

На правах рукописи



Раков Вячеслав Александрович

**МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИБРИДНЫХ
АВТОМОБИЛЕЙ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Вологда – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Вологодский государственный университет» (ВоГУ)

Научный консультант:

Капустин Александр Александрович,
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Асоян Артур Рафикович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», кафедра «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис», профессор;

Ложкина Ольга Владимировна,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева», кафедра физико-химических основ процессов горения и тушения, профессор;

Хмелев Роман Николаевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», кафедра «Транспортно-технологические машины и процессы», профессор;

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Защита состоится «30» сентября 2025 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний Диссертационного совета (аудитория № 220 главного корпуса). Тел./Факс: (812) 316-58-73, E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте: <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/rakov-vyacheslav-aleksandrovich>

Автореферат разослан «23» июня 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.М. Грушецкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В Транспортной стратегии Российской Федерации определены ключевые направления развития автомобильного транспорта, среди которых отмечено стремление к снижению затрат при осуществлении перевозок, уменьшение негативного влияния автомобилей на окружающую среду и здоровье будущих поколений. В комплексе направлений реализации поставленных планов к 2035 году предусматривается введение в эксплуатацию до 26 % от общего автопарка электромобилей и гибридных автомобилей (ГА). Вместе с тем ожидается повышение требований к автотранспортным средствам и как следствие снижение расхода топлива автомобилями на 13-15%, что будет происходить за счет повышения эффективности энергоустановки, включая оптимизацию режимов работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Достижение этих требований должно обеспечиваться, в том числе за счет расширения парка эксплуатируемых гибридных автомобилей.

В соответствии с ГОСТ Р 59483-2021 «Колесные транспортные средства. Термины и определения» автомобиль, имеющий комбинированную энергоустановку (КЭУ), – гибридный. Количество эксплуатируемых в России гибридных автомобилей на начало 2025 года составило 485 тыс. шт.

Мониторинг индикаторных показателей, проведенный Минтранс России в рамках реализации Транспортной стратегии РФ, показал, что доля экологически чистых транспортных средств, включая гибридные автомобили, в общей численности автомобильного парка страны составила всего 4 % при целевом значении в 26 %. Расширение доли эксплуатируемых гибридных автомобилей затрудняется отсутствием объективных методов, апробированных методик, критериев оценки и обеспечения эффективности их эксплуатации.

Гибридные автомобили имеют ряд принципиальных отличий от традиционных автомобилей с ДВС, таких как: работа ДВС в оптимальном нагрузочном режиме; возможность движения с выключенным ДВС; отсутствие холостого хода; возможность рекуперации энергии торможения. КЭУ гибридных автомобилей отличаются по типу в зависимости от схемы передачи энергии на ведущую ось, имеют разные характеристики электропривода и системы хранения электрической энергии. Рассматриваемые особенности влияют на *эффективность* использования гибридных автомобилей, включающую снижение затрат на осуществление перевозочного процесса энергоэффективность и экологическую безопасность (ГОСТ Р 58554-2019 Показатели энергоэффективности и экологии автотранспортных средств).

Имеющаяся теория расчета и теория технической эксплуатации автомобилей не учитывает широкий спектр особенностей и свойств гибридных

автомобилей и влияние на них условий эксплуатации. Это затрудняет решение практических задач по повышению экологической безопасности и ресурсосбережения автомобильного транспорта при использовании гибридных автомобилей, предусмотренных в п. 2 и 7 Транспортной стратегии РФ, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 года № 3363-р.

Таким образом, решение проблемы дальнейшего развития методологии оценки и обеспечения эффективности гибридных автомобилей в заданных условиях эксплуатации является актуальным. Необходимо установить закономерности влияния конструктивных особенностей КЭУ, ее основных характеристик, свойств рекуперативного торможения на топливную экономичность гибридного автомобиля в заданных условиях движения. Ввиду разности климатических зон в России и возможной чувствительности химических источников энергии к низкой температуре требуется оценить приспособленность гибридных автомобилей к холодным условиям эксплуатации. Для априорной оценки эффективности эксплуатации гибридных автомобилей требуется разработать метод теоретического расчета расхода органического топлива, учитывающий условия движения и позволяющий определить критерии оценки, связывающие снижение затрат на выполнение транспортной работы, энергоэффективность и экологическую безопасность. Также требуется рассмотреть вопросы обеспечения эффективности и повышения надежности гибридных автомобилей в различных климатических условиях, поддержания их работоспособности в условиях существующей инфраструктуры обслуживания.

Указанные вопросы требуют: установления факторов, влияющих на топливную экономичность различных типов гибридных автомобилей; разработки физических и расчетных моделей КЭУ, проведения серии экспериментальных стендовых и дорожных испытаний на экспериментальных образцах и серийных автомобилях; разработки методов прогнозирования топливной экономичности гибридных автомобилей с разными типами КЭУ; выработки критериев оценки и обеспечения эффективности гибридных автомобилей и установления границ экономической эффективности их эксплуатации; разработки технических решений и рекомендаций по приспособлению гибридных автомобилей к заданным условиям эксплуатации.

Отмеченные вопросы не могут быть решены без привлечения комплекса научных подходов и формируют цель, задачи, предмет и объект диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследований. В работе проанализированы труды 48 отечественных и зарубежных ученых. Вклад каждого из них подробно рассмотрен в диссертации. Фундаментальная теория оценки эксплуатационных свойств автомобилей изложена д.т.н., проф.

В.А. Иларионовым, теория технической эксплуатации автомобилей – в работах д.т.н., проф. Е.С. Кузнецова. Наиболее близкие работы, где рассмотрены вопросы топливной экономичности и экологической безопасности гибридных автомобилей опубликованы д.т.н., проф. Н.В. Гулия, д.т.н., проф. О.Н. Дидманидзе, д.т.н., проф. С.А. Ивановым, а также к.т.н., К.М. Сидоровым и к.т.н., В.К. Азаровым.

Научные разработки, представленные в трудах ученых, послужили базой для проведения исследований, направленных на расширение теории и практики оценки и обеспечения эффективности применения гибридных автомобилей.

Целью исследования является разработка методологии комплексной оценки и обеспечения эффективности эксплуатации гибридных автомобилей учитывающей условия их применения и связывающей экономические, экологические критерии, тип и характеристики комбинированной энергоустановки.

Цель достигается решением следующих **задач**:

- определение факторов и установление влияния рекуперативного торможения на эффективность эксплуатации гибридных автомобилей;
- установление закономерностей влияния условий эксплуатации на топливную экономичность, экологические свойства гибридных автомобилей и изменения технического состояния КЭУ;
- разработка расчетного метода априорной теоретической оценки топливной экономичности гибридных автомобилей с различными типами КЭУ в заданных условиях эксплуатации;
- разработка метода комплексной оценки и обеспечения эффективности эксплуатации гибридных автомобилей, включающего критерии энергоэффективности и экологической безопасности, обоснование границ экономической целесообразности и методику определения снижения экономических издержек при эксплуатации;
- разработка технических решений и мероприятий, направленных на обеспечение эффективности и повышение надежности гибридных автомобилей в эксплуатации.

Объектом исследования является эксплуатация гибридных автомобилей.

Предмет исследования – комплекс взаимосвязанных методов и методик, позволяющий производить оценку и обеспечивать эффективность эксплуатации гибридных автомобилей.

Рабочая гипотеза: предлагаемая методология на основе установленных закономерностей влияния условий эксплуатации на топливную экономичность, экологические свойства, изменение технического состояния

комбинированной энергоустановки, установления критериев энергоэффективности и обоснования границ экономической целесообразности позволит обеспечить эффективную эксплуатацию гибридных автомобилей.

Научная новизна исследования:

1. Установлены закономерности влияния рекуперативного торможения на эффективность эксплуатации гибридных автомобилей;

2. Выявлены зависимости влияния условий эксплуатации на топливную экономичность, экологические свойства гибридных автомобилей и изменение технического состояния КЭУ;

3. Разработан расчетный метод априорной теоретической оценки топливной экономичности гибридных автомобилей, учитывающий тип и характеристики КЭУ при заданных циклах движения и потери в цепочках передачи энергии;

4. Предложен метод комплексной оценки и обеспечения эффективности эксплуатации гибридных автомобилей, включающий критерии энергоэффективности и экологической безопасности, обоснование границ экономической целесообразности и методику определения снижения экономических издержек при эксплуатации;

5. Разработаны технические решения и мероприятия, направленные на обеспечение эффективности и повышение надежности гибридных автомобилей в эксплуатации.

Теоретическая значимость работы заключается в: установлении влияния рекуперативного торможения на эффективность гибридных автомобилей, включая разработанные методики определения и влияющие факторы; установлении влияния условий эксплуатации на топливную экономичность и экологические свойства гибридных автомобилей, а также закономерности изменения технического состояния КЭУ при эксплуатации; разработке метода априорной теоретической оценки топливной экономичности гибридных автомобилей с различными типами энергоустановок при разных циклах движения; разработке метода комплексной оценки и обеспечения эффективности эксплуатации гибридных автомобилей, включающего критерии энергоэффективности и экологической безопасности, обоснование границ экономической целесообразности и методику определения снижения экономических издержек при эксплуатации.

Практическая значимость работы заключается в: обосновании границ эффективной эксплуатации гибридных автомобилей с разными типами КЭУ в зависимости от годового пробега и периода эксплуатации, получении результатов оценки эффективности гибридных автомобилей разных категорий на основании разработанных критериев; разработке технических решений и мероприятий, направленные на улучшение эффективности и надежности гибридных автомобилей при эксплуатации.

Практическая значимость подтверждается применением результатов в российских предприятиях, осуществляющих разработку и производство электротранспорта, организациях эксплуатирующих гибридные автомобили, обеспечивающих техническую и информационную поддержку при эксплуатации гибридных автомобилей, а также в образовательном процессе при подготовке специалистов автотранспортного комплекса. Результаты работы нашли применение при реализации государственных программ поддержки, производства и использования экологически чистого транспорта.

Методология и методы исследования базируется на общеизвестных аналитических и прикладных методах системного анализа, в частности: наблюдении, измерении, анализе, экспериментировании, обобщении и прогнозировании. При разработке метода прогнозирования топливной экономичности гибридных автомобилей использованы элементы математического анализа, логики и обобщение. При определении закономерностей влияния рекуперации, типа КЭУ, характеристик ее компонентов на эксплуатационные свойства гибридных автомобилей – теоретическое экспериментирование. Значительная часть исследований связана с натурным моделированием и экспериментированием на стендах, опытных образцах и серийных гибридных автомобилях в лабораторных и дорожных условиях.

