

Учёному секретарю диссертационного
совета 31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ»
кандидату технических наук, доценту

Курмаеву Р.Х.

Россия, 125438, г. Москва, ул.
Автомоторная, д. 2

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук Янькова Олега Сергеевича

на диссертацию Климова Александра Владимировича

на тему: **«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»

1. Актуальность темы диссертационной работы

Одним из важных вопросов в автомобильной индустрии является проблема сокращения выбросов токсичных веществ от двигателей внутреннего сгорания. Разработка гибридных и электрических транспортных средств является жизнеспособным решением данной масштабной проблемы. Как у нас в стране, так и за рубежом разработаны стратегии развития электрифицированных автомобилей. В результате чего увеличилось количество данной техники в эксплуатации. Однако главным препятствием массового использования таких машин является малые расстояния, преодолеваемые на одной подзарядке. Одной из актуальных проблем при их проектировании является обеспечение эффективного использования энергии для увеличения пробега. Для этого весьма актуальна разработка научно обоснованных принципов и методов, позволяющих это обеспечить.

Известно, что одним из эффективных направлений достижения этого является организация наиболее рационального рабочего процесса силовой передачи заключающегося в распределении тяговых и тормозных усилий как между ведущими осями, так и отдельными колёсами. Однако имеющиеся исследования основаны на использовании большого объёма данных необходимых для управления, к которым предъявляются высокие требования к качеству. Данные подходы сопряжены с необходимостью применения значительных вычислительных мощностей, а также нередко сталкивается с отсутствием необходимой информации, без которой теряется их эффективность. При этом создание методов лишённых данных недостатков является актуальным.

Развитие колёсных машин указанного типа неуклонно идёт по пути непрерывного возрастания удельной энергонасыщенности машин, увеличения скоростей движения и передаваемых нагрузок с одновременным ужесточением требований к комфортабельности движения. С учётом этих тенденций задачи снижения динамической нагруженности электромеханических силовых передач мобильной техники приобретают все большую актуальность.

Анализ работ многих зарубежных и отечественных авторов, методов, применяемых в инженерной практике, а также приведенные результаты собственных исследований автора для решения задач снижения динамической нагруженности электромеханических силовых передач колёсных машин свидетельствует об общности подходов, базирующихся на исследовании динамики в линейной постановке. В то же время в современных силовых передачах имеется проявление нелинейностей, приводящих к значительному росту динамической нагруженности, определяемой малоизученными динамическими эффектами. К таким эффектам относятся возбуждение автоколебаний при проявлении эффекта отрицательного демпфирования в случае повышенного скольжения колёс.

Разработка современных электрифицированных колёсных машин с электромеханическими силовыми передачами проходит в условиях жёстких ограничений по массе, габаритам, эргономическим и виброакустическим показателям при обеспечении требуемого уровня долговечности и комфортабельности предполагает разработку новых методов исследования динамики электромеханических систем, разработку методов управления обеспечивающих соответствие машины предъявляемым требованиям.

В связи с этим, решаемая в диссертационной работе Климова Александра Владимировича проблема повышения эффективности при снижении динамической нагруженности за счёт подавления высокоинтенсивных нелинейных колебаний и увеличения энергоэффективности за счёт снижения удельного расхода энергии на основе синтеза законов управления электромеханической силовой передачей является актуальной.

2. Оценка содержания и завершённости диссертации

Диссертационная работа Климова А.В. состоит из введения, девяти глав, заключения по работе, списка литературы из 461 наименования, списка используемых сокращений и приложений, в которых приведены патенты, акты опытно-промышленного внедрения результатов работы, акты внедрения результатов в учебный процесс. Работа содержит 408 страниц машинописного текста, включая 350 рисунков, 30 таблиц. Соискателем сформулированы выводы после каждой из глав, в заключении перечислены результаты всей работы.

Во **введении** обоснована актуальность работы, поставлена цель и задачи исследования, излагается предложенный подход решения проблемы, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов, приведены выносимые на защиту положения.

