

На правах рукописи



ОБРАЗЦОВ Никита Артемович

**МЕТОД ОЦЕНКИ ПРИМЕНЕНИЯ
ГИБРИДНОГО СИЛОВОГО БЛОКА С ГАЗОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ
НА КОММУНАЛЬНЫХ МАШИНАХ**

Специальность 2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства
и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель:

Грушецкий Станислав Михайлович
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Зорин Владимир Александрович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический Университет
(МАДИ)», кафедра «Производство и ремонт
автомобилей и дорожных машин», профессор;

Раков Вячеслав Александрович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Вологодский государственный
университет» кафедра «Автомобили
и автомобильное хозяйство», доцент.

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I».**

Защита состоится «18» декабря 2025 года в 16:00 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). 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/obrazcov-nikita-artemovich>

Автореферат разослан «20» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Репин С. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из важнейших составляющих промышленности современного государства является машиностроительная отрасль. На сегодняшний день машиностроительная отрасль сталкивается с рядом проблем.

Известны проблемы: плохая экологическая обстановка в крупных городах, вследствие загрязнений от транспортно-технологических средств (ТТС); топливная зависимость ТТС от нефтепродуктов (95% ТТС в России эксплуатируются на бензине, дизельном топливе и сжиженных углеводородных газах); низкая энергоэффективность коммунальных машин, вследствие работы в городском цикле и большого количества простоев на холостом ходу.

Известны точечные решения вышеперечисленных проблем: применение электрических, газомоторных и гибридных ТТС. У каждого из решений есть преимущества и недостатки. Недостатки электрических ТТС заключаются в большой массе аккумуляторной батареи (АКБ) для обеспечения автономной работы грузовой машины в течение длительного времени. Недостатки газомоторных ТТС заключаются в низкой энергоэффективности вследствие неэффективной работы газового двигателя в некоторых режимах работы. Гибридные решения с традиционными дизельными силовыми установками неполноценно решают экологическую проблему.

Известны методики и методы оценки применения электрических, газомоторных и гибридных ТТС. Но, если предложить комплексное решение описанных проблем, сочетающее в себе преимущества каждого отдельно взятого точечного решения – применение гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах, то как оценить целесообразность такого комплексного решения?

Обнаруживается проблема: отсутствие методов оценки комплексного решения по улучшению экологичности, топливной независимости и энергоэффективности ТТС, заключающегося в применении на коммунальных машинах гибридного силового блока с газовым двигателем.

Данная диссертационная работа описывает впервые представленный метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах. В диссертационной работе исследуется гибридный силовой блок с газовым двигателем применительно к ТТС для вывоза твердых коммунальных отходов (далее по тексту – коммунальные машины или КМ).

Степень разработанности проблемы.

В исследовании эксплуатации ТТС с гибридными силовыми установками большой вклад внесли следующие ученые: Червенчук В. Д., Раков В. А., Гусakov С. В., Забудский А. И., Зорин В. А., Карпухин К. Е., Бахмутов С. В., Пенкин А. Л., Савенков Н. В., Сидоров К. М. Также, зарубежные исследования эксплуатации ТТС с гибридными силовыми установками освещены в работах следующих ученых: Pistoia G., Moghadasi S., Zhang B., Mehrdad E., Gianfranco P. и др.

При этом, отсутствие методов, в которых дается оценка применения гибридного силового блока (силовой установки), установленного на грузовой машине в сочетании с газовым ДВС, положено в основу цели данного научного исследования.

Цель исследования: разработать метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах, позволяющий комплексно подойти к решению проблем экологичности, топливной зависимости и энергоэффективности.

Задачи исследования:

1. Обосновать применение газового двигателя в составе гибридного силового блока коммунальных машин.
2. Определить коэффициент, оценивающий возможность применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах.
3. Разработать математическую модель движения коммунальной машины, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем, учитывающую изменяемые во времени параметры машины.
4. Разработать метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах.

Объект исследования: гибридный силовой блок с газовым двигателем на коммунальных машинах.

Предмет исследования: критерии оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах: экологичность, экономичность и энергоэффективность; показатель рекуперации энергии торможения.

Рабочая гипотеза: возможность применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах может быть оценена интегральным показателем – коэффициентом гибридизации, учитывающем локальные критерии: экологичность, экономичность и энергоэффективность.

Научная новизна:

1. Научно обосновано применение газового двигателя, работающего в режиме полной нагрузки, в составе гибридного силового блока коммунальных машин.
2. Определен интегральный коэффициент гибридизации, оценивающий возможность применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах, учитывающий локальные критерии экологичности, экономичности и энергоэффективности.
3. Разработана математическая модель движения коммунальной машины, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем, учитывающая изменяемые во времени параметры машины.
4. Разработан метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах на базе значения коэффициента гибридизации.

Теоретическая значимость работы заключается в создании математической модели движения коммунальной машины, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем, учитывающей изменяемые во времени параметры машины; состоит в установлении формулы расчета коэффициента гибридизации, учитывающего локальные критерии энергоэффективности, экономичности и экологичности и являющегося базовым критерием для оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах.

Практическая значимость работы заключается в использовании разработанного метода оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах для прогнозирования результатов переоборудования коммунальных машин, эксплуатируемых профильными организациями, на гибридный силовой блок с газовым двигателем; в применении разработанных компьютерных и математических моделей в учебном процессе кафедры НТТМ автомобильно-дорожного факультета ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» при изучении дисциплин «Программные системы инженерного анализа» и «Моделирование сложных процессов» по специальностям 15.03.03 «Прикладная механика» и 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства».

Результаты научных исследований используются в профильных организациях: грузовой автосервис по комплексному ремонту коммунальных машин – ООО «Грин-Трак Спб», оператор по вывозу и утилизации твердых коммунальных отходов по Санкт-Петербургу – АО «Автопарк №1 «Спецтранс», грузовой автосервис спецтехники ООО «Большегруз».

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы: п. 1, 3.

Методология исследования основана на применении общенаучных методов анализа и синтеза с использованием статистических и теоретических исследований, методов экспериментальных исследований, а также методов математического и компьютерного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование применения газового двигателя, работающего в режиме полной нагрузки, в составе гибридного силового блока коммунальных машин.
2. Коэффициент гибридизации, оценивающий возможность применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах, учитывающий локальные критерии экологичности, экономичности и энергоэффективности.
3. Математическая модель движения коммунальной машины, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем, учитывающая изменяемые во времени параметры машины.
4. Метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах на базе значения коэффициента гибридизации.

