

На правах рукописи



Аджиманбетов Султанхан Багатович

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПРИВОДОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Волгоград – 2022

Работа выполнена на кафедре «Эксплуатация и сервис транспортных средств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Горский государственный аграрный университет».

Научный консультант: доктор технических наук, доцент,
Льянов Марат Савкузович

Официальные оппоненты: **Гармаш Юрий Владимирович**,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное казенное военное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Рязанское гвардейское высшее воздушно-
десантное командное училище им. генерала армии
В.Ф. Маргелова», кафедра математических и
естественнонаучных дисциплин, профессор;
Косицын Борис Борисович
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)»,
кафедра «Колесные машины», доцент;
Филькин Николай Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова»,
кафедра «Автомобили и металлообрабатывающее
оборудование», заведующий кафедрой.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева».

Защита состоится «22» сентября 2022 года в 10⁰⁰ часов в аудитории 209 на заседании диссертационного совета 24.2.282.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400005, г.Волгоград, пр. Ленина, д. 28.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на сайте университета www.vstu.ru по ссылке

<https://www.vstu.ru/upload/iblock/894/894061c1abb62e114838c1f6ac0efc75.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Балакина Екатерина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Устойчивой тенденцией последнего времени в автомобилестроении является все более широкое применение электрического привода в конструкции автомобилей, все шире используют электрические и гибридные силовые установки. Гибридные автомобили при рациональном проектировании экономичнее, экологичнее традиционных, способствуют значительному снижению установленной мощности двигателя внутреннего сгорания, оптимизируют его работу за счет использования электродвигателя. Они являются мостом к созданию экологических АТС на чисто электрической тяге.

Рынок электрических и гибридных автомобилей неуклонно растет. Эксперты считают, что к 2030 году в мире будет продано более 20 миллионов машин на электрическом ходу, а к 2040 году 35 – 47 % машин будет оснащено электродвигателями. Электрический привод по сравнению с двигателем внутреннего сгорания имеет преимущества: высокий КПД, большую перегрузочную способность по моменту.

В настоящее время ведутся разработки и исследования схем приводов электрических и гибридных автомобилей. Так, распространение получила электромеханическая трансмиссия, в которой тяговый электродвигатель механически встроен в колеса (мотор-колеса) и получает энергию от аккумулятора или генератора. Такая схема предполагает изменение скорости вращения двигателя для управления скоростью движения машины. Другим её недостатком является рост неподрессоренной массы АТС и более тяжелые условия эксплуатации основных элементов самого мотор-колеса.

Известна также схема привода гибридного автомобиля, в которой двигатель внутреннего сгорания, генератор и электродвигатель механически связаны друг с другом и с колесами посредством планетарного редуктора, что позволяет изменять потоки мощности между этими узлами. Такая схема позволяет обеспечить невысокий расход топлива в городских условиях движения, однако отличается высокой сложностью электрической части, требующей компьютерного управления, и повышенным расходом топлива при равномерном движении по трассе.

Все приведенные схемы силовых установок предполагают для управления скоростью движения автомобиля регулирование частоты вращения электродвигателей. При этом неизбежна работа электродвигателей в нежелательном для них режиме перегрузки (разгон-торможение, пониженные скорости движения). Разработка вариантов электромеханической трансмиссии с альтернативными способами управления скоростью движения, ограничивающими работу электродвигателей на режимах перегрузки и обеспечивающими снижение потерь энергии в приводах, является актуальной и практически значимой проблемой для автотранспортной отрасли страны.

Цель работы – Снижение расхода энергии в приводах транспортных средств с электрическими и гибридными силовыми установками за счет бесступенчатого управления скоростью движения.

Объект исследования – электромеханические приводы гибридного автомобиля и электромобиля, стартер-генераторной установки ДВС.

Предмет исследования – процесс управления режимами работы электро-механических приводов гибридных автомобилей, электромобилей и пуска ДВС.

Методика исследований – базировалась на фундаментальных положениях теории движения автомобиля, теории электропривода, теории автоматического управления, методах аппроксимации экспериментальных данных, методах математического и компьютерного моделирования процессов функционирования электро-механических приводов электромобиля, гибридного автомобиля и стартер-генераторной установки. Экспериментальные исследования процессов пуска ДВС проводились физическим моделированием: стендовыми испытаниями натурных образцов.

Научную новизну работы составляют:

- обоснование энергетической целесообразности управления скоростью транспортного средства с электрическими и гибридными силовыми установками бесступенчатым изменением передаточного числа трансмиссии без изменения угловой скорости вращения тяговых двигателей;
- метод расчета привода электромобиля с вариатором для управления скоростью движения, позволяющий ограничивать в заданных пределах продолжительности работы тяговых электродвигателей электромобиля в режимах перегрузки;
- теоретическое обоснование метода расчета бесступенчатой трансмиссии автомобилей с гибридными силовыми установками, учитывающего ограничения по перегрузке тяговых электродвигателей как на режимах разгона, так и на установившихся режимах движения с максимальной нагрузкой;
- способ двухэтапного пуска автомобильного ДВС с помощью стартер-генераторной установки, позволяющей осуществлять частичную рекуперацию энергии при торможении транспортного средства.

Практическую ценность работы представляют:

- разработанные схемы приводов гибридного автомобиля и электромобиля с бесступенчатым регулированием скорости автотранспортного средства прямым управлением передаточным числом вариатора;
- методики расчетов параметров бесступенчатых приводов и компьютерные модели таких приводов для гибридных автомобилей и электромобилей;
- система двухэтапного стартерного пуска ДВС с вариантами новых технических решений стартер-генераторной установки;
- устройство контактов пускового реле стартера;
- устройство для рекуперации энергии при торможении автотранспортного средства со стартер-генераторной установкой;

Новизна разработанных технических решений подтверждена 10 патентами России на изобретения и 1 патентом на полезную модель.

Достоверность результатов исследований по совершенствованию и созданию основ проектирования электро-механических приводов гибридного автомобиля, электромобиля и стартер-генераторной установки подтверждается апробированными методами компьютерного моделирования с использованием программы «*Matlab Simulink*», экспериментальными исследованиями привода двухэтапного пуска ДВС.

Личное участие автора в получении результатов. Автор является исполнителем всех этапов данной работы. Теоретический анализ проблемы, разработка конструктивных решений, компьютерное моделирование, экспериментальные исследования, изготовление опытного образца системы двухэтапного пуска ДВС проведены при непосредственном участии автора.

Реализация результатов работы. Результаты исследований по диссертационной работе внедрены на «Осетинском заводе автотракторного электрооборудования» (ОАО «ОЗАТЭ» г. Владикавказ), переданы для внедрения в Научно-производственное внедренческое предприятие «Наука», используются в учебном процессе по подготовке бакалавров, магистров и инженеров по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» в ФГБОУ Горском ГАУ, Дагестанском ГАУ им. М.М. Джамбулатова.

Основные положения, выносимые на защиту:

- обоснование параметрического принципа управления скоростью автотранспортного средства бесступенчатым изменением передаточного числа трансмиссии, отличающегося тем, что изменение скорости вращения двигателя для управления скоростью движения автомобиля не применяется;
- функциональные схемы привода электромобиля и гибридного автомобиля на основе параметрического принципа управления скоростью движения;
- методика концептуального проектирования тягового привода электромобиля, включающая расчет основных параметров привода на базе учета допустимого времени работы тягового электродвигателя в трёх режимах: номинальной нагрузки, двух- и трехкратной перегрузки с последующим уточнением эксплуатационных показателей на компьютерной модели в основных режимах движения;
- методика концептуального проектирования привода и трансмиссии гибридного автомобиля, включающая расчет основных параметров привода по двум ключевым режимам работы его двигателей с последующим уточнением эксплуатационных показателей на компьютерной модели в основных режимах движения;
- обоснование эффективности схемы привода двухэтапного стартерного пуска ДВС с вариантами новых технических решений.

Апробация работы. Основные результаты исследований и положения диссертационной работы доложены, обсуждены и получили одобрение на: Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные тенденции развития автомобилестроения в России» (г. Тольятти, ТГУ 2004-2008 г.г.); Международной научно-практической конференции «Научные проблемы автомобильного транспорта» (г. Москва МГАУ, 2010 г.); на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО ГГАУ (г. Владикавказ, 2003-2021 гг.); семинарах кафедр ВолГТУ (г. Волгоград 2019 - 21гг.); на международной конференции Русавтокон (IEEE) Сочи, 2019 г.; на международной конференции промышленных инженеров (ICIE) Сочи, 2020 г., 2021 г., МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2021г. и Нижегородский ГТУ, 2021г.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 40 научных работах, в том числе: 14 статей – в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ; 2 статьи – в журналах, входящих в базу Scopus; 11 патентов

на изобретения; 1 патент на полезную модель; 1 монография; 11 публикаций – в других изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов и результатов, библиографического списка литературы из 158 наименований и приложений. Работа изложена на 250 страницах, содержит 87 рисунок, 6 таблиц, приложения на 18 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы, основанная на тенденциях и направлениях развития мирового автомобилестроения - постепенному переходу к выпуску экологичных гибридных автомобилей и электромобилей с высокими эксплуатационными показателями. Определены цель и задачи исследования, охарактеризованы ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние развития электрических приводов для автотранспортных средств» проведен обзор научных статей и исследований, посвященных разработке приводов электромобилей, гибридных автомобилей, стартерных и стартер-генераторных установок.

ДВС все труднее соответствовать жестким нормам экологических требований и при этом обеспечивать динамичность, экономичность, высокую максимальную скорость автомобиля. Средний легковой автомобиль на 100 км пути расходует примерно 8 л топлива или 32 кВт·ч (из-за завышения мощности установленного на нем *ДВС*), а такой же автомобиль на электрической тяге расходует на том же расстоянии примерно 15-20 кВт·ч электроэнергии, т.е. почти вдвое меньше благодаря высокому КПД электродвигателя.

В настоящее время на серийных электромобилях и гибридных автомобилях массово используются только два типа электродвигателей: *СДПМ* – трёхфазный синхронный с постоянными магнитами на роторе (*Toyota “Prius”, Nissan “Leaf”*) и *АД* – трёхфазный асинхронный с короткозамкнутым ротором (*“Tesla Motors”, Chevrolet “Volt”*). Управление скоростью этих *АТС* осуществляется изменением скорости вращения тяговых электродвигателей регулированием питающего напряжения и частоты реверсивным преобразователем. При таком регулировании возникают значительные потери энергии (особенно в динамичном городском режиме), т.к. вал электродвигателя непосредственно соединен с ведущими колесами через главную передачу. По сравнению с классическим приводом (*ДВС + АКП*) такие установки имеют следующие очевидные преимущества:

1) значительно более высокий *КПД*; 2) возможность рекуперации энергии торможения; 3) коробка передач заменяется на планетарную систему распределения мощности (в гибридах) или вообще отсутствует (в электромобилях); 4) большая перегрузочная способность (1,8–2,5) по сравнению с *ДВС* (у которого 1,2), из-за чего номинальная мощность *ДВС* бывает существенно завышенной по условиям динамики; 5) электродвигатель обеспечивает максимальный крутящий момент уже в начале разгона автомобиля с места и в широком диапазоне частот вращения, что также способствует снижению его номинальной мощности, а *ДВС*

не в состоянии обеспечить достаточный крутящий момент на низких скоростях вращения коленчатого вала.

Неоднозначным остается вопрос выбора соответствующего вида трансмиссии. К примеру, в серийном гибридном автомобиле «*Toyota Prius*» и на многих выпускаемых моделях других фирм, вместо коробки передач для регулирования скорости двигательной установки, состоящей из ДВС и двух электродвигателей-генераторов, используется устройство распределения мощности между этими двигателями, представляющее собой планетарный редуктор. Вал тягового электродвигателя соединен с коронной шестерней, вал ДВС – с водилом, а вал генератора с солнечной шестерней. В этой трансмиссии скорость на ведущих колесах регулируется плавно за счет изменения электроникой режимов работы этих трех двигателей, но трансформации крутящего момента не происходит, как в обычном вариаторе. Нагрузочные моменты проходят через тяговые двигатели, что сильно сказывается на расходе энергии тяговой батареи, особенно в динамике. Секрет экономичности «*Prius*» (городской цикл – 4,5 л/100км), в дополнение к сниженному коэффициенту аэродинамического сопротивления ($C_x = 0,24$), низкому центру тяжести и многорычажной подвеске, заключается в удачном применении бензинового двигателя 1,8 л, работающего по циклу Аткинсона ($\eta = 40\%$). Основным минус привода гибридного автомобиля «*Prius*» - это повышенные потери при управлении передаточным числом планетарной трансмиссии производимое изменением режимов работы ДВС, тягового электропривода и генератора компьютером, а также многократное преобразование одного вида энергии в другой. Система управления приводом интеллектуально чрезвычайно сложна и требует повышенной надежности.

