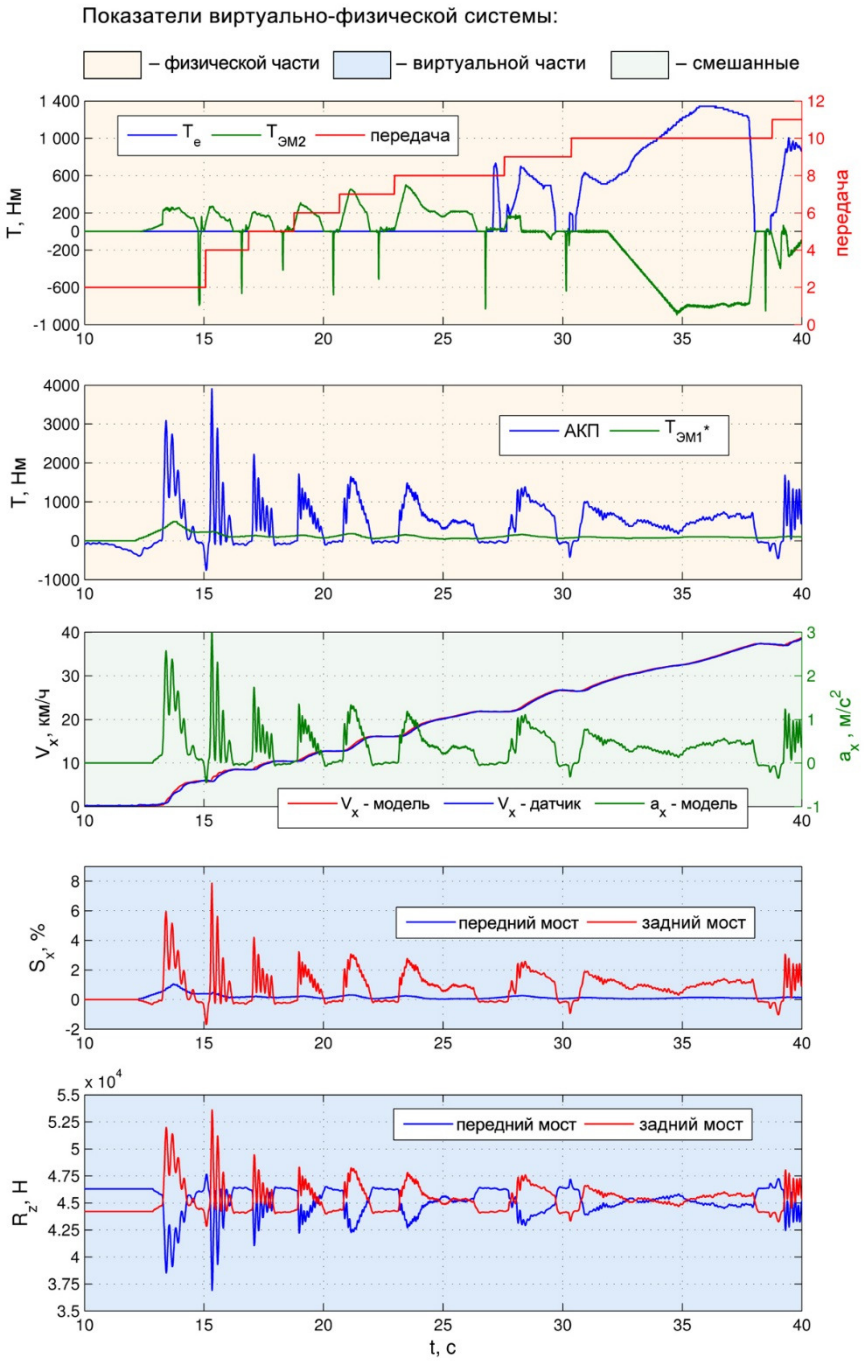


Рисунок 15 – Результаты испытаний виртуального автомобиля с физической КЭУ

Основные результаты и выводы

1. Разработана методика создания виртуально-физических объектов, являющихся инструментами исследования и разработки автомобилей с КЭУ. Синтез этих объ-

