

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Куликова Ильи Александровича
«Совершенствование средств создания и исследования
автомобилей с комбинированными энергоустановками
с помощью технологий виртуально-физических испытаний»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины»

Актуальность тематики работы

Автомобили с комбинированными энергоустановками (КЭУ) в настоящее время являются наиболее распространенным видом альтернативного транспорта. Использование КЭУ позволяет существенно улучшить топливную экономичность автомобилей и уменьшить их вредное воздействие на окружающую среду. КЭУ являются сложными многокомпонентными системами, и реализация их потенциала требует применения нетривиальных научно-инженерных «инструментов», как теоретических, так и экспериментальных. В рассмотренной диссертационной работе показано решение научной задачи создания таких «инструментов», что делает ее актуальной.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Научно обоснован способ создания систем-наблюдателей, позволяющих идентифицировать неизмеряемые крутящие моменты в силовом приводе автомобиля. От существующих способов он отличается сохранением структуры модели и увеличенными возможностями настройки качества идентификации с помощью регуляторов.
- Дано научное обоснование способа создания нагрузки в виртуально-физических системах на базе агрегатных стендов. Способ позволяет корректно воспроизводить нагрузочные режимы с разными моделями автомобиля (с учетом и без учета сцепных свойств колес, с криволинейным движением и т.д.).
- Разработаны модели автомобилей с КЭУ, позволяющие проводить исследования с учетом механических и электрических переменных энергоустановки и динамических свойств автомобиля.

– Предложен и реализован способ исследования потоков мощности и энергоэффективности КЭУ по экспериментальным данным в отсутствии измерения крутящих моментов агрегатов КЭУ и при неизвестном алгоритме управления КЭУ.

– Предложен и реализован способ исследования автомобиля с рекуперативно-механической тормозной системой по экспериментальным данным в отсутствии измерения крутящего момента электродвигателя и моментов тормозных механизмов.

Обоснованность и достоверность результатов исследований

Выбор способов моделирования динамики автомобиля и компонентов энергоустановок, а также принятые при разработке моделей допущения представляются достаточно обоснованными. В исследованиях использован широкий экспериментальный материал, включающий результаты испытаний автомобиля с КЭУ на базе электромобиля, серийного автомобиля с КЭУ и серийной КЭУ грузового автомобиля. Испытания проводились на специализированных дорогах и в лабораториях с использованием поверенного измерительного оборудования. Отдельно следует отметить экспериментальные данные по тяговым батареям, использованные для оценки адекватности моделирования их электрических переменных.

Результаты моделирования сопоставлены с экспериментами по ряду показателей, получена их хорошая сходимость. Результаты представлены в виде серий графиков, которые наглядно демонстрируют изменение переменных и дают достаточно полную картину работы исследуемых объектов во времени. По сопоставляемым переменным рассчитаны погрешности, величины которых свидетельствуют о хорошей адекватности и точности моделирования.

Научная и практическая значимость результатов работы

– Как научную, так и практическую ценность представляет способ создания систем-наблюдателей крутящего момента в силовом приводе автомобиля. Они позволяют проводить исследования автомобилей с минимальными средствами измерений и в отсутствии знаний алгоритмов управления энергоустановок, что

актуально при исследовании серийных автомобилей с закрытым кодом систем управления.

– Научную и практическую значимость представляет методика создания систем виртуально-физических испытаний на базе агрегатных стендов и описание механизма создания нагрузки в них. Использование таких систем позволит заменить существенную часть дорожных отладочных и доводочных испытаний автомобилей лабораторными испытаниями их энергоустановок и агрегатов. Это позволит сделать процесс разработки и исследования автомобилей с КЭУ дешевле, быстрее, а также независимым от сезона, погоды и наличия подходящих испытательных дорог.

– Научную значимость представляют разработанные модели автомобилей с КЭУ, включающие основные компоненты энергоустановок и отражающие их механические и электрические переменные, а также показатели энергоэффективности. Эти модели могут использоваться для разработки и исследований автомобилей с КЭУ.

Структура и содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы работы – совершенствования инструментария исследования и создания автомобилей с КЭУ. Даны 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 технология КЭУ анализируется в ключевых аспектах, которые определяют свойства энергоустановки и оснащенного ей автомобиля. Дается анализ основных схем КЭУ. При анализе функций КЭУ акцент сделан на организации потоков мощности в энергоустановке и рекуперации энергии автомобиля при торможении. Представлен анализ этих функций с точки зрения режима работы тяговой батареи. Отмечается, что полнота рекуперации обеспечивается только при совместной работе электропривода и рабочей тормозной системы, что требует проработки разделения тормозных усилий между ними.

