

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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 сред-
ства и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., доцент

Грушецкий Станислав Михайлович

Санкт-Петербург – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМАТИКА И РЕАЛИИ ТРАНСПОРТНОГО СЕКТОРА	13
1.1 Проблемы и пути их решения	14
1.1.1 Экологическая обстановка в городах.....	15
1.1.2 Диверсификация топливной зависимости автотранспорта ..	16
1.1.3 Энергетические и финансовые затраты на эксплуатацию ТТС	18
1.1.4 Газозаправочная инфраструктура	19
1.1.5 Безопасность эксплуатации и взрывозащищенность	24
1.1.6 Методологическая база оценки и выбора дорожных и коммунальных машин	27
1.2 Применение газового топлива на транспорте.....	29
1.2.1 Программы субсидирования газомоторной техники	31
1.2.2 Нормативные базы, регламентирующие работу коммунальных машин	33
1.2.4 Направления развития газомоторного транспорта.....	36
1.3 Существующие решения применения гибридного силового блока	37
1.3.1 Виды гибридных силовых блоков.....	37
1.3.2 Легковые гибридные автомобили	40
1.3.3 Гибридные автобусы	41
1.3.4 Гибридные грузовики	41
1.3.5 Гибридные коммунальные машины.....	44
1.3.6 Надежность гибридного силового блока.....	47
1.4 Сравнение видов применяемых тяговых электродвигателей	47
1.4.1 Тяговые двигатели постоянного тока	48

1.4.2	Двигатели переменного тока	48
1.4.3	Бесколлекторные (вентильные) электродвигатели	49
1.5	Применение цифрового моделирования для разработки изделий машиностроения.....	51
1.6	Выводы и заключения по проведенному исследованию	55
ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПЕРВИЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОГО СИЛОВОГО БЛОКА		57
2.1	Границы области исследования и критерии оценки применения гибридного силового блока.....	57
2.2	Анализ эффективности газового двигателя при различных нагрузочных режимах.....	60
2.2.1	Режим пуска.....	60
2.2.2	Режим холостого хода	62
2.2.3	Режим средних (оптимальных) нагрузок	63
2.2.4	Режим максимальных (полных) нагрузок	63
2.2.5	Режим экстремальных нагрузок	65
2.2.6	Промежуточные выводы	66
2.3	Узлы и агрегаты гибридного силового блока	67
2.3.1.	Выбор схемы гибридного силового блока	67
2.3.2.	Первичный двигатель.....	69
2.3.3.	Механизм потоков энергии.....	69
2.4	Расчет критериев оценки.....	71
2.4.1	Энергоэффективность.....	72
2.4.2	Экономичность.....	74
2.4.3	Экологичность.....	75
2.4.4	Показатель рекуперации энергии торможения.....	78
2.5	Интегральный коэффициент гибридизации.....	79
2.6	Расчет экономического и экологического эффектов	80
2.7	Метод оценки возможности применения гибридного силового	

блока с газовым двигателем на КМ	83
2.8 Выводы к главе 2.....	84
ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ КОММУНАЛЬНОЙ МАШИНЫ С ГИБРИДНЫМ СИЛОВОМ БЛОКОМ С ГАЗОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ.....	86
3.1 Описание модели	86
3.1.1 Исходная гипотеза	86
3.1.2 Основные допущения	87
3.1.3 Ограничения	88
3.1.4 Структура модели	89
3.1.5 Инструмент построения	90
3.2 Содержание цифровой модели	91
3.2.1 Компьютерная модель	91
3.2.2 Математическая модель движения КМ	96
3.2.3 Выбор узлов и агрегатов	105
3.2.4 Параметры цифровой модели	112
3.3 Выводы к главе 3.....	113
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ.....	114
4.1 Эксплуатационные испытания (натурный эксперимент).....	114
4.1.1 Исходная гипотеза и границы.....	114
4.1.2 Планирование и подготовка.....	115
4.1.3 Проведение испытаний.....	116
4.1.4 Результаты	117
4.2 Цифровые испытания	119
4.2.1 Исходные данные.....	119
4.2.2 Графическое отображение испытаний.....	120
4.2.3 Обработка результатов	123
4.3 Оценка адекватности модели.....	127
4.4 Оценка коэффициента гибридизации	130
4.5 Экономический и экологический эффект	131
4.6 Выводы к главе 4.....	133

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ.....	138
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	169

ВВЕДЕНИЕ

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 не полностью 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. [111-113], Раков В. А. [80-83], Гусаков С. В. [33], Забудский А. И. [55], Зорин В. А. [38], Карпухин К. Е. [89], Бахмутов С. В. [14], Пенкин А. Л. [69], Савенков Н. В. [93], Сидоров К. М. [96]. Также, зарубежные исследования эксплуатации ТТС с гибридными силовыми установками освещены в работах следующих ученых: Pistoia G. [7], Moghadasi S. [6], Zhang B. [10], Mehrdad E. [5], Gianfranco P. [2] 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.

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

Методология и методы исследования базируются на применении комплексного подхода, включающего общенаучные методы анализа и синтеза с использованием статистических и теоретических исследований, методы экспериментальных исследований, а также методы 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 результатов исследования обоснована применением комплексного подхода, включающего общенаучные методы анализа и синтеза; подтверждена результатами исследований, отраженными в научных работах, опубликованных в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, путем сопоставления натуральных и расчетных данных с высоким уровнем адекватности результатов испытаний.

Практическая ценность и реализация результатов исследования заключается 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» «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».

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования докладывались на: 5-й Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания» (2020, СПбГАСУ); 75-й и 76-й Научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (2022, 2023, СПбГАСУ); 3-м Всероссийском научном семинаре «Техническое обеспечение доступности арктических

регионов» (2023, СПбГАСУ); 81-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции (2023, МАДИ, Москва); 36-й и 38-й Национальной научно-технической конференции «Улучшение эксплуатационных показателей и технический сервис автомобилей, тракторов и двигателей» (2023, 2025, СПбГАУ); 8-й и 9-й Международной научно-практической конференции 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, трех 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.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМАТИКА И РЕАЛИИ ТРАНСПОРТНОГО СЕКТОРА

Отталкиваясь от идей диверсификации топливной зависимости ТТС, улучшения их экономичности и экологичности, повышения энергоэффективности, в данном разделе диссертации приведен обзор газомоторной сферы транспортного сектора Российской экономики. Также, произведен обзор существующей гибридной техники, видов гибридных силовых блоков (гибридных силовых установок). Для проведения дальнейшего исследования представлена терминология государственных стандартов для цифрового моделирования.

Уже не первый год обсуждаются перспективы перевода автотранспорта на газомоторное топливо. Такие перспективы есть, и они постепенно воплощаются в жизнь, отражаясь на количественном и качественном составе автопарка России.

Наибольшую распространенность газомоторный автотранспорт получает в сфере коммерческих легковых грузоперевозок. Причина этому – экономическая выгода, которую получают коммерческие организации, занимающиеся легковыми грузоперевозками. На второе место можно уверенно поставить пассажирские перевозки: автобусы, такси. На третьем месте находится газомоторный транспорт для дальнемагистральных грузоперевозок, который начинает набирать все большую популярность. Среди такого транспорта и тягачи на газодизельных циклах, и тягачи на пропан-бутановых смесях, и, пожалуй, самые перспективные – тягачи на СПГ и КПП.

В диссертационной работе рассматривается применение газомоторного топлива на коммунальных машинах для вывоза твердых коммунальных отходов (сокращенно: коммунальные машины или КМ). Коммунальные машины эксплуатируются в городской черте, имеют существенную ежедневную наработку мотор-часов и специфичные режимы работы, включающие в себя большое количество циклов разгонов и торможения, выполнение рабочих опера-

ция по загрузке и прессованию твердых коммунальных отходов (ТКО), разгрузке бункера.

В настоящий момент газомоторные транспортные средства (ТС) в коммунальной технике распространены мало. Общая черта всех вышеперечисленных групп автотранспорта – большие годовые пробеги и большая наработка мотор-часов, по сравнению с частными легковыми автомобилями. За счет того, что вышеперечисленные ТС постоянно находятся в рабочем режиме, основными расходами на эксплуатацию являются расходы на топливо. Организации и частные лица, оплачивающие эксплуатационные расходы этих автомобилей, стремятся минимизировать свои траты и поэтому взамен традиционным бензину или дизельному топливу выбирают газомоторные виды топлива.

Со временем будет происходить постепенное увеличение количества автомобилей на газомоторном топливе. Для этого уже созданы условия для владельцев таких ТС, а именно: субсидирование и государственная поддержка при переводе автомобиля на ГБО (газобаллонное оборудование); специальные программы, покрывающие часть расходов при приобретении автомобиля с предустановленным ГБО; низкие цены на газомоторные виды топлива, которые на данный момент в 2-3 раза ниже цен на традиционные бензин или дизель; развивающиеся сети АГНС (автомобильная газонаполнительная станция), АГНСК (автомобильная газонаполнительная компрессорная станция), КриоАЗС (криогенная автомобильная заправочная станция); наличие нормативно-правовой базы для юридического оформления и законной эксплуатации автомобилей с ГБО.

1.1 Проблемы и пути их решения

Рост внутреннего рынка газового топлива будет способствовать увеличению добычи природного газа, что является приоритетным направлением развития для государства. Об этом сказано в Паспорте подпрограммы «Развитие рынка газомоторного топлива» государственной программы Российской

Федерации «Развитие энергетики» в перспективе до 2030 года [73]. Рост потребления природного газа как моторного топлива возможен при наличии достаточного количества АГНКС. На апрель 2025 года количество АГНКС составляет порядка 671 заправку на всю территорию РФ [56]. Государственной программой «Развитие энергетики» предусмотрено субсидирование для развития сети АГНКС и перевода транспорта на сжатый природный газ (СПГ). Так, по заявлению заместителя министра энергетики Павла Сорокина, сделанного 07.02.2023 г., планируется увеличить количество АГНКС до 1435 единиц к 2035 году.

Правительство России утвердило долгосрочную программу развития транспортной системы страны - "Транспортную стратегию Российской Федерации до 2030 года с перспективой до 2035 года". В рамках реализации этой стратегии Минтранс разработал комплекс мер по оптимизации затрат на перевозки, ключевым элементом которого является планомерный перевод автотранспорта на гибридные и электрические силовые установки. Согласно установленным планам, к 2035 году доля экологичного транспорта в общем автопарке страны должна составить не менее 20% [84]. Данная инициатива свидетельствует о стратегическом курсе ведомства на широкое внедрение гибридных и электрических ТС.