В **главе 1** (Повышения потребительских и эксплуатационных свойств электрифицированных транспортных средств) работы приводится обзор

различных путей повышения общей эффективности электрифицированных транспортных средств и непосредственно электромеханических силовых передач (как компонентов так и в целом), рассматриваются системы рационального распределения усилий между ведущими осями и колёсами с учётом особенностей движения, в том числе направленные на повышение эффективности, систем активной безопасности. Автор также приводит анализ работ, направленных на изучение возбуждения нелинейных энергоёмких колебаний, в том числе установление автоколебательных явлений, в которых описываются закономерности их возникновения в различных технических системах. Отдельно обращается внимание на их возникновение в системах транспортных машин, в особенности для электромеханических, а также возможные методы борьбы с негативными последствиями.

Выполненные в первой главе исследования позволили сформулировать цель и задачи работы, решению которых посвящены остальные главы диссертации.

В главе 2 (Математическая модель системы «колёсное транспортное средство с электромеханической силовой передачей – окружающая среда») приводится описание математической модели движения колёсного транспортного средства (электробуса большого класса) с электромеханической силовой передачей индивидуального привода задних колёс (электропортальным мостом), а также её программная реализация в MatLab Simulink. Математическая модель включает в себя следующие блоки решения дифференциальных уравнений: совместной динамики движения поддрессоренной и неподдрессоренной части машины; взаимодействия колеса с эластичной шиной с неровным, недеформируемым опорным основанием; определения электромагнитного крутящего момента тягового электродвигателя с учётом асимметричности и явнополюсности конструкции электромагнитного ядра; тягового автономного инвертора, включающего силовые транзисторы и векторное управление с координатными преобразованиями и широтно-импульсной модуляцией, реализующей подключение фаз двигателя к источнику электрической энергии. В главе приводятся требования и допущения, предъявляемые к математической модели. Путём сравнения результатов моделирования и экспериментальных заездов по величине среднеквадратичных относительных ошибок проводится валидация, показывающая её адекватность и возможность использовать для исследований.

В главе 3 (Разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности применяемых агрегатов и систем) проводится выработка практических рекомендаций и разработка методики синтеза требуемых технических характеристик агрегатов электромеханической силовой передачи, представляющая собой циклический процесс, основанный на статистическом анализе данных по эксплуатации машин и направленная на обеспечения рационального соответствия их характеристик условиям использования с учётом повышения удельной энергонасыщенности.

В главе 4 (Синтез оптимальных адаптивных методов наблюдения, обеспечивающих работу систем управления) приводится описание и проверка работоспособности адаптивных методов наблюдения за параметрами рабочего процесса функционирования передачи необходимыми для повышения

потребительских свойств качества управления: момента сил сопротивления приведённых к валу электродвигателя, реализуемого электромагнитного крутящего момента, степени загруженности машины, скольжения колёс в ведущем и тормозном режиме с учётом криволинейности траектории движения.

В главе 5 (Исследование особенностей протекания колебательных процессов в электромеханической силовой передаче) рассматриваются вопросы установления закономерностей возникновения нелинейных, энергоёмких колебаний, в том числе автоколебаний. В диссертации рассматривается анализ собственных частот и дополнительных динамических воздействий при проявлении резонансных явлений в системе «ротор электродвигателя – механические передачи – колесо». Приведённые результаты показывают, что в системе могут возникать высокочастотные околорезонансные режимы, но с малыми возмущающими воздействиями, не приводящими к выходу из строя деталей. В работе также рассматривается влияние колебаний крутящего момента на валу ротора электродвигателя, обусловленных периодическим изменением параметров электромагнитного поля в рабочем зазоре. Данные высокочастотные колебания протекают с малыми амплитудами воздействий, не приводящими к поломкам, что подтверждается как результатами математического моделирования работы электродвигателя, движения машины, так и результатами анализа эксплуатационных данных. В диссертации отдельное внимание уделяется закономерностям возбуждения нелинейных, энергоёмких, механических колебаний, которые могут возбуждаться в системе. Автор с помощью критерия Бендиксона определил возможность возбуждения данных колебаний при наличии зависимости силы взаимодействия от скольжения характеризуемой ростом скорости скольжения, снижением силы (отрицательного демпфирования) с последующим её возрастанием: для вращательного и поступательного движения колеса в тяговом режиме при полном скольжении; в тормозном режиме для вращательного движения при частичном скольжении; для поступательного движения при полном. Для поступательного движения кузова и вращательного движения вал электродвигателя данные явления возможны вне зависимости от режима движения. С помощью математического моделирования и натурных экспериментов подтверждена возможность возбуждения высокоинтенсивных колебаний, а также зависимость их частоты от степени скольжения колеса, их синхронизируемость с колебаниями нормальной нагрузки на колесо.