ектов возможен в рамках обобщенного подхода, заключающегося в использовании в качестве средств синхронизации виртуальной и физической частей замкнутых систем автоматического регулирования. Этим подходом обеспечивается решение исследовательских задач двух типов:

– Идентификация неизмеряемых при испытаниях автомобиля или КЭУ переменных, в частности крутящих моментов, посредством виртуального объекта, дублирующего физический. Способ идентификации реализуется путем обобщения прямой задачи динамики автомобиля с моделью водителя до задачи отслеживания измеренных при испытаниях переменных регуляторами, которые приводят модель исследуемого объекта в движение, автоматически определяя неизвестные крутящие моменты в силовом приводе.

– Расширение функциональных возможностей испытаний энергоустановок на агрегатных стендах с помощью систем с виртуальным объектом (автомобиль, дорога), дополняющим физический (КЭУ). Обоснован принцип создания нагрузки в системах этого типа. Нагрузка, соответствующая воспроизводимым режимам движения автомобиля, создается корректно с любым сочетанием крутящего момента и инерции динамометра без необходимости учета последней в виртуальной модели при выполнении условия размещения датчика обратных связей по моменту и частоте вращения вала.

Обоснован способ согласования нагрузочных режимов нескольких силовых агрегатов одной энергоустановки, в том числе механически не связанных, с помощью общей виртуальной модели автомобиля. Способ позволяет синхронизировать режимы работы испытываемых агрегатов при воспроизведении движения автомобиля с кинематическим рассогласованием приводимых ими колес.

2. Проанализированы и выбраны способы моделирования компонентов автомобиля с КЭУ: тяговой батареи, тепловых и электрических двигателей, эластичного колеса.

В качестве средств моделирования батареи рассмотрены электрические схемы замещения. Для проверки адекватности моделей использовались экспериментальные показатели тяговых батарей, полученные при испытаниях КЭУ и электромобиля. Среднеквадратические погрешности моделирования напряжения составили $\sigma = 0.15...0.5\%$ – в зависимости от схемы замещения (наименьшие погрешности обеспечивают схемы с динамическими звеньями). Установлено, что приемлемую точность расчета КПД аккумулятора обеспечивает расчет потерь мощности на его внутреннем сопротивлении. Сопоставление степени заряженности батареи, рассчитанной с учетом этих потерь, с оценками серийных систем мониторинга батарей (BMS) показало расхождения не более 0.15%.

Обоснован выбор эмпирических моделей тепловых и электрических двигателей, отражающих соответствие между управляющим сигналом и откликом на него (крутящим моментом) и энергетическую эффективность двигателя (для ДВС – расход топлива).

Для воспроизведения сцепных свойств шин выбрана модель Magic Formula (автор H. Pacejka), аппроксимирующая силовые факторы в контакте шины с опорной поверхностью тригонометрическими функциями.

3. Разработаны способ и инструментарий исследования системы рекуперации по комплексу показателей энергоэффективности и тормозных свойств автомобиля на

основе результатов его дорожных испытаний с ограниченным составом измеряемых показателей, не включающим крутящие моменты на колесах и в силовом приводе. Инструментарий включает: модель динамики автомобиля с учетом проскальзывания и сцепных свойств колес; модель силового привода; средства идентификации ненаблюдаемых крутящих моментов.

С помощью инструментария и экспериментальных данных определены свойства автомобиля и его энергоустановки в следующих аспектах, связанных с системой рекуперации: показатели режимов работы компонентов энергоустановки и автомобиля (тяговой батареи, тягового электропривода, колес); КПД электропривода (переменный, с максимальным значением 92...93%) и тяговой батареи (переменный, не менее 93%); соотношения тормозных моментов, создаваемых электродвигателем и тормозными механизмами; характеристика сцепления шин автомобиля.