1.1.1 Экологическая обстановка в городах

Экологическая повестка в XXI веке является одним из главных приоритетов развитых государств. В РФ существует и исполняется Указ президента «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года» [104]. Цель экологической политики РФ – значительное улучшение качества природной среды и экологических условий жизни человека, формирование сбалансированной экологически ориентированной модели развития экономики и экологически конкурентоспособных предприятий.

Общеизвестно, что в крупных городах с высокой плотностью автотранспорта наблюдается значительное загрязнение воздуха выхлопными газами,

что существенно ухудшает экологическую ситуацию. Переход на газомоторное топливо способен значительно снизить объем вредных выбросов в атмосферу. Среди всех видов углеводородного топлива метан признан наиболее экологически безопасным вариантом [97].

Экологическая обстановка в Санкт-Петербурге на 2016 год является плачевной, исследование загрязнения города автомобильным комплексом и взаимосвязь загрязнения со здоровьем населения описано в статье Гуртяк М.А. [32]. Так, в Санкт-Петербург количество заболеваний граждан, вызванных плохой экологией, находится на уровне выше среднего, чем в России. Начиная с 2009 года, основным источником загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота стал автомобильный транспорт, на долю которого приходится 91% от совокупного объема выбросов (включая стационарные источники). За 35-летний период наблюдений отмечен значительный рост заболеваемости населения [53].

Аналогичная тенденция описана в трудах Гусакова С.В. [33]. Автор демонстрирует взаимосвязь заболеваемости населения ишемической болезнью сердца с увеличением количества автотранспортных средств в Москве.

Крупные города России активно переводят общественный транспорт на экологичное газомоторное топливо (КПГ и СПГ). К примеру, в Санкт-Петербурге парк автобусов «Пассажиравтотранса» по данным на 2020 год насчитывал более 1600 машин, из которых свыше 10% (167 единиц) работали на природном газе, и их число продолжает расти [99]. Аналогичный тренд наблюдается и в других регионах: в Москве эксплуатируется 119 газовых автобусов, а в Калуге на городских маршрутах эксплуатируются микроавтобусы «ПАЗ», дооборудованные метановыми баллонами.

1.1.2 Диверсификация топливной зависимости автотранспорта

Парк автомобилей в России насчитывает 55 млн единиц, которые обслуживаются 30 тысячами АЗС (по данным Росстата на 2024 год). Подавляющее большинство транспорта (94,7%) критически зависит от нефтепродуктов:

81,1% использует бензин и дизель, а еще 13,6% работает на пропан-бутане (СУГ), который является побочным продуктом нефтедобычи. Лишь 5,3% приходится на технику, независимую от нефти: автомобили на КПП, СПГ и электромобили [105]. Для сравнения, в 2020 году доля альтернативного топлива составляла лишь 1,5%. Поэтому одна из задач – расширить использование природного газа (метана) в качестве моторного топлива для обеспечения энергетической независимости транспорта.

Таблица 1.1 – Количество автозаправочных станций (АЗС) по субъектам Российской Федерации за 2022 год

Количество автозаправочных станций (АЗС) по видам топлива, расположенные на автомобильных дорогах общего пользования федерального, регионального или межмуниципального и местного значения											
Всего	из них:										
	много-топливные заправочные станции (МТЗС)	в том числе обеспечивающие заправку:				автомобильные газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС)	в том числе обеспечивающие заправку сжиженным природным газом (метаном)	автомобильные газозаправочные станции (АГЗС)	криогенные газозаправочные станции (КриогЗС)	в том числе обеспечивающие заправку компримированным природным газом (метаном)	электрозаправочные станции (ЭЗС)
		сжиженным углеводородным (нефтяным) газом (пропаном)	компримированным природным газом (метаном)	сжиженным природным газом (метаном)	сжиженным, а также компримированным природным газом (метаном)						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
30 447	8 374	4 151	419	501	176	451	85	3 543	5	1	574

В северных широтах РФ, а именно в арктической зоне, применение СПГ имеет ряд преимуществ: запас сжиженного газа в криобакке может храниться более значительное время чем в средних широтах, за счет более низких температур окружающей среды; стоимость СПГ может быть ниже, так как основные крупнотоннажные производства СПГ будут находиться за полярным кругом

(Арктик СПГ1, Арктик СПГ-2, Ямал СПГ и т.д.). Более подробно вопрос эксплуатации техники в Арктической зоне рассмотрен в статье [61].

1.1.3 Энергетические и финансовые затраты на эксплуатацию ТТС

Существует ряд факторов, определяющих энергоэффективность ТТС. Для исследуемых коммунальных машин можно выделить следующие факторы:

- 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.

Вышеперечисленные факторы являются недостатками КМ, так как снижают энергоэффективность машин и увеличивают топливные затраты.

На дату (01.11.2024 г.) стоимость бензина АИ-95 составляет порядка 58,5 руб./л., дизельного топлива 67,34 руб./л. Стоимость СУГ около 31,5 руб./л., а метан можно купить за 27,7 руб./куб.м. При этом 1 куб.м. метана и 1 л. пропан-бутана по своей энергоотдаче эквивалентны 1 л. бензина. При больших пробегах машины применение газомоторного топлива окупается уже через несколько месяцев [16]. В особенности перевод автопарков на газомоторное топливо выгоден транспортным организациям, машины которых ежегодно преодолевают расстояния в десятки тысяч километров. Стоит также отметить, что в городах с развитой газозаправочной инфраструктурой значительная часть такси оснащена ГБО. При этом таксисты-частники с большим энтузиазмом переводят свои автомобили на газ. При больших пробегах автомобилей такси экономия на топливе становится более чем значительной.

По результатам сравнительного экономического анализа тягачей КамАЗ 65209 и Daupin CGC4253 6x4 CNG был получен вывод, что срок окупаемости газового тягача меньше на 1,25 года, чем срок окупаемости дизельного тягача

[57].

Таким образом, экономическая выгода от эксплуатации газомоторных ТС очевидна, но стоит также учитывать необходимость наличия соответствующей инфраструктуры и компетенций у обслуживающего персонала.

1.1.4 Газозаправочная инфраструктура

Если АГНКС в крупных городах и на федеральных трассах достаточно распространены [56], то КриоАЗС для заправки ТТС СПГ встречаются редко. Рассмотрим газозаправочную инфраструктуру сжиженного природного газа более подробно. СПГ – это природный газ, охлажденный до температуры сжижения (минус 162°C). Технология сжижения природного газа включает многоступенчатую очистку от примесей: кислорода, серы, азота, диоксида углерода, воды, ртути и других. В результате получается высокоочищенное топливо, сжигание которого приводит к значительному снижению вредных выбросов. К тому же, СПГ можно, при необходимости, регазифицировать в КПП. В сравнении с бензиновыми ДВС, метановые двигатели выделяют в 2-3 раза меньше CO₂, а по сравнению с дизельными – на 90% меньше оксидов азота (NO_x). Кроме того, выхлопы двигателей на метане не содержат сажи и соединений серы, что снижает уровень задымленности и загрязнения воздуха в разы.

СПГ - энергоноситель с наибольшей энергетической эффективностью. При сжижении природный газ переходит в жидкое состояние, при этом его объем уменьшается в 600 раз[4], что позволяет сократить габариты системы хранения топлива, увеличить грузоподъемность и запас хода от одной заправки для транспортных средств, а также позволяет увеличить моторесурс двигателей автомобилей и снизить уровень шума. Процесс сжижения газа является многоступенчатым: на каждом этапе его сжимают в 5–12 раз, охлаждают и направляют на следующую ступень. Непосредственное превращение в жидкость происходит при финальном охлаждении после последнего цикла

сжатия. Данная технология энергозатратна и требует до 25% от общего энергopotенциала полученного СПГ [95].

Процесс заправки бака СПГ занимает почти столько же времени, как и заправка бензином или дизельным топливом, при этом запас хода на одной заправке для магистральных тягачей достигает более 1 400 км.

На сегодняшний день одним из главных препятствий для повсеместного использования транспорта, работающего на СПГ, является дефицит газозаправочной инфраструктуры, который сдерживается жесткими нормативными требованиями к подобным проектам, что приводит к увеличению сроков строительства и конечной стоимости объекта. Принимая во внимание данное обстоятельство и используя накопленный опыт в реализации криогенных проектов, компания «Криогазтех» г. Санкт-Петербург совместно с компаниями «Газсервискомполит» и «Регаз», а также ведущими российскими и международными производителями и поставщиками комплектующих, разработала и внедрила в эксплуатацию линейку мобильных решений, позволяющих осуществлять заправку транспортных средств СПГ в местах, удобных для конечного потребителя. При этом существенно снизив сроки и стоимость создания объектов газозаправочной инфраструктуры СПГ [88,106].

Среди реализованных ООО «Криогазтех» решений можно выделить криогенный передвижной автоматический газовый заправщик (КриоПАГЗ), передвижную газозаправочную установку (ПГЗУ), модульную газозаправочную установку (МГЗУ) и модульную установку разгрузки криогенных емкостей (МРКЕ). КриоПАГЗ предназначен для приема СПГ на объекте производства, его хранения, транспортирования по дорогам общего пользования и осуществления заливок СПГ в криогенные баки автотранспортных средств, использующих СПГ в качестве моторного топлива.

КриоПАГЗ оборудован арматурным шкафом, где помимо криогенных трубопроводов с технологической арматурой и систем безопасности, расположены погружной криогенный насос и измерительный комплекс СПГ, который

полностью обеспечивает функционал заправочной колонки СПГ и имеет сертификат о внесении в реестр средств измерений, что позволяет вести коммерческий учет отпущенного СПГ в бак потребителя. В зависимости от потребностей конечного потребителя, КриоПАГЗ может быть расположен на шасси полуприцепа или на шасси автомобиля, а объем перевозимого СПГ варьируется от 10 до 50 м³ .



Рисунок 1.1. Передвижная газозаправочная установка (ПГЗУ)

ПГЗУ по своему функционалу практически не отличается от описанного выше решения. Единственным отличием является компоновка всего оборудования в форм-факторе стандартного интермодального 20 или 40 ft танк-контейнера. Высокое качество изготовления и применяемых материалов подтверждаются не только сертификатами ТРТС, но и международным сертификатом компании Bureau Veritas. Данное решение в первую очередь будет интересно для компаний со сложной схемой доставки СПГ до объекта потребления за счет возможности транспортировки танк-контейнера различными видами транспорта. Максимальный объем транспортируемого СПГ составляет 41 м³ с учетом коэффициента заполнения криогенного резервуара.

