

Председателю диссертационного совета
31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ»
доктору технических наук, старшему научному сотруднику
Кисуленко Борису Викторовичу
Россия, 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2

О Т З Ы В

официального оппонента Тараторкина Александра Игоревича на диссертацию
Климова А.В. «Методология повышения эффективности электробуса на основе
синтеза законов управления электромеханической силовой передачей»,
представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по
специальности 2.5.11 - «Наземные транспортно-технологические средства и
комплексы»

Актуальность темы исследования

Расширение парка электробусов с электромеханической силовой передачей (ЭМСП) в РФ и за рубежом выявило их недостаточное соответствие возрастающим потребительским требованиям к комплексной эффективности. Основным сдерживающим фактором остается ограниченный запас автономного хода из-за несовершенства источников энергии. В этой связи актуальна задача повышения энергоэффективности путём минимизации потерь при разгоне и установившемся движении, а также увеличения рекуперации при торможении. Решение данной задачи возможно через обеспечение работы агрегатов ЭМСП в зоне максимального КПД на характерных эксплуатационных режимах. Параллельно требуется снижение динамической нагруженности, определяющей плавность хода, надежность и безопасность ТС.

Применяемые методы управления (динамическое программирование, нечёткая логика, искусственный интеллект) отличаются высокой ресурсоёмкостью, требуют мощных вычислителей и репрезентативных данных. Их использование в динамичном транспортном потоке не всегда рационально из-за удорожания системы и рисков снижения безопасности. Следовательно, необходима разработка метода, свободного от этих ограничений, работающего на минимальном наборе датчиков и использующего адаптивные наблюдатели.

Выявляются случаи преждевременных отказов элементов ЭМСП при малых пробегах. При движении по дороге с низким сцеплением возникает повышенное скольжение колес, ведущее к потерям и возбуждению высокоинтенсивных

колебаний. Усугубляющими факторами выступают высокая жесткость внешней характеристики электропривода и отсутствие элементов для рассеивания энергии колебаний. Существующие методы направлены на демпфирование уже развившегося процесса, однако их быстроедействие недостаточно. Поэтому актуальна разработка превентивного метода управления, предотвращающего возникновение колебаний на основе фундаментальных закономерностей.

Проблема повышения комплексной эффективности ЭМСП ТС является актуальной ввиду роста их численности и требований к производительности и безопасности при недостаточной научной обоснованности методов управления РП, уменьшающих потери, увеличивающих рекуперацию и учитывающих риск возникновения нелинейных автоколебаний.

Цель исследования – повышение комплексной эффективности ТС за счет снижения потерь энергии, увеличения рекуперации и снижения динамической нагруженности на основе научно обоснованных принципов и методов управления РП ЭМСП.

Задачи исследования

1. Разработать математическую модель системы «колесное ТС с ЭМСП – окружающая среда».
2. Разработать принципы определения технических характеристик ЭМСП, обеспечивающих повышение комплексной эффективности.
3. Разработать адаптивные методы оценки ключевых параметров РП в системе «ЭМСП – колесо – дорога».
4. Установить закономерности возникновения высокоинтенсивных колебаний в системе «ЭМСП – колесо – дорога».
5. Обосновать принцип снижения динамической нагруженности и разработать метод управления РП.
6. Обосновать принцип повышения энергоэффективности и разработать метод управления РП.
7. Провести экспериментальную оценку работоспособности и эффективности разработанных принципов и методов управления РП.

Научная новизна работы

1. Разработан адаптивный метод оценки момента сил сопротивления, приведённого к колесу в системе «ЭМСП – колесо – дорога». Отличие от известных подходов состоит в том, что задача оценки сведена к поиску оптимального

управления, обеспечивающего обнуление фазовых координат и минимизацию квадратичного функционала интегрального типа.

2. Установлены закономерности возникновения нелинейных высокоинтенсивных колебаний (вплоть до автоколебаний) в системе «ЭМСП – колесо – дорога» для различных режимов:

- в ведущем режиме качения — при вырождении в ноль или изменении знака критерия Бендиксона на фазовой плоскости для поступательного и вращательного движения колеса при полном скольжении (мягкое возбуждение);
- в тормозном режиме качения — для вращательного движения колеса при частичном скольжении (мягкое возбуждение), а также для поступательного перемещения колеса при полном скольжении (жёсткое возбуждение);
- для вращательного движения вала ТЭД и поступательного движения кузова — вне зависимости от режима качения и скольжения. Показано, что частота возбуждаемых колебаний изменяется в зависимости от степени скольжения колеса и синхронизируется с колебаниями нормальной нагрузки, возникающими при движении по неровной опорной поверхности.