Степень достоверности обоснована применением общенаучных методов анализа и синтеза; использованием современных программных средств для математического и компьютерного моделирования; корреляцией результатов проведенных испытаний с исследованиями известных ученых в области гибридных ТТС.

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования докладывались на: 5-й ВМК «Магистерские слушания» (2020, СПбГАСУ); 75-й и 76-й НПК студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (2022, 2023, СПбГАСУ); 3-м ВНС «Техническое обеспечение доступности арктических регионов» (2023, СПбГАСУ); 81-й МНМ и НИК (2023, МАДИ, Москва); 36-й и 38-й ННТК «Улучшение эксплуатационных показателей и технический сервис автомобилей, тракторов и двигателей» (2023, 2025, СПбГАСУ); 8-й и 9-й МНПК студентов, аспирантов и молодых ученых (2024, 2025, СибАДИ, Омск).

Публикации. Основные положения и научные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах (пять из них – в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, в том числе две без соавторов), получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационного исследования. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и специальных терминов, списка использованных источников и приложений. Материалы диссертации содержат 173 страницы, 50 рисунков, 23 таблицы. Список использованных источников включает 118 наименований.

Во введении приведено обоснование актуальности исследования, поставлена цель и определена совокупность задач, направленных на ее достижение, отражены основные положения, выносимые на защиту, практическая и теоретическая значимость диссертационной работы, раскрыта апробация результатов исследования.

Первая глава посвящена существующим проблемам: плохой экологической обстановке в крупных городах, топливной зависимости автотранспорта, низкой энергоэффективности КМ. Рассмотрены способы решения описанных проблем. Рассмотрены нормативные базы, регламентирующие работу и перевод техники, использующей газомоторное топливо. Рассмотрены существующие решения применения гибридных силовых установок на различных видах ТТС. Проведено сравнение видов применяемых тяговых электродвигателей по показателю удельной мощности. Рассмотрена серия государственных стандартов по применению цифрового моделирования для разработки изделий машиностроения серии ГОСТ Р 57700. Сформулированы выводы и заключения по проведенному исследованию.

Вторая глава содержит обоснование выбора первичного двигателя для гибридного силового блока и порядок определения критериев оценки применения

гибридного силового блока на КМ. В главе описаны границы области исследования и сформулированы критерии оценки гибридизации ТТС. Выведены формулы расчета коэффициентов: энергоэффективности, экономичности, экологичности, показателя рекуперации энергии торможения. Введено понятие коэффициента гибридизации коммунальных машин. Описан метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах.

Третья глава посвящена моделированию работы коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем, содержащей разработанную математическую модель. В главе подробно представлено описание и содержание модели, включая исходную гипотезу, основные допущения, ограничения, структуру модели и инструмент построения.

Четвертая глава содержит результаты эксплуатационных и цифровых испытаний, анализ полученных значений критериев оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах. Представлены исходные данные для моделирования и графическое отображение результатов испытаний. Выполнен анализ полученных данных в соответствии с разработанным методом. Дана оценка адекватности цифровой модели. Для исследуемых 12-ти маршрутов посчитан коэффициент гибридизации и осуществлена его оценка. Выполнен сравнительный расчет экономического и экологического эффектов от переоборудования коммунальной машины на гибридный силовой блок с газовым двигателем.

В заключении приведены научные и практические результаты диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обоснование применения газового двигателя, работающего в режиме полной нагрузки, в составе гибридного силового блока коммунальных машин.

Гибридный силовой блок (гибридная силовая установка) – это система узлов и агрегатов, предназначенная для преобразования химической энергии сжигаемого в ДВС топлива в кинетическую энергию вращения на валу тягового электродвигателя, с возможностью промежуточного накопления электрической энергии в аккумуляторной батарее.

За отправную точку проводимого исследования взято предположение, что гибридный силовой блок с газовым двигателем на КМ позволяет более экономично расходовать топливо, за счет рекуперации энергии торможения и за счет наибольшего КПД газового ДВС при номинальном режиме работы. Также гибридный силовой блок обеспечивает увеличение периода автономной работы машины за счет имеющегося стартового заряда АКБ.

Недостатки существующих дизельных КМ:

- длительная работа машин на холостом ходу (остановки на светофорах, остановки во время загрузки контейнеров);

- существенное количество вредных выбросов отработавших газов;
- неэкономичное движение в городском ездовом цикле (разгон-торможение);
- высокая стоимость дизельного топлива.

Преимущества КМ с установленным гибридным силовым блоком с газовым двигателем:

- отсутствие режимов работы на холостом ходу;
- наименьшее количество выбросов среди всех ДВС;
- рекуперативное торможение;
- низкая стоимость газового топлива.

Определены границы исследования. Общая структура границ исследования представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Границы области исследования

Рассмотрены пять основных режимов работы газового двигателя внутреннего сгорания: режим пуска, режим холостого хода, режим средних (оптимальных) нагрузок, режим максимальных (полных) нагрузок, режим экстремальных нагрузок (разгон, ускорение). При смене нагрузочных режимов газовых ДВС значительно меняется эффективность и целесообразность эксплуатации таких двигателей. Цель исследования – сравнить параметры газового ДВС и традиционных ДВС в зависимости от коэффициента избытка воздуха. коэффициент избытка воз-

духа, коэффициент полезного действия (КПД), удельный расход топлива. Анализируется целесообразность эксплуатации строительной и грузовой техники с газовыми двигателями, применительно к условиям работы такой техники.

Получены результаты:

1. При пуске газового ДВС применяются обедненные смеси ($1,0 \leq \alpha \leq 1,2$) с целью соблюдения требований по токсичности отработавших газов и повышения температуры горения газозвушной смеси. Прогрев до рабочей температуры $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ длится 2–5 минут, в зависимости от начальной температуры, что сопоставимо с дизельным и бензиновым двигателями.

2. В режиме холостого хода газовый двигатель проигрывает дизельному по экономичности, в связи с меньшей степенью сжатия ($\epsilon = 12$ у газового, $\epsilon = 17$ у дизельного) и не таким сильным обеднением топливовоздушной смеси ($\alpha \leq 1,57$ для газового, $\alpha \geq 3$ для дизельного).

3. Режим средних нагрузок для газового двигателя характерен меньшим КПД, по сравнению с дизельным. Это связано с меньшей степенью сжатия в газовой двигателе ($\epsilon = 12$ у газового, $\epsilon = 17$ у дизельного).