МГЗУ имеет идентичный функционал, что и на стационарных КриоАЗС. Однако, благодаря своей компактности и модульной конструкции, может быть в короткие сроки передислоцирована и развернута практически на любой АЗС или иной небольшой площадке, производственных и складских комплексах. К достоинствам МГЗУ так же можно отнести использование двухблочного криогенного резервуара хранения, изготовленного в соответствии с требованиями СП156.13130.2014[98]. Большой кавитационный запас для криогенного насоса за счет верхнего расположения модуля хранения, возможность заправки холодным и сатурированным СПГ и возможность размещения модуля заправки СПГ-КПГ при компоновке оборудования в габаритах стандартных 40ft танк-контейнеров.



Рисунок 1.2 Модульная газозаправочная установка (МГЗУ)

МРКЕ предназначена для осуществления заливок СПГ в криогенные баки транспортных средств с помощью криогенного насоса. Для учета отгружаемого СПГ предусмотрен измерительный комплекс сжиженного природного газа. Данный модуль включает в себя все необходимое для безопасной

эксплуатации и управления технологическими процессами на объекте заправки и требует лишь подключения к сетям электроснабжения. Запуск данного модуля при его релокации на другое место занимает несколько часов и не требует специальных условий для установки на площадке размещения.



Рисунок 1.3 Модульная установка разгрузки криогенные емкости (МРКЕ)

Основным преимуществом МРКЕ является то, что он использует в качестве системы хранения СПГ транспортную емкость, т.е. отсутствует необходимость установки стационарной емкости хранения, что снижает нормативные требования к объекту заправки СПГ. Подобные решения актуальны для мест периодической заправки СПГ, а также для использования в качестве резервных модулей при остановке стационарных КриоАЗС на техническое обслуживание или ремонт.

С целью обеспечения максимальной безопасности объекта заправки СПГ, все оборудование укомплектовано датчиками-газоанализаторами, системой электроснабжения и пожарной сигнализацией. В состав пожарной сигнализации входит взрывозащищенный извещатель пламени, имеющий малое время срабатывания, необходимое для поддачи сигнала «ПОЖАР». Щит автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) выполнен во взрывозащищенном исполнении и оборудован системой освещения и обогрева.

Стоит также отметить, что применение мобильных решений не требует возведения капитальных сооружений для организации процесса заправки транспорта, что существенно снижает затраты на строительство и сроки ввода объектов в эксплуатацию.

1.1.5 Безопасность эксплуатации и взрывозащищенность

Распространено заблуждение о повышенной взрывоопасности автомобилей на газовом топливе. Однако официальная классификация МЧС РФ [78] показывает иную картину: если бензин относится к третьему классу пожароопасности, то пропан-бутановая смесь - ко второму.

Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
Ацетилен	Акрилонитрил	Ацетальдегид	Бензол
Винилацетилен	Акролеин	Ацетон	Декан
Водород	Бутан	Бензин	о-Дихлорбензол
Гидразин	Бутилен	Винилацетат	Додекан
Изопропилнитрат	Бутадиен	Винилхлорид	Метан
Метилацетилен	1,3-Пентадиен	Гексан	Метилбензол
Нитрометан	Пропан	Изооктан	Метилмеркаптан
Окись пропилена	Пропилен	Метиламин	Метилхлорид
Окись этилена	Сероуглерод	Метилацетат	Окись углерода
Этилнитрат	Этан	Метилбутилкетон	Этиленбензол
	Этилен	Метилпропилкетон	
	Эфиры:	Метилэтилкетон	
	диметиловый	Октан	
	дивиниловый	Пиридин	
	метилбутиловый	Сероводород	
		Спирты:	
	Широкая фракция	метиловый	
	легких углеводо	этиловый	
	родов	пропиловый	
		амиловый	
		изобутиловый	
		изопропиловый	
		Циклогексан	
		Этилформиат	
		Этилхлорид	

Рисунок. 1.4. Классификация горючих веществ

Метан (основной компонент КПГ) обладает наивысшим - четвертым классом безопасности, что делает его самым безопасным из распространенных автомобильных топлив. Наглядное сравнение классов опасности различных топлив представлено на рисунке 1.4.

При рассмотрении вопросов пожарной безопасности сжиженных углеводородных газов следует отметить, что существующая в России инфраструктура из 3,5 тысяч газозаправочных станций и соответствующий парк автомобилей с пропан-бутановым оборудованием успешно эксплуатируются без зарегистрированных случаев самовозгорания или взрывов. Это подтверждает относительную безопасность СУГ, хотя метан в этом отношении обладает еще более высокими показателями и может рассматриваться как предпочтительный вариант газомоторного топлива с точки зрения пожарной безопасности.

Однако наряду с очевидными преимуществами перехода на газомоторное топливо существуют и существенные недостатки. В процессе заправки автомобилей компримированным природным газом наблюдаются утечки метана - мощного парникового газа, что связано с несовершенством существующих технологий заправки. Конструкция баллонных систем для метана предполагает использование нескольких крупногабаритных баллонов, что приводит к увеличению снаряженной массы транспортного средства и сокращению полезного объема салона или багажного отделения. В связи с этим, в сегменте легковых автомобилей более широкое применение нашли системы, работающие на сжиженном углеводородном газе (СУГ). Метановое топливо является экономически целесообразным решением главным образом для коммерческого и грузового транспорта, где имеются достаточные возможности для размещения габаритного газобаллонного оборудования.

Дальнейшее развитие газомоторного топлива требует решения ряда важных задач: создания разветвленной сети метановых заправочных станций, организации специализированных сервисных центров для технического обслуживания газобаллонного оборудования, а также разработки экологических методов утилизации отработанных масляных фильтров и других сопутствующих материалов [66].

Говоря о СПГ, отметим, что транспорт на СПГ в нашей стране встречается редко. И этому есть ряд причин: для заправки таких автотранспортных средств нужны специальные КриоАЗС, а для хранения СПГ в баке автомобиля

необходимо поддерживать постоянную температуру не выше 162°C. Это накладывает определенные требования на транспортное средство. Для эффективности использования СПГ автотранспортное средство должно постоянно находиться в рабочем состоянии и простои такой техники не должны превышать 4-5 дней, так как по истечении этого времени для поддержания физических характеристик и параметров топлива внутри криобака, метан начинает стравливаться в атмосферу. Также, необходимо наличие КриоАЗС или передвижного заправщика, во избежание «осушения» ТС. По этим причинам СПГ распространен достаточно мало, его можно встретить на некоторых дальнемагистральных перевозках и в частных локализованных автопарках со специальной приспособленной под эксплуатацию на СПГ техникой.

Обеспечение взрывозащищенности.

Существует устойчивое заблуждение об опасности природного газа. На самом деле, в силу своих физических свойств метан, в соответствии с классификацией горючих веществ МЧС РФ [78], относится к наиболее безопасному 4 классу, так как он легче воздуха и при утечках быстро улетучивается в атмосферу, имеет очень высокую температуру самовоспламенения, а взрывоопасная концентрация достигается только при достаточно большой доле газа в воздухе. Наглядная информация с характеристикой пожароопасности популярных видов топлива представлена на рисунке 1.5

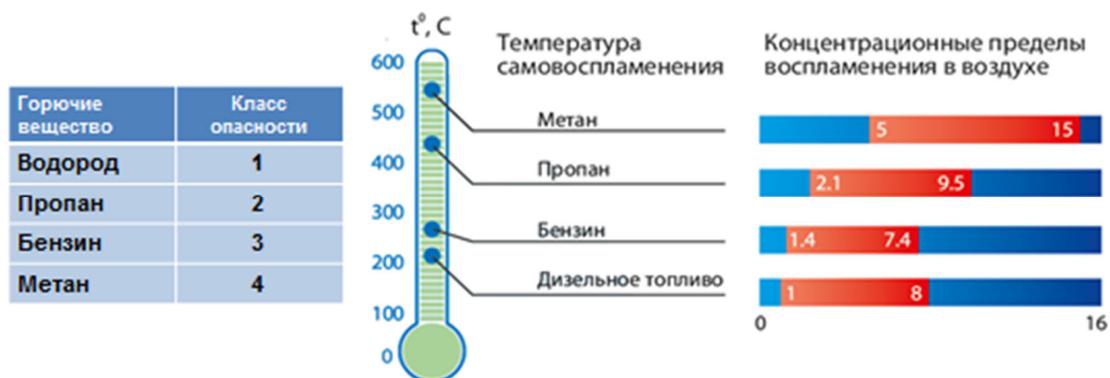


Рисунок 1.5. Пожароопасность популярных видов топлива

Еще одним направлением обеспечения производственной безопасности является цифровизация документооборота, так называемый электронный документооборот (ЭДО). За счет цифровизации документооборота организаций, эксплуатирующих автопарки машин, достигается задокументированность и отчетность всех ситуаций, возникающих во время производства работ и в дальнейшем возможно учитывать эти данные для минимизации рисков и обеспечения производственной безопасности. Более подробно вопрос внедрения ЭДО рассмотрен в статье [67].

1.1.6 Методологическая база оценки и выбора дорожных и коммунальных машин

В каждой существующей методике есть концепция, т.е. некая идея, опираясь на которую, автор, или группа авторов, описывают методы, применяемые для оценки или выбора определенной машины или группы машин.

В монографии Репина С.В. «Надежность и эффективность эксплуатации транспортно-технологических машин» [86] основной концепцией является **надежность** машин. В монографии исследуются теоретические и практические проблемы обеспечения работоспособности транспортно-технологических машин (ТТМ) средствами технической эксплуатации. Изложена методология создания системы управления работоспособностью ТТМ. Разработаны математические модели для описания методик управления процессами формирования парков, технического обслуживания и ремонта ТТМ, материально-технического обеспечения, показаны методы оптимизации.

В учебном пособии Баловнева В.И. «Определение оптимальных параметров и выбор дорожно-строительных машин методом анализа четвертой координаты» [13] для выбора строительных машин применен обобщенный **метод анализа и минимизации математических моделей четвертой координаты** (продолжительности) рабочего процесса или цикла транспортно-технологических машин. Выбор строительных машин различных функциональных

групп осуществляется, опираясь на этот обобщенный метод. Автор рекомендует данное пособие для студентов, аспирантов, инженеров и научных сотрудников.