3. Научно обоснован принцип снижения динамической нагруженности ЭМСП, заключающийся в обеспечении устойчивости движения системы путём предотвращения поступления энергии, провоцирующей повышенное скольжение колёс в ведущем и тормозном режимах. На основе этого принципа разработан метод управления РП ЭМСП, который вводит в расчёт уставки запрашиваемого крутящего момента дополнительный противофазный диссипативный момент («вязкое трение»). Это позволяет выводить из системы энергию, способствующую возбуждению колебаний, либо не допускать её поступления.

4. Научно обоснован принцип повышения энергоэффективности колёсного ТС с ЭМСП, направленный на снижение удельного расхода энергии за счёт уменьшения потерь, повышения КПД и увеличения рекуперации. Для реализации этого принципа предложен метод однопедального управления, при котором водитель воздействует только на педаль хода. Метод предусматривает:

- установление границ режимов работы ЭМСП и соответствующих зон функционирования;
- формирование зависимостей тягового и рекуперативного моментов с учётом характеристик ТС и условий движения;
- формирование управляющего сигнала, обеспечивающего минимизацию нарастания удельного усилия, движение изображающей точки РП в областях

максимального КПД и плавный переход между режимами с нулевой скоростью изменения момента, что исключает возбуждение колебаний.

5. Разработан метод синтеза S-образных кривых зависимости крутящего момента (тягового и рекуперативного) от положения педали хода. Метод основан на стыковке полиномов по значениям и производным в краевых и граничных точках, обеспечивает плавное изменение момента, особенно в зонах нулевого углового ускорения вала ТЭД и нулевой скорости ТС при смене режима. Это предотвращает ударные нагрузки в зубчатых зацеплениях и исключает возбуждение колебаний.

Практическая значимость диссертационного исследования

1. Разработанная и верифицированная математическая модель пространственного движения колёсного ТС позволяет на стадии проектирования определять режимы нагружения, формировать законы управления РП ЭМСП, а также проводить виртуальные испытания и настройку алгоритмов.

2. Предложены принцип и методика определения ключевых технических характеристик узлов и агрегатов ЭМСП, обеспечивающих повышение эффективности ТС. Методика включает анализ условий эксплуатации, формирование внешней механической характеристики, выбор типа и конфигурации ТЭД, его главных размеров и параметров механической трансмиссии с учётом статистических характеристик эксплуатации.

3. Разработаны расчётная схема и инженерная методика, позволяющие на этапе проектирования исследовать закономерности возбуждения высокоинтенсивных нелинейных колебаний. Методика базируется на анализе дифференциальных уравнений движения системы и определении поведения критерия Бендиксона (дивергенции) на фазовой плоскости.

4. Разработанный метод синтеза зависимостей момента от положения педали хода может быть адаптирован для других ТС с ЭМСП. Он обеспечивает стыковку полиномов по значениям и производным, что гарантирует плавность изменения момента при смене режимов и снижает динамическую нагруженность.

5. Разработанные адаптивные наблюдатели ключевых параметров РП могут быть использованы при создании программного обеспечения систем управления колёсных ТС с ЭМСП.

6. Научно обоснованный принцип снижения динамической нагруженности (через введение диссипативного момента «вязкого трения») и

реализующий его метод могут применяться в алгоритмах управления для подавления или предотвращения нелинейных колебаний.

7. Научно обоснованный принцип повышения энергоэффективности и метод однопедального управления, обеспечивающий движение в зонах высокого КПД и плавную рекуперацию, также могут быть использованы при разработке программного обеспечения систем управления.

8. Результаты обобщения и анализа условий эксплуатации электробусов, а также характеристики эквивалентного цикла (маршрута) с учётом пассажиропотока, могут применяться при проектировании ЭМСП, энергоустановок и оптимизации их характеристик.

9. Материалы диссертации могут быть полезны научно-исследовательским и проектно-конструкторским организациям при разработке перспективных и модернизации существующих ТС с ЭМСП.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов базируется на логическом построении исследования, корректной постановкой цели и задач, использовании методов динамического сложных механических систем, изложенных в трудах отечественных и зарубежных учёных, а также подтверждается:

- результатами имитационного моделирования на ЭВМ и экспериментальных исследований;
- сопоставлением теоретических и экспериментальных результатов, подтверждённых актами внедрения (в том числе ООО «Инновационный центр КАМАЗ», ПАО «КАМАЗ», ООО «НПФ Ирбис», АО «АмперМагнит», ООО НПФ «АРС ТЕРМ», ООО «Силовая электроника», АО «ПО Муроммашзавод», АО «КАМА», а также вузами: ИРНИТУ, Московский политехнический университет, МФТИ, МАДИ, ВГЛТУ).