На традиционных автомобилях с ДВС также используется обычная вариаторная трансмиссия, как правило, совместно с гидротрансформатором. Для обеспечения реверса и нейтрали в такой коробке установлен дополнительно отдельный механизм (DNR). Управление скоростью автомобиля осуществляется не только вариатором, но и изменением скорости вращения ДВС, что приводит к частичному использованию преимуществ вариатора.

На автомобиль бизнес класса «*Toyota Camri*» впервые установлена новая коробка передач, в котором вариатор совмещен со стартовым редуктором с постоянным передаточным числом («*Direct Shift CVT*»). Первоначальный разгон осуществляется редуктором, а затем коробка переключается на вариаторное регулирование скорости автомобиля. Такая коробка не в полной мере использует преимущества вариаторного управления и теряет плавность при переключении от стартового редуктора к вариатору и наоборот.

Электрооборудование традиционных автомобилей с ДВС (стартер и генератор) не соответствуют современным тенденциям развития АТС в силу следующих причин: 1) снижается надежность пуска ДВС в зимнее время; 2) любое снижение скорости АТС осуществляется исключительно гашением кинетической энергии тормозной системой; 3) отсутствует какая-либо рекуперация энергии торможения. Преобразование стартера и генератора в стартер-генераторную установку позволяет расширить функциональные возможности электрооборудования.

В результате обзора электроприводов и трансмиссий АТС выявлено:

1. В традиционных автомобилях с ДВС применяются коробки передач с вариатором, в которых не в полной мере реализованы преимущества вариаторной трансмиссии.

2. На электромобилях выпускаемых разными фирмами управление скоростью движения осуществляется изменением скорости вращения тягового электродвигателя, вал которого непосредственно соединен с главной передачей. В динамическом режиме городского движения энергоэффективность такого управления низкая.

3. На гибридных автомобилях используется планетарная трансмиссия со сложным управлением распределением потоков мощности трех используемых двигателей, что приводит к значительным потерям энергии.

4. Традиционные автомобили с ДВС нуждаются в совершенствовании функционирования своего электрооборудования – стартера и генератора.

Важный вклад в развитие научной базы по разработке приводов гибридных автотранспортных средств, электромобилей и их систем внесли академики И.П. Ксенович, Д.С. Стребков, доктора наук И.К. Александров, Б.Н. Белоусов, А.А. Благоднаров, Н.В. Гулиа, С.В. Гусаков, Г.О. Котиев, В.А. Кузнецов, В.В. Марков, Е.М. Овсянников, В.А. Раков, В.В. Селифонов, Н.М. Филькин, В.П. Хортов, А.А. Эйдинов и др., а также зарубежные исследователи James Larmine, John Lowti, Thomas Bohme, Benjamin Frank и др. Теоретические и экспериментальные исследования по созданию основ проектирования гибридных автомобилей, электромобилей и стартер-генераторных установок проводятся научно-исследовательскими и производственными организациями *НАМИ*, *МАМИ (ГТУ)*, *МВТУ* им. Н.Э. Баумана, *МАДИ (ГТУ)*, *ВАЗ*, *УАЗ*, *Ижмаш-Авто*, *Самарский ГТУ*, *ФГУП НИИАЭ*, *Новосибирский ГТУ*, *НПП «Квант»* и др.

Анализ результатов этих исследований показал, что в настоящее время подходы к разработке приводов гибридных автомобилей, электромобилей и стартер-генераторных установок, выбору их основных элементов требуют дальнейшего развития и совершенствования для повышения их экологических, топливно-экономических и эксплуатационных показателей.

Исходя из этого, сформулированы следующие основные задачи исследования:

1. Анализ традиционной системы управления скоростью АТС, обоснование и разработка альтернативного (параметрического) принципа управления для гибридного автомобиля и электромобиля.
2. Разработка рациональных схем приводов электромобиля и гибридного автомобиля на основе предложенного принципа бесступенчатого регулирования передаточного числа трансмиссии.
3. Обоснование концептуальной методики выбора основных элементов привода гибридного автомобиля с учетом особенностей параметрического принципа управления; обеспечение эффективной работы ДВС в составе его двигательной установки.
4. Обоснование концепции выбора основных элементов привода электромобиля с учетом особенностей параметрического принципа управления и режимов работы электрического двигателя.

5. Обоснование и разработка рациональных схем приводов стартерного пуска ДВС и стартер-генераторной установки автомобиля.

Во второй главе «Совершенствование и создание основ проектирования тягового привода электромобиля» обоснован выбор альтернативного способа управления скоростью транспортного средства – бесступенчатым изменением передаточного числа трансмиссии без регулирования скорости приводного двигателя, разработана схема тягового привода электромобиля, разработана методика расчета и проектирования на основе компьютерного моделирования.

Несмотря на то, что многие мировые ведущие фирмы серийно выпускают гибридные автомобили и электромобили, до сих пор не решены вопросы обоснованного выбора мощностей двигателей привода. Открытым остается вопрос выбора вида трансмиссии. В нашей стране проблема разработки электромобилей и гибридных транспортных средств (ГТС) требует дальнейшего развития, обобщения имеющегося мирового и отечественного опыта разработки и проектирования отдельных функциональных узлов транспортных средств, их систем управления движением.

Во всех современных тяговых приводах электромобилей изменение продольной скорости движения осуществляется при постоянном (или кусочно-постоянном) передаточном отношении трансмиссии за счет управления скоростью вращения двигателя (традиционное, «координатное» управление).

Альтернативный вариант: при практически постоянной частоте вращения двигателя управлять скоростью за счет изменения передаточного отношения трансмиссии («параметрическое» управление), – не используется, хотя обладает явными достоинствами. Покажем это, учитывая следующее:

- 1) для корректного рассмотрения сравниваемые машины должны быть идентичны во всём, кроме каналов управления скоростью движения;
- 2) частота вращения в альтернативном варианте не регулируется, поэтому меняется слабо (из-за жесткости характеристики электродвигателя).

Крутящий момент $M_{\text{дв}}$ двигательной установки в динамике равен:

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{дин}} + \frac{1}{i_{\text{тр}}} M_{\text{к}} + M_{\text{мех.пот.}}; \quad (1)$$

где $M_{\text{дин}} = J_{\text{дв}} \frac{d\omega}{dt}$ – динамическая составляющая момента двигательной установки; $J_{\text{дв}}$ – момент её инерции; ω – частота вращения вала двигательной установки; $i_{\text{тр}}$ – передаточное отношение трансмиссии; $M_{\text{к}}$ – момент сопротивления движению на колесах; $M_{\text{мех.пот.}}$ – момент механических потерь в трансмиссии.

$M_{\text{дин}}$ в традиционном варианте составляет существенную величину в динамике, т.к. частота ω меняется в полном диапазоне: от нуля до максимума. В альтернативном же случае даже отрицателен, т.к. ω незначительно проседает.

$M_{\text{мех.пот.}}$, ввиду относительно малых величин потерь в обоих вариантах, составляет малую долю по сравнению с $M_{\text{к}}/i_{\text{тр}}$.

Поведение передаточного отношения $i_{\text{тр}}$ (оно во всех случаях равно отношению частоты вращения вала двигателя к частоте вращения ведущих колес) определяет принципиальную разницу между традиционным и предлагаемым подходами.

В первом (традиционном) случае управление скоростью движения осуществляется непрерывным принудительным изменением частоты вращения двигателя, а i_{mp1} строго постоянно.

Во втором случае предлагается ровно наоборот: управление скоростью движения осуществлять непрерывным принудительным изменением передаточного отношения трансмиссии i_{mp2} , а частота вращения двигателя будет почти постоянной и незначительно дрейфующей вокруг значения, заданного текущим напряжением аккумуляторной батареи. Но тогда основная часть крутящего момента двигателя, равная M_k/i_{mp2} будет в любой момент времени на любых скоростях движения (кроме максимальной, когда $i_{mp1} = i_{mp2}$) в (i_{mp2}/i_{mp1}) раз меньше таковой для традиционного случая (M_k/i_{mp1}) при прочих равных обстоятельствах. Чем меньше скорость автомобиля, т.е. чем больше текущее значение i_{mp2} , тем меньше требуемый крутящий момент от двигателя (по сравнению с традиционным случаем), тем меньше потребляемый ток и, соответственно, расход ёмкости батареи. Особенно это проявляется в начале разгонов (а) и конце торможений (б), рис.1.

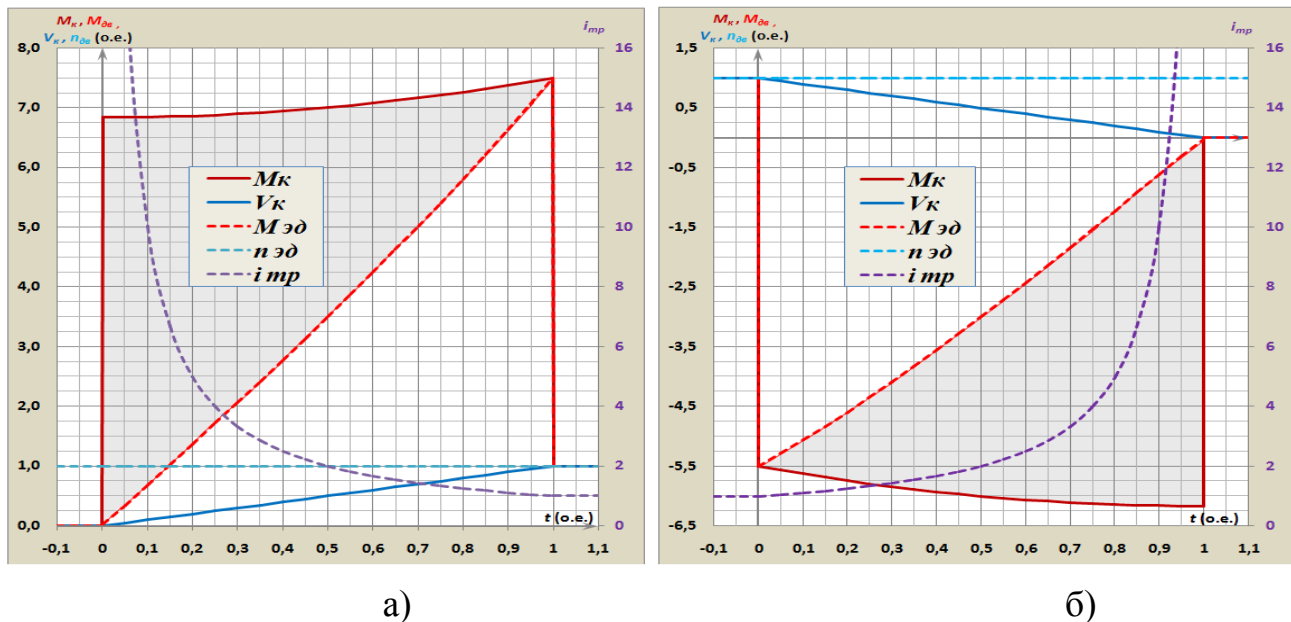


Рисунок 1 – Разгон (а) и торможение (б) АТС при традиционном и альтернативном принципах управления скоростью

Здесь по левой ординате в относительных единицах (о.е.) откладываются момент сопротивления на колёсах M_k , скорость автомобиля V , момент, требуемый от электродвигателя при альтернативном управлении скоростью электромобиля вариатором $M_{эд}$, частота вращения электродвигателя $n_{эд}$; по правой – передаточное отношение трансмиссии i_{mp} , по оси абсцисс – время t (в о.е. от времени разгона).

Пусть при разгоне-торможении автомобиля на ровной дороге его скорость нарастает (спадает) линейно. Момент на колёсах:

$$M_k = F_c \cdot R_k = (f \cdot m_{авто} \cdot g + 0,5 \cdot C_x \cdot S_{лоб} \cdot \rho \cdot V^2 + m_{авто} \cdot \frac{dV}{dt}) \cdot R_k, \quad (2)$$

где F_c – сила сопротивления движению автомобиля;

R_k – радиус качения колес;

f – коэффициент сопротивления качению колес;

$m_{авто}$ – полная масса автомобиля;

g – ускорение свободного падения;

C_x – продольная составляющая безразмерного коэффициента полной аэродинамической силы;

$S_{лоб} = 0,78 \cdot B \cdot H$ – лобовая площадь автомобиля; (B и H – наибольшие ширина и высота автомобиля);

ρ – плотность воздуха;

V – горизонтальная скорость автомобиля, м/с;

Пусть также на установившейся скорости (например, 100 км/час) суммарная сила сопротивления движению составляет 1 о.е. Известно, что на такой скорости составляющая аэродинамического сопротивления примерно вдвое превышает силу сопротивления качению, т.е. 2/3 о.е. и 1/3 о.е. соответственно. Примем также, что при линейных ускорениях-замедлениях сила инерции машины постоянна и составляет $\pm 6,5$ о.е.

При неизменном передаточном отношении трансмиссии двигательная установка должна обеспечивать линейный рост (спад) частоты вращения на своём выходном валу и преодолевать крутящий момент, прямо пропорциональный суммарному моменту сопротивления движению (кривые M_k) на колесах.