Положения, выносимые на защиту

1. Установленное снижение выбросов загрязняющих веществ и расхода топлива за счет рекуперативного торможения гибридных автомобилей;
2. Выявленные зависимости влияния условий эксплуатации на топливную экономичность, экологические свойства гибридных автомобилей и изменение технического состояния КЭУ;
3. Разработанный расчетный метод априорной теоретической оценки топливной экономичности гибридных автомобилей, учитывающий тип и характеристики КЭУ при заданных циклах движения и потери в цепочках передачи энергии;
4. Разработанный метод комплексной оценки и обеспечения эффективности эксплуатации гибридных автомобилей, включающий критерии энергоэффективности и экологической безопасности, обоснование границ экономической целесообразности и методику определения снижения экономических издержек при эксплуатации;
5. Разработанные технические решения и мероприятия, направленные на обеспечение эффективности и повышение надежности гибридных автомобилей в эксплуатации.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования обеспечивается применением известных общенаучных методов,

использованием сертифицированных средств измерения, применением алгоритмов проверки и верификации, экспериментальным подтверждением полученных результатов и сопоставлением их с другими общеизвестными достижениями.

Апробация работы. *Основные положения работы обсуждались на:* 8–17-й Международных научно-технических конференциях «Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте» (Вологда, ВоГУ, 2013–2023 гг.); Международной научно-практической конференции «Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования» (Воронеж, ВГЛТА, 2014 г.); 12–16-й Международных конференциях «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» (Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2016–2024 гг.); Международной научно-технической конференции «Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса» (Москва, МАДИ, 2019 и 2025 гг.); 82-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции (Москва, МАДИ, 2024 г.); Всероссийской научно-технической конференции по автоматическому управлению и регулированию тепло-энергетических установок. Заседания № 95–100 (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020–2024 г.); Международной конференции «2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications» (Москва, МАДИ, 2021 г.); Международной конференции «Транспортная доступность Арктики: Сети и системы» (Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2021, 2024 г.); Международной научно-практической конференции АВТОНЕТ «Перспективные транспортные технологии» (Екатеринбург, 2023, 2024 г.).

Личный вклад автора. Автором определена концепция исследования, сформулированы цель и задачи, разработано и изготовлено экспериментальное оборудование, проведены исследования, на основе которых установлены теоретические зависимости, разработаны и внедрены расчетные и экспериментальные методы и методики комплексной оценки и обеспечения эффективности эксплуатации гибридных автомобилей, определены критерии оценки, обоснованы границы экономической целесообразности их эксплуатации, а также предложены технические решения и мероприятия, направленные на повышение надежности и эффективности гибридных автомобилей в эксплуатации.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта, а именно: п. 6. «Обеспечение экологической и дорожной безопасности автотранспортного комплекса; совершенствование методов автодорожной и экологической

экспертизы, методов экологического мониторинга автотранспортных потоков» и п. 22 «Методы ресурсосбережения в автотранспортном комплексе».

Публикации Основные результаты диссертационного исследования изложены в 150 работах общим объемом 104 п.л. (авторских – 83 п.л.), в том числе 20 работ – в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, 12 работ – в Международных индексируемых базах Scopus и Web of Science Core Collection. Издано 2 монографии, получено 2 патента на полезную модель, 1 свидетельство о регистрации программ ЭВМ и баз данных.

Структура и объем диссертации. Работа содержит 422 страницы текста, включая: введение, основную часть из пяти глав, заключение, список литературы из 265 наименований и 90 страниц приложений. Основная часть включает 101 иллюстрацию и 38 таблиц.

Во введении сформулирована проблема исследования, ее обоснованность, актуальность предпосылки к проведению, цель и задачи. Аргументируется научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе обоснован выбор объекта исследования и его рассматриваемые эксплуатационные свойства. Приводится хронология изменения эксплуатационных свойств автомобилей на протяжении истории их развития и состояние автомобильного транспорта в России и в других странах мира. Представлены критерии оценки влияния гибридных автомобилей на окружающую среду в России и мире в целом. Определены закономерности в развитии энергетических установок автомобилей. На основе комплексного подхода к системе «автомобиль – водитель – среда» приводится анализ влияния ключевых факторов на формирование эксплуатационных свойств автомобилей, по результатам которого определены наиболее значимые из них.

Во второй главе изложены новые разработанные методики оценки топливной экономичности по параметрам рабочих процессов движения гибридного автомобиля.

Приведены методы оценки влияния рекуперативного торможения на эффективность гибридных автомобилей, включая методики определения и влияющие факторы.

Изложены методы и методики оценки эффективности гибридных автомобилей в лабораторных условиях и при проведении натурных испытаний на реальных гибридных серийных и экспериментальных автомобилях.

Приведены результаты оценки влияния времени поездки и температуры окружающей среды на топливную экономичность гибридных автомобилей, включая сравнение с бензиновым аналогом.

Представлены результаты оценки надежности КЭУ гибридных автомобилей с анализом причин возникновения отказов и неисправностей.

В третьей главе приводятся основные положения расчетного метода априорной оценки расхода органического топлива гибридных автомобилей с заданным типом комбинированной энергоустановки (последовательная, параллельная, последовательно-параллельная), характеристик основных ее компонентов, а также заданного цикла движения. Приведен порядок верификации метода. Представлены результаты прогнозирования расхода топлива гибридного автомобиля категории M_1 при движении по циклу испытаний транспортных средств малой грузоподъемности (ВЦИМГ) по ГОСТ Р 59890-2021.

В четвертой главе изложена комплексная оценка эффективности эксплуатации гибридных автомобилей, включающая методику сравнительной оценки экономических издержек при их эксплуатации, которая устанавливает взаимосвязь между первоначальной и остаточной стоимостью, затратами на топливо и экономической выгодой от эксплуатации.

Представлены результаты оценки эффективности эксплуатации гибридных автомобилей категории M_1 , M_2 , M_3 и N_1 с различными типами КЭУ в заданных условиях эксплуатации.

Определены границы устанавливающие целесообразность использования гибридных автомобилей в зависимости от среднего годового пробега и продолжительности эксплуатации. Рассчитана возможная экономическая эффективность для автотранспортных предприятий при использовании гибридных автомобилей.

Предложены критерии, позволяющие обосновать экологическую безопасность и энергоэффективность гибридных автомобилей на основе ГОСТ Р 58554-2019, а также на основе удельных показателей.

В пятой главе предложены технические решения и мероприятия по обеспечению эффективности эксплуатации гибридных автомобилей и повышению их надежности. Даны предложения по стимулированию производства и эксплуатации более эффективных гибридных автомобилей.

В заключении приводятся основные результаты выполненного научного исследования.

В приложениях представлены справочные материалы, результаты расчетов, протоколы проведения испытаний, графики с результатами расчетов параметров движения гибридного автомобиля и комбинированной энергоустановки, таблицы с результатами наблюдений за расходом топлива в процессе эксплуатации, характеристики применяемых экспериментальных образцов и стендов, акты внедрения, дипломы, свидетельства и патенты на программу для ЭВМ и полезную модель, свидетельства о регистрации средств измерения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Установленное снижение выбросов загрязняющих веществ и расхода топлива за счет рекуперативного торможения гибридных автомобилей.

В работе установлен ряд теоретических зависимостей, связывающих свойства рекуперативного торможения, характеристики энергоустановки гибридных автомобилей и их топливную экономичность.

1.1. Влияние начальной скорости движения гибридного автомобиля и замедления при торможении на рекуперацию.

К эксплуатационным факторам относятся: начальная скорость движения; количество циклов разгонов-торможений на пройденный путь; замедление при торможении.

Замедление при рекуперативном торможении ограничено мощностью системы электропривода. В соответствии со стандартным испытательным ездовым циклом ВЦИМГ оно не превышает $0,8 \text{ м/с}^2$. В условиях эксплуатации рабочее торможение может происходить с замедлением до $2,5 \text{ м/с}^2$.

Таким образом, границы области, где в большей степени должно быть реализовано рекуперативное торможение для гибридных автомобилей должны иметь интервал скорости от 5 до 76 км/ч и замедлением до $2,5 \text{ м/с}^2$.

Конструктивными факторами, ограничивающим возврат кинетической энергии торможения, является масса автомобиля, мощность системы электропривода и емкость бортового источника энергии.

Для установления связи между конструктивными параметрами и эксплуатационными свойствами использованы зависимости мощностного расчета автомобиля. Известно, что при торможении мощность силы инерции автомобиля уравнивается мощностью сил сопротивления качению и воздушного потока. В рассматриваемых границах начальной скорости торможения доля мощности силы сопротивления воздушного потока не превышает 10%, поэтому ею можно пренебречь. Сложение оставшихся сил сопротивления качению и инерции позволяет получить максимальную мощность энергии рекуперативного торможения

$$N_{PT MAX} = \frac{v_i m (a_i k_M - g f_K)}{3600}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где v_i – скорость автомобиля ($5 \div 76 \text{ км/ч}$), m – масса автомобиля (кг); a_i – замедление (м/с^2); k_M – коэффициент учета вращающихся масс; g – ускорение свободного падения (м/с^2), f_K – коэффициент сопротивления качению колес.

Эта зависимость позволяет проводить аналитические исследования при оценке возможности рекуперации и вводить ограничения при расчете расхода топлива ДВС гибридных автомобилей.

В таблице 1 приведены результаты расчета мощности торможения гибридного автомобиля заданной массой 1350 кг в зависимости от параметров торможения.

Таблица 1 – Влияние начальной скорости торможения и замедления на мощность в системе электропривода

Замедление, м/с ²		Мощность в системе электропривода при заданном замедлении, кВт									
		0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
Начальная скорость торможения, км/ч	20	0,2	1,6	3,0	4,2	5,3	6,3	7,2	7,9	8,6	9,1
	40	0,2	3,1	6,0	8,8	11,5	14,1	16,5	18,9	21,1	23,2
	60	0,2	3,8	8,4	12,8	17,0	21,2	25,3	29,2	33,0	36,7
	80	0,2	3,9	9,7	15,7	21,6	27,4	33,0	38,6	44,0	49,3

Исходя из приведенной таблицы, с учетом принятого по стандартному циклу ГОСТ Р 59890-2021 замедлению и указанной массы гибридного автомобиля для реализации рекуперативного торможения мощность системы электропривода должна составлять не менее 14 кВт. Формула 1 позволяет вычислить N_{PT} для гибридных автомобилей любой массы и заданной начальной скорости.

1.2. Влияние энергии движения гибридного автомобиля на рекуперацию при торможении.