В автореферате диссертации на соискание ученой степени д.т.н. В. Н. Иванова «Концепция эффективного использования парка машин дорожно-строительных организаций» [39]. Ключевым критерием выбора техники служит ее **эффективность**. Для ее оценки автором разработана экономико-математическая модель, позволяющая определить оптимальную структуру парка дорожно-строительных машин с учетом требований к проведению профилактических работ и их влияния на производственную эксплуатацию.

Существует методика оценки влияния типа двигателя гибридных автомобилей на их экономичность и экологическую безопасность, описанная В. А. Раковым и А. А. Капустиным [43], метод оценки экономической эффективности гибридных автомобилей В. А. Ракова [80], учебное пособие, анализирующее выбор силовой установки в гибридной машине С. В. Гусакова [33], методика расчета расхода энергии гибридного автомобиля, описанная в трудах Трофименко Ю. В. [102].

Существующие методы и методики по оценке и выбору дорожных и коммунальных машин, и схожие с ними, не описывают возможность применения гибридной силовой установки в составе с газовым двигателем внутреннего сгорания, и не предоставляют оценки целесообразности применения такой конструкции. У таких машин существенно меняются эксплуатационные затраты. Также необходимо учитывать другой порядок ТО (техническое обслуживание), условия заправки топливом, статистику отказов, расходы на переоборудование или производство и прочие параметры для данных типов машин.

В современной России и ближайшем будущем, с ростом спроса на газовые виды топлива и увеличением количества машин, работающих на нем, метод оценки возможности применения гибридного силового блока (силовой установки) с газовым двигателем будет актуален.

Еще одна большая проблема некоторых существующих методик заключается в том, что они разработаны, опираясь на документы и стандарты многолетней давности. В конце 2020 года вышел указ правительства об отмене старых стандартов [71]. Поэтому методики, ссылающиеся на старые нормы, стандарты и акты можно считать неактуальными.

1.2 Применение газового топлива на транспорте

В Российской Федерации задан курс на расширение производства и сбыта природного газа. Об этом свидетельствуют различные государственные программы: Подпрограмма «Развитие рынка газомоторного топлива» государственной Программы Российской Федерации «Развитие энергетики» в перспективе до 2030 года [73]; Постановление Правительства РФ от 13 мая 2020 г. № 669 (в редакции от 19.08.2023 № 1354) «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета производителям техники, использующей природный газ в качестве моторного топлива» [72]; Постановление Правительства РФ от 10.09.2016 N 903 (ред. от 06.05.2024) О порядке разработки и реализации межрегиональных и региональных программ газификации жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и иных организаций [70] и др.

Также, взят курс на внешние рынки сбыта газового топлива. По данным международной группы поставщиков СПГ – «GIIGNL», на 2019 год Россия занимает 4-е место среди экспортеров данного вида топлива [3]. При этом в нашей стране уже существуют, строятся и запланированы крупные строительные СПГ проекты [17].

Крупнейшими СПГ проектами являются «Сахалин-2» (оператор — «Газпром»), «Ямал СПГ» (ведущая роль у «НОВАТЭК») и введенный в эксплуатацию в 2019 году завод «Высоцк СПГ» от компании «Криогаз».

Строящиеся СПГ-проекты: «Арктик СПГ-2», «Портовая СПГ», «Балтийский СПГ» в Усть-Луге.

Будущие СПГ-проекты: «Обский СПГ», «Арктик СПГ-1», Якутский СПГ, «Дальневосточный СПГ», «Печора СПГ», «Кара-СПГ», «Амурский СПГ»



Рисунок 1.6 Проекты по производству СПГ в России на 2020-2030 г.

Согласно оценкам Минэнерго, к 2035 году Россия может нарастить производство СПГ до 80–140 млн тонн. Реализация заявленных проектов позволит стране занять 20–25% мирового рынка. Однако долгосрочный рост столкнется с глобальной декарбонизацией. В то время как спрос на газ в Европе к 2040 году может сократиться вдвое, азиатский рынок, отказываясь от угля, станет новым драйвером роста [20]. Новая тактика России предполагает интеграцию производства СПГ в развитие газотранспортной системы (ГТС), что позволит задействовать мощности ключевых заводов (Балтийский СПГ, Амурский ГПЗ и др.) и использовать весь потенциал инфраструктуры.

Общая картина СПГ проектов России графически представлена на рисунке 1.6.

Глобальный переход на «голубое топливо» - мировой тренд. Статистика работающих и запланированных заводов по производству СПГ в мире представлена на рисунке 1.7.

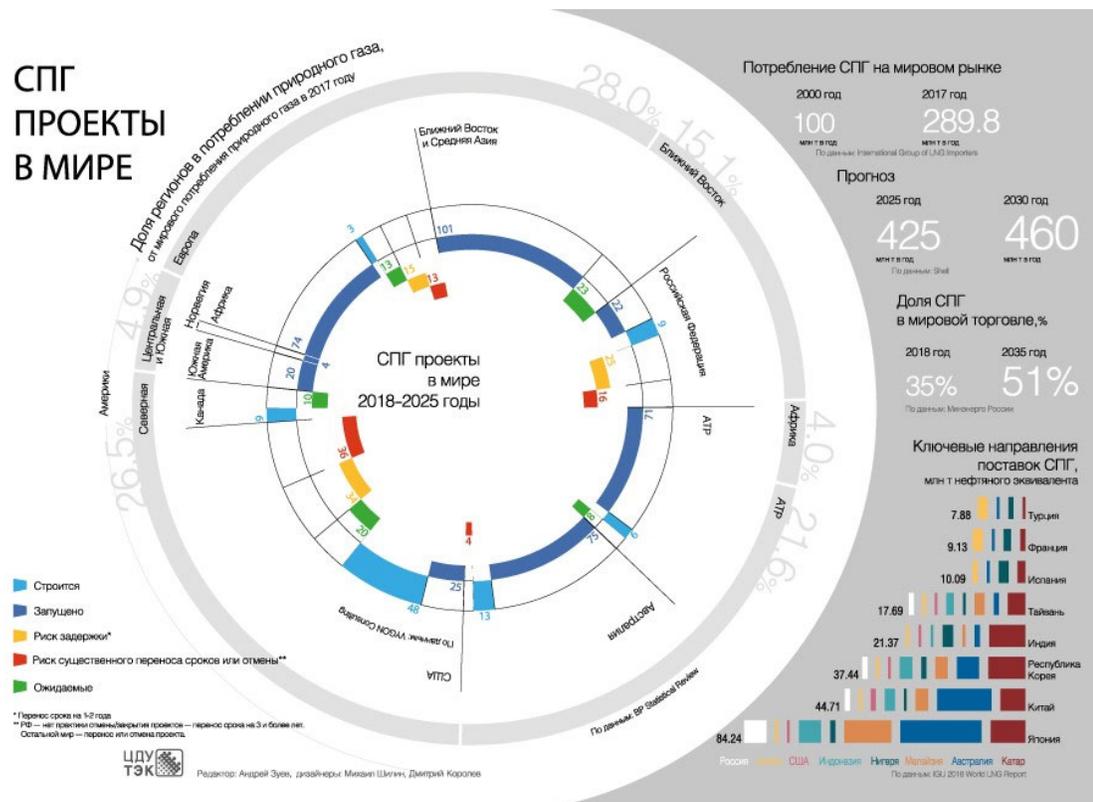


Рисунок 1.7. СПГ проекты в мире 2018-2025 г.

Запуск новых СПГ-заводов позволит России войти в число крупнейших мировых производителей сжиженного газа и составить конкуренцию действующим лидерам — Катару, Австралии и США [17].

Применение газового топлива на транспорте – одна из составляющих государственного вектора по расширению производства и сбыта газового топлива.

1.2.1 Программы субсидирования газомоторной техники

В рамках исполнения поручений Президента от 11.06.2013г. №Пр-1298 и распоряжения Правительства Российской Федерации от 13.05.2013г. №767-р [76] федеральные органы власти, нефтегазовые компании и производители техники ведут масштабную работу по развитию рынка газомоторного топлива и созданию необходимой заправочной инфраструктуры.

Большинство регионов утвердили и реализуют программы перевода

транспорта на природный газ, включая обновление автопарков. Ключевым инструментом государственной поддержки выступает предоставление федеральных субсидий. Эта мера особенно актуальна, поскольку высокая стоимость газомоторной техники по сравнению с обычной является основным сдерживающим фактором

4 февраля 2021 г. было утверждено Постановление № 115, о правилах предоставления субсидий из федерального бюджета производителям газомоторной техники [75]. Постановление содержит правила предоставления и размер субсидирования.

Для субсидирования необходимо, чтобы ТС соответствовало следующим критериям:

- возраст техники не более года;
- экологический класс не ниже Евро-5;
- техника зарегистрирована в соответствии с законодательством;
- производитель техники – отечественная компания;
- отсутствие у производителя задолженностей перед государством.

В случае реализации техники в субъектах РФ, входящих в состав Дальневосточного федерального округа, субсидия предоставляется в двукратном размере. В случае установки битопливных двигателей субсидия предоставляется в размере 50 процентов от указанного предельного размера субсидии.

Перечень ТС, попадающих под субсидирование и размер скидки для них представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Перечень газомоторной техники, подпадающей под субсидирование

Категория ТС	Скидка для ТС на КПГ, руб. без НДС	Скидка для ТС на СПГ, руб. без НДС
Автобусы		
Автобусы категории М2, технически допустимая максимальная масса которых не превышает 5 тонн и которые имеют более 8 мест	105000	300000

Окончание таблицы 1.2

Автобусы категории М3, технически допустимая максимальная масса которых превышает 5 тонн и которые имеют более 8 мест для сидения, длиной до 10 метров	525000	1500000
Автобусы категории М3, технически допустимая максимальная масса которых превышает 5 тонн и которые имеют более 8 мест для сидения, длиной свыше 10, но не более 16 метров	980000	2800000
Автобусы категории М3, технически допустимая максимальная масса которых превышает 5 тонн и которые имеют более 8 мест для сидения, длиной свыше 16 метров	1190000	3400000
Транспортные средства категорий 1, 2, 3, в том числе повышенной проходимости категории G, а также специализированные транспортные средства указанных категорий		
Транспортные средства полной массой не более 3,5 тонны	115000	300000
Транспортные средства полной массой свыше 3,5 тонны, но не более 8 тонн	225000	900000
Транспортные средства полной массой свыше 8 тонн, но не более 11 тонн	450000	1800000
Транспортные средства полной массой свыше 11 тонн	750000	2500000
Легковые автомобили		
Транспортные средства категории М1, в том числе повышенной проходимости категории G, а также специальные и специализированные транспортные средства указанной категории	115000	260000

1.2.2 Нормативные базы, регламентирующие работу коммунальных машин

Для коммунальных машин, производящих уборку твердых коммунальных отходов (ТКО) предусмотрен определенный временной интервал работы, регламентируемый СанПиН 2.1.3684-21: «Хозяйствующий субъект, осуществляющий деятельность по сбору и транспортированию ТКО, обеспечивает вывоз их по установленному им графику с 7.00 до 23.00 часов» [94]. Таким образом, максимальная суточная продолжительность работы коммунальной машины – мусоровоза в городских условиях составляет 16 часов.