4. В режиме полных нагрузок индикаторный КПД газового ДВС сопоставим с индикаторным КПД дизельного двигателя ($\eta^i \approx 40\%$). Более того, при работе на метане могут быть получены лучшие показатели по удельным (массовым) расходам топлива на полных нагрузках. Этот факт объясняется более высокой массовой теплотой сгорания метана ($\lambda = 50,2$ Мдж/кг для метана, $\lambda = 42,7$ Мдж/кг для ДТ).

5. В режиме экстремальных нагрузок применение газового двигателя нецелесообразно, так как экстремальные нагрузки предполагают условия сильного обогащения смеси, быстрый процесс горения смеси. Оба этих условия являются неблагоприятными условиями работы газового ДВС, со значительными тепловыми потерями. Фундаментальная скорость распространения ламинарного фронта пламени для метана $U_n \leq 0,38$ м/с, для ДТ и бензина $U_n = 0,3 \dots 0,7$ м/с.

Таким образом, газовый ДВС целесообразно применять на ТТС, длительное время работающих в режимах полной нагрузки. К таким машинам относятся, в том числе, гибридные ТТС.

Исследуемые КМ работают в городском ездовом цикле, включающем многократные повторы разгона и торможения, операции загрузки и уплотнения отходов, и требует от гибридного силового блока аккумуляторных батарей с большой емкостью. Оптимальной, с точки зрения режима эксплуатации и требований по емкости батарей, является последовательная схема гибридного силового блока, изображенная на рисунке 2. Сплошными линиями показана передача механической энергии, пунктирными – передача электрической энергии. Сплошные красные стрелки показывают последовательную передачу мощности на колеса. Пунктирные зеленые стрелки показывают передачу мощности при рекуперативном торможении.

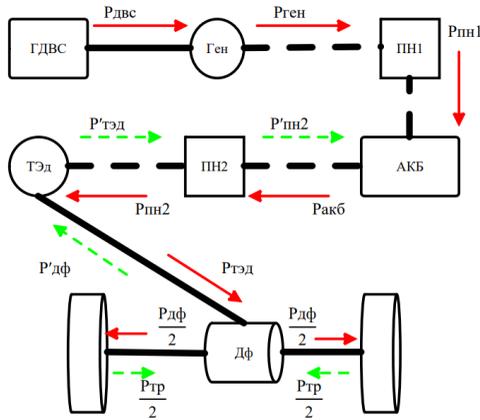


Рисунок 2. Последовательная схема гибридного силового блока: ГДВС – газový двигатель внутреннего сгорания; Ген – генератор; ПН-1 – преобразователь напряжения на генераторе; АКБ – высоковольтная аккумуляторная батарея; ПН-2 – преобразователь напряжения на тяговом электродвигателе; ТЭд – тяговый электродвигатель; Дф – дифференциал

2. Коэффициент гибридации, оценивающий возможность применения гибридного силового блока с газovým двигателем на коммунальных машинах, учитывающий локальные критерии экологичности, экономичности и энергоэффективности.

К локальным критериям оценки относятся: объем топлива для выполнения маршрута (энергоэффективность); финансовые затраты на выполнение маршрута (экономичность); количество выбросов отработавших газов (ОГ) за один маршрут (экологичность); показатель рекуперации энергии торможения. Критерии наглядно представлены на рисунке 3.



Рисунок 3. Критерии оценки применения гибридного силового блока с газovým двигателем на КМ

Впервые выведены формулы для расчета локальных критериев оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах. Критерии оцениваются с помощью соответствующих коэффициентов. Коэффициенты численно характеризуют целесообразность применения гибридного силового блока в составе разработанного метода.

Оценка критерия энергоэффективности гибридного силового блока с газовым двигателем производится с помощью **коэффициента энергоэффективности** $K_{ЭЭФ}$:

$$K_{ЭЭФ} = \frac{V_{\text{пг}} \rho_{\text{пг}} \lambda_{\text{пг}} + V_{\text{эз}} (1 - C_{\text{бк}}) \cdot 3,6}{V_{\text{дт}} \rho_{\text{дт}} \lambda_{\text{дт}}} \quad (1)$$

где $V_{\text{дт}}$ – объем дизельного топлива, потраченного за один маршрут, по данным мониторинга, л.; $\rho_{\text{дт}}$ – плотность ДТ, кг/л.; $\lambda_{\text{дт}}$ – удельная теплота сгорания ДТ, МДж/кг; $V_{\text{пг}}$ – объем метана, потраченного за один маршрут, по данным цифровых испытаний, м³; $\rho_{\text{пг}}$ – плотность метана при нормальных условиях, кг/м³; $\lambda_{\text{пг}}$ – удельная теплота сгорания метана, МДж/кг; $V_{\text{эз}}$ – емкость аккумуляторной батареи, установленной на ГСУ, кВт · ч; $C_{\text{бк}}$ – остаток заряда АКБ после выполнения маршрута, по данным цифровых испытаний, %; 3,6 – константа для перевода из кВт · ч в МДж.

Оценка критерия экономичности гибридного силового блока с газовым двигателем производится с помощью **коэффициента экономичности** $K_{ЭН}$:

$$K_{ЭН} = \frac{P_{\text{пг}} V_{\text{пг}} + P_{\text{эз}} V_{\text{эз}}}{P_{\text{дт}} V_{\text{дт}}} \quad (2)$$

где $P_{\text{дт}}$ – стоимость ДТ, руб./л.; $P_{\text{пг}}$ – стоимость КПГ, руб./м³; $P_{\text{эз}}$ – стоимость одного кВт·ч электроэнергии, руб./кВт · ч.

Оценка критерия экологичности гибридного силового блока с газовым двигателем производится с помощью **коэффициента экологичности** $K_{ЭЛ}$:

$$K_{ЭЛ} = \frac{V_{\text{пг}} \rho_{\text{пг}} (g_{\text{пг_CO2}} + g_{\text{пг_CO}} + g_{\text{пг_NOx}})}{V_{\text{дт}} \rho_{\text{дт}} (g_{\text{дт_CO2}} + g_{\text{дт_CO}} + g_{\text{дт_NOx}})} \quad (3)$$

где $g_{\text{дт_CO2}}$, $g_{\text{дт_CO}}$, $g_{\text{дт_NOx}}$ – удельные выбросы углекислого газа, угарного газа, оксида азота соответственно при сгорании 1 кг ДТ грузовым автомобилем полной массы более 3,5 т., г/кг; $g_{\text{пг_CO2}}$, $g_{\text{пг_CO}}$, $g_{\text{пг_NOx}}$ – удельные выбросы углекислого газа, угарного газа, оксида азота соответственно при сгорании 1 кг КПГ грузовым автомобилем полной массы более 3,5 т., г/кг.