Начальная энергия движения гибридного автомобиля также влияет на характеристики рекуперативного торможения. На основании теории расчета автомобиля энергию торможения в отдельно взятом интервале времени (t_i) можно представить уравнением:

$$W_{\text{Ki}} = v_i \cdot m \cdot a_i \cdot k_{\text{M}} \cdot t_i. \quad (2)$$

Из этой зависимости следует, что масса и скорость движения гибридного автомобиля линейно влияют на мощность рекуперативного торможения и при расчетах могут учитываться пропорционально коэффициентами. Для городского режима эксплуатации удельная величина мощности рекуперативного торможения исходя из соотношения N_{PT} / m и полученных в таблице 1 результатов составила $N_{\text{PT}}^{\text{уд}} = 9,7$ кВт/т.

1.3. Влияние характеристик тягового электропривода КЭУ на рекуперативное торможение.

Т.к. составные части электропривода КЭУ имеют ограничения по силе тока и напряжению эффективность рекуперации при интенсивных торможениях снижается, что требует введения ограничений при проведении расчетов.

Также, если исходить из обратного, и зафиксировать $N_{РТ}$ на постоянном уровне можно рассчитать время и замедление при торможении с использованием рекуперации.

На рисунке 1 приведена диаграмма торможения для гибридного автомобиля массой 1350 кг при фиксированной начальной скорости 50 км/ч и трех ограничениях $N_{РТ}$: 5, 10 и 15 кВт. В предыдущем пункте установлено, что при таком диапазоне мощностей эффективность возврата энергии наиболее высокая.

Штриховыми линиями показаны кривые замедления, сплошными линиями – графики изменения скорости. Торможение при скорости менее 10 км/ч осуществляется механической тормозной системой.

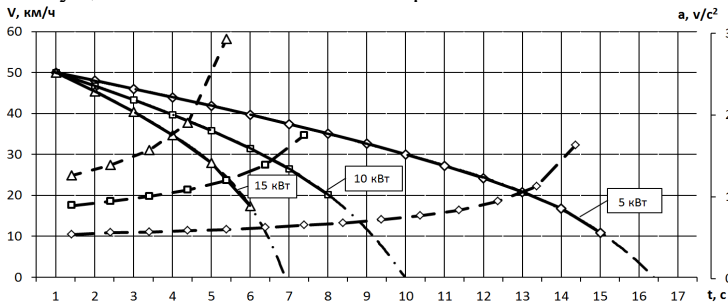


Рисунок 1 – Диаграмма рекуперативного торможения с фиксированной мощностью системы электропривода

Диаграмма показывает взаимосвязь между замедлением, временем торможения, начальной скоростью торможения при фиксированной мощности системы электропривода.

Обобщенные результаты показывают, что наиболее полный возврат энергии в КЭУ гибридных автомобилей категории M_1 и N_1 эксплуатируемых в городском режиме движения обеспечивается системой электропривода мощностью не менее 14 кВт, для автобусов категории M_2 – 35 кВт, для автобусов категории M_3 – 100 кВт соответственно. При меньшей мощности системы тягового электропривода и накопления энергии эффективность возврата энергии снижается.

Установленные зависимости и результаты исследований позволяют оценивать характеристики рекуперативного торможения и учитывать их при прогнозировании топливной экономичности гибридных автомобилей.

1.4. Методика теоретической оценки влияния рекуперативного торможения на экономичность и экологическую безопасность гибридных автомобилей.

Представленная методика основана на принципах мощностного расчета автомобиля и энергетического анализа потоков энергии в КЭУ.

В основе настоящего исследования лежит теоретическая имитация движения гибридного автомобиля по заданному циклу, в котором задано время (t) и изменение скорости при движении $v(t)$. Мощностной расчет и энергетический баланс позволяют получить изменение мощности на ведущих колесах (N_T) при движении, предварительно оценить среднюю мощности ДВС ($N_{ДВС}$) и определить мощность в цепи накопителя электрической энергии $N_{НЭ}(t)$, которая в каждый интервал времени (i) равна:

$$N_{НЭi}(t) = (N_{НЭi-1} + N_{ДВСi} - N_{Ti}) \cdot \eta_{п}, \quad (3)$$

где $\eta_{п}$ – коэффициент полезного действия привода.

При этом значение $N_{НЭ}$ может быть как положительным, так и отрицательным. При положительном значении накопитель электрической энергии заряжается, при отрицательном – разряжается.

На автомобилях с традиционной энергоустановкой в составе ДВС движение осуществляется только за счет его полезной работы. На автомобилях с КЭУ запас энергии в накопителе $W_{НЭ}$ позволяет начинать движение с выключенным ДВС. После окончания запаса энергии в накопителе или запросе водителя на высокий крутящий момент ДВС включается в работу. Условия начала движения гибридного автомобиля с выключенным ДВС определено следующими зависимостями:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } W_{НЭi} > W_{НЭ MIN} \\ \text{если } 0 < N_{Ti} < N_{НЭ MAX} \end{array} \right\} \quad (4)$$

Режим работы ДВС без рекуперации ($N_{ДВС}$) и с рекуперацией ($N_{ДВС P}$) позволяет судить о снижении расхода органического топлива и выбросов загрязняющих веществ от гибридного автомобиля. Для вычисления расхода топлива используется заданное значение $q_{уд}$ (г/кВт·ч) и рассчитанная мощность двигателя $N_{ДВС}$. Для учета изменения удельного расхода топлива использован поправочный коэффициент rvk_1 , приведенный в ГОСТ Р 56162-2014.

С учетом поправочного коэффициента rvk_1 расход топлива гибридного автомобиля Q_T в каждый конкретный момент времени i и выбросы загрязняющих веществ M_i вычислялись по формулам:

$$Q_{Ti} = q_{уд} \cdot N_{ДВСi} \cdot rvk_1, \quad (5)$$

$$M_{ji} = Q_{Ti} \cdot M_j, \quad (6)$$

где $q_{уд}$ – удельный расход топлива бензинового двигателя, M_j – масса загрязняющих веществ, образующихся при сгорании бензина, j – загрязняющее вещество.

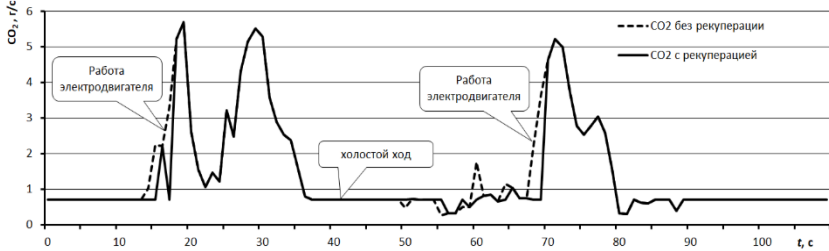


Рисунок 2 – График, характеризующий выбросы CO₂ автомобиля с рекуперацией и без (начальный участок цикла ВЦИМГ (ГОСТ Р 59890-2021))

Для объективности расчетов начальная энергия в накопителе ($W_{НЭ \text{ нач.}}$) равна энергии в накопителе в конце цикла испытания ($W_{НЭ \text{ кон.}}$):

$$W_{НЭ \text{ нач.}} = W_{НЭ \text{ кон.}} \quad (7)$$

Благодаря использованию накопленной при рекуперации энергии в первые несколько секунд начала движения автомобиля ДВС не задействован, а разгон осуществляется за счет электродвигателя, использующего возвращенную энергию. Следовательно, в этот период не расходуется топливо и не выбрасываются загрязняющие вещества.

Результаты оценки, приведенные на рисунке 2 показывают, что возврат энергии торможения на гибридном автомобиле, эксплуатируемом в условиях городского движения, снижает расход топлива и выбросы загрязняющих веществ на 6,5%. Для подтверждения результатов исследования были дополнительно проведены эксперименты на автомобиле с КЭУ смешанного типа, по результатам которых было установлено, что при циклах с торможениями с 40 км/ч возврат энергии снижает расход топлива на 8 %. А при отключении ДВС по время снятия нагрузки при таких же условиях расход топлива снижается на 16%.

Выбросы CO₂ автомобиля категории М₁ в год составляют:

$$M_{CO_2}^{Год} = \frac{M_{ср} \cdot L_{ср}^{Год}}{10^6} = \frac{277 \cdot 18\,000}{10^6} = 5,0 \text{ т} \quad (8)$$

где $M_{ср}$ – среднее значение удельного выброса CO₂ (согласно расчетному методу «НИИАТ» принято 3,12 кг/кг бензина или 277 г/км при среднем расходе топлива 12 л/100км); $L_{ср}^{Год}$ – среднегодовой пробег автомобиля (тыс. км).

Снижение расхода бензина за счет повторного использования энергии торможения одним автомобилем категории М₁ составляет 170 литров в год

или снижение выбросов CO_2 на 0,4 т. В масштабах всего автопарка России использование рекуперации в автомобилях категории M_1 может снизить выбросы CO_2 на 9 млн. т в год (принято, что 50% из 45 млн. автомобилей эксплуатируется в городском цикле). Потребление топлива автопарком снизится на 3,8 млн т, стоимость которого в ценах 2025 года составит 230 млрд руб.

2. Выявлены зависимости влияния условий эксплуатации на топливную экономичность, экологические свойства гибридных автомобилей и изменение технического состояния КЭУ.

2.1. Стендовые испытания КЭУ.

Разработка и апробация методик оценки топливной экономичности КЭУ в заданных режимах работы проводилась, в том числе и в лабораторных условиях.

Для этого был разработан и сконструирован экспериментальный стенд, имитирующий движение гибридного автомобиля с КЭУ нескольких типов: последовательная, параллельная и последовательно-параллельная.

С помощью экспериментального стенда (рисунок 3) проведена оценка свойств эффективности рекуперации, что позволяет уточнить ее влияние на расход топлива гибридных автомобилей.