Вывоз снега является исключением в законе Санкт-Петербурга о тишине. Исключение описано в пункте 4 статьи 8 Закона Санкт-Петербурга от

31.05.2010 N 273-70 [37]. Для всех остальных видов шумных работ устанавливается запрет на их проведения в ночное время: в период с 22.00 до 8.00 часов. Таким образом, максимальная суточная продолжительность работы коммунальной машины в городских условиях составляет 14 часов, если эта машина не осуществляет уборку снега и не вывозит ТКО.

Нормативно-правовая база для перевода ТС на ГБО.

Порядок регистрации переоборудованных на газобаллонное оборудование (ГБО) транспортных средств описан в 4-м разделе V главы Технического регламента Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» (ТР ТС 018/2011) [101] и Постановлении Правительства РФ (ПП РФ) от 6 апреля 2019 года №413 «Об утверждении Правил внесения изменений в конструкцию находящихся в эксплуатации колесных транспортных средств и осуществления последующей проверки выполнения требований технического регламента Таможенного союза "О безопасности колесных транспортных средств" [74].

Процесс перевода автомобиля на ГБО состоит из нескольких этапов. Рассмотрим эти этапы подробнее.

Этап 1. Получение заключения предварительной технической экспертизы конструкции транспортного средства на предмет возможности внесения в нее изменений и установки ГБО.

Проведение технической экспертизы проводится исключительно аккредитованными испытательными лабораториями или их представителями, оформляется на официальном бланке с индивидуальным номером.

Этап 2. Получение разрешения из ГИБДД, позволяющее установить ГБО.

Для получения разрешения нужно написать заявление на установку ГБО в отделение ГИБДД, в котором имеется отдел по технадзору.

Этап 3. Переоборудование ТС и оформление декларации производителя работ.

Декларация производителя работ по установке на транспортное средство ГБО заполняется и подписывается установщиком оборудования. Также, собственнику установщик выдает:

- копии сертификатов соответствия на используемые для переоборудования компоненты и баллон;
- паспорт на баллон (-ы);
- свидетельство о проведении периодических испытаний ГБО, установленного на ТС по форме 207 [47];
- свидетельство о соответствии ТС, с установленным на него ГБО, требованиям безопасности по форме 2а [25].

Этап 4. Оформление диагностической карты.

Необходимо пройти технический осмотр транспортного средства с внесенными изменениями в его конструкцию и оформить диагностическую карту. В примечании диагностической карты необходимо указать вносимые изменения. В данных транспортного средства необходимо и указать измененную массу ТС без нагрузки.

Этап 5. Оформление протокола проверки безопасности конструкции транспортного средства после внесенных в нее изменений.

Протокол оформляется в аккредитованной испытательной лаборатории.

Этап 6. Выдача свидетельства о соответствии ТС с внесенными в его конструкцию изменениями требованиям безопасности.

Для осуществления проверки и получения свидетельства владелец транспортного средства или его доверенное лицо представляет в подразделение Госавтоинспекции, выдавшее разрешение на Этапе 2, транспортное средство с внесенными в его конструкцию изменениями и весь пакет документов, собранных ранее.

Этап 7. Внесение данных в ПТС и оформление СТС.

В течение 10 суток после получения свидетельства на Этапе 6 владельцу транспортного средства необходимо обратиться в подразделение Госавтоин-

спекции, предоставляющее государственную услугу по регистрации автотранспортных средств, для внесения изменений в регистрационные данные транспортного средства. Все собранные ранее документы понадобятся на этом этапе.

Необходимые для внесения изменений в конструкцию ТС документы и формы можно найти в Приложении № 2 к Приказу МВД России от 7 декабря 2000 г. [79].

1.2.4 Направления развития газомоторного транспорта

Ключевые условия для развития газомоторного транспорта в России:

1. Инфраструктурное развитие: строительство новых газозаправочных станций (АГНКС и КриоАЗС).
2. Финансовая поддержка потребителей: субсидирование установки ГБО на существующие автомобили; льготы при покупке новых газомоторных транспортных средств.
3. Просветительская работа: разработка информационных кампаний о реальных рисках и преимуществах газового топлива.
4. Экономическое стимулирование: поддержание ценовой привлекательности газа относительно бензина/дизеля.
5. Законодательное регулирование: адаптация нормативной базы под современные требования к ГБО.
6. Сервисное обеспечение: формирование сети специализированных станций техобслуживания.
7. Экологический контроль: повышение экологических стандартов для эксплуатируемых ТС.

Широкое распространение газомоторного топлива в России зависит от комплексной реализации этих мер [65].

1.3 Существующие решения применения гибридного силового блока

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.

1.3.1 Виды гибридных силовых блоков

В гибридных автомобилях передача энергии от первичного источника энергии на ведущий вал колес может быть реализована по одной из нескольких схем: последовательной, параллельной или смешанной. Подробно виды гибридных силовых блоков с расчетом их основных параметров представлены в статье [112].

Гибридный силовой блок последовательного типа

В последовательной гибридной системе движение автомобиля обеспечивается электродвигателем, а малолитражный ДВС выполняет роль привода для генератора, который вырабатывает электроэнергию. Такая конструкция избавляет от необходимости использовать коробку передач и мощный двигатель внутреннего сгорания. Дополнительная зарядка аккумулятора происходит за счет рекуперации энергии при торможении.

Принцип работы заключается в том, что мощность передается на колеса через цепочку преобразований. Сначала ДВС вырабатывает механическую энергию, которая передается генератору. Генератор преобразует ее в электричество, и вместе с энергией от аккумуляторной батареи (АКБ) она питает электропривод. Тот, в свою очередь, превращает электричество во вращение колес.

Ключевая особенность последовательного гибрида – использование мало мощного ДВС, который либо работает в оптимальном режиме (с максимальным КПД), либо отключается. В случае его остановки АКБ самостоятельно обеспечивает достаточную мощность для движения. Однако это требует более мощного электродвигателя и аккумулятора, что увеличивает стоимость системы.

Наибольшая эффективность такой схемы проявляется в условиях городской езды – при частых остановках, торможениях и движении на низких скоростях.

Гибридный силовой блок параллельного типа

В параллельной гибридной системе ведущие колеса могут приводиться в движение как электродвигателем, так и ДВС. При этом электродвигатель обладает обратимым действием – при необходимости он выполняет функцию генератора. Синхронизация работы обоих двигателей осуществляется с помощью электронной системы управления. В качестве трансмиссии чаще всего применяется планетарная передача.

В отличие от последовательной схемы, ДВС работает в разных режимах, а не только на оптимальных оборотах. При разгоне электродвигатель дополняет ДВС, повышая динамику, а на постоянной скорости или при торможении – переключается в режим генерации, подзаряжая АКБ.

Преимущество параллельных гибридов – возможность использования менее емкой АКБ, поскольку основную нагрузку берет на себя ДВС, а электродвигатель лишь assisteрует ему. Кроме того, в этой схеме снижены энергопотери по сравнению с последовательным гибридом, что повышает общий КПД системы.

Однако, по экологичности и экономичности параллельная схема уступает последовательной, так как ДВС задействуется чаще и не всегда в оптимальном режиме.

Последовательно-параллельный гибридный силовой блок

Последовательно-параллельная гибридный силовой блок объединяет принципы работы обеих гибридных схем благодаря использованию отдельного генератора и планетарного делителя мощности. На начальном этапе движения и при низких скоростях автомобиль работает исключительно на электродвигателе по последовательному принципу. Когда скорость возрастает или требуется поддержание постоянного скоростного режима, в работу включается ДВС. В ситуациях, требующих повышенной мощности - при разгоне, движении в гору или других интенсивных нагрузках - система переходит в параллельный режим, задействуя одновременно и двигатель внутреннего сгорания, и электродвигатель, который дополнительно получает энергию от аккумулятора.

Особенностью данной конструкции является планетарный механизм, который выполняет функцию распределения мощности: часть энергии ДВС передается непосредственно на колеса, а часть передается на генератор. Генератор, в свою очередь, либо питает электродвигатель, либо заряжает тяговую батарею. При этом электродвигатель используется только для привода колес и рекуперации энергии торможения, что повышает общую эффективность системы. Вся работа трансмиссии постоянно контролируется и оптимизируется компьютерной системой управления, которая выбирает наиболее рациональный режим использования энергетических источников в зависимости от условий движения.

Благодаря такой комбинированной схеме ДВС может работать преимущественно в оптимальных режимах с максимальным КПД, что позволяет уменьшить его мощность по сравнению с параллельными гибридами.

Основные режимы работы гибридного силового блока

Режимы работы гибридного силового блока можно разделить на: последовательную передачу энергии на колеса только за счет АКБ, передачу энергии на колеса за счет ДВС и АКБ (только для параллельного и последова-

тельно-параллельного гибрида), заряд АКБ от ДВС и заряд АКБ за счет рекуперативного торможения. Более подробно режимы работы рассмотрены в трудах [55, 112,111].

1.3.2 Легковые гибридные автомобили

В сфере легкового машиностроения гибридные решения применяются с конца XX века. Раков В.А. в статье «Исследование автопарка гибридных автомобилей» [82] показал распределение мирового автопарка легковых гибридных автомобилей по маркам и моделям по состоянию на 2013 год. Распределение показано на рисунке 1.8.