Для подсчета **показателя рекуперации энергии торможения** P_{pe} необходимо найти отношение суммарного количества энергии, вернувшейся в АКБ при рекуперативном торможении к суммарному количеству энергии, потраченному на движение. Количество энергии подсчитывается интегрированием по времени движения произведений мгновенных значений силы тока и напряжения на клеммах АКБ. Показатель рекуперации энергии торможения P_{pe} вычисляется по формуле:

$$P_{pe} = \frac{W_{pe}}{W_n} \cdot 100\% = \frac{\int_0^T I_{pe}(t) U_{pe}(t) dt}{\int_0^T I_n(t) U_n(t) dt} \cdot 100\% \quad (4)$$

где W_{pe} – суммарное количество энергии, вернувшейся в АКБ при рекуперативном торможении, Втч; W_n – суммарное количество энергии, потраченное на движение, Втч; I_{pe} – мгновенная сила тока на клеммах АКБ при рекуперативном торможении, А; U_{pe} – мгновенное напряжение на клеммах АКБ при рекуперативном торможении, В; I_n – мгновенная сила тока на клеммах АКБ при движении, А; U_n – мгновенное напряжение на клеммах АКБ при движении, В; T – продолжительность маршрута, с.

Впервые введен интегральный **коэффициент гибридизации коммунальных машин** $K_{гибр}$. Коэффициент гибридизации позволяет обобщить оценку исследуемых критериев применения гибридного силового блока на коммунальных машинах и оценить возможность применения гибридного силового блока с газовым двигателем на КМ. Коэффициент гибридизации коммунальных машин $K_{гибр}$ является средним коэффициентов энергоэффективности, экономичности и экологичности на всех исследуемых маршрутах для машины одной типоразмерной группы, и вычисляется по формуле:

$$K_{гибр} = \frac{1}{3n} \cdot \sum_{i=1}^n (K_{эф} + K_{эл} + K_{эн})_i \quad (5)$$

где n – количество исследованных маршрутов.

Пороговое значение коэффициента гибридизации, оценивающее возможность применения гибридного силового блока с газовым двигателем на исследуемых коммунальных машинах, составляет 1,0. Если $K_{гибр} < 1,0$, то гибридизация коммунальной машины целесообразна; если $K_{гибр} \geq 1,0$, то гибридизация коммунальной машины нецелесообразна. Значение 1,0 вытекает из физического смысла коэффициентов энергоэффективности, экономичности и экологичности, определяющих коэффициент гибридизации.

3. Математическая модель движения коммунальной машины, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем, учитывающая изменяемые во времени параметры машины.

В модели учитываются изменения массы коммунальной машины, вызванные выполнением ее рабочих операций. Также в модели учитывается изменение уровня заряда аккумуляторной батареи, от которого зависит условие запуска и выключения газового двигателя. Математическая модель содержит набор формул, условий и соотношений, с помощью которых осуществляется моделирование работы узлов и агрегатов силового блока. Основные допущения и ограничения модели представлены в полном тексте диссертации. Укрупненный алгоритм работы модели изображен на рисунке 4.

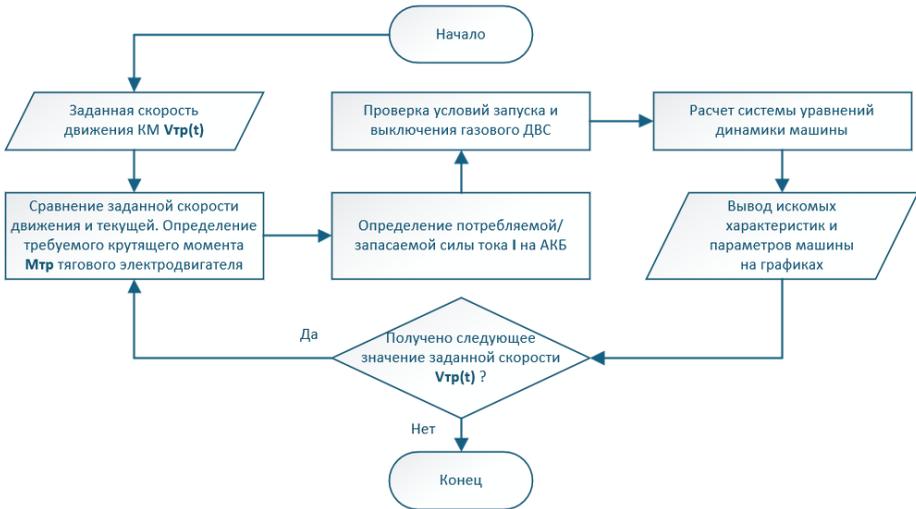


Рисунок 4. Укрупненный алгоритм новой математической модели движения КМ, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем, учитывающей изменяемые во времени параметры машины

На входе в модель задаются исходные данные в виде зависимости скорости КМ от времени $V_{тp}(t)$. Для баланса точности и скорости моделирования частота дискретизации модели Δt варьируется от 0,001 до 1 секунды.

Через каждый промежуток Δt модель получает значение требуемой(заданной) скорости в текущий момент времени. Далее значение требуемой скорости преобразуется в требуемую частоту вращения вала тягового электродвигателя $n_{тp}$ по формуле:

$$n_{тp} = 2,65 \frac{V_{тp}}{R} K \quad (6)$$

где $V_{тp}$ – требуемая(заданная) скорость, км/ч; R – радиус колеса КМ, м; K – передаточное число редуктора КМ.

Далее в подсистеме в блоке управления в контроллере скорости подсчитывается требуемый крутящий момент на тяговом электродвигателе. Требуемый крутящий момент пропорционален разности между требуемой частотой вращения вала тягового электродвигателя и текущей частотой вала тягового электродвигателя, возвращенной от блока машины, умноженной на коэффициент усиления. Такой подход обеспечивает увеличение крутящего момента тягового электродвигателя пропорционально разнице между заданной и требуемой его частотами вращения. Требуемый крутящий момент $M_{тр}$ удовлетворяет условиям:

$$M_{тр} \propto (n_{тр} - n_{тек}) k_{ус} \quad (7)$$

$$-M_{макс} \leq M_{тр} \leq M_{макс} \quad (8)$$

где $n_{тек}$ – текущая частота вращения вала тягового электродвигателя, об/мин; $k_{ус}$ – коэффициент усиления; $M_{макс}$ – максимальный крутящий момент электродвигателя, Нм.