Накопителем электрической энергии в экспериментальном стенде является АКБ состоящая из сверхвысокоемких конденсаторов емкостью 0,7 Фарада. Т.к. используется АКБ состоящая из конденсаторов, накопленная в ней электрическая энергия определяется по формуле 9, отдаваемая или получаемая равна разности энергий в конце W_1 и начале W_2 заряда-разряда (формула 10).

$$W = \frac{C/n \cdot (U/n)^2}{2000}, \text{ кДж}, \quad (9)$$

где n – число конденсаторов в АКБ соединенных последовательно.

$$W = W_1 - W_2, \text{ кДж}. \quad (10)$$

Эффективность рекуперации является наиболее важным ее свойством. В источниках литературы указывается коэффициент эффективности рекуперации, однако его понятие и методика определения и в нашей стране

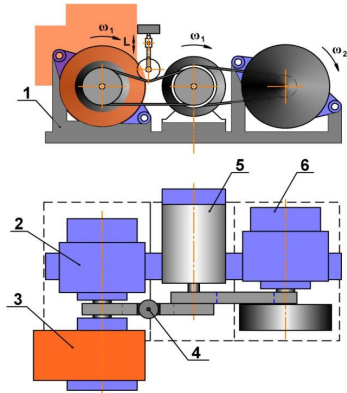


Рисунок 3 – Схема привода испытательного стенда, где 1 – рама; 2 – генераторная установка; 3 – ДВС; 4 – ролик с регулируемым натяжением; 5 – тяговый асинхронный электродвигатель; 6 – узел нагрузки

и за рубежом применительно к гибридным автомобилям пока однозначно не описана. В связи с этим предложено интерпретировать понятие эффективности рекуперации двумя подходами:

1-й подход. Коэффициентом K_{P1} , который характеризует эффективность тягового электропривода, включая накопитель энергии и позволяет оценивать влияние рекуперации на расход топлива. Он учитывает потери при преобразовании механической энергии в электрическую в электроприводе при торможении, КПД накопителя и потери в электроприводе при преобразовании электрической энергии в механическую при использовании рекуперированной энергии повторно. Количество отданной при разгоне W_P и возвращенной при торможении W_T энергии определялось с помощью формул 9 и 10.

Полученный коэффициент эффективности рекуперации в данном случае:

$$K_{P1} = \frac{W_T}{W_P} = \frac{794}{3281} = 0,24. \quad (11)$$

Т.е. из всей потраченной на разгон энергии обратно в накопитель возвращено 24%. В системах накопления с химическими источниками постоянного тока эффективность рекуперации может быть ниже (6-24%).

2-й подход. Коэффициент K_{P2} , который характеризует эффективность рекуперации как отношение количества энергии W_T возвращенной в АКБ при торможении с заданной начальной частоты вращения привода n до полной остановки, к кинетической энергии движущегося с такой же частотой n привода (в случае гибридного автомобиля – кинетической энергии движения).

Энергия привода (гибридного автомобиля) определяется как произведение массы на частоту вращения (с учетом вращающихся масс, при необходимости) или вычислена по затратам электрической энергии в цепи электропривода (W_P) с учетом собственных потерь в энергоустановке (W_{Π}). При стендовых испытаниях использован последний способ. С помощью датчиков в инверторе определялись затраты энергии на разгон привода с заданной массой и на холостом ходу без нагрузки.

$$W_K = W_P - W_{\Pi}. \quad (12)$$

Эффективность рекуперации энергии торможения для второго подхода:

$$K_{P2} = \frac{W_T}{W_P - W_{\Pi}} = \frac{794}{3281 - 1061} = 0,36. \quad (13)$$

Т.е. в АКБ вернулось 36% кинетической энергии движущегося с заданной частотой вращения привода.

2.2. Исследования топливной экономичности гибридных автомобилей в дорожных условиях.

Полученные теоретические результаты прошли апробацию при определении оптимальных параметров электропривода КЭУ гибридного автобуса в рамках НИР «Научно-техническое обоснование энергетического баланса в системе генератор – накопитель энергии – двигатель гибридного привода на основе исследований ездового цикла троллейбуса» по заказу ОАО «Транс-Альфа».

Результаты исследований были использованы при создании опытного образца автобуса с КЭУ последовательного типа и конденсаторным высоковольтным накопителем энергии (фото на рисунке 4). Результаты испытаний подтвердили теоретические расчеты топливной экономичности и показали направления совершенствования КЭУ в определении режимов работы ДВС и емкости накопителя энергии.

Полученный задел реализован при разработке КЭУ последовательного типа для городского автомобиля, которая была изготовлена и прошла дорожные испытания в автомобиле ВАЗ-1118 (рисунки 5–6).



Рисунок 4 – Опытный образец автобуса с КЭУ «Транс-Альфа» на испытаниях, г. Вологда

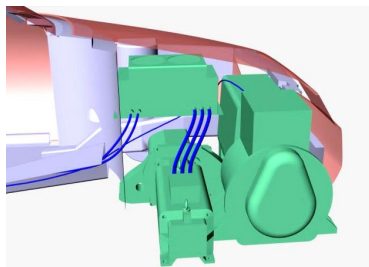
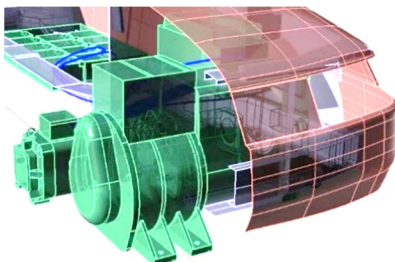


Рисунок 5 – 3D Модель компоновки основных элементов автомобиля с экспериментальной КЭУ

Испытания экспериментального гибридного автомобиля проведены в режиме эксплуатации, в том числе приближенном к низкоскоростной части испытательного цикла ВЦИМГ (ГОСТ Р 59890-2021). В экспериментах записывался расход топлива, скоростные и динамические свойства. Расход топлива измеряли электронным расходомером EURO-SENS PN100 объемного типа, зарегистрированного в Российском реестре средств измерения. Передача данных о скорости движения и расходе топлива осуществлялась телеметрической системой мониторинга транспортных средств Omnicomm с терминалом передачи телеметрических данных о транспортном средстве Galileosky 7.0 российского производства.



Рисунок 6 – Подкапотное пространство автомобиля на базе ВАЗ-1118 с экспериментальной КЭУ

По результатам проведенных испытаний можно отметить:

- средний расход топлива при испытаниях составил 5,5 л/100 км, что на 35 % меньше чем у ВАЗ-1118 с ДВС в таких же условиях;
- максимальная мощность ДВС 10 л.с. позволяет сохранять баланс потребления и выработки энергии при движении в городском режиме со средней скоростью до 42 км/ч, что соответствует результатам мощностного и энергетического расчета;
- динамические свойства автомобиля ВАЗ-1118 с КЭУ, не смотря на малую мощность ДВС, не ухудшились и позволяют ускоряться без изменения передаточного числа трансмиссии в городском режиме движения;
- емкость системы накопителя энергии позволяет двигаться с выключенным ДВС до 500 метров.

Стабилизация скоростного и нагрузочного режима позволяет ДВС комбинированной энергоустановки работать с минимальным удельным расходом топлива. Система накопления энергии компенсирует недостаток мощности при пиковых нагрузках.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность предварительных расчетов и использовались для проверки достоверности полученных закономерностей.

2.3. Оценка влияния рекуперативного торможения на топливную экономичность и экологические свойства гибридных автомобилей в дорожных условиях.

Оценка выполнена методом сравнения при испытаниях гибридного автомобиля в дорожных условиях. Вначале совершался заезд с циклом разгонов и торможений с включенной, а затем на этом же гибридном автомобиле с выключенной системой рекуперации. Таким образом, при одинаковых условиях движения определялось влияние рекуперации торможения на топливную экономичность, выбросы CO_2 и мелкодисперсной пыли.

Торможения производились с начальной скорости 40 км/ч с максимальным замедлением 2 м/с² до полной остановки.

При проведении испытаний проводилась запись параметров работы ДВС, характеризующих расход топлива и выбросов CO_2 . Выбросы мелкодисперсных частиц пыли от износа тормозных колодок определялись путем взвешивания их до и после каждого испытания.

Результаты обработки протоколов испытаний показали, что возврат энергии при торможении в накопитель и повторное ее использование снижает расход топлива ДВС на 16%. Снижение выбросов CO_2 (ΔM_{CO_2}) автомобилем категории M_1 и N_1 со среднегодовым пробегом $L_{\text{CP}} = 17500$ км (средний пробег в России) и средним расходом топлива $Q_s = 10$ л/100 км в год составит

$$\Delta M_{\text{CO}_2} = \frac{C_{\text{уд}} \cdot L_{\text{CP}} \cdot Q_s \cdot \Delta Q \cdot j_{\text{ГОР}}}{100\,000 \cdot \rho_{\text{T}}} = 0,55 \text{ т}, \quad (14)$$

где $C_{\text{уд}}$ – удельные выбросы CO_2 при сгорании топлива (согласно методике по инвентаризации выбросов «НИИАТ» 3,12 кг/кг); ΔQ – коэффициент снижения расхода топлива на основании проведенных замеров – 0,16; $j_{\text{ГОР}}$ – доля пробега в городских условиях (принята $\frac{1}{2}$ от общего пробега); ρ_{T} – плотность бензина.

Полученные значения сопоставимы с результатами теоретических расчетов, приведенных в разделе 1 основного содержания работы автореферата.

Выбросы мелкодисперсных частиц пыли от износа накладок тормозных колодок определялся путем их взвешивания до и после каждого цикла испытаний. При использовании рекуперации износ снизился в 3 раза, как следствие, выбросы мелкодисперсных частиц пыли также снизятся втрое. Материал накладок тормозных колодок при этом не оказывает влияние на результат, т.к. критерий сравнения относительный, а испытания проводились в одинаковых условиях.

2.4. Результаты оценки влияния климатических условий, времени поездки на топливную экономичность гибридных автомобилей.

Оценка производилась путем наблюдения за эксплуатацией гибридного автомобиля категории М₁ со смешанной схемой КЭУ и автомобиля с ДВС в течение 7 лет. Запись расхода топлива производилась на основе данных АЗС. На рисунке 7 показано изменение расхода топлива по сезонам года.

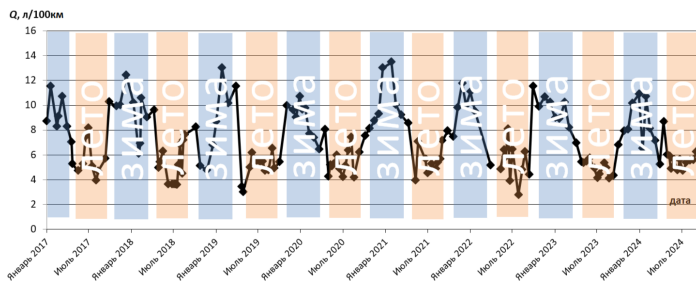


Рисунок 7 – Изменение расхода топлива гибридного автомобиля в условиях эксплуатации за 7 лет наблюдений

Средняя годовая температура при испытаниях составляла +4 °С и изменялась в диапазоне от -32 до +33 °С. Средний годовой пробег автомобиля составлял 15 тыс. км, среднее время поездки 25 минут, режим эксплуатации – смешанный.

Мощность ДВС энергоустановок сравниваемых бензинового и гибридного автомобилей, водитель, условия эксплуатации, климатические условия были одинаковыми, соответственно их влияние можно исключить, что в такой длительный период ранее не проводилось. Это позволило оценить эксплуатационные свойства гибридного автомобиля не отдельно, а в системе Автомобиль-Водитель-Среда. Записи расхода топлива автомобилей за семилетний период наложены на один график и сгруппированы по месяцам года (рисунок 8).