В случае же параметрического управления постоянная частота вращения выходного вала двигательной установки делится, а момент умножается на увеличенное (обратно пропорциональное скорости движения) передаточное отношение трансмиссии, поэтому кратно *меньший* этот момент (кривые M_{∂}), чем требуемый в традиционном приводе (разница тонирована серым цветом), преодолевает тот же момент сопротивления на колесах. Это даёт следующие преимущества предлагаемому параметрическому принципу управления:

1. при разгонах динамический момент на валу двигательной установки нарастает постепенно от 0 до максимума (а при традиционном управлении - сначала и до конца разгона максимальный), что даёт экономию топлива и, соответственно, уменьшение токсичных выбросов у классических авто, снижение расхода энергии накопителя и увеличение дальности пробега у гибридных автомобилей и электромобилей;

2. существенно меньше требуемый тормозной момент M_{∂} (рис. 1б) по сравнению с традиционным управлением (M_k), примерно вдвое облегчается нагрузка на элементы тормозной системы.

3. при традиционном торможении (рис. 1б, кривая M_k) рекуперируется как бы больше энергии, чем при параметрическом (кривая M_{∂}), но площадь тонированного участка на рис. 1а несколько больше, чем на рис. 1б, т.е. выигрыш на разгонах перекрывает этот проигрыш. Кроме того, для традиционных электромобилей рекуперация избыточно мощных зарядных токов батареи (по кривой M_k рис. 1б) возможна только за счёт наращивания дополнительного оборудования и представляет собой отдельную сложную техническую задачу, которая с гораздо меньшими проблемами решается при параметрическом управлении (кривая M_{∂}).

4. не нужен сложный реверсивный преобразователь, электродвигатель непосредственно подключается к тяговой батарее (при использовании двигателя постоянного тока);

двукратная перегрузка допустима в течение 1 мин, а трехкратная – 10 сек. Логично сопоставить этим режимам работы электродвигателя соответствующие режимы движения электромобиля, а именно:

- номинальной нагрузке двигателя – длительное установившееся движение электромобиля на максимальной эксплуатационной скорости $V_{\max 1}$;
- двукратной нагрузке – кратковременное (1 мин) установившееся движение электромобиля на максимальной маневровой скорости $V_{\max 2}$ (в случае, например, необходимости резкого обгона);
- трехкратной – конец линейного разгона электромобиля до 100 км/ч. Учитывая, что допустимое время существования такой нагрузки (10 сек) близко вероятному времени разгона машины, а диаграмма изменения нагрузки на валу двигателя при параметрическом управлении имеет вид вогнутого треугольника (рис. 1а), максимальный *мгновенный* коэффициент перегрузки электродвигателя (в самом конце разгона) достигает 7, но эквивалентное его значение (за 10 сек всего разгона) остается в пределах 3.

Паспортная мощность электродвигателя для городского электромобиля определяется по режиму двукратной нагрузки задаваемым значением максимальной маневровой скорости:

$$P_{\text{ЭД}}^{\text{ном}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{\kappa}^{V_{\max 2}} \cdot \pi \cdot n_{\kappa}^{V_{\max 2}}}{\eta_{\text{тп}} \cdot 30} \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Для вычисления параметров привода проектируемого электромобиля используется разработанный *Excel*-формуляр (рис. 3), куда заносятся исходные данные. В формуляр заложены параметры динамики и ходовой платформы машины, близкие к самому популярному российскому автомобилю «Гранта». В соответствии с расчетами выбираем каталожный общепромышленный электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения ПН160М с номинальными данными 18кВт, 220 В, 3150 об/мин. Для наглядности, расчет сопровождается графиками интересующих координат процесса. Для ввода данных доступны только ячейки задаваемых величин, выделенные желтым цветом. В таблице расчета серым цветом выделены две строки: средняя соответствует концу разгона машины на 100 км/час, предпоследняя – установившемуся движению на максимальной скорости. Итог *Excel*-расчета выводится в диапазоне ячеек, расположенных в красном прямоугольнике слева внизу листа формуляра. Эти результаты являются исходными для последующего модельного этапа проектирования привода.

Задаваемое в *Excel*-формуляр значение времени разгона до 100 км/час удовлетворяется, если расчетное *мгновенное* значение коэффициента перегрузки электродвигателя (в самом конце разгона) получилось не более 7. Затем, решением кубического уравнения, получающегося из (2):

$$[0,5 \cdot C_x \cdot S_{\text{лоб}} \cdot \rho] \cdot (V_{\max 1})^3 + [f \cdot g \cdot m_{\text{авто}}] \cdot V_{\max 1} - [3,6 \cdot \omega_{\text{ЭД}}^{\text{ном}} \cdot M_{\text{ЭД}}^{\text{ном}}] = 0 \quad (4)$$

– рассчитывают максимальную эксплуатационную скорость $V_{\max 1}$. При превышении скоростью электромобиля этого значения более 1 мин., система управления

должна выдавать информационное предупреждение водителю о возможности теплового перегрева двигателя.

Пакет *Simulink* компьютерной математической среды *MatLab* является де-факто мощнейшим инструментом моделирования сложных динамических объектов. С его помощью поэлементно создана модель тягового привода проектируемого электромобиля (рис. 4) и использована для второго этапа проектирования: проверки результатов предпроектного *Excel*-формулярного расчета и уточнения эксплуатационных характеристик.

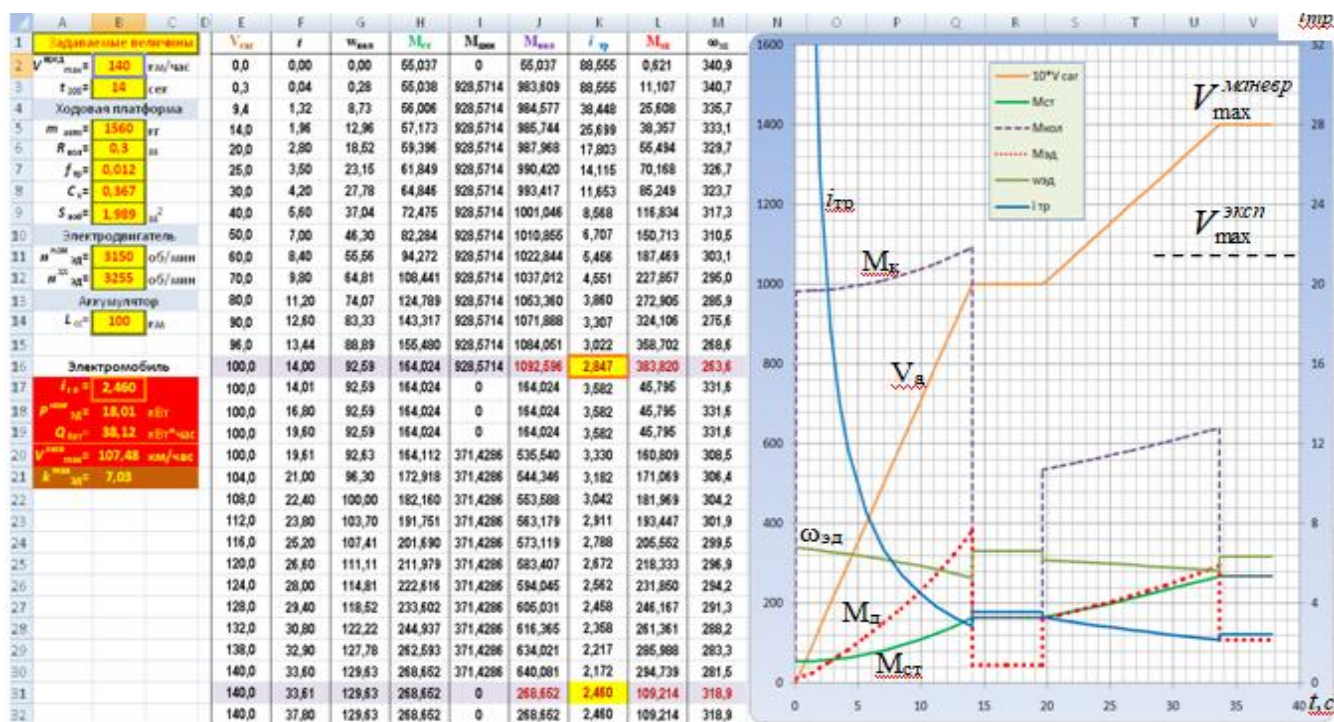


Рисунок 3 – Лист *Excel*-формулярного концептуального расчета привода электромобиля с вариаторной трансмиссией

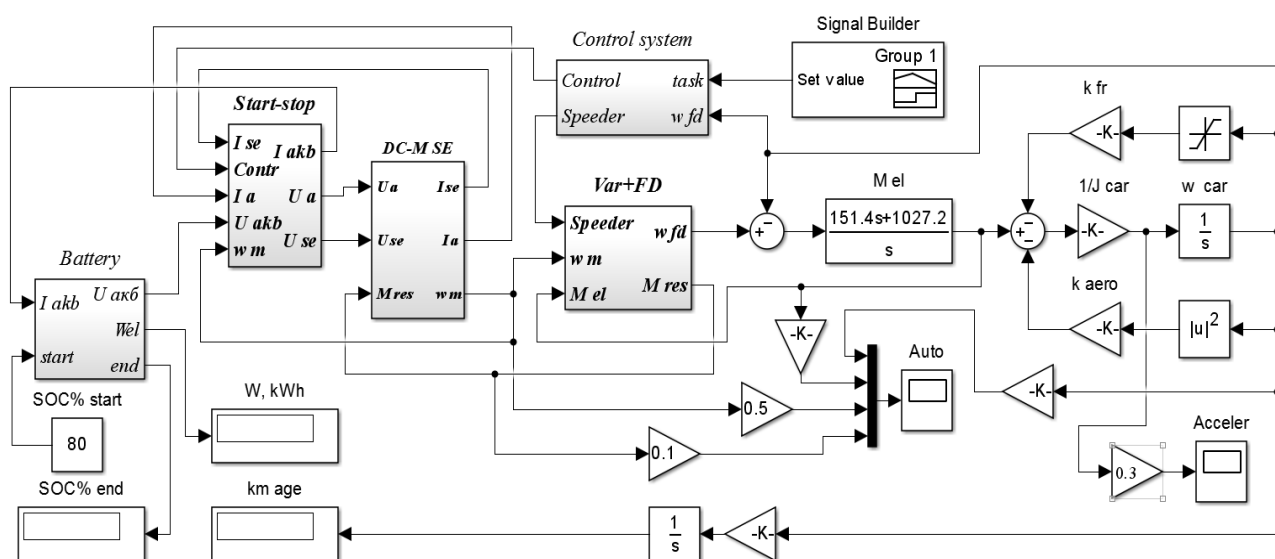


Рисунок 4 – Simulink-модель привода электромобиля с вариаторной трансмиссией

На рисунке 4 Signal Builder – формирователь сигнала Task положения педали акселератора; Control system – САУ скоростью электромобиля; Start-stop – подсистема старт-стоп; DC-M SE – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением; Var + FD – вариатор и главная передача. Сигналы в схеме рисунка 4: Control – сигнал задатчика интенсивности; Speeder – сигнал регулятора скорости; Mel – момент упругий на шинах ведущих колес; Mres – момент нагрузки на валу электродвигателя

Кроме того, по результатам компьютерного моделирования был проведен сравнительный анализ такого же электромобиля, но с традиционной схемой управления скоростью движения путем «электрического» регулирования скорости вращения двигателя изменением напряжения питания с помощью широтно-импульсного преобразователя (ШИП), в следующих условиях движения:

1. Динамический режим (разгон и торможение, рис. 5 и 6).