Далее требуемый крутящий момент поступает на блок тягового электродвигателя. Блок тягового электродвигателя представляет собой универсальный бесколлекторный (вентильный) двигатель и привод с замкнутым контуром регулирования крутящего момента. Блок объединяет в себе электродвигатель, приводную электронику и систему управления. Блок генерирует кривую зависимости крутящего момента от скорости, которая ограничивает входной крутящий момент и допускает только тот диапазон крутящих моментов и скоростей, который определяет кривая. Максимальные допустимые значения мощности и крутящего момента тягового электродвигателя обозначены $M_{макс}$ и $N_{макс}$ соответственно. Блок тягового электродвигателя подсоединен идеальными проводами к АКБ. В случае подачи на блок сигнала положительного требуемого крутящего момента, тяговый электродвигатель расходует запасенную в АКБ электроэнергию. В случае с отрицательным крутящим моментом – запасает, за счет рекуперативного торможения. Потребляемая сила тока I блоком тягового электродвигателя, электрическая мощность $P_{эл}$, электрическая мощность, теряемая во время работы $P_{пот}$ определяются по формулам:

$$I = \frac{P_{эл}}{U} \quad (9)$$

$$P_{эл} = P_{пот} + \omega_{рот} M'_{тр} \quad (10)$$

$$P_{пот} = k M'_{тр}{}^2 \quad (11)$$

$$k = \frac{\omega_{ном} \left(1 - \frac{\eta_{эд}}{100} \right)}{M_{ном} \frac{\eta_{эд}}{100}} \quad (12)$$

где U – напряжение на клеммах, В; $\omega_{\text{рот}}$ – угловая скорость ротора, рад/с; $M'_{\text{тр}}$ – требуемый крутящий момент, не превышающий максимальные параметры блока, Нм; k – коэффициент пропорциональности для потерь сопротивления, рад/Нм·с; $\omega_{\text{ном}}$ – номинальная угловая скорость ротора электродвигателя, рад/с; $M_{\text{ном}}$ – номинальный крутящий момент электродвигателя, Нм; $\eta_{\text{эд}}$ – КПД электродвигателя.

Инерция ротора тягового электродвигателя $M_{\text{ин}}$ вычисляется по формуле:

$$M_{\text{ин}} = J \frac{d\omega_{\text{рот}}}{dt} \quad (13)$$

где J – инерция ротора электродвигателя, кг·м²; t – время, с.

Блок тягового электродвигателя подсоединен к дифференциалу (редуктору) заднего моста КМ. Дифференциал жестко соединен с блоком машины и передает на него результирующую крутящего момента гибридного силового блока. Потери мощности на трение в дифференциале $P_{\text{трД}}$ считаются по формуле:

$$P_{\text{трД}} = (1 - \eta_{\text{дф}}) \frac{2\pi M'_{\text{тр}} n_{\text{тек}}}{60} \quad (14)$$

где $\eta_{\text{дф}}$ – КПД дифференциала, Вт.

Дифференциал соединен с осями колес машины. Оси с колесами обсчитываются в блоке машины. Блок машины рассчитывает движение КМ следующим образом: движение машины является результатом суммарного эффекта всех сил и моментов, действующих на него. Точки приложения сил схематично изображены на рисунке 5.

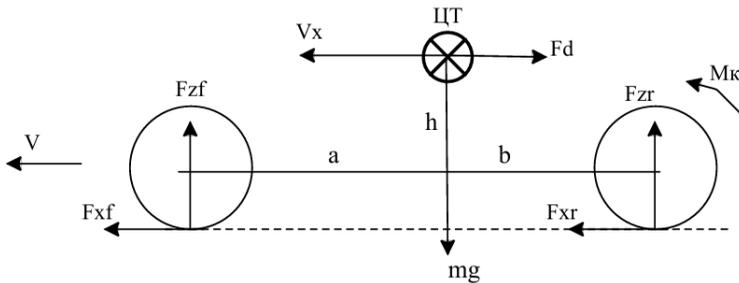


Рисунок 5. Схема приложения сил к моделируемой КМ, где: V_x – текущая скорость моделируемой КМ (продольная скорость ступицы колеса), м/с; h – высота центра тяжести (ЦТ) КМ над землей, м; a, b – расстояние от передней и задней осей соответственно до точки нормальной проекции центра тяжести КМ на общую плоскость осей, м; m – текущая масса моделируемой КМ, зависит от наполненности КМ ТКО, кг; F_{zf}, F_{zr} – нормальные силы нагрузки на каждое колесо на передней и задней осях соответственно, Н; F_{xf}, F_{xr} – продольные силы, действующие на каждое колесо на передней и задней осях соответственно, Н; F_d – сила сопротивления воздуха, Н

Продольные силы шин толкают транспортное средство вперед или назад. Вес транспортного средства действует через его центр тяжести (ЦТ). Независимо от

того, движется ли транспортное средство вперед или назад, аэродинамическое сопротивление замедляет его. Динамика транспортного средства описывается уравнениями:

$$m\dot{V}_x = F_x - F_d \quad (15)$$

$$F_x = 2(F_{xf} + F_{xr}) \quad (16)$$

$$F_d = \frac{1}{2}C_d\rho AV_x^2 \quad (17)$$

$$F_{xf} = \frac{-h(F_d + m\dot{V}_x) + bmg}{2(a+b)} \quad (18)$$

$$F_{xr} = \frac{+h(F_d + m\dot{V}_x) + amg}{2(a+b)} \quad (19)$$

где C_d – коэффициент сопротивления воздуха; ρ – плотность воздуха, кг/м³; A – площадь передней части КМ, м².

Нормальные силы, действующие на колеса, удовлетворяют равенству:

$$F_{xf} + F_{xr} = \frac{mg}{2} \quad (20)$$

Уравнение поступательного движения нескользящей, неподатливой шины имеет вид:

$$V_x = R\Omega \quad (21)$$

где Ω – угловая скорость колеса, об/сек.

Сопротивление качению колеса F_{ck} учитывается в модели и прямо пропорционально коэффициенту сопротивления:

$$F_{ck} = F_z\mu \quad (22)$$

где F_z – нормальная сила, действующая на колесо, Н; μ – коэффициент сопротивления качению колеса.