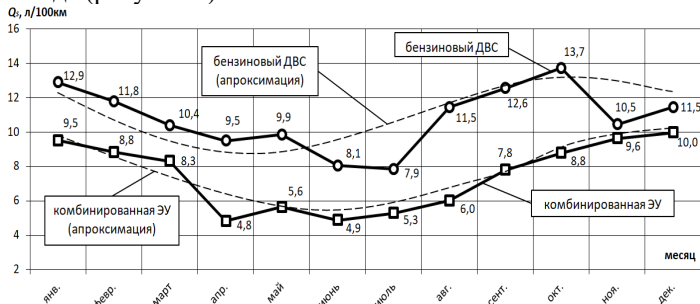


Рисунок 8 – График изменения среднего расхода топлива автомобилей с ДВС и КЭУ по месяцам года за 7 лет наблюдений

Согласно результатам наблюдений средний расход топлива автомобилем с бензиновым ДВС составил 10,5 л/100 км, это эквивалентно выбросам 245 г/км CO_2 . Гибридный автомобиль расходовал в среднем 6,38 л/100 км или 152 г/км выбросов CO_2 , что на 38 % меньше. Каждые 10 тыс. км гибридный автомобиль расходовал на 400 литров топлива меньше, чем автомобиль с ДВС.

2.5. Оценка надежности КЭУ гибридных автомобилей.

В период с 2007 по 2024 годы были проведены наблюдения за надежностью 55 гибридных автомобилей разных марок эксплуатируемых в Москве, Санкт-Петербурге, Ярославле, Вологде и др. городах. По полученным данным построены графики вероятностей отказов и неисправностей по отдельным моделям и элементам КЭУ наблюдаемых автомобилей.

Оценка надежности показала, что КЭУ гибридных автомобилей имеет ресурс с вероятной средней наработкой безотказной работы $\gamma = 90\%$ в 200 тыс. км и меньшие на 50% затраты на поддержание работоспособности ДВС, трансмиссии и тормозной системы. Автомобили с КЭУ имеют меньше отказов при эксплуатации в холодном климате. В тоже время ДВС КЭУ гибридного автомобиля склонен к образованию низкотемпературных нагаров, что связано с частыми его отключениями и неполными прогревами. Восстановление работоспособности КЭУ гибридных автомобилей, осложнено недостаточным количеством станций обслуживания со специалистами, имеющими необходимую квалификацию.

3. Расчетный метод априорной теоретической оценки топливной экономичности гибридных автомобилей, учитывающий тип и характеристики КЭУ при заданных циклах движения и потери в цепочках передачи энергии.

Метод разработан на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований проведенных в работе и служит для прогнозирования топливной экономичности гибридных автомобилей с разными типами и характеристиками энергоустановок в различных циклах движения до начала их практической эксплуатации. В основе метода лежат методики мощностного и энергетического расчетов. При энергетическом расчёте КЭУ гибридного автомобиля представляется как система связей – «цепочек передачи энергии» от ДВС на ведущие колеса. В зависимости от выбранной типовой схемы КЭУ, характеристик накопителя энергии, электропривода определяются потери при передаче энергии и расход топлива.

3.1. Расчет КЭУ последовательной схемы.

В последовательной схеме энергия от ДВС передается на ведущие колеса только электрическим путем. Это упрощает механическую трансмис-

сию, но увеличивает потери на двойное преобразование энергии. ДВС в такой схеме работает в квазистационарном режиме, обеспечивающем минимальный удельный расход топлива.

Расчет мощностного баланса после обработки данных показывает долю мощности, приходящуюся на тяговый накопитель энергии (ТНЭ), рекуперацию и прямую передачу на тяговый электродвигатель (рисунок 9).



Рисунок 9 – Результаты расчета мощностного баланса при движении по низкоскоростному участку цикла ВЦИМГ

Уравнение передачи энергии в КЭУ имеет вид

$$N_{\text{ДВС}} = \frac{N_{\text{ср.пол}}}{K \cdot \eta_{\text{п}}} - N_{\text{т.ср}} \cdot \eta_{\text{р}} = \frac{N_{\text{пр.ср}} + N_{\text{нэ.ср}}}{K \cdot \eta_{\text{п}}} - N_{\text{т.ср}} \cdot \eta_{\text{р}}, \quad (15)$$

где $N_{\text{ДВС}}$ – мощность ДВС, кВт; $N_{\text{пр.ср}}$, $N_{\text{нэ.ср}}$, $N_{\text{ср.пол}}$ – мощность, передаваемая по каждой из цепочек привода, кВт; K – коэффициент запаса ДВС по мощности; $\eta_{\text{п}}$, $\eta_{\text{р}}$ – КПД электропривода и рекуперации.

Средняя мощность в цепочке электропривода ($N_{\text{пр.ср}}$) определяется разницей:

$$N_{\text{пр.ср}} = N_{\text{ср.пол}} - N_{\text{нэ.ср}}. \quad (16)$$

С учетом КПД всех элементов цепочки электропривода мощность рассчитывается по формуле:

$$N_1 = \frac{N_{\text{ср}} - N_{\text{нэ.ср}}}{K \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{ин}} \cdot \eta_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{тр}}}, \quad (17)$$

где $\eta_{\text{г}}$ – КПД электрогенератора; $\eta_{\text{ин}}$ – КПД инвертора; $\eta_{\text{э}}$ – КПД тягового электродвигателя; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии.

Мощность, проходящая через тяговый накопитель энергии ТНЭ, с учетом КПД всех элементов цепочки равна:

$$N_2 = \frac{N_{\text{нэ.ср}}}{K \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{ТНЭ}} \cdot \eta_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{тр}}}. \quad (18)$$

С учетом того, что часть энергии на испытуемом участке возвращается в ТНЭ при рекуперативном торможении и расходуется повторно для движения, дважды проходя по цепочке электропривода.

Цепочка потерь при рекуперации определяется как среднее значение мощности торможений за испытание ($N_{\text{Т.СР}}$) с учетом потерь в элементах тягового привода.

$$N_3 = N_{\text{Т.СР}} \cdot \eta_{\text{Р}} \cdot \eta_{\text{ТР}}^2 \cdot \eta_{\text{Э(Г)}}^2 \cdot \eta_{\text{ПР}}^2 \cdot \eta_{\text{ТНЭ}} \cdot \eta_{\text{Э}}, \quad (19)$$

где $\eta_{\text{Р}}$ – КПД рекуперации (определяется на основании методик исследований указанных в разделах 2.8-2.10 диссертации).

Суммирование мощности передаваемой по всем цепочкам определяет мощность, развиваемую ДВС за испытание

$$N_{\text{ДВС}} = N_1 + N_2 - N_3. \quad (20)$$

3.2. Расчет КЭУ параллельной схемы.

Большая часть энергии КЭУ в параллельной схеме передается через механическую передачу. Мощность этой цепочки с учетом потерь в механической цепочке, условно обозначенная как N_1 , определяется выражением

$$N_1 = \frac{N_{\text{СР.ПОЛ}}}{K \cdot \eta_{\text{ТР}}}, \quad (21)$$

где $\eta_{\text{ТР}}$ – КПД трансмиссии; K – коэффициент загрузки ДВС по мощности.

Все значения выше $N_{\text{СР.ПОЛ}}$ (рисунок 9) будут относиться к цепочке ТНЭ. Отсюда следует

$$N_{\text{ТНЭ.СР}} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - N_{\text{СР.ПОЛ}})}{n} \quad (22)$$

(Σ если $N_i - N_{\text{СР.ПОЛ}} > 0$),

где n – количество значений, удовлетворяющих условию $N_i > 0$ (ДВС включен).

С учетом потерь в электрической цепочке КЭУ, условно обозначенная как N_2 , мощность определяется выражением

$$N_2 = \frac{N_{\text{ТНЭ.СР}}}{K \cdot \eta_{\text{Г}} \cdot 2\eta_{\text{ИН}} \cdot \eta_{\text{ТНЭ}} \cdot \eta_{\text{М}} \cdot \eta_{\text{ТР}}}. \quad (23)$$

Мощность в цепочке рекуперации энергии N_3 определяется по формуле 19.

Суммирование мощности передаваемой по всем цепочкам определяет мощность, развиваемую ДВС за испытание по формуле 20.

3.3. Расчет КЭУ последовательно-параллельной (смешанной) схемы.

КЭУ смешанного типа имеет две электрические машины (М/Г1 и М/Г2), инверторы управления ими (Ин.1, Ин.2), механическое устройство

смешения мощности (УСМ), тяговый накопитель электрической энергии (ТНЭ) и ДВС.

Энергия ДВС в смешанной схеме КЭУ разделяется на 2 цепочки: механическую и электрическую в заданном конструкцией соотношении. Исходя из этого соотношения устанавливается коэффициент $K_э$, с учетом которого также рассчитываются цепочки передачи энергии.

$$N_1 = K_э (N_{\text{ср.пол.и}} - N_{\text{нэ.ср}}), \quad (24)$$

$$N_2 = K_э N_{\text{нэ.ср}}, \quad (25)$$

$$N_3 = (1 - K_э) \cdot (N_{\text{т.и}} - N_{\text{нэ.ср}}), \quad (26)$$

$$N_4 = N_{\text{т.ср}} \cdot \eta_p \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{мг2}} \cdot \eta_{\text{ин.}} \cdot \eta_{\text{тнэ}}, \quad (27)$$

Суммирование мощности передаваемой по всем цепочкам за вычетом мощности рекуперации определяет мощность, развиваемую ДВС

$$N_{\text{двс}} = N_1 + N_2 + N_3 - N_4. \quad (28)$$

3.4. Расчет расхода топлива для всех схем КЭУ.

Расход топлива для всех схем КЭУ определяется из полученной мощности и удельного эффективного расхода топлива двигателя (g_e), который определен заводскими характеристиками ДВС, расчетами или результатами испытаний.

$$Q_T = N_{\text{двс}} \cdot g_e. \quad (29)$$

3.5. Достоверность результатов расчета.

Предусмотрены алгоритмы калибровки и верификации расчетного метода, указанные в разделе 3.3 диссертации. Проверка и апробация метода производилась путем сравнения полученных расчетных данных с результатами эксплуатационных испытаний и данных заводов-изготовителей. Заложенная погрешность расчетов – не более 5%.

3.6. Ограничения и допущения. Не предусматривается подзарядка ТНЭ гибридного автомобиля от внешней электросети. КПД элементов электропривода КЭУ принимается условно постоянным. В расчете не учитываются прогрев ДВС и салона автомобиля.