В главе 6 (Метод управления с функцией подавления высокоинтенсивных колебательных процессов при повышенном проскальзывании колёс) обосновывается принцип снижения динамической нагрузки силовой передачи, основанный на предотвращении зарождения или развития высокоинтенсивных, энергоёмких, нелинейных колебаний за счёт поддержания устойчивости механического движения тел. В диссертации проведён анализ устойчивости по 2 методу Ляпунова в тяговом и тормозном режиме работы для колеса и вала электродвигателя как тел определяющих динамику работы передачи. Автором научно обоснован метод управления рабочим процессом, в котором при появлении повышенного скольжения колеса происходит корректировка уставки крутящего момента на величину противофазно направленного диссипативного

момента, что обеспечивает выведение энергии провоцирующей колебания из системы. Приводится блок-схема функционирования метода и программная реализация в MatLab Simulink. Работоспособность и эффективность метода подтверждена с помощью математического моделирования интенсивного разгона и торможения электробуса при совершении манёвров путём сопоставления амплитуд возникающих колебаний.

В главе 7 (Принцип повышения энергоэффективности движения) приводит описание принципа повышения энергоэффективности за счёт снижения потерь энергии в электромеханической силовой передаче, увеличение её рекуперации за счёт метода управления рабочим процессом только с помощью педали газа, позволяющим обеспечивать тяговый, рекуперативный, режимы движения и выбег, исключая задействование основной, рабочей тормозной системы, а, следовательно, и затраты энергии на привод её агрегатов. Автор обосновывает положение границ режимов движения, зависимости крутящего момента электродвигателя от параметров движения и нажатия на педаль, а также характер их изменения при переходах между режимами с учётом минимизация нарастания удельного усилия на колёсах и обеспечения пролегания траектории движения изображающей точки в координатах «крутящий момент-частота вращения» в областях наибольшего КПД. Приводится блок-схема функционирования метода и программная реализация в MatLab Simulink, результаты сравнительного математического моделирования движения электробуса в условиях, приближенных к эксплуатационным подтверждающие работоспособность метода управления, идентичность тягово-динамических свойств машины в сравнении с машиной, имеющей обычное двухпедальное управление и иной характер воздействий на педаль акселератора.

В главе 8 (Экспериментальные исследования работоспособности и эффективности метода управления, позволяющего подавлять колебания) автором формулируются цели, задачи и программа сравнительного экспериментального исследования работоспособности и эффективности научно обоснованного метода управления передачей обеспечивающего подавление возбуждаемых колебаний, приводится перечень необходимого испытательного оборудования, информационно-измерительного и программного обеспечения для проведения ходовых испытаний. Излагается сравнение результатов сравнительных заездов, подтверждающих работоспособность и эффективность метода, поскольку происходит снижением амплитуд возмущающих воздействий, а также уменьшается скорость их изменения. Приводится анализ результатов измерений тока, потребляемого и генерируемого электроприводом и вывод о влиянии возбуждаемых механических колебаний на возбуждение колебаний в электрической части силовой передачи, а также благоприятное влияние метода управления на снижение их интенсивности.

В главе 9 (Исследование эффективности и работоспособности метода управления формирования уставок крутящего и тормозного моментов посредством одной педали) автором формулируются цели, задачи и программа сравнительного экспериментального исследования работоспособности и эффективности научно обоснованного метода управления передачей обеспечивающего повышение

энергоэффективности. Излагается сравнение результатов сравнительных заездов, подтверждающих работоспособность и эффективность метода. Приводится вывод о положительном влиянии метода управления с использованием S-образных зависимостей на динамическую нагруженность, так как происходит исключение возбуждения колебаний и ударных переключений в зацеплении за счёт реализации плавного изменения знака крутящего момента с учетом нулевой производной его изменения в окрестностях области нулевой угловой скорости.

Диссертационная работа выполнена на высоком методическом и научном уровне, содержит всесторонний анализ и решение обозначенных в ней актуальной проблемы.

3. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна диссертационного исследования заключается в:

1) В установлении новых закономерностей формирования динамической нагруженности электромеханических силовых передач, отличающихся учётом малоизученных эффектов возбуждения нелинейных энергоёмких колебаний и взаимном влиянии динамического поведения электромагнитного и механического контуров системы друг на друга, их синхронизируемость с колебаниями нормальной нагрузки на колесо. В установлении новых результатов экспериментальной и количественной оценки малоизученных явлений возникновения нелинейного, высокомоментного возбуждения;

2) В обосновании и разработке новых технических решений, направленных на адаптивное определение ключевых параметров рабочего процесса электромеханической силовой передачи, построенных на определении параметра при управлении рабочим процессом, доставляющим нулевые значения фазовым координатам;

3) В обосновании и разработке новых технических решений по снижению динамической нагруженности электромеханических силовых передач колесных машин за счёт подавления высокоинтенсивных колебаний и уменьшении амплитуд возмущающих воздействий. Новизна новых технических решений подтверждена патентом РФ на изобретение № 2797069.

4) В обосновании и разработке новых технических решений по повышению энергоэффективности электромеханических силовых передач колесных машин, заключающихся в снижении удельного расхода энергии на движение при уменьшении потерь и увеличении рекуперации. Новизна новых технических решений подтверждена патентом РФ на изобретение № 2799275.

5) В обосновании и разработке нового метода синтеза кривых зависимости крутящего момента тягового электродвигателя электромеханической силовой передачи, представляющих собой набор полиномов, сопрягаемых с учётом равенства значения функции и её производной, что обеспечивает плавное изменение управляемого параметра.

Таким образом, по результатам анализа научных положений, выносимых автором диссертационного исследования на защиту, можно сделать заключение, что они обладают научной новизной.

4. Степень достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций обосновывается корректностью формулировки цели, постановки задач исследования; применения теорий автомобиля, теории колебаний, теории управления, теории электрических машин и электропривода, автоматизированных систем автомобиля, основных положений электроники и электротехники, а также теории испытаний агрегатов, узлов автомобиля и автомобиля в целом; методов математического анализа и математического моделирования, численных методов вычислительной математики, современного программного обеспечения; согласованностью полученных результатов расчётных исследований с лабораторными и дорожными испытаниями.

Таким образом, по результатам анализа научных положений и выводов, выносимых автором диссертационного исследования на защиту, можно сделать заключение что они являются обоснованными.

5. Теоретическая и практическая значимость работы

Диссертационная работа отличается высоким уровнем теоретических разработок и большим объемом экспериментальных исследований, совокупный результат которых расширяет научное знание в области теории и практики проектирования колёсных транспортных средств с электромеханической силовой передачей, их агрегатов, методов управления.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в дальнейшем развитии теории проектирования колёсных транспортных средств с электромеханической силовой передачей, касающейся совершенствования методов управления, с учётом параметров движения, характеристик машины, особенностей конструкции, управления агрегатами и вероятного возбуждения мало изученных нелинейных энергоёмких колебаний.

Практическая значимость работы заключается в создании принципов повышения комплексной эффективности колёсных транспортных машин с электромеханической силовой передачей, включающей такие базовые качества как энергоэффективность и динамическая нагруженность; методов и законов управления рабочим процессом передачи реализующих данные принципы; подходах к определению ключевых параметров, характеризующих рабочий процесс передачи и их программной реализации в виде адаптивных наблюдателей; рекомендациях и методике выбора и расчёта ключевых параметров агрегатов электромеханической силовой передачи.

Результаты экспериментальных исследований подтверждающие взаимное влияние возбуждаемых колебательных явлений в механической и электрической части передачи могут быть использован для дальнейших исследований как их

влияния на рабочие процессы, так и для синтеза мер предотвращения неблагоприятных воздействий. В особенности это важно для перезаряжаемых систем хранения электрической энергии.

Материалы диссертации могут быть использованы в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях, занимающихся проектированием колесных машин, а также в учебном процессе высших учебных заведениях технического профиля. Высокая практическая ценность работы подтверждением большим количеством актов внедрения на промышленных предприятиях, занимающихся разработкой, производством и модернизацией перспективных транспортных машин с электромеханическими силовыми передачами, а также транспортных тяговых систем.

6. Аprobация работы, публикации и соответствие содержания диссертации и автореферата

Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на многих научно-технических семинарах и научно-технических конференциях, часть исследований выполнялась в рамках государственного технического задания по теме № FZRR-2023-0007 от 26.10.2023г.