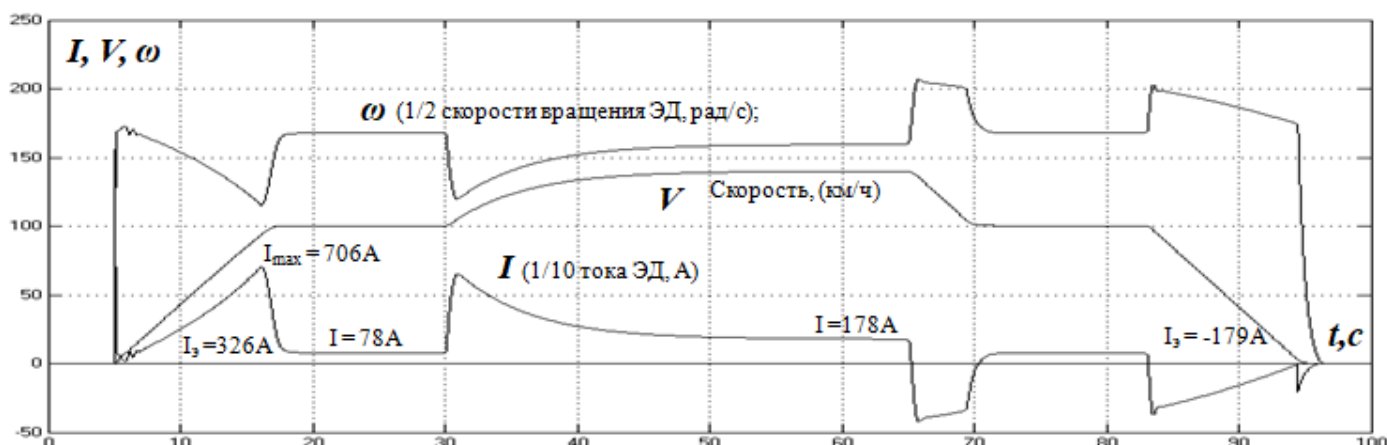


Рисунок 5 – Динамика проектируемого электромобиля с вариаторным управлением скорости (I_3 и I_a – эквивалентный и амплитудный токи электродвигателя)

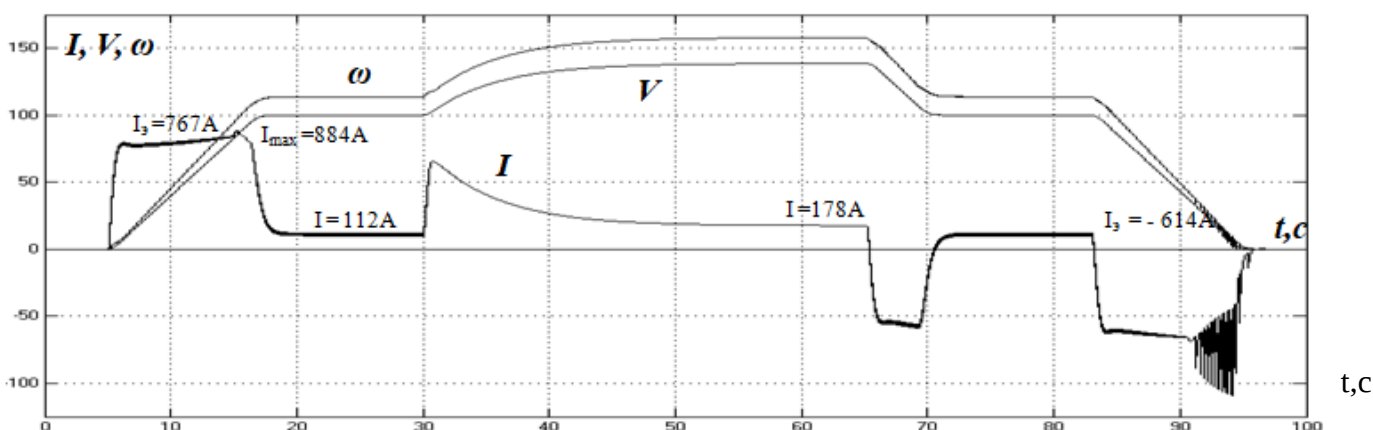


Рисунок 6 – Динамика электромобиля с управлением скоростью ШИП

Скоростная динамика обоих электромобилей соответствует расчётной, разгон до 100 км/ч – 12 с; при разгонах вариаторным управлением (рис. 5) форма тока электродвигателя имеет вид вогнутого треугольника, а при управлении ШИП – прямоугольная (рис. 6), поэтому эквивалентный ток «вариатора» - $I_3 = 326 A$, «ШИП» - 767 А. Это позволяет вариаторному управлению выдержать расчётный динамический режим эквивалентной перегрузки электродвигателя и экономить

заряд тяговой батареи, а при управлении *ШИП* это не выдерживается ($k_{эд}^{max} = 9,4$, вероятен круговой огонь в коллекторе, рис. 6). На установившейся скорости движения, меньше номинальной, видно, что при параметрическом управлении через двигатель протекает ток 78 А, потому что есть запас по передаточному отношению, а при традиционном управлении – 112 А, что больше номинального тока электродвигателя. При торможениях рекуперативный ток: «вариатор» - 179 А, а «*ШИП*» - 614 А. На предельной скорости, когда передаточные отношения трансмиссий одинаковы и токи, потребляемые от батареи одинаковы. Большие рекуперативные токи опасны для тяговой батареи и создают проблемы при управлении *ШИП*. Кроме того, импульсный режим торможения при *ШИП*-управлении (замедление перед остановкой) вызывает дискомфортные водителю и пассажирам низкочастотные колебания (дёргания) электромобиля. Динамика электромобиля с вариаторным управлением вполне приемлема, в *ШИП*-управлении токовая динамика недопустима, а режим рекуперативного торможения избыточен.

2. Шосейный режим – имитация установившегося движения по шоссе со скоростью $V_{max1} = 107,5$ км/ч до полного расхода ресурса тяговой батареи (от 100% заряда до 0%). Пробег электромобиля с управлением *ШИП* – 197 км, с вариаторным управлением – 200 км, практически одинаков.

3. Городской режим (при рекомендуемом расходе заряда батареи от 80% до 30%) по ездовому циклу *ARDC*, который учитывает «пробки» в городе. Результаты: электромобиль с вариаторным управлением – пробег 104,5 км, расход энергии от батареи в пересчёте на 100 км пути – 17,2 кВт·ч; с управлением *ШИП* – 54 км, расход – 29,6 кВт·ч на 100 км. Вариаторная схема управления имеет почти двукратное превосходство в итоговом пробеге электромобиля при одинаковом расходе энергии батареи, а в энергетике вариаторное управление в 1,72 раза экономичнее. В итоге обеспечивается лучшее использование ресурса батареи (рис. 7).

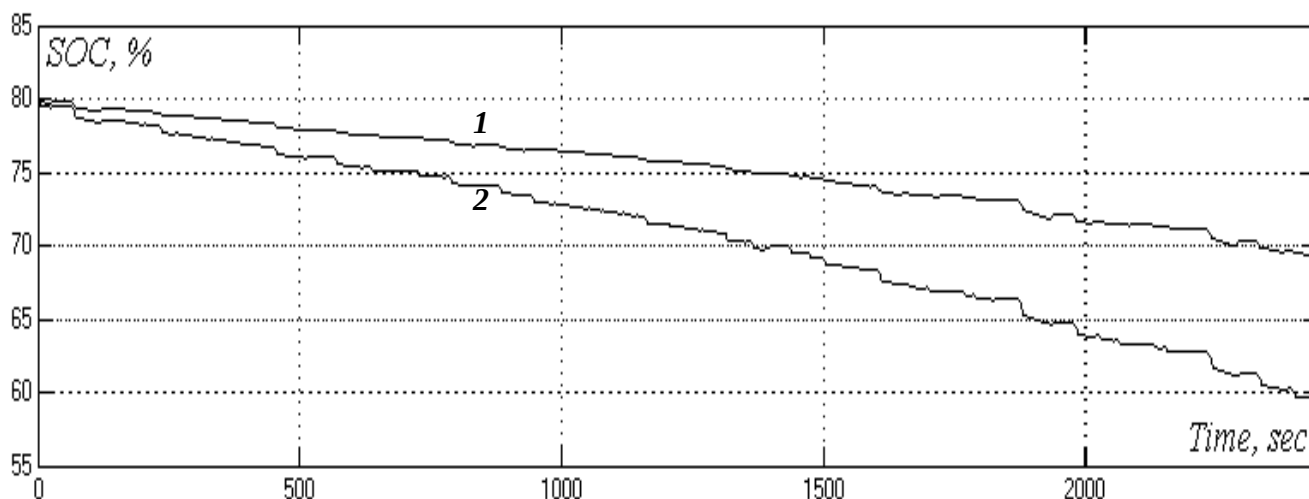


Рисунок 7 – Уменьшение заряда батареи (SOC, %) электромобилей в течение первого городского ездового цикла:

1 – вариаторный привод; 2 – привод с *ШИП*

В третьей главе «Совершенствование и создание основ проектирования привода гибридного автомобиля» разработана функциональная схема его тягового привода рис. 8, методика расчета его основных параметров с учетом особенностей двигательной установки (электродвигатель + ДВС) и бесступенчатой трансмиссией.

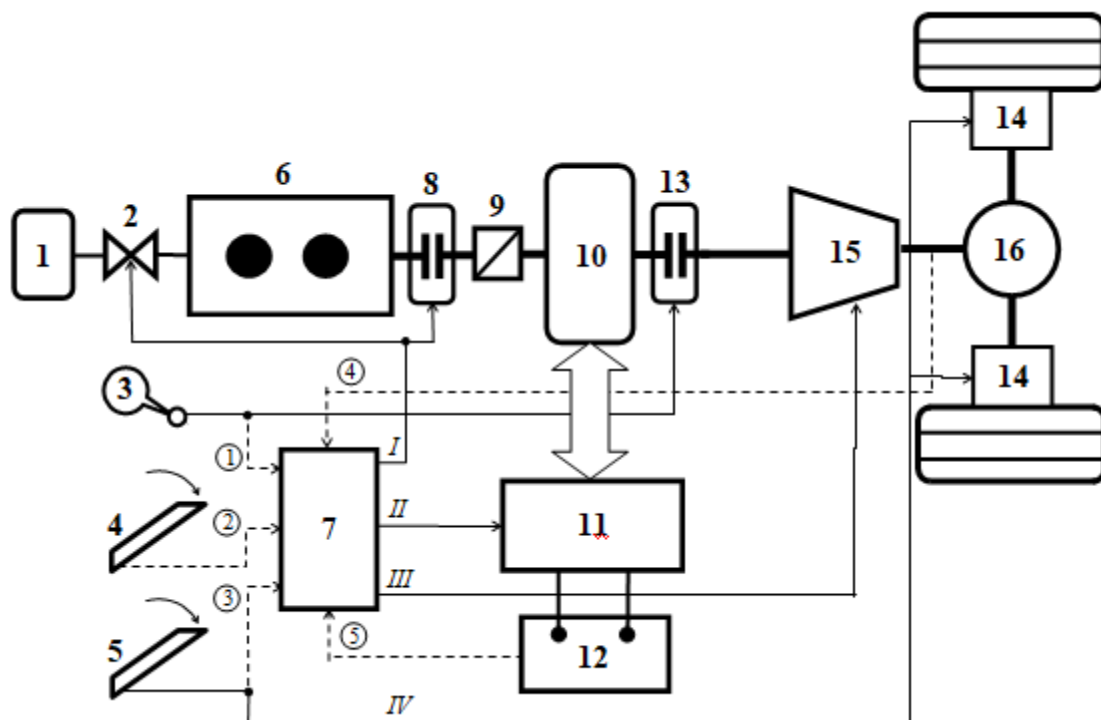


Рисунок 8 – Схема гибридного автомобиля с вариаторной трансмиссией

1 – топливный бак; 2 – дроссельная заслонка; 3 – джойстик режимов работы ТС; 4 – педаль акселератора; 5 – педаль тормоза; 6 – ДВС; 7 – контроллер управления с подсистемой старт-стоп; 8 и 13 – сцепления с электроимпульсным переключением; 9 – согласующий редуктор; 10 – ДППТ НВ; 11 – силовой коммутатор с блоком управления; 12 – аккумуляторная батарея; 14 – тормоз; 15 – вариатор; 16 – главная передача

Сцепление 8 и ДВС 6 включаются в случае, когда текущая скорость вращения электродвигателя (вычисляется в контроллере по соотношению сигналов II, III и ④) проседает ниже уровня, соответствующего допустимой перегрузке электродвигателя, и отключаются, когда эта скорость близка к номинальной. Кроме того, ДВС и его сцепление 8 принудительно включаются при превышении сигналом желаемой скорости уровня (например, более 76 км/час), соответствующего так возросшему аэродинамическому сопротивлению машины, что появляется опасность некоторого перегрева одиночно работающего электродвигателя из-за нагружения его сверх номинальной способности. Сцепление 13 включено во всех положениях, кроме «самозарядка».

Интенсивность работы ДВС определяется регулятором дроссельной заслонки пропорционально положению педали акселератора 4, но с коррекцией на разность желаемого и действительного напряжения батареи 12.

На первом, «эскизном» этапе проектирования осуществляется предварительный расчет мощности энергетических элементов привода (ДВС, электродвигатель, аккумуляторная батарея) и передаточных отношений основных элементов

трансмиссии, имея ввиду следующие обстоятельства:

а) момент сопротивления на колесах горизонтальному движению вычисляется как сумма составляющих от сил сопротивления качению, аэродинамического сопротивления и инерции. Ветровое давление и уклон трассы можно не рассматривать, поскольку они будут парироваться автоматикой управления (путем подключения ДВС и регулированием положения его дроссельной заслонки при возникновении дополнительной нагрузки). Результат влияния этих факторов может быть уточнен на втором – «модельном», – этапе проектирования;

б) для обоснованного выбора каталожной номинальной мощности двигателей гибридного автомобиля требуется решение системы двух уравнений, отражающих баланс энергетики движущих сил и сил сопротивления движению в экстремальных для этих двигателей в двух режимах, а именно:

- длительное установившееся движение на максимальной скорости транспортного средства, которая требует от ДВС максимума крутящего момента, а от электродвигателя (по условиям перегрева) – работы в режиме не тяжелее номинального;

- конец линейного разгона до 100 км/час (рис. 1а), когда от электродвигателя требуется вся его перегрузочная способность, а ДВС работает на той точке своей внешней характеристики, которая определяется текущей частотой вращения его коленчатого вала;

в) при предварительной оценке ёмкости батареи имеем в виду, что:

- для снижения деградации батареи состояние заряда в ней надо поддерживать в пределах 30÷80%, т.е. номинал её ёмкости надо удваивать относительно реально затрачиваемой энергии в городском режиме эксплуатации;

- на этапе предпроектного расчета в формуле для ёмкости аккумулятора следует также учесть вклад ДВС в энергетику движения машины. Параметр окончательно уточняется на втором («модельном») этапе проектирования.