Выполнен расчет параметров автомобилей массой 1500 кг с КЭУ 3-х типов, а также для сравнения автомобиля с бензиновым ДВС. В качестве оцениваемого участка использован стандартный испытательный ездовой цикл ВЦИМГ, состоящий из 4-х участков. Результаты расчета параметров движения для низкоскоростного и среднескоростного участков цикла ВЦИМГ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета расхода топлива, выбросов CO_2 , а также основных параметров ЭУ в зависимости от цикла движения

Показатель*	Низкоскоростной участок				Среднескоростной участок			
	Тип энергоустановки**							
	Комбинированная ЭУ			ДВС	Комбинированная ЭУ			ДВС
	посл.	паралл.	смеш.		посл.	паралл.	смеш.	
$N_{\text{ДВС}}$, кВт	5,24	10,4	5,34	27,1	11,96	16,9	11,7	36,9
$N_{\text{эл.ДВ}}$, кВт	17,6	16,4	16,6	–	24	20,4	20,5	–
$W_{\text{НЭ}}$, кДж	528	361	461	–	678	374	515	–
Q_s , л/100 км	5,1	5,4	4,9	9,91	5,3	5,41	5,0	8,93
CO_2 , г/км	120	127	115	232	125	127	117	209

* $N_{\text{ДВС}}$ – средняя мощность ДВС; $W_{\text{НЭ}}$ – максимальная запасаемая энергия в ТНЭ; $N_{\text{эл.дв.}}$ – средняя мощность электропривода; Q_s – приведенный расход топлива; CO_2 – удельные выбросы CO_2 .

** посл. – комбинированная ЭУ последовательного типа; паралл. – комбинированная ЭУ параллельного типа; смеш. – комбинированная ЭУ смешанного типа.

На графике (рисунок 10) приведены результаты расчета выбросов CO_2 автомобилей с различными типами энергоустановок.

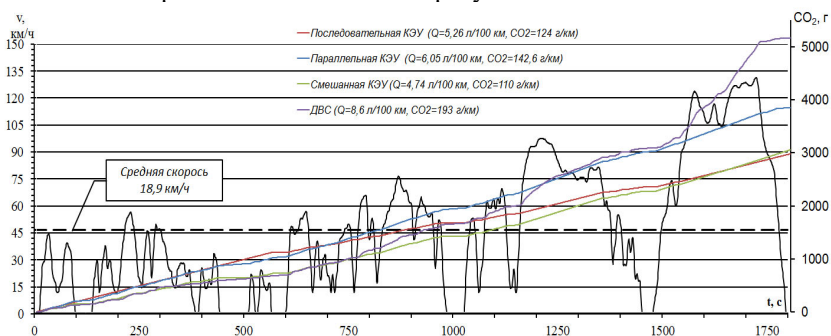


Рисунок 10 – Совмещенный график цикла движения ВЦИМГ (ГОСТ Р 59890-2021), результатов расчета расхода топлива и выбросов CO_2 автомобилей с различными типами КЭУ и ДВС

Расчеты показывают, что автомобиль с КЭУ при движении по низкоскоростному и среднескоростному участку цикла (ГОСТ Р 59890-2021)

имеет расход топлива меньше на 30–40 %, чем аналогичный с бензиновым ДВС. При этом выбросы CO_2 составляют 110–120 г/км (у автомобиля с ДВС – 230 г CO_2 /км).

Алгоритмы расчетного метода заложены в программу для априорного расчета расхода топлива гибридными автомобилями КЭУ-АВТО.

4. Разработанный метод комплексной оценки и обеспечения эффективности эксплуатации гибридных автомобилей, включающий критерии энергоэффективности и экологической безопасности, обоснование границ экономической целесообразности и методику определения снижения экономических издержек при эксплуатации.

4.1. Методика оценки снижения издержек за счет использования гибридных автомобилей с учетом их стоимости и затрат на топливо.

Используется метод сравнения и расчета. Сравнение представлено для автомобилей с бензиновым ДВС и гибридного автомобиля с КЭУ смешанного типа. Основная искомая величина – стоимость 1 км пробега (руб./км). Учитываются: цена нового автомобиля; предполагаемое число лет эксплуатации; расход топлива; средний годовой пробег. Затраты на техническое обслуживание, текущий ремонт и страхование не учитываются.

Показатель снижения экономических издержек при эксплуатации гибридного автомобиля по сравнению с бензиновым аналогом при « n » лет эксплуатации:

$$\Pi_{\Gamma A} = \frac{(\Pi_A e^{-0,11n}) + 0,01L_{\Gamma}\Pi_{\Gamma}Q_{100} - (K_{\Gamma}\Pi_A e^{-0,11n}) - 0,01K_{\Gamma}L_{\Gamma}\Pi_{\Gamma}Q_{100}}{L_{\Gamma}}, \frac{\text{руб}}{\text{км}}, \quad (30)$$

где Π_A – цена нового автомобиля с бензиновым ДВС (руб.); n – число лет эксплуатации; Q_{100} – приведенный расход топлива автомобиля с бензиновым ДВС (л/100км); L_{Γ} – годовой пробег автомобиля (км); Π_{Γ} – цена одного литра топлива, руб.; K_{Γ} – коэффициент повышения цены гибридного автомобиля по сравнению с аналогом, имеющим ДВС; K_{Γ} – коэффициент, снижения расхода топлива гибридным автомобилем по сравнению с аналогом, имеющим ДВС.

4.2 Обоснование границ эффективности эксплуатации гибридных автомобилей с разными типами КЭУ в зависимости от годового пробега и периода эксплуатации.

На основании комплекса разработанных методик и методов, образующих единую методологию, спрогнозирована эффективность эксплуатации гибридных автомобилей в руб./км. Исходными данными служат: стоимость базового и гибридного автомобилей, среднегодовой пробег, цикл движения автомобилей, их масса и другие технические характеристики. Расход топлива при движении по заданному циклу определяется в программе КЭУ-

АВТО (глава 3 работы), оценка снижения издержек при эксплуатации гибридных автомобилей вычисляется по методике, описанной в главе. 4.1 диссертации.

Определены границы экономической эффективности от эксплуатации гибридных автомобилей категорий M_1 , M_2 , M_3 , N_1 при движении по испытательному циклу ВЦИМГ (ГОСТ Р 59890-2021).

Эксплуатация автомобилей категории M_1 с КЭУ смешанного типа, работающих в таксомоторном предприятии, при ежегодном пробеге 50 тыс. км эффективна после первого года эксплуатации, с КЭУ (48 Вольт) параллельного типа – с третьего года эксплуатации при пробеге 150 тыс. км.

Эксплуатация гибридных автобусов с КЭУ последовательного типа, работающих в качестве маршрутных транспортных средств в автотранспортном предприятий, при ежегодном пробеге 50 тыс. км становится эффективной через 4 года или 200 тыс. км пробега.

Эксплуатация автомобилей категории N_1 с КЭУ параллельного типа при ежегодном пробеге 40 тыс. км становится эффективной с третьего года эксплуатации или после 120 тыс. км.

4.3. Критерии оценки энергоэффективности и экологической безопасности гибридных автомобилей.

4.3.1. Энергоэффективность и экологическую безопасность гибридных автомобилей категории M_1 и N_1 предлагается оценивать на основе показателей указанных в ГОСТ Р 58554-2019. На рисунке 11 классы энергоэффективности отображены на графике с указанием положения автомобилей, оснащенных ДВС и КЭУ. Прогнозирование топливной экономичности и выбросов CO_2 выполнено с помощью метода, реализованного в программе КЭУ-АВТО (глава 3 работы).

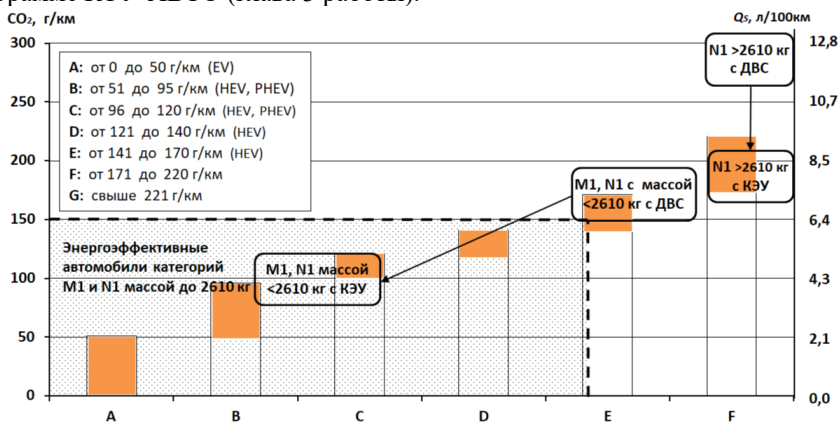


Рисунок 11 – Энергоэффективность гибридных автомобилей категории M_1 и N_1 в соответствии с ГОСТ Р 58554-2019

В соответствии с рекомендациями, утвержденными Распоряжением Министерства транспорта РФ от 14 марта 2008 г. № АМ-23-р с дополнениями 2009–2024 года, выпускаемые в России автомобили категории M_1 и N_1 , имеющие в качестве единственного источника энергии ДВС, не могут обеспечить выбросы CO_2 меньше 150 г/км (6,4 л/100 км). Исходя из этого гибридные автомобили, имеющие выбросы CO_2 меньше 150 г/км, соответствующие классам энергоэффективности А–Е, можно относить к энергоэффективным. Гибридные автомобили категории M_1 и N_1 массой более 2610 кг (в соответствии с ТР ТС 018/2011 и Правилами ЕЭК ООН № 49) не могут соответствовать этим критериям. Рекомендуется относить такие автомобили к энергоэффективным, если они имеют выбросы CO_2 по ГОСТ Р 59890-2021 менее 221 г/км (класс энергоэффективности – F).

4.3.2. Обоснование эффективности гибридных автомобилей на основе удельных показателей.

Оценку эффективности гибридных автомобилей массой более 2610 кг целесообразно проводить по удельным показателям на ед. мощности, как это рекомендовано Правилами ЕЭК ООН № 49. Мощность при испытании определяется теоретическими зависимостями мощностного расчета. Расход топлива гибридного автомобиля при движении по заданному циклу определяется по программе КЭУ-АВТО (глава 3 работы). Полученное значение удельного расхода топлива на ед. мощности гибридного автомобиля (g_e) при движении по заданному циклу характеризует эффективность его энергоустановки.

Второй удельный показатель – энергетический КПД ($\eta_э$). В отличие от механического КПД учитывает эффективность работы не только энергоустановки, но и всего гибридного автомобиля. Энергетический КПД определяется отношением полезной работы, совершаемой гибридным автомобилем ($W_{пол}$) к общим затратам энергии ($W_{общ}$) за весь цикл испытаний. Данный критерий также учитывает эффективность КЭУ в составе автомобиля.