Таким образом, анализ цели, задач, элементов научной новизны, практической значимости, а также обоснованности и достоверности позволяет заключить, что диссертационная работа удовлетворяет критериям научной новизны, а сформулированные выводы и рекомендации являются обоснованными.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на многих научно-технических семинарах и конференциях (перечень приведён в диссертации).

Публикации по теме диссертации

Основные результаты исследования опубликованы в 39 печатных работах, в том числе:

- 21 статья в изданиях, рекомендованных ВАК РФ;
- 7 публикаций в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science.
- по материалам диссертации получено 7 патентов РФ (на изобретения и полезные модели) и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Количество и качество публикаций полностью соответствуют требованиям ВАК РФ. Материалы, представленные в автореферате, отражают основное содержание диссертации.

Структура работы

Диссертация Климова А.В. состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы (461 наименование) и приложений. Общий объём — 409 страниц машинописного текста, включая 350 рисунков, 30 таблиц и приложения с актами внедрения. После каждой главы приведены выводы, в заключении обобщены итоговые результаты работы.

Во введении обоснована актуальность, определена степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе («Повышение потребительских и эксплуатационных свойств электрифицированных транспортных средств») на основе обзора отечественных и зарубежных источников проанализировано современное состояние проблемы. Рассмотрены работы, посвящённые повышению эффективности ТС за счёт снижения динамической нагруженности и улучшения энергоэффективности, включая исследования нелинейных динамических процессов (в частности, автоколебаний в трансмиссии) и методов борьбы с последствиями повышенного скольжения колёс и элементов трансмиссии, в том числе для машин с ЭМСП. Показано, что в существующих исследованиях не учитывается потенциальная возможность возникновения нелинейных колебаний в рассматриваемых системах.

Во второй главе («Математическая модель системы «колёсное транспортное средство с электромеханической силовой передачей – окружающая среда») приведено теоретическое описание имитационной модели пространственного движения аккумуляторного ТС с ЭМСП. Модель позволяет исследовать

динамические и нелинейные колебательные процессы, их влияние на характеристики движения, а также выполнять отладку алгоритмов управления.

В третьей главе («Разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности применяемых агрегатов и систем») представлены результаты анализа эксплуатационных данных ТС с ЭМСП. Эти данные использованы для определения типа и главных размеров тягового электродвигателя (ТЭД), построения внешней скоростной характеристики, назначения номинальных режимов, распределения КПД и выбора параметров механической трансмиссии, позволяющих повысить общую эффективность ЭМСП.

В четвёртой главе («Синтез оптимальных адаптивных методов наблюдения, обеспечивающих работу систем управления») изложены теоретические основы и процедура синтеза адаптивных наблюдателей ключевых параметров режимов работы ЭМСП, необходимых для реализации задач управления.

В пятой главе («Исследование особенностей протекания колебательных процессов в электромеханической силовой передаче») установлено, что вследствие высокой компактности и жёсткости конструкции в ЭМСП возникают лишь упругие резонансные колебания с малыми амплитудами и незначительными возмущениями, не приводящие к разрушению элементов. Субгармонических, супергармонических и комбинационных резонансных режимов не обнаружено из-за малой фазовой неустойчивости сил взаимодействия.

В шестой главе («Метод управления с функцией подавления высокоинтенсивных колебательных процессов при повышенном проскальзывании колёс») представлены научное обоснование принципа снижения динамической нагруженности, теоретические основы метода подавления высокоинтенсивных колебаний в ЭМСП и его практическая реализация.

В седьмой главе («Повышение энергоэффективности движения») изложены научное обоснование принципа повышения энергоэффективности за счёт снижения удельного расхода энергии, теоретические основы и реализация метода управления РП ЭМСП, позволяющего уменьшить потери и увеличить рекуперацию, а также снизить динамическую нагруженность при переходах между режимами. Метод включает систему правил установления границ режимов движения и формирования зависимостей крутящего момента, обеспечивающих плавный переход (при нулевой скорости изменения момента), движение изображающей точки в зонах максимального КПД и минимизацию нарастания удельного усилия для исключения возбуждения колебаний.

В восьмой главе («Экспериментальные исследования работоспособности и эффективности метода управления, позволяющего подавлять колебания») обоснованы цели и задачи, разработана программа сравнительных экспериментальных исследований. Описаны испытания, включающие сравнительные заезды ТС с реализованным методом управления и без него в условиях повышенного скольжения.

В девятой главе («Исследование эффективности и работоспособности метода управления формированием уставок крутящего и тормозного моментов посредством одной педали») сформулированы цель и задачи экспериментальной проверки метода однопедального управления. Проведено сравнение заездов с классическим управлением и с однопедальным в условиях, приближённых к эксплуатационным (имитация дорожных ситуаций, движение с переменной скоростью, смешанный цикл).