Остаточная емкость $Q_{ост}$ и текущий заряд АКБ Q считаются следующим образом:

$$Q_{ост} = Q_{нач} - \int_0^T I(t) dt \quad (23)$$

$$Q = \frac{Q_{ост}}{Q_{ном}} \cdot 100\% \quad (24)$$

где $Q_{нач}$ – стартовый заряд АКБ, А·ч; A ; $Q_{ном}$ – номинальный заряд АКБ, А·ч.

Тепловые потери на АКБ $P_{акб}$ считаются по формуле:

$$P_{акб} = I^2 R_{вн} \quad (25)$$

где $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление батареи, Ом.

Каждая остановка для выполнения технологической операции по загрузке и выгрузке ТКО увеличивает счетчик остановок $S_{ост}$ на 1.

Во время остановки включается гидропривод рабочего оборудования. Для упрощения подсчета затрат электроэнергии на работу гидропривода гидронасос заменен резистором с постоянным сопротивлением. Затраченная мощность на работу гидронасоса $P_{гн}$ вычисляется по формуле:

$$P_{гн} = \frac{U_{гн}^2}{R_{гн}} = \frac{U^2}{k_{гн}^2 R_{гн}} \quad (26)$$

где $U_{гн}$ – напряжение на клеммах гидронасоса, В; $R_{гн}$ – сопротивление резистора, имитирующего гидронасос, Ом; $k_{гн}$ – коэффициент понижающего трансформатора постоянного тока перед гидронасосом.

Расчет массы КМ m выполняется следующим образом:

$$m = m_{сн} + m_{кон} (S_{ост} \text{ mod } S_{пц}) \quad (27)$$

где $m_{сн}$ – снаряженная масса КМ, кг; $m_{кон}$ – масса погрузки мусора за остановку, кг; $S_{ост}$ – текущее показание счетчика остановок; $S_{пц}$ – количество загрузок контейнеров за один цикл.

4. Метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах на базе значения коэффициента гибридизации.

Разработанный метод позволяет оценить возможность гибридизации исследуемой КМ. Сперва анализируются эксплуатационные показатели машины на реальных маршрутах. Далее, с помощью разработанной математической модели, анализируются рассчитываемые эксплуатационные показатели гибридной КМ на аналогичных маршрутах. Следующим шагом рассчитываются критерии оценки: энергоэффективность, экономичность, экологичность, показатель рекуперации энергии торможения. По результатам выполненных расчетов оценивается коэффициент гибридизации, дающий комплексную оценку целесообразности переоборудования исследуемого типа КМ на гибридный силовой блок с газовым двигателем. Для финансовой оценки гибридизации КМ предложены формулы расчета экономического и экологического эффектов, а также срока окупаемости переоборудования, представленные в основном тексте диссертационной работы.



Рисунок 6. Маячковый трекер Scout MT



Рисунок 7. Дооборудованный маячковым трекером мусоровоз JAC N120

Для применения разработанного метода на практике **выполнен эксперимент:** проведены эксплуатационные испытания существующих коммунальных машин АО «Автопарк №1 «Спецтранс» – бункерных мусоровозов категории N2 на платформе JAC N120 с задним типом погрузки, обслуживающие 12 различных маршрутов в центре Санкт-Петербурга. Эксперимент проведен с целью сбора эксплуатационных данных для моделирования. На исследуемые коммунальные машины установлены маячковые трекеры модели «Scout MT-850+», рисунок 6,7. В ходе эксплуатационных испытаний установленные маячковые трекеры фиксируют параметры машины: мгновенную скорость, время в пути, географические координаты, объем топлива в баке. Прочие параметры для проведения исследования не учитывались. Движение КМ происходит по стандартным маршрутам на территории г. Санкт-Петербурга.

Результаты эксплуатационных испытаний на исследуемых маршрутах представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исследуемые маршруты коммунальных машин

№ маршрута	Длина маршрута, км	Обозначение машины	Гос. номер	Дата	Длительность маршрута, ч
1	68,1	610 JAC	B610XK147	04.11.2024	8:54:32
2	86,7	610 JAC	B610XK147	05.11.2024	12:21:30
3	69,6	610 JAC	B610XK147	06.11.2024	9:21:57
4	62,4	188 JAC	M188CC198	04.11.2024	8:58:56
5	69,1	188 JAC	M188CC198	05.11.2024	9:53:20
6	94,5	188 JAC	M188CC198	06.11.2024	13:13:19
7	76,7	173 JAC	M173PC198	04.11.2024	10:03:13
8	83,9	173 JAC	M173PC198	05.11.2024	10:51:48
9	120,6	173 JAC	M173PC198	06.11.2024	13:59:19
10	161,7	566 JAC	M566PC198	04.11.2024	19:42:47
11	155,8	566 JAC	M566PC198	05.11.2024	15:10:35
12	156,4	566 JAC	M566PC198	06.11.2024	19:06:31

Пример части полученных данных по маршруту № 6 представлен на рисунке 8, где в первом столбце указана дата и время движения машины, а во втором ее мгновенная скорость. Полные данные движения по маршрутам представлены в Приложении А диссертационного исследования.

Дата. Время, с	Скорость, км/ч	Дата. Время, с	Скорость, км/ч
06.11.2024 07:09:48	0	06.11.2024 07:10:25	9,5
06.11.2024 07:09:50	2,2	06.11.2024 07:10:29	11
06.11.2024 07:09:52	3,5	06.11.2024 07:10:38	10
06.11.2024 07:09:57	3,5	06.11.2024 07:10:40	11,1
06.11.2024 07:09:58	5,6	06.11.2024 07:10:42	11,4
06.11.2024 07:09:59	5,6	06.11.2024 07:10:44	9,7
06.11.2024 07:10:01	6,7	06.11.2024 07:10:55	7,2
06.11.2024 07:10:09	8,4	06.11.2024 07:11:04	6,6
06.11.2024 07:10:22	13,2	06.11.2024 07:11:09	0
06.11.2024 07:10:24	13,6	06.11.2024 07:11:19	0

Рисунок 8. Часть результатов эксплуатационных испытаний мусоровоза 188 JAC за 06.11.2024 г. На маршруте №6

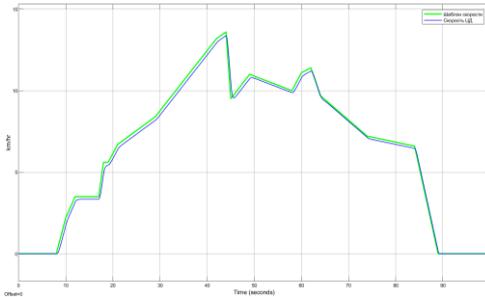


Рисунок 9. Графическая интерпретация движения мусоровоза 188 JAC за 06.11.2024 г. в промежуток времени с 07:09:40 по 07:11:19

С помощью математической модели разработана цифровая модель, для которой проведены цифровые испытания: графическая интерпретация движения по маршруту № 6 в течение первых 100 секунд представлена на рисунке 9. Жирной зеленой линией показан график заданной скорости по результатам эксплуатационных испытаний, тонкой синей линией показан график скорости моделируемой КМ. Как видно из рисунка 9, график скорости моделируемой КМ практически соответствует заданному графику движения. Незначительные расхождения вызваны тем, что текущая скорость моделируемой КМ стремится соответствовать значениям заданной скорости, но это не всегда возможно в силу наличия инерции модели и возможных погрешностей маячковых трекеров на реальной машине.