В таблице 3 приведены результаты прогнозирования удельных показателей автомобилей категорий M_2 , M_3 , N_1 с разными типами энергоустановок при движении по испытательному циклу ВЦИМГ (ГОСТ Р 59890-2021).

Таблица 3 – Результаты прогнозирования эффективности автомобилей с разными типами энергоустановок по удельным показателям

Тип ЭУ	Масса авто- мобиля, кг*	Q_s , л/100км	g_e , г/(кВт·ч)	η_e , %
Категория М ₂ (Автобус ГАЗель Next)				
КЭУ посл.	3500	12,3	274	22,3
КЭУ паралл.		12,6	282	21,6
КЭУ смеш.		10,6	236	25,9
ДВС		17,1	382	16,0
Категория М ₃ (ЛИА3-4292)				
КЭУ посл.	11000	33,9	273	23,1
КЭУ паралл.		32,8	264	23,8
КЭУ смеш.		29,5	237	26,5
ДВС		45,5	366	17,2
Категория N ₁ (ГАЗель Next)				
КЭУ посл.	3000	11,2	235	30
КЭУ паралл.		10,8	226	31
КЭУ смеш.		9,2	192	35,7
ДВС		14,4	301	23,4

* при загрузке 50 % от максимальной.

Результаты расчета показывают, что автомобили с КЭУ имеют удельный расход топлива ниже 280 г/(кВт·ч). Аналогичный существующий автомобиль с ДВС имеет удельный расход топлива более 300 г/(кВт·ч). Таким образом, исходя из полученных результатов оценки, можно характеризовать автомобили с КЭУ эффективными, если они имеют удельный расход топлива ниже 280 г/(кВт·ч). Исходя из результатов оценки рекомендуется относить гибридные автомобили категорий М₂, М₃, N₁ к эффективным, если их энергетический КПД при испытании по заданному циклу превышает 22 %. Согласно таблице 4 по этому критерию оценки не все гибридные автомобили можно отнести к эффективным, что также говорит о необходимости обоснования их применения в заданных условиях эксплуатации.

5. Разработанные технические решения и мероприятия, направленные на обеспечение эффективности и повышение надежности гибридных автомобилей в эксплуатации.

5.1. Рекуператор тепловой энергии отработавших газов.

Как было определено выше надежность ДВС комбинированной энергоустановки снижается из-за образования низкотемпературных нагаров. Для повышения надежности КЭУ в условиях частых запусков ДВС разработан управляемый рекуператор, который, используя часть тепловой энергии отработавших газов, ускоряет прогрев двигателя (Патенты №120923 и №127690). Рекуператор является управляемым газожидкостным теплообменником, в котором изменяется расход отработавших газов через теплообменную камеру за счет открытия или закрытия заслонки.

В результате испытаний на автомобиле категории М₁ установлено, что при температуре отработавших газов 350 °С (через 2 минуты после запуска холодного ДВС) тепловая мощность, передаваемая в циркуляционный контур системы охлаждения, составляет 1,15 кВт, а после прогрева ДВС во время движения возрастает до 7,4 кВт.

В течение 5 лет испытаний на гибридных автомобилях с установленным рекуператором в условиях холодного климата и частых поездках на расстоянии менее 10 км к 250 тыс. км пробега повышенного расхода масла ДВС из-за низкотемпературного нагара не наблюдалось, в отличие от гибридных автомобилей без рекуператора. В дополнении к этому благодаря ускоренному прогреву ДВС и пассажирского салона улучшается топливная экономичность, комфорт и безопасность пассажиров.

5.2. Рекомендации и мероприятия по повышению надежности гибридных автомобилей при эксплуатации.

В целях формирования компетенций у технических специалистов в существующей инфраструктуре ТО и ремонта автомобилей для оперативного устранения неисправностей и отказов ДВС и высоковольтной части электрооборудования гибридных автомобилей разработано учебное пособие «Гибридные автомобили», 2016 г., авторы А.А. Капустин, В.А. Раков, дополненное УМО ВУЗов по автомобильным специальностям.

Разработаны и внедрены методики оценки технического состояния КЭУ гибридных автомобилей. Методики изложены в работе «Эксплуатация и обслуживание автомобилей с гибридными силовыми установками», автор В.А. Ракова, 2014 г.

Для контроля расхода топлива, упрощения поиска неисправностей и проверки технического состояния КЭУ в эксплуатации разработаны алгоритмы сбора и систематизации данных с заданными критериями по параметрам встроенной системы самодиагностирования, которые используются в мобильном приложении Motor Data OBD, (Акт внедрения от

15.06.2021, АО «Легион-Автодата», г. Москва). Число пользователей мобильного приложения более 5 млн чел.

5.3. Рекомендации по использованию результатов работы в государственных программах.

Опираясь на результаты исследования, в настоящей работе даны предложения по корректировке государственных программ и рекомендаций, направленных на стимулирование эксплуатации более эффективных гибридных автомобилей, в числе которых механизмы экономического стимулирования, учитывающие их экологические свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложен комплекс методов оценки, научно-технических решений, критериев оценки, рекомендаций, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение эффективности автомобильного транспорта страны за счет использования гибридных автомобилей при одновременном сокращении экономических издержек, а именно:

1. Установлены взаимосвязи между рекуперативным торможением и эффективностью гибридных автомобилей, произведено теоретическое обоснование влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на эффективность рекуперативного торможения. Для гибридного автомобиля категорий M_1 и N_1 достаточная мощность системы электропривода при рекуперации торможения составляет 15 кВт. При использовании рекуперативного торможения расход топлива одним автомобилем снижается на 16%, что уменьшает выбросы CO_2 одним автомобилем в год на 0,4 т. В масштабах всего автопарка России использование рекуперации в автомобилях категории M_1 и N_1 может снизить выбросы CO_2 на 9 млн. т. в год. Потребление топлива автопарком снизится на 3,8 млн т, стоимость которого в ценах 2025 года составит 230 млрд руб.

На основании лабораторных исследований и дорожных испытаний уточнено понятие «коэффициент возврата энергии при рекуперации (K_p)», характеризующий эффективность рекуперативного торможения в отношении влияния его на расход топлива автомобиля и дополняющий понятие «эффективность рекуперации торможения», применяемое в настоящее время для стендовых испытаний электрических машин, локомотивов и железнодорожного транспорта.

2. Определено влияние условий эксплуатации на топливную экономичность и экологические свойства гибридных автомобилей. Эксплуатация гибридных автомобилей неэффективна при средних дистанциях поездки менее 5 км (продолжительности поездок с момента запуска ДВС менее 15 минут) и температуре ниже - 15 °С. Выбросы мелкодисперсных частиц пыли от износа накладок тормозных колодок в городском цикле

движения за счет использования рекуперации снижаются в 3 раза. Установлены основные причины отказов элементов КЭУ при эксплуатации и вероятность их проявления.

3. Разработан метод, позволяющий произвести теоретическое прогнозирование топливной экономичности гибридного автомобиля в зависимости от типа КЭУ (последовательная, параллельная или последовательно-параллельная), характеристик тягового электропривода, емкости тягового накопителя энергии, а также заданного цикла движения.

Получены результаты оценки топливной экономичности гибридных автомобилей категорий M_1, M_2, M_3, N_1 . Автомобиль с КЭУ последовательной, параллельной и смешанной типовых схем имеет расход топлива ниже на 42, 25 и 41% соответственно, чем аналог с бензиновым ДВС. Результаты оценки для автомобилей категории M_2 и M_3 при использовании КЭУ последовательного типа при движении по циклу WHTC испытания автомобилей (Правила ЕЭК ООН № 49) показали снижение расхода топлива на 28 и 25 %. Для автомобилей категории N_1 при движении по испытательному циклу ВЦИМГ (ГОСТ Р 59890-2021) – на 22 %. На низко- и среднескоростной части испытательного цикла ВЦИМГ разница в топливной экономичности с ДВС возрастает до 50 %.

При имитации движения с минимальным изменением скорости (загородный цикл) разница в топливной экономичности с ДВС составляет 15 % только у гибридного автомобиля с КЭУ последовательно-параллельной типовой схемы. У других типов КЭУ в таком режиме улучшение топливной экономичности отсутствует.

За 7-летний период наблюдений в условиях эксплуатации серийных гибридных автомобилей снижение расхода топлива составило 38 % по сравнению с аналогичными автомобилями с бензиновым ДВС в одинаковых условиях эксплуатации. Это соответствует результатам теоретических расчетов, результатам лабораторных испытаний и подтверждает адекватность разработанного метода прогнозирования расхода топлива. Вероятность отказов КЭУ у гибридных автомобилей, затраты на обслуживание и ремонт в указанный период были ниже на 50%.

4. Разработан метод комплексной оценки и обеспечения эффективности эксплуатации гибридных автомобилей, включающий критерии энергоэффективности и экологической безопасности, обоснование границ экономической целесообразности и методику определения снижения экономических издержек при эксплуатации.

С помощью разработанного метода комплексной оценки установлены границы эффективности эксплуатации гибридных автомобилей категории M_1, M_2, M_3 и N_1 с различными типами КЭУ в заданных условиях эксплуа-

тации. Гибридные автомобили при коммерческой эксплуатации в городских условиях становятся более эффективными, чем традиционные с ДВС через 1–4 года, в зависимости от категории и среднегодового пробега. Минимальный среднегодовой пробег, при котором эксплуатация целесообразна, составляет 15 тыс. км.

5. Предложены технические решения и рекомендации, направленные на обеспечение эффективности эксплуатации гибридных автомобилей и повышения их надежности. В частности, разработанный управляемый рекуператор тепловой энергии отработавших газов оригинальной конструкции, позволяет улучшить топливную экономичность и надежность КЭУ гибридных автомобилей при частых запусках ДВС в холодных климатических условиях.

Разработанные алгоритмы сбора, систематизации и анализа эксплуатационных свойств гибридных автомобилей внедрены в диагностические программные алгоритмы компании АО «Легион-Автодата» при совершенствовании мобильного приложения Motor Data OBD.

Результаты работы использованы в учебной литературе, образовательных курсах и реализуются при подготовке специалистов автотранспортного комплекса.

Изложенные новые научно обоснованные технические решения нашли применение при реализации государственной программы «Комплексный план мероприятий поддержки производства и использования экологически чистого транспорта» в РФ (Письмо Минэнерго от 6.02.2014).