Также в первой главе описаны теоретические и экспериментальные инструменты исследования и разработки автомобилей с КЭУ. Проанализированы их недостатки и ограничения, в частности с точки зрения возможностей измерений и ограниченной информации об алгоритмах управления серийными КЭУ. Сделаны выводы о необходимости использования более совершенных инструментов, позволяющих преодолеть эти ограничения.

Во второй главе проведен анализ существующих средств виртуально-физических испытаний, которые могут быть использованы для устранения недостатков исследовательского инструментария. Выделены два типа виртуально-физических систем: с дублированием физического объекта виртуальным (для идентификации ненаблюдаемых переменных) и с дополнением физического объекта виртуальным (для воспроизведения работы энергоустановки на агрегатном стенде в различных режимах движения автомобиля). Проанализировано использование систем первого типа для идентификации ненаблюдаемых крутящих моментов в силовом приводе автомобиля. Проанализировано использование систем второго типа для испытаний КЭУ и их компонентов, в частности, в процедуре Глобальных технических правил №4 для сертификации большегрузных автомобилей с КЭУ с определением их экологического класса. Показана эволюция систем стендовых испытаний от простой имитации прямолинейного движения автомобиля до моделирования движения с проскальзыванием и кинематическим рассогласованием колес.

При анализе виртуально-физических систем отмечены недостатки описанного в публикациях наблюдателя входных переменных и необходимость их устраниния путем изменения структуры наблюдателя. Отмечена необходимость научного обоснования способов создания нагрузки на агрегатных стенах.

В третьей главе описана обобщенная методика создания усовершенствованных виртуально-физических систем с использованием замкнутых систем автоматического управления с регуляторами, которые осуществляют сопряжение и синхронизацию виртуальной и физической части исследуемого объекта.

Обоснование структуры виртуально-физических систем-наблюдателей выполнено путем анализа решения задачи динамики с заданной фазовой

траекторией. Для решения прямой задачи динамики используется замкнутая система управления с регулятором. Обобщение этого подхода с использованием экспериментальных данных в качестве заданных фазовых траекторий позволяет идентифицировать один или несколько ненаблюдаемых крутящих моментов на валах силовых агрегатов энергоустановки или на колесах автомобиля. Приведены примеры систем идентификации, организованных по этому принципу.

Обоснование способа создания нагрузки в виртуально-физических системах на базе агрегатных стендов выполнено путем анализа равновесия моментов, создаваемых испытываемым агрегатом и нагружающим устройством, а также момента в виртуальной части объекта испытаний, являющейся «продолжением» физической части. Управление моментом нагружающего устройства осуществляется замкнутой системой с регулятором. На базе этого принципа предлагается способ испытаний КЭУ с несколькими агрегатами. В этом случае все виртуальные части силовых агрегатов связываются с общей для них моделью динамики автомобиля, в результате чего создается согласованная нагрузка, соответствующая движению автомобиля в различных условиях, в том числе с рассогласованием вращения колес и их приводов из-за проскальзывания или кинематики поворота.

В четвертой главе проведен анализ и выбор математических моделей компонентов КЭУ и автомобиля: тяговых батарей, тепловых и электрических двигателей, шин автомобиля. Показана целесообразность использования т.н. имитационных моделей, которые воспроизводят реакцию выходных переменных моделируемого объекта на входные (или на управляющие сигналы), не отражая внутреннюю структуру объекта и физические или химические процессы, происходящие в нем.

Рассмотрены модели тяговых батарей в виде электрических схем замещения. Показано, что наилучшее качество воспроизведения напряжения батареи обеспечивается схемами замещения с динамическими звенями, включающими емкостные элементы. Представлен способ расчета степени заряженности батареи по потерям на внутреннем сопротивлении по закону Джоуля-Ленца. Показаны результаты моделирования работы тяговых батарей КЭУ и электромобиля.

Выбранные модели двигателей воспроизводят отклик крутящего момента на валу на управляющий сигнал, а также аппроксимируют или интерполируют показатели расхода топлива ДВС и КПД электропривода. Представлены данные из публикаций и экспериментов, проведенных автором, которые подтверждают обоснованность этого выбора.

Проанализированы эмпирические модели шины, которые аппроксимируют коэффициент сцепления в функции проскальзывания колеса. По мнению автора, наиболее подходящей для решения задач исследования является модель Magic Formula, разработанная голландским ученым Н. Рисејка.