Всего маршрут № 6 длится 13 часов 13 минут. За весь маршрут газовый двигатель моделируемой КМ запускается два раза и подзаряжает АКБ. График заряда

АКБ представлен на рисунке 10. По вертикальной оси представлен заряд батареи, в процентах, а по горизонтальной время компиляции модели, в секундах.

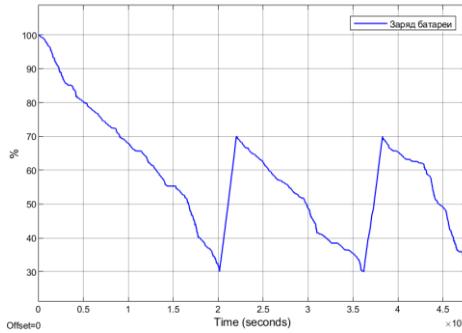


Рисунок 10. График заряда АКБ моделируемой КМ на маршруте № 6

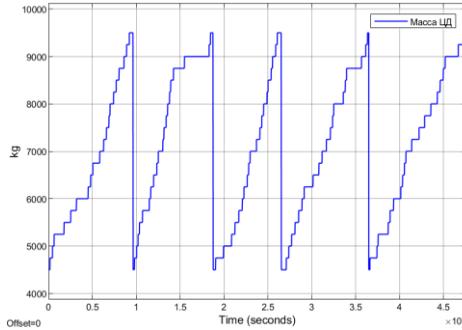


Рисунок 11. График изменения массы моделируемой КМ на маршруте № 6

Также, цифровая модель позволяет отследить массу транспортного средства в реальный момент времени. Так как мусоровоз периодически останавливается и загружает контейнеры с ТКО, его масса увеличивается. Спустя 20-30 загрузок машина едет на место временного складирования ТКО, разгружается и возвращается на маршрут. График изменения массы моделируемой КМ представлен на рисунке 11. Как видно из графика, моделируемая КМ четыре раза произвела разгрузку ТКО и пятый раз разгрузится перед окончанием смены.

Физический смысл формулы расчета показателя рекуперации энергии торможения (4) заключается в нахождении отношения накопленной электрической энергии при рекуперативном торможении к общей потраченной электрической энергии на движение и привод рабочего оборудования.

График мгновенной электрической мощности и график изменения показателя рекуперации цифровой модели при проведении цифровых испытаний на Маршруте № 6 за 06.11.2024 за первый час движения коммунальной машины показаны на рисунках 12 и 13.

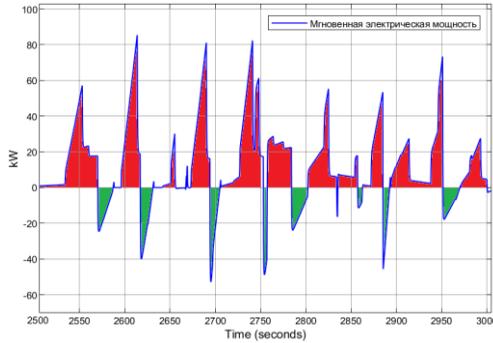


Рисунок 12. График мгновенной электрической мощности на маршруте № 6 от 06.11.2024 в интервале движения с 1000 с. по 1500 с

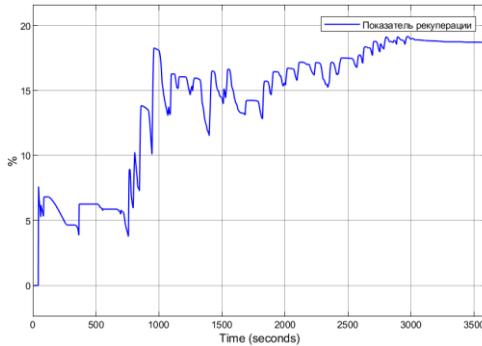


Рисунок 13. График изменения показателя рекуперации на маршруте № 6 от 06.11.2024 за 1 час

Площадь под графиком положительных значений мгновенной электрической мощности показывает количество потраченной энергии на движение моделируемой КМ. Площадь под графиком отрицательных значений мгновенной электрической мощности показывает количество рекуперативно запасенной энергии, вернувшейся в АКБ.

Значения показателей рекуперации цифровой модели при прохождении цифровых испытаний по исследуемым маршрутам представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения показателей рекуперации

№ маршрута	1	2	3	4	5	6
Показатель рекуперации $P_{ре}$	20,57	20,96	21,27	19,22	18,12	17,67
№ маршрута	7	8	9	10	11	12
Показатель рекуперации $P_{ре}$	20,8	17,83	21,53	20,11	19,99	20,08

Показатель рекуперации энергии торможения моделируемой КМ находится в диапазоне от 17,67 % до 21,53 %.

Полученные значения показателей рекуперации сопоставимы с результатами исследований ряда ученых в области гибридных транспортных средств и свидетельствуют об адекватности результатов моделирования с помощью разработанной математической модели.

Значения остальных исследуемых локальных критериев – энергоэффективности, экономичности и экологичности посчитаны по формулам (1,2,3) в виде соответствующих коэффициентов. По формуле (5) посчитан впервые введенный коэффициент гибридизации $K_{ГИБР}$.