Основные положения диссертации изложены в достаточном числе публикаций, автореферат в основном соответствует её содержанию.

Публикации, приведённые в автореферате, включают материалы по основным разделам диссертации. Основные положения и результаты исследований изложены в 39 публикациях, в том числе 21 в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций. а соискание учёной степени доктора наук, в изданиях, входящих в международные системы цитирования Scopus и Web of Science - 7. По результатам работы получено 7 патентов РФ на изобретения и полезные модели и 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Количество и качество публикаций соответствует требованиям ВАК РФ.

7. Замечания по диссертационной работе

К замечаниям по диссертационной работе следует отнести следующее:

1) В математической модели не учитываются динамические процессы колебаний площадки контакта колеса с эластичной шиной относительно обода вращающегося колеса, что снижает возможности модели выполнять исследования динамических процессов в системе *«электромеханическая силовая передача – колесо – дорога»*.

2) Приведенные диссертации формулы для расчета скольжения колёс с эластичными шинами не учитывает динамику продольных колебаний площадки контакта шины относительно обода вращающегося колеса.

3) В математической модели не учитываются крутильные колебания, возникающие в механических передачах, что снижает возможности модели выполнять исследования динамических процессов в системе *«электромеханическая силовая передача – колесо – дорога»*.

4) В рассматриваемых математических описаниях зависимостей силы взаимодействия колеса с дорогой от скольжения автор использует некоторые коэффициенты, о которых упоминает что *«численное значение, которых не столь важно» ... «важен только знак»*. Однако стоило привести диапазон рассматриваемых значений коэффициентов.

5) В диссертации автор не приводит значений передаточных коэффициентов и их зависимостей, амплитудно-частотных характеристик, фазово-частотных характеристик системы, показывающих степень влияния параметров рабочего процесса на возбуждение колебательного процесса.

6) Очевидно, что при использовании разработанного однопедального метода управления силовая электромеханическая передача не сможет обеспечить требуемых замедлений при экстренном торможении колёсной машины. Каким образом обеспечивается выполнение данных требований к транспортному средству? Использование данного метода управления потребует постоянного поддержания нажатой педали акселератора для обеспечения движения на выбеге, что может повысить утомляемость водителя.

7) При исследовании работоспособности и эффективности метода управления, обеспечивающего подавление автоколебательных явлений, автор приводит зависимости скорости движения от времени, по которым видно увеличение тормозного пути по сравнению с торможением без использования данного метода, что видится как недопустимо.

Отмеченные недостатки снижают качество исследований, но они не влияют на главные теоретические и практические результаты работы. Диссертацию Климова А.В. можно считать завершённым исследованием, представляющим учёным и разработчикам научно-методический аппарат, позволяющий эффективно решать научные и инженерные задачи, возникающие в процессе разработки транспортных машин с электромеханическими силовыми передачами. Полученные результаты свидетельствуют о решении поставленных задач и достижении цели диссертационного исследования.

8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным положением о присуждении учёных степеней

Диссертация Климова Александра Владимировича на соискание ученой степени доктора технических наук «Методология повышения эффективности электробуса на основе синтеза законов управления электромеханической силовой передачей» выполнена на актуальную тему и является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей паспорту научной специальности 2.5.11 - Наземные транспортно-технологические средства и комплексы.

Диссертация Климова Александра Владимировича соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», а сам соискатель, решивший важную научную проблему повышения комплексной эффективности колёсных транспортных средств с электромеханической силовой передачей на примере электробуса, обосновавший и разработавший научно обоснованные методы для снижения динамической нагруженности и повышения

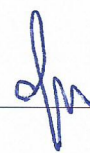
энергоэффективности электромеханических силовых передач при управлении рабочим процессом, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.11 - Наземные транспортно-технологические средства и комплексы.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, профессор
кафедры «Автомобильный транспорт,
строительные и дорожные машин»,

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет»

(специальность 2.5.11 - Наземные
транспортно-технологические средства и
комплексы)



О.С. Яньков

«29» июня 2026 г.

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83, каб. К-125.

Тел.: +7 (3952) 40-56-89.

Эл. почта: yos913005@mail.ru.

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический
университет», <http://www.istu.ru>.