При расширении доли гибридных автомобилей в общем автопарке страны до 26 % (14 млн. ед.) (как запланировано в Транспортной Стратегии РФ) снижение потребления топлива составит 11,9 млн т. в год (20 %), затраты на топливо уменьшатся на 907 млрд руб. в год, а выбросы CO₂ на 36,9 млн т.

Таким образом, предложенный комплекс методов, методик и критериев, реализованный в виде единой методологии разработанный на основе установленных закономерностей влияния условий эксплуатации на топливную экономичность, экологические свойства, изменения технического состояния комбинированной энергоустановки, установления критериев энергоэффективности и обоснования границ экономической целесообразности подтверждает принятую гипотезу об обеспечении эффективности эксплуатации гибридных автомобилей, что предусмотрено п. 2 и 7 Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ***В изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ***

1. Раков, В. А. Исследование автопарка гибридных автомобилей / В. А. Раков // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 1(31). – С. 18–23.
2. Раков, В. А. Определение мощности, потребляемой транспортным средством при неустановившихся режимах работы ДВС / В. А. Раков, И. К. Александров // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 5. – С. 9–11.
3. Раков, В. А. Исследование эксплуатационной надежности гибридных силовых установок автомобилей / В. А. Раков // Автотранспортное предприятие. – 2013. – № 4. – С. 44–49.
4. Раков, В. А. Развитие парка гибридных автомобилей / В. А. Раков // Мир транспорта. – 2013. – № 1(45). – С. 52–59.
5. Раков, В. А. Математическое моделирование рекуператоров тепловой энергии системы охлаждения ДВС / В. А. Раков // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 11. – С. 7–9.
6. Раков, В. А. Уменьшение времени прогрева двигателей и отопления салона транспортного средства за счет использования теплоты отработавших газов / В. А. Раков, А. Ю. Сальников // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 5(41). – С. 36–43.
7. Раков, В. А. Особенности налогообложения автомобилей с гибридными силовыми установками / В. А. Раков // Автотранспортное предприятие. – 2016. – № 2. – С. 54–56.
8. Раков, В. А. Оценка расхода топлива автомобиля при диагностировании по косвенным признакам / В. А. Раков // Автотранспортное предприятие. – 2016. – № 4. – С. 51–54.
9. Капустин, А. А. Альтернативная эффективность гибридных автомобилей / В. А. Раков, А. А. Капустин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2017. – № 2. – С. 68–72.
10. Раков, В. А. Сравнение выбросов загрязняющих веществ от автомобилей и различных энергетических установок / В. А. Раков, А. А. Капустин // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 6(60). – С. 53–60.
11. Капустин, А. А. Экологическая безопасность электромобилей с точки зрения выбросов CO₂. / В. А. Раков, А. А. Капустин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2018. – № 4. – С. 178–182.
12. Раков, В. А. Исследование характеристик рекуперативного торможения автотранспортных средств / В. А. Раков // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2020. – Т. 19. – № 5. – С. 220–224.

13. Раков, В. А. Влияние рекуперации энергии торможения на выбросы твердых частиц от автотранспорта / В. А. Раков // Мир транспорта и технологических машин. – 2020. – 4(71). – С. 61–69.

14. Раков, В. А. Анализ приспособленности трансмиссии автомобиля к характеристике топливной экономичности двигателя / В. А. Раков, Н. Н. Трушин // Мир транспорта и технологических машин. – 2022. – 1(76). – С. 95–102.

15. Раков, В. А. Закономерности и перспективы совершенствования энергоустановок автомобилей / В. А. Раков, Н. Н. Трушин, А. А. Капустин // Транспорт на альтернативном топливе. – 2022. – № 2(86). – С. 64–70.

16. Раков, В. А. Методика оценки влияния емкости накопителя энергии комбинированной энергоустановки автомобиля на его топливную экономичность / В. А. Раков // Грузовик. – 2022. – № 11. – С. 8–13.

17. Раков, В. А. Комбинированная система привода с активным сцепом для автомобилей повышенной проходимости / В. А. Раков // Грузовик. – 2022. – № 9. – С. 6–10.

18. Раков, В. А. Определение 30-минутной мощности комбинированной энергоустановки гибридных автомобилей / В. А. Раков // Транспорт на альтернативном топливе. – 2024. – № 1(97). – С. 69–76.

19. Раков, В. А. Прогнозирование условий эффективной эксплуатации гибридных автомобилей / В. А. Раков // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 2-1(85). – С. 99–105.

20. Раков, В. А. Оценка экологической безопасности и энергоэффективности гибридных автомобилей // В. А. Раков // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – №1(80). – С. 63–71.

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

21. Kapustin, A. Methodology to Evaluate the Impact of Hybrid Cars Engine Type on their Economic Efficiency and Environmental Safety / A. Kapustin, V. A. Rakov // International Conference on Road Organization and Safety in Big Cities. Amsterdam : Elsevier BV, 2017. – V. 20. – P. 247–253.

22. Kapustin, A. Assessing safety of gas, petrol and electric vehicles / A. Kapustin, V. A. Rakov // Thirteenth International Conf. on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018), 2018. – V. 36. – P. 260-265.

23. Kapustin, A. Results of assessing CO2 emissions from e-vehicles in case of their possible switching to electricity / A. Kapustin, V. A. Rakov // Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018), 2018. – V. 36. – P. 266–273.

24. Sinitsyn, A., Rakov, V., Eperin, A. P., Rundygin, Y. A., Rusinov, R. V., Izmailov, R. A., ... Akhmetova, I. Simulation of Heat Transfer Processes in Cooling Systems with Heat Recovery. Paper presented at the IOP Conference Series / A. Sinitsyn, V. Rakov, A. P. Eperin, Y. A. Rundygin, R. V. Rusinov R. A., Izmailov, ... // Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – 337(1).

25. Rakov, V., Ivanov, V. N., Karpov, Y. G., Melehin, V. F., Izmailov, R. A., Yun, V. K., & Zaripova, D. A. Method for Determining the Basic Energy Characteristics of Elements of a Hybrid Car Engine / V. Rakov, V. N. Ivanov, Y. G. Karpov, V. F. Melehin, R. A. Izmailov, V. K. Yun, & D. A. Zaripova // Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – 337(1).

26. Rakov, V. Determination of the Required Power for Bus Hybrid Engine / V. Rakov, T. Akhmetov, A. Capustin & A. Vostrov // Paper presented at the E3S Web of Conferences. – 2020. – 178.

27. Rakov, V. Assessment of Feasibility of Using the Existing Electric Power Infrastructure for Charging Electric and Hybrid Vehicles / V. Rakov, O. Pikalev, T. Akhmetov, T. Bulavina & P. Smirnov // Paper presented at the E3S Web of Conferences. – 2020. – 178.

28. Rakov, V. Study of Braking Energy Recovery Impact on Cost-efficiency and Environmental Safety of Vehicle. / V. Rakov, A. Kapustin, I. Danilov // Paper presented at the Transportation Research Procedia, 2020. – V. 50. – P. 559–565.

29. Rakov, V. Determination of Optimal Characteristics of Braking Energy Recovery System in Vehicles Operating in Urban Conditions. / V. Rakov // Paper presented at the Transportation Research Procedia, 2020. – V. 50. – P. 566–573.

30. Karelina, M. Y. Methodological Approaches to Estimation of the Braking Energy Recovery Properties / M. Y. Karelina, O. N. Didmanidze, V. A. Rakov // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021, pp. 1–4.

31. Rakov, V. A. Stagnation in the Development of Internal Combustion Engines as a Factor of Transition to More Perfect Power Units / V. A. Rakov, B. S. Subbotin, A. M. Ivanov and A. V. Podgornyy // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021, pp. 1–5.

32. Rakov, V. Modeling of Engine Warm-up with the Use of an Exhaust Gas Recuperator at Low Ambient Temperatures / V. Rakov, O. Pikalev, A. Bogomolov, N. Dymov // Transportation Research Procedia. – 2021. – 57. – pp. 547–552.

***Патенты и программы для ЭВМ,
имеющие государственную регистрацию***

33. Пат 120923 РФ, МПК В60Н 1/18. Экономайзер тепла выпускных газов двигателей внутреннего сгорания / В. А. Раков ; Патентообладатель: Раков В.А. Оpubл. 10.10.2012, – 2 с.

34. Пат 127690 РФ, МПК В60Н1/18. Система автоматического управления экономайзером отработавших газов / В. А. Раков, А. А. Сеницын, В. В. Верхорубов ; Патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный технический университет». Оpubл. 10.05.2013, Бюл. № 13, – 2 с.

35. Раков, В. А. КЭУ-АВТО. Программа для расчета расхода топлива гибридными автомобилями по заданному циклу движения: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023666519, опубл. 1.08.2023 / В. А. Раков.

Монографии

36. Раков, В. А. Эксплуатация и обслуживание автомобилей с гибридными силовыми установками: монография / В. А. Раков. – Вологда : ВоГУ, 2014. – 143 с.

37. Оценка эксплуатационных свойств автомобилей с комбинированными энергетическими установками: монография / В. А. Раков. – Вологда : ВоГУ, 2020. – 240 с.

В сборниках трудов международных научных конференций

38. Раков, В. А. Оценка экономической эффективности гибридных автомобилей / В. А. Раков // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы Международной научно-технической конференции. – Вологда : ВоГУ, 2015. – С. 161–166.

39. Капустин, А. А. Метод оценки выбросов парникового газа CO₂ электромобилями / В. А. Раков, А. А. Капустин // Организации и безопасность дорожного движения в крупных городах: сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2018. – С. 194–200.

40. Раков, В. А. Экспериментальная оценка характеристик рекуперативного торможения / В. А. Раков // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства: технология и надежность машин, приборов и оборудования : материалы XIV Международной научно-технической конференции. – Вологда : ВоГУ, 2020. – С. 413–420.

41. Раков, В. А. Стагнация развития конструкции двигателей внутреннего сгорания и ее влияние на экологичность автотранспортных средств /

В. А. Раков // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте : материалы XV Международной научно-технической конференции – Вологда : ВоГУ, 2021. – С. 290–294.

42. Раков, В. А. Влияние рекуперативного торможения на экономичность и экологическую безопасность автомобилей с накопителем энергии / В. А. Раков // Перспективные транспортные технологии : материалы II Международной научно-практической конференции НТИ «Автонет», Екатеринбург, 10 июля 2023 года. – Москва: Московский политехнический университет, 2023. – С. 10–15.

43. Раков, В. А. Результаты оценки эффективности эксплуатации гибридных автомобилей / В. А. Раков // Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : Сборник научных трудов по материалам 82-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 30 января – 01 2024 года. – Москва: МАДИ, 2024. – С. 70–76.

Компьютерная верстка В. С. Весниной

Подписано к печати 29.05.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 2,2. Тираж 150 экз. Заказ 62.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А