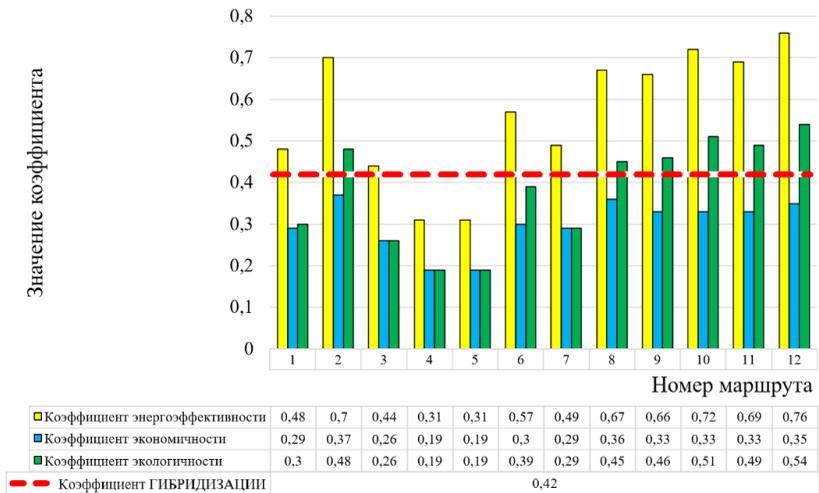


Рисунок 14. Критерии оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем

Кoeffициент гибридизации исследуемых 12-ти маршрутов $K_{ГИБР} = 0,42$ (Показан пунктирной линией на рисунке 14). Полученное значение является положительным результатом исследования и свидетельствует о целесообразности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на рассмотренных коммунальных машинах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационного исследования получены следующие научные и практические результаты:

1. На основании проведенного анализа выполнено научное обоснование применения газового двигателя в составе гибридного силового блока коммунальных машин. Газовый двигатель в составе гибридного силового блока работает

в номинальном режиме при полной нагрузке, что обеспечивает его максимальный КПД. За счет рекуперации энергии торможения в гибридном силовом блоке и максимального КПД газового двигателя достигается наибольшая топливная экономичность и экологичность коммунальной машины, обеспечивается ее энергоэффективность. Описан механизм потоков энергии.

2. Определены и исследованы локальные критерии оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах: энергоэффективность, экономичность, экологичность, показатель рекуперации энергии торможения. Впервые описан коэффициент гибридизации коммунальных машин. Коэффициент гибридизации позволяет обобщить предложенные критерии и оценить возможность гибридизации коммунальной машины. Выведены формулы расчета исследованных коэффициентов.

3. Разработана математическая модель движения коммунальной машины, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем, учитывающая изменяемые во времени параметры машины. Математическая модель используется в цифровой модели коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем. Цифровая модель разработана в ПО KM MathWorks MATLAB Simulink R2023a. Цифровая модель позволяет тестировать различные конфигурации коммунальных машин, изменяя характеристики и параметры применяемых в модели узлов и агрегатов.

4. Разработан метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах на базе значения коэффициента гибридизации, и показана последовательность действий для применения разработанного метода.

5. В соответствии с разработанным методом осуществлен расчет критериев оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на исследуемых коммунальных машинах. Получены результаты: коэффициент энергоэффективности находится в диапазоне от 0,31 до 0,76; коэффициент экономичности находится в диапазоне от 0,19 до 0,37; коэффициент экологичности находится в диапазоне от 0,19 до 0,54. Полученные диапазоны коэффициентов являются положительным результатом исследования, так как они указывают на более высокие эксплуатационные показатели коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем, по сравнению с базовой машиной.

Показатель рекуперации энергии торможения моделируемой КМ находится в диапазоне от 17,67 % до 21,53 %. Полученный диапазон значений коррелирует с исследованиями ряда ученых и свидетельствует об адекватности разработанной цифровой модели.

Дана оценка впервые введенного коэффициента гибридизации коммунальных машин. Получен результат: коэффициент гибридизации $K_{\text{ГИБР}} = 0,42$. Значение $K_{\text{ГИБР}} < 1,0$, соответственно, применение гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах, эксплуатируемых на 12-ти исследованных маршрутах, целесообразно.

Экономический эффект от переоборудования одной коммунальной машины на гибридный силовой блок с газовым двигателем составляет 893 тысячи рублей в год экономии на топливных затратах в ценах ноября 2024 года. Экологический эффект показывает сокращение вредных выбросов на 31 тонну в год. Окупаемость переоборудования одной машины составляет 6,09 года.

Таким образом, решена обозначенная в актуальности работы научная проблема и разработан метод оценки комплексного решения по улучшению экологичности, топливной независимости и энергоэффективности ТТС, заключающегося в применении на коммунальных машинах гибридного силового блока с газовым двигателем.

Результаты диссертационной работы могут быть применены для автопарков жилищно-коммунальных служб, муниципальных и подрядных организаций, обслуживающих улицы, дороги, парки, жилые зоны и городскую инфраструктуру. Также, результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для предприятий-производителей коммунальной техники.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. *Образцов Н. А.* О некоторых проблемах организации ремонта транспортно-технологических машин / О. А. Бардышев, С. В. Репин, Н. А. Образцов [и др.] // Грузовик. – 2022. – № 5. – С. 28–34.
2. *Образцов Н. А.* Предпосылки, реальность и перспективы СПГ / Н. А. Образцов // Грузовик. – 2022. – № 3. – С. 44–46.
3. *Образцов Н. А.* Оценка применения СПГ в качестве топлива для дорожно-строительных машин в Арктической зоне / С. М. Грушецкий, С. А. Евтюков, Н. А. Образцов [и др.] // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 6. – С. 41–45.
4. *Образцов Н. А.* Исследование эффективности газовых ДВС при различных нагрузочных режимах / Н. А. Образцов, С. А. Евтюков, С. М. Грушецкий // Грузовик. – 2023. – № 9. – С. 15–18.
5. *Образцов Н. А.* Выбор базовой машины для газового двигателя RGK.ЕС.820.959-340 / Н. А. Образцов // Грузовик. – 2023. – № 7. – С. 3–5.

Публикации в других изданиях

6. *Образцов Н. А.* Особенности и перспективы развития отрасли газомоторного топлива в России / Н. А. Образцов, А. Н. Хачатрян, А. В. Перепелюк, М. Н. Бизюков // Магистратура - автотранспортной отрасли: материалы V Всероссийской межвузовской конференции, Санкт-Петербург, 23 октября 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. – С. 100–105.

7. *Образцов Н. А.* Цифровая модель гибридной трансмиссии с газовым двигателем на коммунальных машинах / Н. А. Образцов // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых : Сборник статей IX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, приуроченная к 95-летию основания ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, 24–25 апреля 2025 года.* – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2025. – С. 744–751.

Программы для ЭВМ

8. *Образцов Н. А.* Цифровая модель коммунальной машины с гибридной трансмиссией с газовым двигателем: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025661360, дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05.05.2025 / Н. А. Образцов

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 07.10.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 113.

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