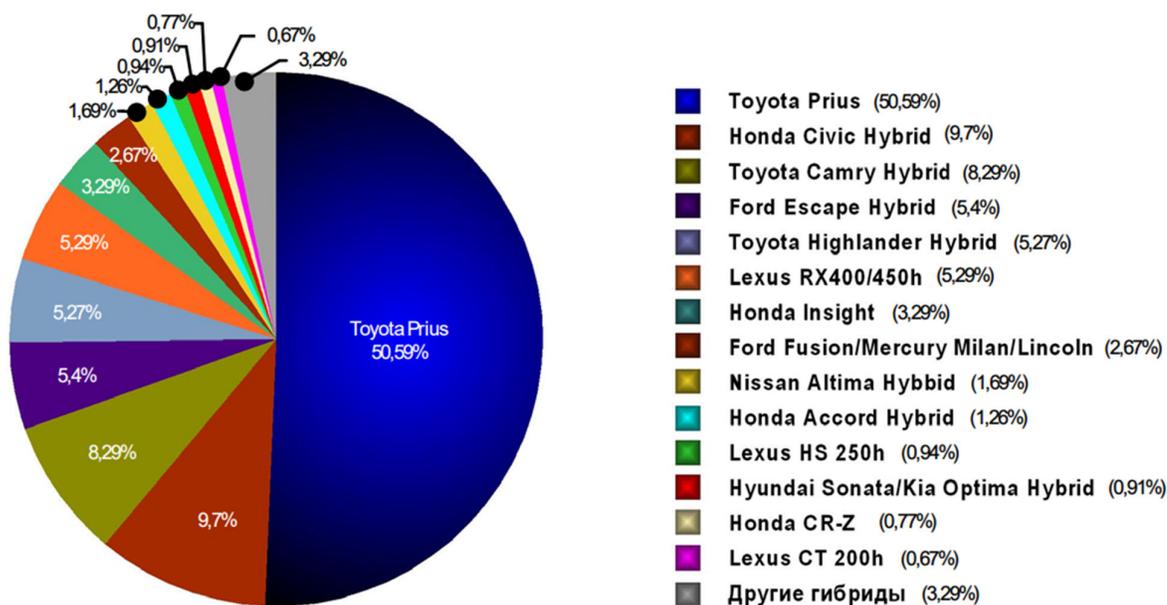


Рисунок 1.8. Распределение мирового автопарка гибридных легковых автомобилей

«На 2013 год в мире было продано более 4 млн автомобилей с гибридной силовой установкой. При этом динамика продаж является устойчивой и имеет тенденцию к росту» – сообщает автор. В период с 2010 года по 2020 мировой автопарк гибридных автомобилей увеличился более чем в 3 раза [46]. Российские исследователи В.Д. Червенчук, А.И. Забудский рассматривают конструктивные особенности гибридных силовых установок самых популярных легковых автомобилей [113].

1.3.3 Гибридные автобусы

Ряд белорусских исследователей: А. А. Дюжев, П. Л. Мариев, Л. Г. Красневский и др. в статье «Гибридные силовые установки мобильных машин - конкурентоспособное направление развития машиностроения Беларуси» [23] утверждают: «... за прошедшие полтора десятилетия именно на легковых автомобилях отработаны теория и техника, получен колоссальный практический опыт производства и эксплуатации ГСУ, что является фундаментальной научно-технической базой для их распространения на грузовые автомобили и другие виды тяжелых мобильных машин».

Белорусские авторы предлагают ближайшие перспективы для гибридных машин: автобусы. По данным [1] в 2013 году компанией Дженерал Моторс (Аллисон) выпущено более 5000 единиц гибридных автобусов. Использование на Автобусах ГСУ обосновано эксплуатацией в условиях режимов движения современного города, для которых характерны невысокие средняя и максимальная скорости, большое число остановок и малые расстояния между ними. Именно на таких режимах хорошо проявляется эффект регенеративного торможения, так как доля накопленной энергии в суммарных ее затратах на разгоны с остановки до скорости транспортного потока становится очень существенной. За счет этого достигается экономия топлива порядка 20 - 30 %, в зависимости от режима эксплуатации.

1.3.4 Гибридные грузовики

Первые гибридные автомобили Scania появились еще в 2014 году, а их запас хода составлял всего два километра. На 2023 год покупателям доступны более совершенные PHEV и NEV модели, способные преодолеть до 60 км без подзарядки.

Машины Scania комплектуются двигателем-гибридом с 9-литровым силовым агрегатом мощностью 280-360 лошадиных сил и моментом вращения

от 1400 до 1700 Н·м. В качестве еще одного варианта предусмотрен 7-литровый мотор на 220-280 «лошадей» с моментом 1000-1200 Н·м. Оба мотора соответствуют Евро-6 и способны работать на горючем HVO.

Гибридные грузовики PHEV объединяют два типа двигателей: ДВС и электрический. Представляют собой более продвинутую версию машин по сравнению с HEV. Эти варианты Скания способны автономно пройти до 60 км (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 Гибридные тягачи Scania BEV и PHEV

Канадский ученый Sina Moghadasi исследует применение гибридных силовых установок с газовыми ДВС применительно к дальнемагистральным грузовикам. Согласно исследованию [6], параллельные и последовательные схемы подключения гибридных установок с газовым ДВС позволяют улучшить топливную экономичность на 2,9% и 26% соответственно, по сравнению с грузовиком на дизельном ДВС. Также уменьшается и количество вредных выбросов. На рисунке 1.10 показана схема передачи энергии в системе соответствующих гибридов.

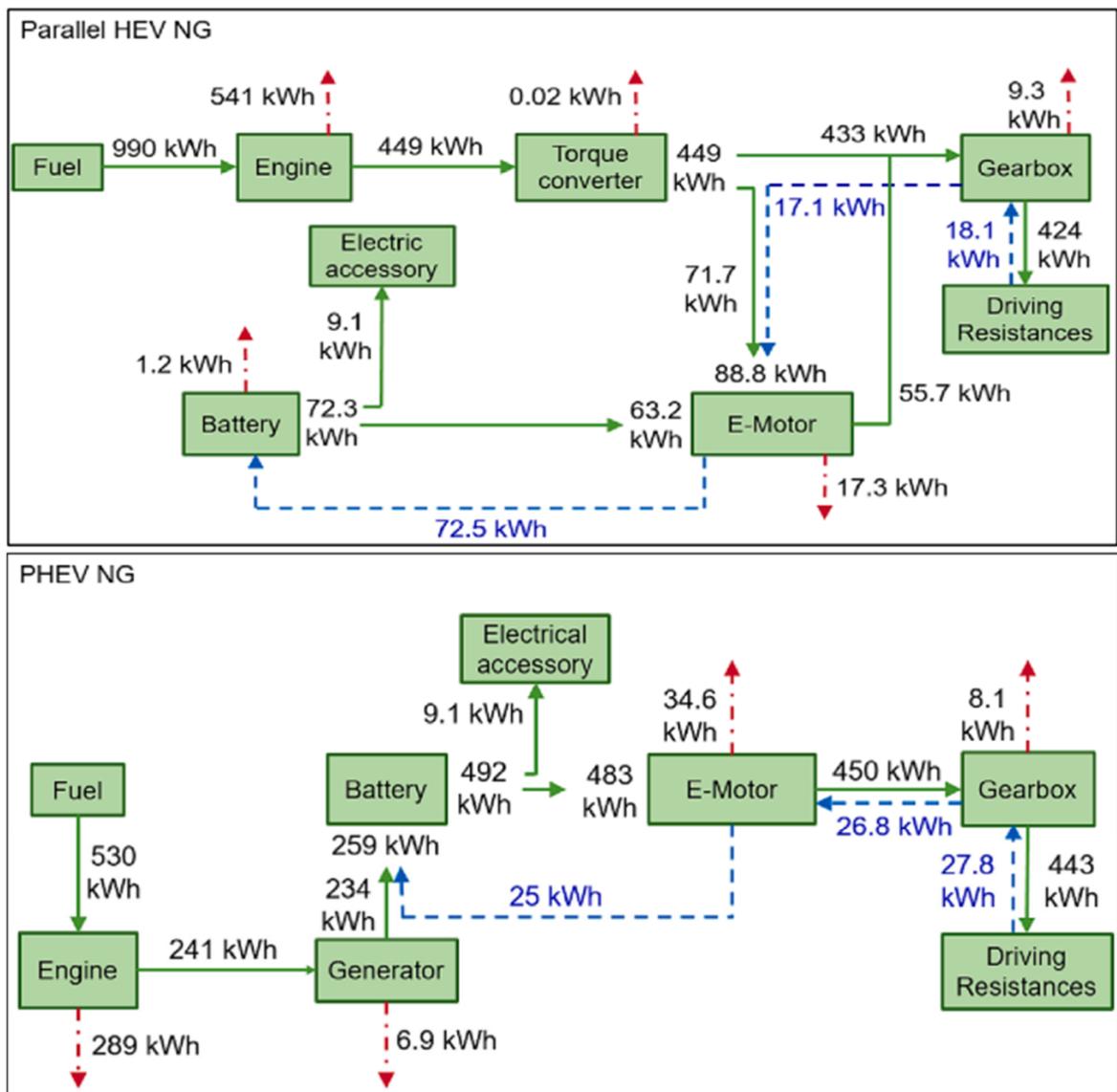


Рисунок 1.10. Схемы передачи энергии в параллельном и последовательном гибридах. Зеленая стрелка – передаваемая энергия, красная – потери энергии, синяя – энергия, генерируемая рекуперативным торможением.

Согласно результатам компьютерного моделирования [93], гибридный грузовик КамАЗ 53212 категории N3 показал снижение путевого расхода топлива на 8,63% в условиях магистрального цикла по ГОСТ Р 54810-2011 по сравнению с серийной моделью. Однако, данная экономия оказалась существенно ниже, чем у легковых автомобилей (категории M1), где гибридные решения позволяют добиться экономии в среднем на 35 – 40%.

1.3.5 Гибридные коммунальные машины

Пионером в области гибридных мусоровозов стали США, где первая такая машина вышла на маршруты в 2009 году. Вслед за этим ведущие автопроизводители, включая Mercedes-Benz, Volvo, Mack Trucks и BYD, запустили собственные разработки гибридных мусоровозов. К 2016 году только во Флориде эксплуатировалось порядка 50 единиц такой спецтехники с электрической силовой установкой.



Рисунок 1.11. Гибридный мусоровоз с боковой погрузкой Peterbilt

Современные гибридные мусоровозы отличаются разнообразием технических решений. Производители экспериментируют с различными схемами: одни модели предусматривают подключение ДВС к ведущим колесам в определенных режимах, другие используют концепцию Range Extender, где двигатель внутреннего сгорания выполняет исключительно функцию зарядки тяговой батареи, являющейся основным источником энергии для электропривода.

Особый интерес представляет разработка Peterbilt – гибридный мусоровоз с дизель-гидравлической трансмиссией Eaton. Выбор такой схемы обусловлен ее высокой топливной эффективностью в городских условиях, что подтвердилось в ходе испытаний прототипа (рисунок 1.11). Этот проект демонстрирует перспективность гибридных решений для коммунальных машин, работающей в режиме частых остановок и стартов.