Уравнение баланса моментов на выходном валу двигательной установки гибридного автомобиля (рис. 8):

$$k_{\text{ЭД}}^M \cdot M_{\text{ЭД}}^{\text{ном}} + i_{\text{ср}} \cdot M_{\text{ДВС}} = \frac{1}{\eta_{\text{мп}} \cdot i_{\text{эн}} \cdot i_{\text{вар}}} \cdot M_{\kappa}^V, \quad (5)$$

где $k_{\text{ЭД}}^M = M_{\text{ЭД}} / M_{\text{ЭД}}^{\text{ном}}$ – текущий коэффициент перегрузки электродвигателя по моменту;

$M_{\text{ЭД}}$ и $M_{\text{ЭД}}^{\text{ном}}$ – текущий и номинальный моменты электродвигателя на текущей $\omega_{\text{ЭД}}$ и номинальной $\omega_{\text{ЭД}}^{\text{ном}}$ скорости его вращения;

$M_{\text{ДВС}}$ – момент ДВС на текущей скорости вращения $\omega_{\text{ДВС}}$ его коленчатого вала;

$i_{\text{ср}}$, $i_{\text{эн}}$ и $i_{\text{вар}}$ – передаточные отношения соответственно согласующего редуктора, главной передачи и вариатора;

M_{κ}^V – момент сопротивления на колесах при текущей скорости V автомобиля.

Для описания зависимости момента ДВС от скорости вращения его коленчатого вала используем рекомендованную в *Simulink MatLab* обобщенную формулу:

$$M_{ДВС} = \frac{N_{\max}}{\omega_{\max}} \cdot \left(k_1 + k_2 \cdot \frac{\omega_{ДВС}}{\omega_{\max}} - k_3 \cdot \frac{\omega_{ДВС}^2}{\omega_{\max}^2} \right), \quad (6)$$

где $N_{\max}$ и $\omega_{\max}$ – каталожные мощность и скорость вращения коленчатого вала ДВС; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты аппроксимирующего полинома (для ДВС с искровым зажиганием $k_1 = k_2 = k_3 = 1$, для дизеля $k_1 = 0,6526, k_2 = 1,6948, k_3 = 1,3474$).

В первом режиме длительного установившегося движения на максимальной скорости $V_{\max 1}$ машины параметры уравнения (5) будут следующие: $k_{ЭД}^M = 1$; $i_{\text{var}} = 1$; $M_{ЭД} = M_{ЭД}^{\text{ном}}$; $\omega_{ЭД} = \omega_{ЭД}^{\text{ном}}$; $M_{ДВС} = M_{ДВС}^{\max}$ – максимальное значение крутящего момента ДВС на скорости $\omega_{ДВС} = \omega_{ДВС}^{\text{max}}$ вращения коленчатого вала; $M_{\kappa}^V = M_{\kappa}^{V_{\max 1}}$ – момент сопротивления на колесах по (5) на максимальной скорости движения (ускорение равно 0, а скорость вращения колес $\omega_{\kappa}^{V_{\max 1}}$). Тогда передаточные отношения согласующего редуктора i_{cp} и главной передачи i_{zn} определяются:

$$i_{\text{cp}} = \omega_{ДВС}^{\text{max}} / \omega_{ЭД}^{\text{ном}}; \quad i_{\text{zn}} = \omega_{ЭД}^{\text{ном}} / \omega_{\kappa}^{V_{\max 1}}. \quad (7)$$

Во втором режиме, в конце разгона на скорость 100 км/час (рис. 1а) максимально используется перегрузочная способность электродвигателя, т.е. $k_{ЭД}^M = k_{ЭД}^{\max}$, при этом скорость его вращения $\omega_{ЭД}^{\text{разгон}} = \omega_{ЭД}^{\text{xx}} - (\omega_{ЭД}^{\text{xx}} - \omega_{ЭД}^{\text{ном}}) \cdot k_{ЭД}^{\max}$ проседает ниже номинальной (здесь $\omega_{ЭД}^{\text{xx}}$ – скорость холостого хода). Однако регулятор передаточного отношения вариатора в системе управления скоростью машины по возможности компенсирует эту просадку, задавая

$$i_{\text{var}}^{\text{разгон}} = \begin{cases} \frac{1}{i_{\text{zn}}} \cdot \frac{\omega_{ЭД}^{\text{разгон}}}{\omega_{\kappa}^{100}}, & \text{если } \omega_{ЭД}^{\text{разгон}} \geq i_{\text{zn}} \cdot \omega_{\kappa}^{100}; \\ 1, & \text{если } \omega_{ЭД}^{\text{разгон}} < i_{\text{zn}} \cdot \omega_{\kappa}^{100}, \end{cases}$$

где $\omega_{\kappa}^{100} = 100 / (3,6 \cdot R_{\kappa})$ – угловая скорость вращения колес на скорости машины 100 км/час. Считаем, что машина разгоняется линейно с постоянным ускорением, равным $100 / (3,6 \cdot t_{100})$, где t_{100} – время разгона машины (сек) до скорости 100 км/час. Момент сопротивления на колесах по (2) в конце разгона $M_{\kappa}^V = M_{\kappa}^{V_{100}}$.

Получившаяся из (5) система двух уравнений баланса моментов для двух указанных режимов движения машины должна решаться совместно:

$$\left. \begin{aligned} M_{ЭД}^{\text{ном}} + i_{\text{cp}} \cdot M_{ДВС}^{\max} &= \frac{1}{\eta_{\text{mp}} \cdot i_{\text{zn}} \cdot (V_{\max 2} / V_{\max 1})} M_{\kappa}^{V_{\max 1}}; \\ k_{n \max} \cdot M_{ЭД}^{\text{ном}} + i_{\text{cp}} \cdot M_{ДВС}^{\text{разгон}} &= \frac{1}{\eta_{\text{mp}} \cdot i_{\text{zn}} \cdot (V_{\max 2} / 100)} M_{\kappa}^{V=100} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

и позволяет, с учетом аналитической зависимости (6), однозначно определить минимально необходимые номинальные мощности электродвигателя и ДВС проектируемого привода.

Требуемая ёмкость тяговой батареи $Q_{бат}$ для гибридного автомобиля предварительно определяется выражением:

$$Q_{бат} = \frac{2}{\eta_{бат} \cdot \eta_{тр}} (P_{эд}^{ном} - \Delta P_{ДВС}) \frac{L_{сс}}{V_{max}} \quad (9)$$

где 2 – коэффициент использования ёмкости батареи, учитывающий необходимость поддержания её заряда в диапазоне от 80 до 30%;

$\eta_{бат}$, $\eta_{тр}$ – соответственно, КПД батареи и трансмиссии;

$P_{эд}^{ном}$ – расчетная номинальная мощность электродвигателя;

$\Delta P_{ДВС} \approx \frac{1}{3} P_{эд}^{ном}$ – часть мощности, покрываемая в ГТС за счет ДВС, кВт;

$L_{сс}$ – среднесуточный пробег машины в этом же режиме движения, км.

Уравнения (7 – 9) позволяют однозначно определить исходные значения кинематических и энергетических параметров основных элементов принятой схемы проектируемого гибридного привода.

В примере формуляра (рис. 9) заложены параметры автомобиля «Гранта».

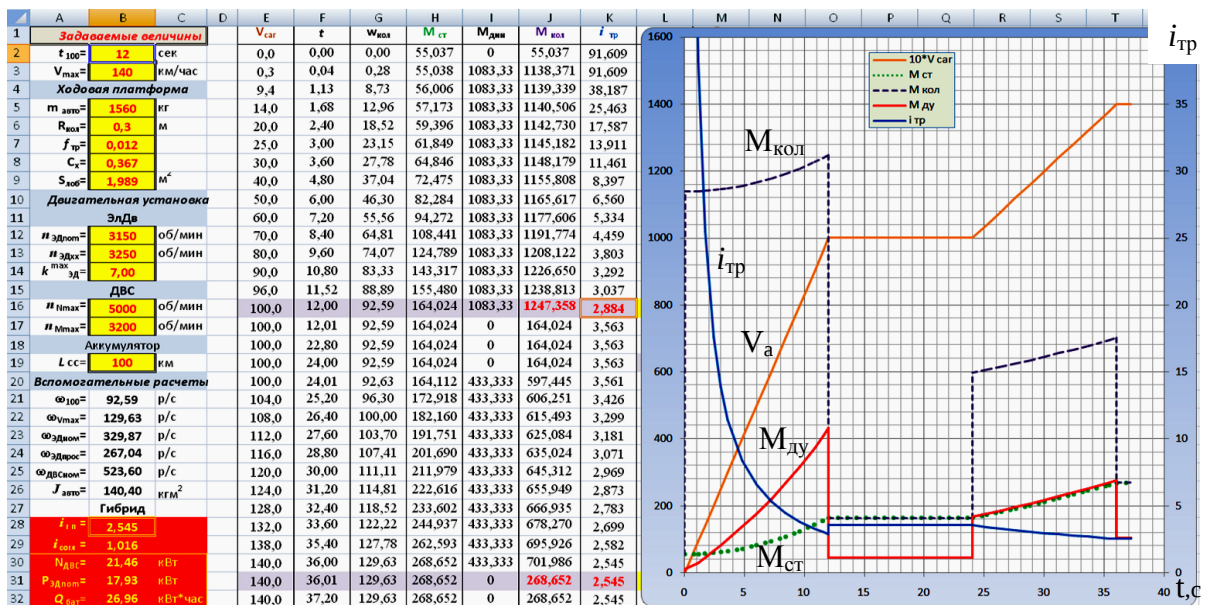


Рисунок 9 – Лист Excel-формуляра расчета привода гибридного автомобиля

В соответствии с полученными расчетными мощностями выбираем из каталогов: ДВС от ВАЗ-1111 мощностью 21,5 кВт (29,3 л.с.), электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения 2ПН160М с номинальными данными 18 кВт, 220 В, 3150 об/мин, а также тяговую батарею от электромобиля Hyundai Ionic ёмкостью 28 кВт*час.

На основе расчетных данных создана модель тягового привода проектируемого гибридного автомобиля (рис. 10) и проанализировано её поведение в характерных режимах движения.

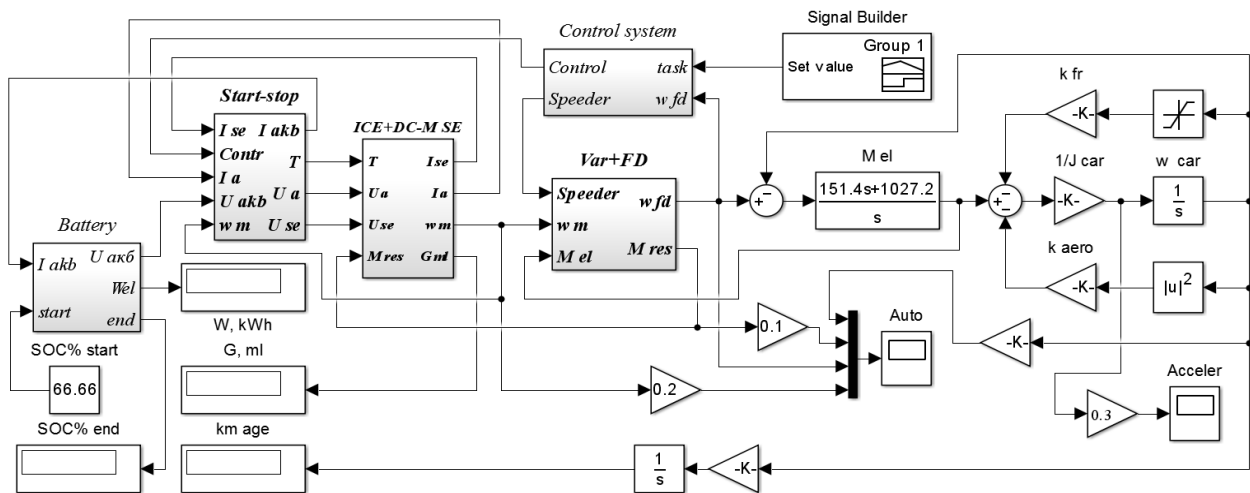


Рисунок 10 – Simulink-модель привода гибридного автомобиля

Модель гибридного автомобиля исследовалась в трёх режимах движения и в режиме стояночной самозарядки.