Корректность идентификации показателей движения автомобиля и работы его энергоустановки подтверждается следующими результатами проведенного исследования:

– обеспечением приемлемого качества отслеживания регуляторами экспериментальных показателей, которые использовались для идентификации: частот вращения колес автомобиля (σ= 0.05...0.94%), силы тока батареи (σ = 1.5...2%);

– приемлемой сходимостью результатов моделирования с данными, полученными при испытаниях автомобиля, по следующим контрольным показателям: скорость автомобиля (σ =1.5...2%), продольное ускорение автомобиля (σ = 7.5...8.7%), напряжение батареи (σ =0.44...0.56%);

Определены параметры модели шины, которые существенно влияют на корректность идентификации ненаблюдаемых крутящих моментов на колесах автомобиля. Ими являются наклон $\varphi - S$ диаграммы в области устойчивой работы шины и соотношение нормальных жесткостей шин передних и задних колес.

4. Разработаны способ и инструментарий для исследования организации потоков мощности в КЭУ с двухпоточной бесступенчатой трансмиссией (на примере Toyota Hybrid System) по результатам лабораторных испытаний автомобиля с ограниченным составом измеряемых переменных, не включающим крутящие моменты силовых агрегатов, а также в отсутствии информации об алгоритме управления КЭУ. Инструментарий включает: модели динамики автомобиля и силового привода КЭУ; средства идентификации ненаблюдаемых крутящих моментов.

С помощью инструментария и экспериментальных данных определены свойства автомобиля и его энергоустановки в следующих аспектах: показатели режимов работы компонентов КЭУ (ДВС, тяговой батареи, электромашин); разделение потоков мощности между ДВС, батареей и электромашинами; КПД КЭУ (переменный, с максимальным значением порядка 95%); влияние циркуляции мощности на КПД КЭУ (снижение КПД на 7...10%).

Корректность идентификации показателей имитации движения автомобиля на стенде и работы его энергоустановки подтверждается следующими результатами проведенного исследования:

– обеспечением приемлемого качества отслеживания регуляторами экспериментальных показателей, которые использовались для идентификации: скорости автомобиля

($\sigma \approx 0.2\%$), частоты вращения вала ДВС ($\sigma = 0.1...3.25\%$), силы тока батареи ($\sigma \approx 4.9$ %);

– приемлемой сходимостью результатов моделирования с данными, полученными при испытаниях автомобиля, по следующим контрольным показателям: крутящий момент ДВС (сопоставление с данными из публикаций), напряжение батареи ($\sigma \approx 0.14\%$), часовой расход топлива ($\sigma \approx 8.2\%$), интегральный расход топлива ($\sigma \approx 0.74\%$, расхождение в конце ездового цикла $\approx 1.4\%$).

5. Разработана и реализована на базе агрегатного стенда система управления виртуально-физическими испытаниями автомобиля с КЭУ с расширенными возможностями воспроизведения режимов движения автомобиля.

Проведены виртуально-физические испытания автомобиля с КЭУ в ездовом цикле с определением его топливной экономичности и регистрацией основных показателей работы компонентов КЭУ. Проведены виртуально-физические испытания автомобиля с КЭУ с воспроизведением проскальзывания колес автомобиля и его курсового движения.