Основные замечания по содержанию диссертации

1. В характеристиках тягового электродвигателя, приведённых на рисунке 3.15, нарушена взаимосвязь между мощностью, частотой вращения и крутящим моментом (не соблюдается соотношение $M=P/\omega$), что ставит под сомнение корректность представленных номинальных параметров.

2. При разработке математической модели пространственного движения колесного ТС с электромеханической силовой передачей не раскрыта степень детализации элементов трансмиссии. Остаётся неясным, учитываются ли упругие и инерционные звенья, определяющие возникновение колебательных процессов в заявленном частотном диапазоне, и каким образом моделируются их связи.

3. В третьей главе утверждается, что применение переключаемой трансмиссии снижает потери энергии на 7 %. Однако из текста не следует, проводилась ли оценка сопутствующих затрат: увеличение трудоёмкости изготовления и сборки редукторов с устройствами переключения передач, а также усложнение алгоритмов и аппаратной реализации системы управления.

4. В числе вычисляемых на борту транспортного средства наблюдателей указаны момент сил сопротивления и масса ТС. Обе величины входят в одно уравнение движения, составленное на основе второго закона Ньютона (по аналогии с зависимостью (4.1)), при этом известным параметром является движущий момент, вычисленный по току. Не обоснован способ определения двух неизвестных из одного уравнения, а также не раскрыт учёт влияния уклона дороги и переменного сопротивления качению на эти оценки.

5. При сопоставлении момента сопротивления, измеренного тензометрическими колёсами, и вычисленного момента (рис. 7 автореферата) автор отмечает их расхождение на переходных процессах и совпадение в установившихся режимах. Не уточнено, какое влияние оказывает пренебрежение пиковыми значениями момента на качество управления трансмиссией и на устойчивость системы в динамических режимах.

6. В расчётной схеме для определения собственных частот и форм колебаний трансмиссии приведена половина двухмоторной ЭМСП. Не ясно, каким образом в этой схеме учитывается двухпоточность конструкции (распределение потоков мощности и возможное взаимовлияние приводов).

7. Производилось ли сравнение расчётного гармонического возмущения, формируемого тяговыми электродвигателями, с экспериментальными данными, полученными на испытательном стенде НТЦ ПАО КАМАЗ (рис. 51 диссертации)? Учитывая активное развитие электротранспорта, такие данные являются крайне востребованными для расчётных отделов, однако в работе не приведены количественные оценки их расхождения.

8. В тексте автореферата крайне сжато изложены результаты по разработке зависимостей для однопедального управления, хотя данный результат представляет значительную научную и практическую ценность. Желательно более подробное освещение этого аспекта.

9. В тексте диссертации не раскрыто, учитывалось ли при расчёте собственных частот ЭМСП влияние дополнительного демпфирующего (диссипативного) момента вязкого трения, выступающего в качестве управляющего фактора. Если учитывалось, то не указана степень его влияния на получаемые частотные характеристики.

Указанные выше замечания не снижают общей положительной оценки диссертации и позволяют считать работу Климова А.В. завершённым исследованием, предоставляющим учёным и разработчикам научно-методический аппарат для эффективного решения научных и инженерных задач, возникающих при разработке транспортных машин с электромеханическими силовыми передачами.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением ВАК РФ

Диссертация Климова Александра Владимировича «Методология повышения эффективности электробуса на основе синтеза законов управления электромеханической силовой передачей», представленная на соискание учёной

степени доктора технических наук, выполнена на актуальную тему и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Она соответствует паспорту научной специальности 2.5.11 – «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы».

Диссертация отвечает требованиям пунктов 9 – 14 Положения о присуждении учёных степеней. Соискателем решена важная научная проблема повышения комплексной эффективности транспортных средств за счёт снижения потерь энергии, увеличения её рекуперации и уменьшения динамической нагруженности на основе научно обоснованных принципов и методов управления рабочим процессом электромеханической силовой передачи.

Автор заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.11 – «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы».

Официальный оппонент:

А.И. Тараторкин

Доктор технических наук, старший научный сотрудник отдела механики транспортных машин ФГБУН Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН (специальность 05.05.03 – «Колёсные и гусеничные машины»)



95.08.26

Россия, 620049, Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34,
ФГБУН Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН
Тел.: (3522) 41-15-46. Эл. почта: alexandr_tar@mail.ru

Подпись Тараторкина А.И. удостоверяю

*и.о. устного секретаря
ИМАН УрО РАН, к.т.н. Е.А. Тараторкина*