Режим 1: разгон с места до скорости 100 км/час, затем на 30-й сек доразгон до 140 км/час, на 65-й сек торможение до 100 км/час и с 85-й сек. полная остановка – для оценки динамических характеристик машины.

Результаты моделирования показали: разгон до скорости 100 км/час линейный, за 12 с, как и задано в *Excel*-формуляре, при этом пиковый момент электродвигателя 360 Нм, максимальный мгновенный коэффициент его перегрузки $k_{эд}^{\max} = 6,6$ (даже меньше заданного в формуляре $k_{эд}^{\max} = 7$).

Режим 2: имитация пробега в 100 км по шоссе с различными установившимися скоростями и начальными зарядами аккумуляторной батареи – для оценки эксплуатационных характеристик в длительном режиме движения.

Результаты моделирования показывают: если двигаться на трассе со скоростями от 80 до 100 км/час, то дальность пробега машины ограничена только ёмкостью её топливного бака, а эксплуатационный расход составляет 3,2÷5,1 л/100 км в зависимости от состояния заряда тягового аккумулятора. Движение с большей постоянной скоростью (110÷140 км/час) возможно, но его желательно периодически чередовать с движением на скорости «быстрой» путевой подзарядки 80 км/час (для сохранения жизненного цикла батареи).

Режим 3: имитация суточного пробега в городском цикле (использован ездовой цикл *ARDC*) при расходе ресурса батареи от 80 до 30 % – для оценки эксплуатационных характеристик в условиях максимальной интенсивности движения.

Результаты: 1) в первых 4-х циклах городского режима пройдено 91,5 км, в пересчете на 100 км пути и расходе заряда батареи от 80% в начале движения до 43,7% имеем: расход бензина 1,8 литра, энергии батареи 10 кВт·час;

2) 6-й и 7-й циклы идентичны, заряд батареи (за счет работы 2-го контура регулирования положения дроссельной заслонки) устанавливается на постоянном уровне 40,5%, то есть при таком состоянии батареи можно ездить в городском режиме сколь угодно долго без подзарядки аккумулятора, но расход бензина будет 4,3 литра на 100 км. Иначе говоря, хочешь экономичную езду – через каждые 90 км в городе подзаряжай батарею до 80%. Подзарядку можно

осуществлять как от внешнего источника электрической энергии (дешевле), так и от собственного ДВС (несколько дороже) в режиме стояночной самозарядки.

Возможна стояночная самозарядка тяговой батареи, когда электродвигатель работает в режиме генератора, вращаемого ДВС, при этом сцепление 8 (рис.8) включено, а сцепление 13 выключено. Моделирование этой ситуации для разряженной до 30% батареи показывает, что подзарядка до 80% достигается ровно за 1 час работы привода, причем расход топлива составляет 3,8 л, а в батарею закачивается 14 кВт·ч энергии.

Таким образом, моделирование электромобиля и гибридного автомобиля в характерных для них режимах движения показывает с одной стороны, что проектные расчеты в Excel-формулах достаточно обоснованны, с другой – что двухэтапная методика итеративного проектирования с модельно-ориентированным подходом может вполне удовлетворительно заменить натурные испытания и тем самым сократить материальные, трудовые и временные затраты.

В четвертой главе «Повышение энергоэффективности приводов пуска ДВС и стартер-генераторной установки автомобиля» рассмотрены способы улучшения функционирования системы пуска и стартер-генераторной установки. Предложена эффективная двухэтапная система пуска с вариантами технических решений. При существующей системе пуска стартер подключают к аккумуляторной батарее после механического соединения шестерни на его валу с венцом маховика ДВС (рис. 11а).

Это требует выдачи значительной пиковой мощности от аккумуляторной батареи, т.к. крутящий момент стартера должен преодолеть не только момент сопротивления, но и момент инерции его вращающихся масс и якоря самого стартера.

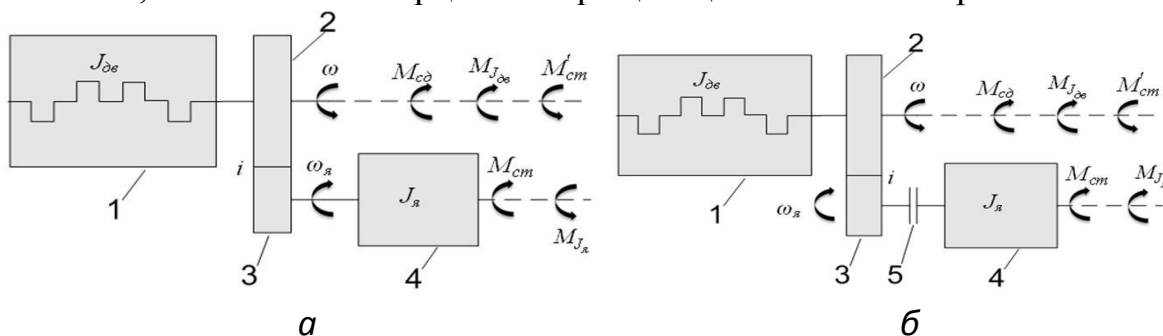


Рисунок 11 – Расчетная схема пуска ДВС:

а – традиционного; б – двухэтапного

1 – ДВС; 2 – маховик ДВС; 3 – шестерня привода; 4 – стартер;

5 – сцепление (электромагнитная муфта)

Учитывая, что электростартер питается от энергоисточника ограниченной мощности, который снижает свою работоспособность с понижением окружающей температуры, целесообразно сначала произвести запуск стартера без нагрузки, а затем уже подключить его якорь, набравший значительный запас энергии, к маховику ДВС, т.е. сделать пуск двухэтапным, как показано на рис.11б. Для осуществления такого пуска необходимо иметь обычное сцепление или электромагнитную муфту. При таком запуске снижается нагрузка на стартер и облегчается режим работы аккумуляторной батареи. Это подтверждается сравнением уравнений равновесия моментов традиционного и двухэтапного стартерных пусков.

При традиционном пуске имеем следующее уравнение равновесия:

$$M'_{cm} = M_{c\partial\partial} + M_{J\partial\partial} + M_{Jя} . \quad (10)$$

А для двухэтапного пуска это уравнение выразится так:

$$M'_{cm} + M'_{Jя} = M_{J\partial\partial} + M_{c\partial\partial} , \quad (11)$$

где $M'_{cm} = M_{cm} \cdot i$ - момент, создаваемый стартером, приведенный к валу ДВС;

$M_{c\partial\partial}$ – момент сопротивления вращению коленчатого вала при пуске ДВС;

$$M_{J\partial\partial} = J_{\partial\partial} \frac{d\omega}{dt} \quad - \text{суммарный инерционный момент ДВС};$$

ω – угловая скорость коленчатого вала;

$J'_{я} = i^2 \cdot J_{я}$ – момент инерции якоря стартера, приведенный к коленвалу;

i – передаточное число привода стартер – ДВС.

Как видно из уравнения (11), при двухэтапном пуске приведенный динамический момент якоря стартера $M'_{Jя}$ не только отпадает как самостоятельная часть нагрузки стартера, но и, меняя свой знак, становится активным (тяговым) и помогает пуску, а динамический момент сопротивления уменьшается на величину, равную $2M'_{Jя}$. Это значительно снижает требуемый вращающийся момент, создаваемый стартером и благоприятно сказывается на режиме работы аккумуляторной батареи, т.к. энергия отбирается не сразу, а поэтапно: сначала механическую энергию $W_{я} = J_{я} \omega_{я}^2 / 2$ приобретает якорь стартера, затем подключается сам стартер.

Решая уравнение двухэтапного пуска относительно угловой скорости коленчатого вала, которая при пуске изменяется от начальной до минимальной, определяем наименьшую при данных условиях угловую скорость, которая обеспечивает пуск ДВС:

$$\omega_{min} = \omega_{нач} - \frac{M_{cm} \cdot i - M_{c\partial\partial}}{J_{я} \cdot i^2 - J_{\partial\partial}} t_{дон} \quad (12)$$

ω_{min} – наименьшая при данных условиях угловая скорость коленчатого вала, достаточная для обеспечения пуска ДВС;

$\omega_{нач}$ – начальная скорость вращения коленчатого вала двигателя, равная $\omega_{хх}/i$;

$\omega_{хх}$ – угловая скорость холостого хода электростартера.

$t_{дон}$ – допустимая по нормативу продолжительность одной попытки пуска двигателя.

Уравнение (12) определяет возможность двухэтапного запуска ДВС. Для этого рассчитанное значение ω_{min} сравниваем с требуемым ω_{min}^T при данных условиях. Если $\omega_{min} < \omega_{min}^T$, то на валу стартера необходимо предусмотреть дополнительный маховик. Предлагаемый способ пуска дает возможность стартеру функционировать в стартер-генераторном режиме, т.е. стать стартер-генераторной установкой (пат. РФ 2280190).

Рассмотрены возможности повышения возвращаемой энергии при рекуперативном торможении автомобиля со стартер-генераторной установкой (СГУ). В существующих СГУ режим рекуперативного торможения имеет относительно малую длительность из-за снижения скорости автомобиля. При недостаточной скорости вращения электрической машины происходит срыв генерации, тормо-

жение производится, в основном штатным тормозом, без возврата энергии. Для повышения эффективности процесса рекуперации предлагается установить между трансмиссией автомобиля и электрической машиной вариатор, способный обеспечить поддержку заданной угловой скорости вала генератора во время торможения за счет изменения передаточного отношения обратно-пропорционально изменению скорости автомобиля. При этом становится возможным использовать кинетическую энергию торможения автомобиля почти до полной его остановки. Для реализации вышеизложенного разработано устройство эффективного торможения транспортного средства (патент РФ № 2229767), рис. 12.

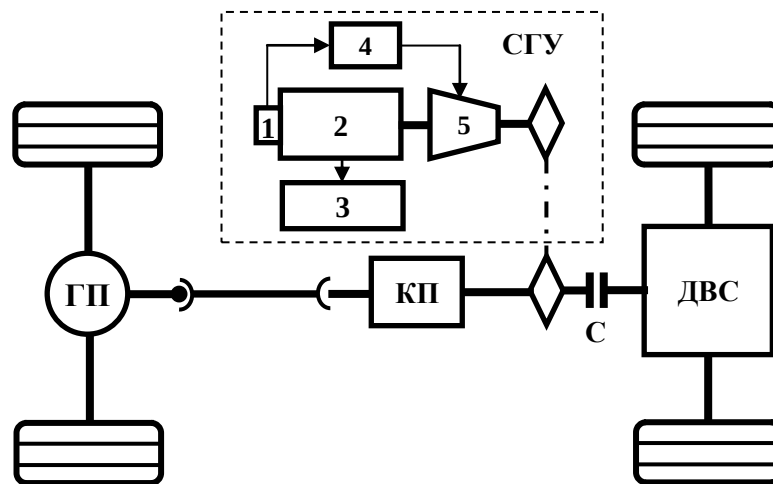


Рисунок 12 – Схема рекуперативного торможения автомобиля с вариатором:

1 – датчик скорости; 2 – электрическая машина СГУ; 3 – аккумуляторная батарея; 4 – блок управления; 5 – вариатор; ГП – главная передача; КП – коробка передач; С – сцепление; ДВС – двигатель внутреннего сгорания

Датчик скорости 1 контролирует угловую скорость вращения генератора 2 и при её снижении блок управления 4 повышает передаточное число вариатора 5, обеспечивая постоянство угловой скорости вала генератора, который получает вращение от колёс, продолжая заряжать аккумулятор 3 и обслуживать бортовые потребители электроэнергии без отбора мощности от ДВС. По такой схеме СГУ, являясь достаточно автономной и компактной, может быть без существенных переделок встроена в серийный автомобиль.

При использовании предлагаемого устройства в уравнении движения тормозящего автомобиля, кроме штатного тормоза (ψ_T), появляется тормозной момент электрической машины СГУ в режиме генератора ($M_{ген}$):

$$\delta m \frac{dV}{dt} = -[(\psi + \psi_T) mg + k_{\epsilon} S_{лоб} V^2 + \frac{i_{гн}}{R_k} i_{вар} M_{ген}], \quad (13)$$

где δ – коэффициент учета вращающихся масс;

m – масса автомобиля, кг;

V – скорость автомобиля, м/с;

ψ – коэффициент сопротивления дороги;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

$k_{\epsilon} = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_{\epsilon}$ – коэффициент обтекаемости автомобиля, $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$, (C_x – продольная составляющая безразмерного коэффициента полной аэродинамической силы; ρ_{ϵ} – плотность воздуха, кг/м^3);

$S_{\text{лоб}}$ – лобовая площадь автомобиля (сечение миделя), м^2 ;

$\psi_{\text{т}}$ – коэффициент сопротивления штатного тормоза;

$R_{\text{к}}$ – радиус качения колеса;

$i_{\text{вар}} = i_{\text{вар}}(V)$ – принудительно изменяемое передаточное отношение вариатора;

$M_{\text{ген}}$ – тормозной момент электрической машины СГУ в режиме генератора, который определяется по формуле:

$$M_{\text{ген}} = \frac{U \cdot R_{\text{к}} \cdot I_{\text{я}}}{i_{\text{гп}}} \cdot \frac{1}{V} \quad (14)$$

где U и $I_{\text{я}}$ – соответственно напряжение электрической машины и его ток.