Рисунок 1.12. Гибридный мусоровоз КамАЗ. Прототип.

В российском сегменте спецтехники первенство в гибридизации мусоровозов принадлежит гибридной модели на базе шасси КамАЗ-65208 (рис. 1.12). Данная разработка была анонсирована и продемонстрирована общественности в июне 2017 года и принадлежит к категории N3 [100].

В дополнение к штатному 300-сильному мотору Cummins ISB 6.7 300 на прототипе прилагается тяговый электродвигатель Bosch, развивающий максимальную мощность 120 кВт, что эквивалентно 163 л.с., и батареи, обеспечива-

ющие 8-км запас хода. Столь маленькая цифра запаса электротяги обусловлена техническим заданием – в электромобиль мусоровоз будет превращаться лишь непосредственно при работе во дворах.



Рисунок 1.13. Прототип гибридного мусоровоза Урал

В конце октября 2023 года новостными изданиями был представлен прототип гибридного мусоровоза категории N2, разработанный ООО «Автомобильный завод «Урал» совместно с Южно-Уральским государственным университетом (рисунок 1.13). Предпосылки и основные направления для разработки мусоровоза на базе шасси «Урал» опубликованы в статье «Тенденции развития коммунальных транспортных средств с электрической трансмиссией» следующих авторов: Рождественский Ю.В., Гаврилов К.В., Леванов И.Г., Дойкин А.А., Хозенюк Н.А. [100].

Сообщается, что запас хода данной машины на аккумуляторных батареях составляет 100 км, а с учетом запасенного в криобаке СПГ – более 400 км. По состоянию на 16.03.2024 г. более подробные характеристики данного мусоровоза не опубликованы.

1.3.6 Надежность гибридного силового блока

Для коммунальных машин для вывоза ТКО вопрос надежности рассмотрен В. А. Зориным [38]. Результаты показали, что наибольшее количество отказов приходится на исполнительные механизмы, имеющие гидравлический привод.

В исследовании [81] анализируется статистика отказов гибридных автомобилей Toyota Prius. На первом месте по отказам находится ДВС – 71% отказов, из них: 51% – система зажигания, 15,5% – система питания, 4,5% – ЭБУ и датчики. Эти неисправности критичны, так как автомобиль не может двигаться только на электротяге. Ресурс ДВС зависит не столько от пробега, сколько от правильной эксплуатации (например, Prius может пройти 400 тыс. км без капремонта).

На втором месте по отказам делитель мощности (PSD) – 21% отказов: проблемы со смазкой трансмиссии; неисправности зубчатых механизмов; отказы системы охлаждения трансмиссии.

На третьем месте по числу отказов находится электроника – 5,5% отказов: перегрев инвертора и обмоток статора тягового электродвигателя и генератора [113].

Для повышения надежности гибридных ТС необходимо соблюдать рекомендации по эксплуатации ТС, искать более совершенные материалы для смазки делителя мощности и исследовать эффективнее способы охлаждения электродвигателя и генератора.

1.4 Сравнение видов применяемых тяговых электродвигателей

Тяговые электродвигатели известны в традиционном исполнении: постоянного или переменного тока. В конце XX века начали все большее применение находить бесколлекторные (вентильные) электродвигатели. Для наглядного параметра, определяющего целесообразность применения того или иного

электродвигателя, далее будет рассмотрена удельная мощность, как отношение мощности электродвигателя к его массе.

1.4.1 Тяговые двигатели постоянного тока

На городском (трамваи, метро), пригородном и магистральном электро-транспорте с питанием от постоянного тока (3000 В) традиционно применяются тяговые двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением.

Если линия электрифицирована однофазным переменным током (25 кВ), двигатели также чаще всего имеют последовательное возбуждение, но иногда используются и с независимым. В последнем случае напряжение на обмотке возбуждения регулируется автоматически (обычно через управляемый возбудитель) пропорционально току нагрузки, что обеспечивает тяговые характеристики, аналогичные двигателям с последовательным возбуждением. Кроме того, независимое возбуждение позволяет реализовать рекуперативное торможение. Например, троллейбусные двигатели часто выполняются со смешанным возбуждением, включая слабую независимую обмотку [52].

Преимущество двигателей постоянного тока — простота регулировки частоты вращения.

Двигатель постоянного тока ДК 213, применяемый для привода ведущих колес троллейбуса, имеет мощность 115 кВт, работает от напряжения 600 В, имеет массу 700 кг и КПД около 90%. **Удельная мощность ДК 213 составляет примерно 164 Вт/кг.**

1.4.2 Двигатели переменного тока

Двигатели переменного тока применяются, в основном, в промышленности, где присутствует трехфазная сеть и нет необходимости проводить выпрямление тока, или наоборот, ШИМ переменного тока из постоянного.

У двигателей переменного тока максимальная частота вращения не может быть выше частоты питающей сети. Существуют асинхронные моторы,

которые питаются от сети частотой 400 Гц, они имеют более высокую удельную мощность чем те что работают от 50 Гц, но главный недостаток двигателей переменного тока - отсутствие регулировки частоты вращения.

Трехфазный двигатель Able Y2-315S-2, мощностью 110 кВт, работающий от напряжения 380/660 В, имеет массу 850 кг и КПД около 93%. **Удельная мощность Able Y2-315S-2 составляет примерно 129 Вт/кг.**

1.4.3 Бесколлекторные (вентильные) электродвигатели

Бесколлекторные электродвигатели постоянного тока (англ. brushless DC electric motor - BLDC), также называемые вентильными электродвигателями или вентильно-индукторными двигателями в современном мире получают все более широкое распространение. Таким названием обозначается синхронный мотор с ротором из постоянного магнита и электронной схемой, преобразующей постоянный ток в трехфазный переменный нужной частоты и амплитуды. Такие двигатели сочетают удобство управления скоростью (как коллекторные постоянного тока), крутящим моментом, за счет регулировки амплитуды волны (напряжения) и отсутствие изнашиваемых щеток (как асинхронные).

Далее в диссертационной работе под термином вентильно-индукторный двигатель (ВИД) будет подразумеваться бесщеточный электродвигатель на постоянных магнитах, установка, состоящая из ВИД и интегрированной системы регулируемого электропривода будет называться вентильно-индукторный привод (ВИП).

Основная функция ВИП заключается в преобразовании электрической энергии из питающей сети в механическую энергию, передаваемую исполнительному механизму. При этом система электропривода позволяет осуществлять точное управление процессом преобразования энергии, включая регулирование таких параметров как частота вращения, момент и мощность в соответствии с требованиями конкретной технологической задачи.

Управление работой ВИП реализуется посредством полупроводниковых

преобразовательных устройств, включающих выпрямитель, импульсный регулятор постоянного тока и частотный преобразователь с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В классическом исполнении ВИП представляет собой электромеханическую систему, состоящую из синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (СДПМ), силового инвертора для питания обмоток якоря и автоматизированной системы управления, оснащенной датчиками положения ротора (ДПР) [68].

Как показано на структурной схеме (рисунок 1.14), безредукторный вариант ВИП включает в себя несколько ключевых компонентов: частотный преобразователь (состоящий из инвертора и фильтра), собственно вентильно-индукторную машину, блок управления и опционально - датчики положения.

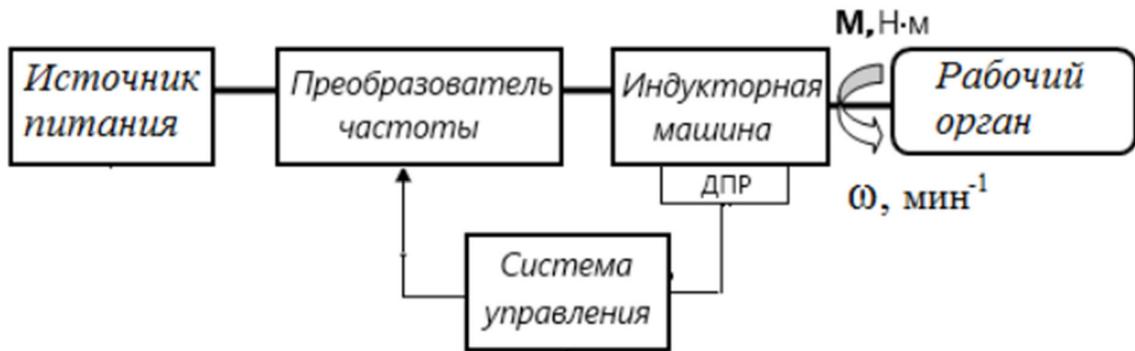


Рисунок 1.14. Структурная схема ВИП

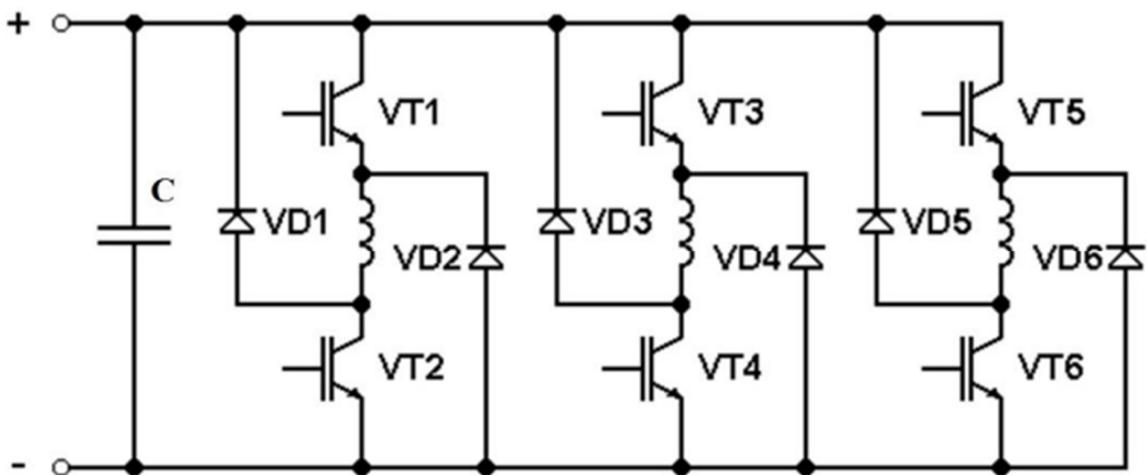


Рисунок 1.15. Схема полумостового инвертора

Преобразователь частоты генерирует однополярные прямоугольные импульсы для питания фазных обмоток двигателя. Наиболее распространенной конфигурацией является полумостовой инвертор с двумя силовыми ключами на каждую фазу (рисунок 1.15).