В пятой главе описано исследование автомобиля, оснащенного рекуперативно-механической тормозной системой, на примере модифицированного электромобиля ВАЗ 1817 Ellada. Исследование проведено в аспектах энергоэффективности и тормозных свойств автомобиля. Для этого использовались результаты его испытаний на дороге автополигона и виртуальная модель, отражающая динамику автомобиля с учетом сцепных свойств колес и основные компоненты энергоустановки, включая электропривод и тяговую батарею. Для моделирования дорожных испытаний, в которых не измерялся крутящий момент в силовом приводе и моменты тормозных механизмов, была создана система идентификации ненаблюдаемых переменных. С ее помощью были идентифицированы распределения тормозных моментов между электродвигателем и тормозными механизмами при замедлении автомобиля, а также КПД электропривода и тяговой батареи. Приведены серии графиков с изменением соответствующих переменных во времени и рассчитаны погрешности моделирования в сравнении с измеренными переменными движения автомобиля и работы энергоустановки, подтвердившие адекватность воспроизведения дорожных экспериментов с помощью модели.

В шестой главе описано исследование автомобиля с КЭУ на примере Toyota Prius в аспектах режимов работы энергоустановки, организации ее потоков мощности и энергоэффективности. В исследованиях использовались результаты испытаний автомобиля на стенде с беговыми барабанами в ездовом цикле и его математическая модель, включающая ДВС, электродвигатели, батарею, планетарную трансмиссию и динамику автомобиля. Для моделирования

испытаний, в которых не измерялись крутящие моменты двигателей, была создана система идентификации ненаблюдаемых переменных. С ее помощью было проведено моделирование испытаний автомобиля в загородном ездовом цикле с определением основных переменных энергоустановки и топливной экономичности. Результаты моделирования были использованы для анализа потоков мощности и КПД КЭУ. Адекватность моделирования подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными, как в форме графиков, так и путем расчета погрешностей.

В седьмой главе описано создание системы испытаний КЭУ грузового автомобиля, состоящей из физической части (КЭУ) и виртуальной части (автомобиля), которые объединены в замкнутую систему с силовыми и информационными связями. Система воспроизводит движение виртуального автомобиля с физической КЭУ в различных режимах. С ее помощью были выполнены испытания с имитацией движения автомобиля в ездовом цикле с определением его топливной экономичности, а также испытания на разгонную и тормозную динамику с учетом сцепления шин с опорной поверхностью. Результаты этих испытаний представлены в виде серий графиков, отражающих переменные физической и виртуальной частей объекта исследования.

Приложение А к диссертации дает дополнительный материал к главе 7, описывающий виртуально-физическое моделирование, которое воспроизводит криволинейное движение автомобиля с КЭУ.

Выводы по отдельным главам достаточно полно характеризуют результаты исследований, проведенных в них. Основные результаты и выводы соответствуют поставленным задачам.

Результаты диссертационного исследования достаточно полно отражены автором в 14 печатных работах, из которых 9 опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Замечания

1. Глава 3 является ключевой в данной работе, однако недостаточно полно и определенно представляет методику создания систем виртуально-физических испытаний для исследования и разработки автомобилей с КЭУ. В главе следовало бы четко обозначить алгоритм, последовательность действий и используемые при этом методы и средства с целью возможности реализации предлагаемой методики.
2. В главе 3 следовало бы более ясно осуществить связь ПИ-регуляторов, описанию которых посвящен отдельный подраздел, с методикой создания систем виртуально-физических испытаний.
3. Отсутствуют выводы по Главе 3.
4. Представление результатов испытаний исключительно в виде графических зависимостей является наглядным, однако затрудняет количественную оценку представленных в работе данных.
5. При исследовании серийного автомобиля с КЭУ фирмы Toyota не учитывалась эффективность повышающего преобразователя постоянного напряжения, включенного между высоковольтной батареей и тяговым инвертором.
6. Целесообразно сопоставить результаты виртуально-физических испытаний на стенде (глава 7) с результатами дорожных испытаний того же автомобиля с той же КЭУ в тех же режимах движения. Это подтвердит адекватность виртуально-физического моделирования и корректность способа создания нагрузки в системах стендовых испытаний, описанного в главе 3.

Заключение

Диссертация И.А. Куликова является актуальной и завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи совершенствования инструментария исследования и разработки автомобилей с КЭУ посредством технологий виртуально-физических испытаний.

Основные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в печатных работах и аprobированы на научных конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации и в достаточной степени его отражает. Выводы соответствуют поставленным задачам и отражают научную новизну работы. Приведенные выше замечания не снижают ценность работы, их можно рассматривать как рекомендации для ее развития.

Диссертационная работа Куликова И.А. отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины».

Официальный оппонент –

Засл. деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Электротехника и электрооборудование»
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический
университет» (МАДИ)

125319, г. Москва, Ленинградский

проспект, д. 64.

Тел.: (903)784-88-76

E-mail:ioutt@mail.ru

Ютт Владимир Евсеевич

Подтверждение подписи оппонента

Ученый секретарь Ученого совета МАДИ
28 ноября 2016 г.

Немчинов М.В.