Уравнение (13) решено численным методом с помощью программы *Simulink* из пакета компьютерной математики *Matlab*. Блок-диаграмма модели приведена на рис. 13.

По этой модели одновременно рассчитывается торможение автомобиля в трёх вариантах:

- в первом варианте (блок 1 рис. 13) – торможение производится самовыбегом автомобиля без рекуперации;
- во втором варианте (блок 2) – осуществляется рекуперативное торможение со СГУ с обычным регулятором напряжения генератора;
- в третьем варианте (блок 3) – производится рекуперативное торможение со СГУ с вариатором.

Действие штатной тормозной системы определяется её коэффициентом сопротивления $\psi_{\text{т}} \neq 0$, при $\psi_{\text{т}} = 0$ тормоз не включен, имеет место выбег автомобиля. Результаты моделирования представлены семействами тахограмм торможений, рис. 14.

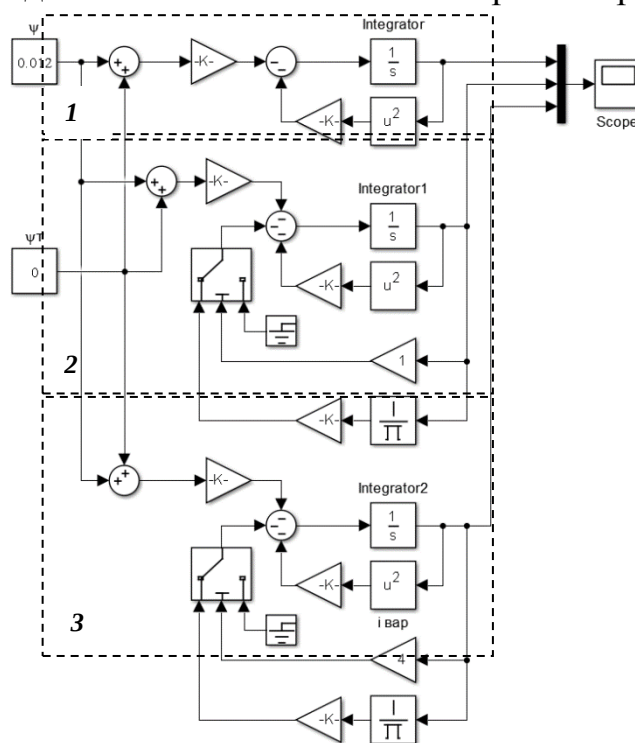


Рисунок 13 – Блок-диаграмма моделирования процессов торможения автомобиля с различными СГУ

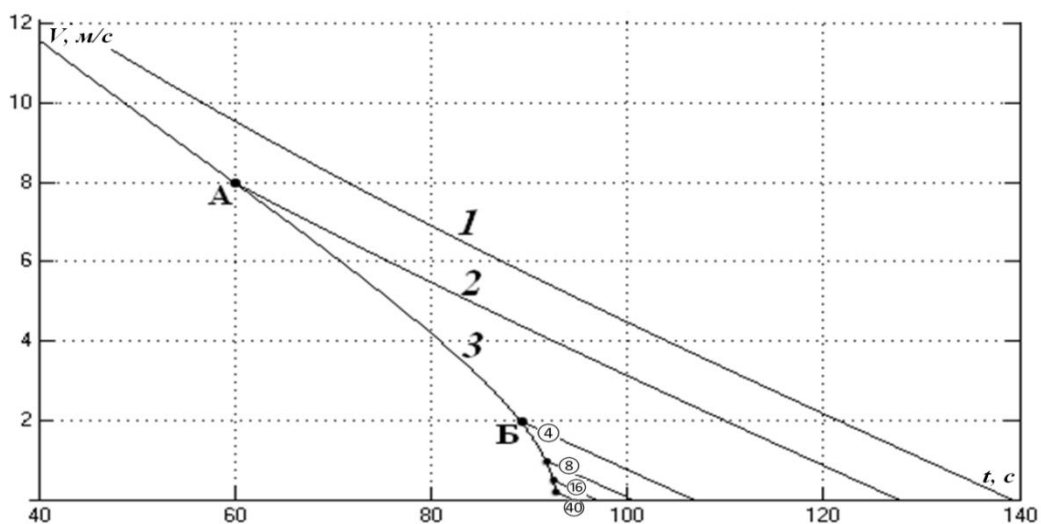


Рисунок 14 – Результаты моделирования торможения автомобиля:

1 – без рекуперации (выбег); 2 – с рекуперацией в СГУ с регулятором напряжения;
3 – с рекуперацией в СГУ с вариатором; А – точка срыва рекуперации в СГУ без вариатора, Б – срыв рекуперации с диапазоном вариатора 4; 4, 8, 16, 40 – значения диапазонов вариатора

Как видно, длительность рекуперативного режима в предлагаемой СГУ с вариатором, даже при его небольшом максимальном диапазоне, порядка 4, в 1,8 раза больше, чем при его отсутствии, что позволяет увеличить рекуперлируемую энергию на 18%. В качестве вариатора можно использовать промышленно выпускаемые изделия.

Наибольший эффект получается при глубоких (вплоть до остановки автомобиля) торможениях, т.е. в интенсивном городском цикле движения автотранспорта. Автономность, компактность и простота предложенных решений позволяют использовать их в том числе для быстрой модернизации существующих серийных моделей автомобилей.

В пятой главе «Оценка эффективности разработок электромеханических приводов автотранспортных средств» проанализированы результаты: 1) компьютерного моделирования привода электромобиля; 2) гибридного автомобиля, 3) экспериментального исследования предложенного привода пуска ДВС и 4) моделирования привода стартер-генераторной установки автомобиля.

1. Проведена сравнительная экономическая оценка эксплуатационных показателей предлагаемого тягового привода электромобиля с двигателем постоянного тока при управлении его скорости вариатором (пат. 2703639 на способ и устройство) и широтно-импульсным преобразователем (ШИП).

Электромобиль по результатам моделирования расходует на 100 км пути в городском режиме:

- при управлении скоростью вариатором 17,96 кВт·ч;
- при управлении скоростью ШИП 29,6 кВт·ч.

Затраты на электроэнергию составляют:

- при вариаторном управлении: $C_v = q_{\text{эл}} \cdot C_3 = 17,96 \cdot 4 = 72$ руб./100км;
- при управлении ШИП: $C_{\text{шип}} = q_{\text{эл}} \cdot C_3 = 29,6 \cdot 4 = 118,4$ руб/100км.

Себестоимость 1км пробега электромобиля по расходу энергии:

- с вариаторным управлением 0,72 руб./км;

- с управлением *ШИП* 1,18 руб./км.

Электромобиль с вариаторным управлением скорости в 1,64 раза меньше потребляет энергии. Основной экономический показатель разработанного электромобиля – удельный расход энергии составляет – 180,7 Вт·ч /км.

2. Произведена оценка эффективности использования гибридного автомобиля в городском режиме движения и трёх видах зарядки тяговой батареи: а) зарядка от розетки; б) путевая подзарядка и в) стояночная «самозарядка».

а) Экономичная зарядка батареи от розетки через каждые 90 км пробега, когда расход топлива составляет 1,78 л на 100 км, а расход электроэнергии равен 9,96 кВт·ч. Общие затраты составляют:

$$C_1 = q_m \cdot C_m + q_e \cdot C_e = 1,78 \cdot 42 + 9,96 \cdot 4 = 115 \text{ (руб.)} \quad (15)$$

где q_m , q_e – расход топлива и электроэнергии;

C_m , C_e – цена топлива и электроэнергии.

Себестоимость 1 км городского пробега при такой зарядке составит: 1,15 руб.

б) Путевая подзарядка. При установившемся движении электромобиля в городе заряд батареи устанавливается на уровне $SOC = 40,5\%$, т.е. при таком состоянии батареи можно ездить в городском режиме сколько угодно долго без подзарядки батареи, но расход топлива составит $0,984 \cdot 100 / 22,86 = 4,3$ л на 100 км. Затраты при этом составят:

$$C_2 = q_m \cdot C_m = 4,3 \cdot 42 = 180,6 \text{ руб./100км}$$

Себестоимость 1 км городского пробега составит 1,8 руб.

в) Стояночная «самозарядка», когда автомобиль остановлен, ДВС вращает тяговый электродвигатель в генераторном режиме. Батарея заряжается до уровня $SOC = 80\%$ за 1 час работы привода (при начальном уровне $SOC = 30\%$). При этом расход топлива составляет 3,81 л. Учитывая, что при езде расход топлива составит 1,78 л/100км, общие затраты при «самозарядке» составят:

$$C_{сз} = (q_{сз} + q_e) \cdot C_m = (3,816 + 1,78) \cdot 42 = 235,02 \text{ руб./100км}$$

где $q_{сз}$, q_e – расход топлива при «самозарядке» и при езде.

Себестоимость 1 км при «самозарядке» 2,35 руб.

Сравнение себестоимости 1 км городского пробега с серийной «Грантой». Городской расход «Гранты» - 8 л/100 км. При стоимости 1 л бензина АИ- 92 42 рубля, себестоимость 1км составит 3,36 руб.

3. Экспериментально получены осциллограммы изменения основные параметров переходного процесса стартерного пуска ДВС: мощность потребляемая стартером 1, частота вращения коленчатого вала 2, ток стартера 3 при традиционном пуске (рис.15а) и предлагаемом двухэтапном пуске (рис. 15б). Результаты обработки экспериментальных данных подтвердили эффективность предлагаемого способа пуска ДВС. Энергоэффективность пуска повышается на 27 – 30% за счёт рационального, поэтапного использования энергии аккумуляторной батареи. Двухэтапный пуск создаёт благоприятный режим работы для батареи и способствует повышению его ресурса. Полученная энергоэффективность достигается без изменения основных параметров системы пуска ДВС.

Привод предлагаемой двухэтапной системы пуска ДВС облегчает переход к созданию стартер-генераторных установок автомобилей и является мостом к гиб-

ридными автомобилям и электромобилям.

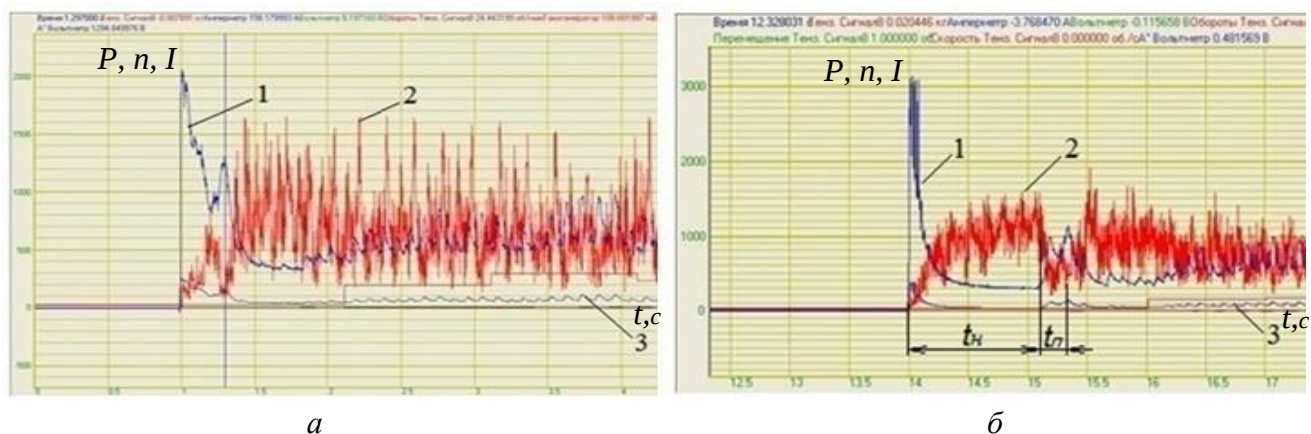


Рисунок 15 – Осциллограммы переходных процессов пуска ДВС:

а – традиционного; б – двухэтапного;

1 – мощность потребляемая стартером (Вт); 2 – частота вращения коленчатого вала (об/мин.); 3 – ток, потребляемый стартером (А)

4. Повышена энергоэффективность работы стартер-генераторной установки (СГУ) автомобиля в режиме рекуперативного торможения на основе совершенствования её привода с использованием вариатора. Моделирование процесса рекуперации с вариатором выявило: повышение количества возвращаемой энергии торможения на 18% за счёт увеличения длительности рекуперации по сравнению со схемой без вариатора.