Установлено, что реализованный способ управления обеспечивает устойчивую работу виртуально-физической системы и приемлемое качество регулирования нагрузки, создаваемой динамометрическими устройствами. Согласование работы физической и виртуальной частей системы в соответствии с предложенной методикой позволяет адекватно воспроизводить работу КЭУ в режимах движения автомобиля, характеризующихся кинематическим рассогласованием вращения колес.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Куликов И.А., Фисенко И.А. Моделирование движения автомобиля с автоматической трансмиссией средствами программного пакета Simulink // Труды НАМИ: сб. науч. ст.– М., 2008. – Вып. №239, –С. 80–98. **Издание входит в перечень ВАК.**
2. Куликов И.А., Селифонов В.В. Математическое моделирование движения автомобиля с гибридной силовой установкой параллельного типа // Труды НАМИ: сб. науч. ст.– М., 2009. – Вып. №242, –С. 67–84. **Издание входит в перечень ВАК.**
3. Куликов И.А., Селифонов В.В. Комбинированная энергоустановка последовательно-параллельного типа: теоретическое исследование // «Журнал Автомобильных Инженеров». – М., 2011.– №6(71) – С. 14–17. **Издание входит в перечень ВАК.**
4. Куликов И.А. Оценка свойств гибридных автомобилей при их сертификации // «Вестник ВНИИНМАШ». – М., 2011.– №10 (10). с. 39-44. **Издание входило в перечень ВАК.**
5. Николаенко А.В., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Павлушков Б.Э., Филонов А.И., Благушко Я.В., Баулина Е.Е., Куликов И.А., Карпухин К.Е., Данилин М.Ф. Способ управления комбинированной энергетической установкой // Патент (изобретение) RU 2424926 C1 - 2011.
6. Куликов И.А. Специфика сертификации гибридных грузовых автомобилей и автобусов // «Вестник ВНИИНМАШ». – М., 2012.– №3 (13).– С. 58–63. **Издание входило в перечень ВАК.**
7. Бахмутов С.В., Павлушков Б.Э., Селифонов В.В., Серебряков В.В., Филонов А.И., Благушко Я.В., Маликов О.В., Баулина Е.Е., Куликов И.А., Карпухин К.Е. Комбинированная энергетическая установка гибридного автомобиля // Патент (изобретение) RU 2457959 C2 - 2012.

8. Малкин М.А., Куликов И.А. Улучшение тягово-динамических свойств и топливной экономичности дорожных грузовых автомобилей за счёт вспомогательной системы привода передних колес // «Журнал Автомобильных Инженеров». – М., 2013.– №5(82).–С. 32–38. **Издание входит в перечень ВАК.**
9. Куликов И.А., Коркин С.Н., Семикин С.Н., Бокарев А.И. Применение технологии HILS в разработке энергоустановки автопоезда с КЭУ // Труды НАМИ: сб. науч. ст.– М., 2014. – Вып. №257 – С. 95–102. **Издание входит в перечень ВАК.**
10. Куликов И.А. Технология HIL как инструмент создания автомобильных многоприводных силовых агрегатов // Журнал «Известия МГТУ МАМИ». – М., 2014.– №3(21).–С. 27–34. **Издание входит в перечень ВАК.**
11. Kulikov I.A., Baulina E.E., Filonov A.I. Optimal Control of a Hybrid Vehicle's Powertrain Minimizing Pollutant Emissions and Fuel Consumption // SAE Technical Paper 2014-01-2372, 2014, doi: 10.4271/2014-01-2372.
12. Баулина Е.Е., Бахмутов С.В., Куликов И.А., Круташов А.В., Серебряков В.В., Филонов А.И. Комбинированные энергетические установки транспортных средств // Учебное пособие. – М.: Тракторы и сельхоз машины, 2014. 105 с.
13. Куликов И.А., Бахмутов С.В., Барашков А.А. Исследование динамических характеристик автомобиля с системами активной безопасности посредством виртуальных и дорожных испытаний. // Труды НАМИ: сб. науч. ст.– М., 2016. – Вып. №265, –С. 53–65. **Издание входит в перечень ВАК.**
14. Kulikov, I., Shorin, A., Bakhmutov, S., Terenchenko, A. et al. A Method of Powertrain's Components Sizing for a Range Extended Electric Vehicle // SAE Technical Paper 2016-01-8096, 2016, doi:10.4271/2016-01-8096.