Основные выводы по диссертационной работе

1. Предложен и обоснован параметрический принцип управления скоростью транспортного средства бесступенчатым изменением передаточного числа трансмиссии, без регулирования скорости вращения двигательной установки. Преимущество принципа (по сравнению с традиционным) состоит в уменьшении требуемого крутящего момента от двигателя пропорционально уменьшению текущей скорости движения автомобиля, что особенно проявляется в режимах разгона и торможения.

2. Разработаны новые схемы приводов электромобиля и гибридного транспортного средства на основе предложенного параметрического принципа управления скоростью транспортного средства прямым регулированием передаточным числом вариатора.

3. Обоснован расчет основных параметров привода предложенной в диссертации схемы электромобиля на базе учета допустимого времени работы тягового электродвигателя в трёх режимах: номинальной нагрузки, двух- и трехкратной перегрузки.

4. Обоснована методика расчета основных параметров привода предложенной в диссертации схемы гибридного автомобиля совместным решением системы двух уравнений, отражающих баланс движущих сил и сил сопротивления в двух

режимах: первый – конец процесса разгона до 100 км/ч (с максимальным использованием перегрузочной способности электродвигателя); второй – длительное движение транспортного средства на максимальной скорости (*ДВС* работает с максимальным крутящим моментом, электродвигатель с номинальной нагрузкой).

5. Разработана методика двухэтапного концептуального проектирования приводов электромобиля и гибридного транспортного средства: первый этап - обоснованный предпроектный расчет параметров приводов; второй этап - уточнение эксплуатационных показателей приводов на компьютерных моделях исследуемых объектов в основных режимах движения.

6. Для оптимизации расходов топлива и энергии тяговой батареи гибридного транспортного средства рационально регулирование дроссельной заслонки осуществлять не только по положению педали акселератора, но и корректировать в зависимости от текущего уровня заряда батареи.

7. Обоснована и экспериментально подтверждена эффективность предложенного привода двухэтапного пуска *ДВС* с вариантами технических решений (на уровне изобретений), повышающих надежность пуска за счёт снижения энергозатратности процесса на 27 – 30% по сравнению с традиционным.

8. Обоснован предложенный привод стартер-генераторной установки автомобиля (патент РФ № 2229767) , повышающий возврат рекуперированной энергии на 18% по сравнению с традиционной схемой.

По содержанию диссертационной работы опубликовано:

в изданиях, рекомендованных ВАК РФ – 14:

1. Аджиманбетов, С.Б. Двухступенчатая система пуска двигателя /С.Б. Аджиманбетов, Г.И. Мамити, М.С. Льянов //Автомобильная промышленность, 2002, № 8. – с.23-24.

2. Аджиманбетов, С.Б. Новый выключатель электростартера / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность, 2003, № 7. – с. 19.

3. Аджиманбетов, С.Б. Защита аккумуляторной батареи от перезаряда / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность, 2004, № 1. – с. 31-32.

4. Аджиманбетов, С.Б. Способ повышающий эффективность торможения АТС с гибридным приводом / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность, 2005, № 9. – с. 28.

5. Аджиманбетов, С.Б. Автомобиль с комбинированной силовой установкой. Торможение электродвигателем / С.Б. Аджиманбетов, И.Х. Есенов // Автомобильная промышленность, 2006, № 3. – с. 19.

6. Аджиманбетов, С.Б. Двухэтапный пуск ДВС электростартером/ С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность, 2007, № 7. – с. 11-12.

7. Аджиманбетов С.Б. Втягивающее реле электростартера ДВС / С.Б. Аджиманбетов, И.Х. Есенов // Механизация и электрификация сельского хо-

зйства, 2009, № 3. – с. -3736.

8. Аджиманбетов, С.Б. Система эффективного электрического торможения АТС /С.Б. Аджиманбетов, И.Х. Есенов // Автомобильная промышленность, 2010, № 5. – с. 20-22.

9. Аджиманбетов, С.Б. Автомобильные комбинированные энергоустановки и их классификация /С.Б. Аджиманбетов//Автомобильная промышленность, 2011, № 8. – с. 13-17.

10. Аджиманбетов, С.Б. Гибридомобиль с вариатором / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность, 2011, № 9. – с. 9-10.

11. Аджиманбетов, С.Б. Электростартер с маховиком / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность, 2011, № 12. – с. 19-20.

12. Аджиманбетов, С.Б. Электростартерный пуск ДВС и устройства его облегчения / С.Б. Аджиманбетов // Автомобильная промышленность, 2012, № 10. – с. 14-18.

13. Аджиманбетов, С.Б. Моделирование двухэтапного пуска ДВС / С.Б. Аджиманбетов, Э.К. Гутиев//Автомобильная промышленность, 2013, № 9. – с. 12-14.

14. Аджиманбетов, С.Б.. Расчет системы двухэтапного пуска ДВС / С.Б. Аджиманбетов, И.Х. Есенов //Автомобильная промышленность, 2017, №8. – с.32-33.

в зарубежных изданиях, входящих в базу Scopus – 2:

15. Khatagov, A.C. Conceptual Design Methodics of Hybrid Car Traction Drive / A.C. Khatagov, S.B. Adzhimanbetov, Z.A.Khatagov, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021. – 643-651 p.

16. Khatagov, A.C. Two Concepts of Urban Electric Vehicle Drive/ A.C. Khatagov, S.B. Adzhimanbetov, Z.A.Khatagov, Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, 2019.

монографии – 1:

17. Аджиманбетов С.Б. Стартерные и гибридные силовые установки автомобилей: монография / С.Б. Аджиманбетов . – Владикавказ: Издательство ФГБОУ ВО «Горский госагроуниверситет», 2020. – 175 с.

патенты – 12:

18.Аджиманбетов, С.Б. Устройство эффективного торможения транспортного средства с гибридным приводом: пат. 2229767 на изобретение, РФ: МПК N02K 7/18 / Аджиманбетов С.Б.; заявл. 22.07.2002; опубл. 27.05.2004. Бюл. № 15 – 4 с.: ил.

19.Аджиманбетов, С.Б. Система электростартерного пуска ДВС: пат. 2239090 на изобретение, Рос. Федерация: МПК F02N 15/02 / Аджиманбетов С.Б., Льянов М.С., Цховребова И.Ч.; заявл. 28.05.2001; опубл. 27.10.2004. Бюл. № 30 – 4 с.: ил.

20.Аджиманбетов, С.Б. Система двухступенчатого электростартерного пуска ДВС транспортного средства: пат. 2280190 на изобретение, РФ: МПК F02N 15/00 / Аджиманбетов С.Б., Тангатаров М.Я.; заявл. 20.03.2005; опубл. 20.07.2006. Бюл. № 20 – 3 с.: ил.

21.Аджиманбетов, С.Б. Система двухэтапного электростартерного пуска ДВС: пат. 2320888 на изобретение, Рос. Федерация: МПК F02N 15/02 / Аджиман-

бетов С.Б.; заявл. 18.10.2006; опубл. 27.03.2008. Бюл. № 9 – 4 с.: ил.

22.Аджиманбетов, С.Б. Выключатель электростартера ДВС: пат. 2350774 на изобретение, Рос. Федерация: МПК F02N 15/06 / Аджиманбетов С.Б., Есенов И.Х., Бурдзиев А.Г.; заявл. 19.11.2007; опубл. 27.03.2009. Бюл. № 9 – 2 с.: ил.

23.Аджиманбетов, С.Б. Привод вентилятора системы охлаждения ДВС: пат. 97174 на полезную модель, Рос. Федерация: МПК F02P 5/04 / Аджиманбетов С.Б., Аджиманбетов А.С.; заявл. 31.07.2008; опубл. 27.08.2010. Бюл. № 24 – 2 с.: ил.

24.Аджиманбетов, С.Б. Система бесконтактного включения электростартера ДВС транспортного средства: пат. 2418974 на изобретение, РФ: МПК F02N 15/00 / Аджиманбетов С.Б., Есенов И.Х.; заявл. 27.01.2009; опубл. 20.05.2011. Бюл. № 14 – 4 с.: ил.

25.Аджиманбетов, С.Б. Система электростартерного пуска ДВС: пат. 2462611 на изобретение, Рос. Федерация: МПК F02N 15/02 / Аджиманбетов С.Б., Глабец А.А., Голобоков М.Г.; заявл. 27.12.2010; опубл. 27.09.2012. Бюл. № 27 – 4 с.: ил.

26.Аджиманбетов, С.Б. Система двухрежимного электростартерного пуска ДВС: пат. 2479744 на изобретение, Рос. Федерация: МПК F02N 11/00 / Аджиманбетов С.Б.; заявл. 13.09.2011; опубл. 20.04.2013. Бюл. № 11 – 4 с.: ил.

27.Аджиманбетов С.Б. Способ управления приводом электромобиля и устройство для его осуществления: пат. 2703639 на изобретение. Рос. Федерация: МПК B60L 50/60/Аджиманбетов С.Б., Хатагов А.Ч., Хатагов З.А., Дрияев Т.В.; заявлено 30.10.2018; опубл. 19.12.2019. Бюл. №35.

28.Аджиманбетов С.Б. Широкодиапазонная реверсивная трансмиссия: пат. 2729847 на изобретение, Рос. Федерация: МПК F16H 15/50 / Хатагов А.Ч, Хатагов З.А., Аджиманбетов С.Б.; заявл. 19.02.2020; опубл. 12.08.2020. Бюл. №23 – 9 с.: ил.

29.Аджиманбетов С.Б. Бесступенчатая трансмиссия: пат. 2756733 на изобретение, Рос. Федерация: МПК F16H 15/38; F16H 3/00 / Хатагов А.Ч, Хатагов З.А., Аджиманбетов С.Б.; заявл. 20.04.2020; опубл. 04.10.2021.

публикации в других изданиях – 11:

30.Аджиманбетов С.Б. Пуск ДВС в две ступени [Текст] / С.Б. Аджиманбетов // Известия ФГБОУ ВПО ГГАУ, т. 40, 2003. – с. 82-83.

31.Аджиманбетов, С.Б. Рациональный привод вентилятора системы охлаждения ДВС / С.Б. Аджиманбетов // Труды ФГОУ ВО СКГМИ (ГТУ) вып. 12, 2005. – с. 129.

32.Аджиманбетов, С.Б. Стартер-генератор транспортного средства / С.Б. Аджиманбетов // Известия ФГБОУ ВПО ГГАУ, т. 44, 2007. – с. 125-126.

33.Аджиманбетов, С.Б. Тиристорное включение электростартера ДВС / С.Б. Аджиманбетов, И.Х. Есенов // Проектирование специальных машин для освоения горных территорий. Матер. межд. научно-практ. конф. – Владикавказ: ФГБОУ ВПО ГГАУ, 2011. – с. 5-6.

34.Аджиманбетов, С.Б., Экспериментальное исследование двухэтапного электростартерного пуска ДВС / С.Б. Аджиманбетов, В.И. Кесаев // Известия ФГБОУ ВПО ГГАУ, №52(2), 2015. – с.169 – 172.

35.Аджиманбетов, С.Б., Система двухрежимного электростартерного пуска ДВС / Аджиманбетов С.Б.,Тхапсаев В.А.// Известия ФГБОУ ВО ГГАУ, №53(1), 2016. – с. 97 - 101.

36.Аджиманбетов, С.Б. Расчет маховика максимальной энергоемкости для электростартера ДВС/Аджиманбетов С.Б., Есенов И.Х., Бидеева И.Х.//Сб. Перспективы развития АПК в современных условиях, материалы 7^й международной НПК, Владикавказ, 2017 – с.324 – 325.

37.Аджиманбетов С.Б. Оценка эффективности системы рекуперации гибридного автомобиля с вариатором/Аджиманбетов С.Б., Льянов М.С.//Материалы всероссийской НПК «Достижения науки – сельскому хозяйству». – Горский ГАУ. Том 1, часть 1. – Владикавказ, ФГБОУ ВО Горский ГАУ, 2017, с.278-281.

38.Аджиманбетов С.Б. Гибридная силовая установка автомобиля/Аджиманбетов С.Б., Уртаев Т.А.// Материалы всероссийской НПК «Достижения науки – сельскому хозяйству». – Горский ГАУ. Том 1, часть 1. – Владикавказ, ФГБОУ ВО Горский ГАУ, 2017, с.281-284.

39.Аджиманбетов С.Б. Расчет мощности электродвигателя и емкости батареи для электромобиля / Кодзаев Т.Б., Дрияев Т.В.//Вестник научных трудов молодых ученых, аспирантов и магистрантов, №54, с.165-167 ФГБОУ ВО Горский ГАУ, 2017.

40. Аджиманбетов С.Б., Электромобиль с автономным зарядным устройством / Токарев В.А.// Материалы международной НПК «Научное обеспечение устойчивого развития АПК горных и предгорных территорий», посвященной 100-летию Горского ГАУ часть 1, с.321 – 323– ФГБОУ Горский ГАУ, Владикавказ - 2018.

Подписано в печать «__» _____ 2022г. Заказ №____ Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 2,0.

Отпечатано в типографии ООО НПКП «Мавр»

362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Августовских событий, д.8