Алгоритм управления работой как преобразователя, так и двигателя реализуется системой управления на основе запрограммированных логических схем и сигналов обратной связи от датчиков положения [115].

Детально схемы управления СДПМ, в том числе с ШИМ, рассмотрены в диссертации Лутонина А.С. [51], в данной работе не затрагиваются.

Вентильно-индукторный двигатель ДВИТ 110, применяемых на машинах специального назначения, имеет мощность 110 кВт, работает от напряжения 300 В, имеет массу 275 кг и КПД примерно 94%. **Удельная мощность ДВИТ 110 составляет 400 Вт/кг.**

Аналогичный по назначению двигатель ВМЭД-01 имеет мощность 120 кВт, напряжение питания 300 В, массу 165 кг и КПД 96%. **Удельная мощность ВМЭД-01 составляет примерно 727 Вт/кг.**

В данном разделе посчитано, что удельная мощность электродвигателей постоянного тока находится в диапазоне 170 Вт/кг, переменного тока в диапазоне 130 Вт/кг, а современных ВИД в диапазоне 400 - 700 Вт/кг. Таким образом, ориентируясь на удельную мощность электропривода, целесообразно применение ВИД в составе ВИП.

1.5 Применение цифрового моделирования для разработки изделий машиностроения

Текущий уровень развития науки и техники позволяет создавать математические и компьютерные модели, описывающие с высокой степенью адекватности поведение изделий промышленности на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ).

Применение цифровых двойников позволяет обосновывать принятые

решения за счет быстрой проверки изменений, вносимых в конструкцию изделия и его составных частей, в ходе цифровых испытаний, и анализировать влияние изменений показателей одних составных частей на другие.

Цифровая модель создается, разрабатывается и тестируется, в соответствии с ГОСТ Р 57700.37-2021 «ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ» [31].

Цифровая модель изделия – это система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла.

Математическая модель – модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений [п. 3.1.4 28].

Компьютерная модель – это модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными [п. 3.1.7 28].

По исходным данным для тестирования цифровой модели проводятся цифровые испытания. **Цифровые испытания** – в это определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) этого объекта. Цифровые (виртуальные) испытания проводят на цифровых (виртуальных) испытательных стендах и полигонах. **В случае невозможности проведения физических (то есть нецифровых) испытаний изделия или его составных частей, цифровые (виртуальные) испытания следует проводить в обязательном порядке** [п. 6.6 31].

ГОСТ Р 57700.37–2021 представляет собой первый документ в серии национальных и отраслевых нормативов, устанавливающих требования к разработке цифровых двойников. В нем регламентируются типовые требования к их структуре, порядку сопровождения при эксплуатации изделий, а также вопросы учета и хранения данных.

Стандарты серии ГОСТ Р 57700, разработка которых началась в 2017

году, включают более 25 нормативных документов. Они формируют единую систему требований к использованию компьютерного моделирования и цифровых испытаний при создании и эксплуатации высокотехнологичной промышленной продукции, включая изделия военного назначения.

Разработка нового стандарта осуществлялась рабочей группой под руководством Центра НТИ "Новые производственные технологии" СПбПУ и РФЯЦ-ВНИИЭФ в рамках деятельности технического комитета №700, специализирующегося на вопросах математического моделирования и высокопроизводительных вычислений. Стандарт вступает в силу с 1 января 2022 года [90].

Термины и определения, применяемые в серии стандартов ГОСТ Р 57700:

адекватность модели – соответствие модели моделируемому изделию (процессу, явлению) по обоснованному перечню характеристик [п. 3.1 31];

программное обеспечение компьютерного моделирования (ПО КМ) – программы, выполняющие математические расчеты, и программы, предназначенные для подготовки исходных данных, обработки результатов расчета, а также другие вспомогательные программы. [п. 3.1.1 30];

цифровой двойник изделия (ЦД) – система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [п. 3.24 31]. Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ) изделия. Требования к разработке ЦД на каждой стадии ЖЦ изделия могут устанавливаться стандартами организаций [п. 6.1 31]. Требования к ЦД и состав отчетных документов устанавливаются заказчиком в техническом задании [п. 6.2 31]. Задачи ЦД:

- оценка научной обоснованности, тактико-технической целесообразности и технологической реализуемости разрабатываемого или готового изделия в различных условиях эксплуатации;

- возможность на различных стадиях ЖЦ изделия проследить принятые

технические решения и их обоснованность;

- обеспечение выполнения участниками процессов ЖЦ функций управления требованиями, конфигурацией и эксплуатационно-техническими характеристиками изделия;

- снижение себестоимости и сроков разработки опытных образцов и испытаний изделия и (или) его составных частей за счет проведения цифровых (виртуальных) испытаний в объеме, достаточном для подтверждения соответствия требованиям технического задания.

Далее в диссертационной работе под понятием «**цифровой двойник**» подразумевается цифровая модель коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем, проходящая цифровые испытания по заданным исходным данным.

В качестве ПО КМ предлагается использовать программную среду для математического и компьютерного моделирования - MathWorks MATLAB Simulink. Данное программное обеспечение предназначено для динамического моделирования систем, параметры которых изменяются во времени. В процессе цифровых испытаний модели система рассчитывает и визуализирует в графическом и численном виде все необходимые показатели и характеристики цифрового двойника.

Процесс работы в Simulink включает два основных этапа:

1. построение пользователем блок-схемы с определением временных математических зависимостей между входными параметрами, внутренними состояниями и выходными характеристиками системы;
2. выполнение моделирования системы в режиме реального времени.

Блок-схемы в Simulink отражают временные взаимосвязи между сигналами и переменными состояниями [34]. Решение системы уравнений, представленной блок-схемой, получается путем вычисления этих взаимосвязей на каждом временном шаге в заданном интервале моделирования. Сигналы в системе представляют собой количественные показатели, изменяющиеся во времени и

определяемые для каждого момента между началом и завершением моделирования. Математические зависимости между сигналами и переменными состояния описываются системами уравнений, заключенными в функциональные блоки [110].

Simulink предлагает пользователям обширную коллекцию специализированных дополнений, расширений и тематических библиотек, разработанных для применения в различных научных и технических областях [40].

1.6 Выводы и заключения по проведенному исследованию

Резюмируя обзорную часть первой главы, можно сделать следующие выводы:

1. Государство заинтересовано в развитии газомоторной отрасли транспортного сектора, это обосновано большими запасами природного газа в России. Также это подтверждают государственные программы по субсидированию газомоторной техники и развитию энергетики.

2. Экологическая обстановка в больших городах ухудшается, в основном, за счет транспортного сектора. Постепенный переход от традиционных машин с ДВС к электромобилям позволит сократить количеств вредных выбросов в городах и может осуществляться посредством постепенной гибридизации транспортных средств.

3. Энергоэффективность и экономичность машин – важный фактор для любой организации, эксплуатирующей транспортно-технологические средства. Использование газового топлива позволяет снизить эксплуатационные расходы организации посредством уменьшения затрат на топливо. Применение гибридных решений позволяет повысить энергоэффективность машины.

4. Один из способов решения описанных проблем транспортного сектора – применение гибридного силового блока на коммунальных машинах. Оптимальной, с точки зрения режима эксплуатации и требований по емкости

батарей, является последовательная схема гибридного силового блока. В качестве генератора и тягового электродвигателя в гибридном силовом блоке целесообразно применять вентильный электродвигатель, обладающий значительно более высокими показателями удельной мощности, по сравнению с электродвигателями постоянного или переменного тока.

5. Для снижения экологического загрязнения атмосферы города в качестве ДВС на гибридном силовом блоке предлагается применять газовый двигатель, работающий на КПП. Сжатый метан выбран ввиду того, что на эксплуатационной базе АО «Автопарк №1 «Спецтранс» уже имеется заправочная инфраструктура для заправки мусоровозов КПП. Использование метана вместо дизеля позволит сократить затраты на топливо. Дополнительно, для сокращения удельного расхода газа необходимо предусмотреть возможность заряда аккумуляторной батареи от электрической сети. В ночное время АКБ коммунальной машины заряжается, а при выезде на утреннюю смену машина первые несколько часов работает без запуска газового ДВС. Применение газового двигателя в качестве силовой установки на коммунальных машинах возможно, имеет свои преимущества и недостатки и требует более тщательного изучения.

6. Рассмотрена нормативная база по применению цифрового моделирования для разработки изделий машиностроения. Для проведения цифровых испытаний предлагается использовать методы и инструменты цифрового моделирования согласно серии государственных стандартов ГОСТ Р 57700.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПЕРВИЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОГО СИЛОВОГО БЛОКА

2.1 Границы области исследования и критерии оценки применения гибридного силового блока

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 и за счет наибольшего КПД ДВС при номинальном режиме работы. Также гибридный силовой блок обеспечивает увеличение периода автономной работы машины за счет имеющегося стартового заряда АКБ.

За основу исследования выбраны эксплуатируемые в настоящий момент коммунальные машины категории N2 (ТТС для вывоза твердых коммунальных отходов) и данные мониторинга работы этих машин. Данные мониторинга представляют собой отчеты, содержащие информацию о пройденном маршруте машин, потраченному топливу, мгновенной скорости машин каждые 2-10 сек., точкам остановок (стоянок), длительности стоянок, длительности работы стационарного ДВС на холостом ходу при перемещении между стоянками и др. Исходные данные обрабатываются с целью использования в цифровых испытаниях в специальной программной среде.

Особенность исследуемого гибридного силового блока заключается в применении газового двигателя. Газовый двигатель обеспечивает аналогичные мощностные параметры при работе в номинальном режиме, при этом достигается наибольший КПД двигателя и обеспечиваются значительно более лучшие экологические показатели за счет применения газового топлива – метана. 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.

Данные мониторинга исследуемых машин представлены в виде маршрутов, по которым проезжают коммунальные машины. Маршруты анализируются (испытываются) в цифровой модели, другими словами проводятся цифровые испытания коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем по набору реальных исходных данных. Испытываемая КМ имеет информационные связи с реальной КМ, поэтому она может быть названа цифровым двойником (ЦД), в соответствии с ГОСТ Р 57700.37-2021 «ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ» [31]. Результаты испытаний отображают графики зависимости различных параметров ЦД в зависимости от времени движения по испытываемому маршруту, такие как: скорость движения ТС, крутящий момент тягового электродвигателя, уровень заряда батареи, количество запасенной посредством рекуперации энергии, количество потребленного топлива, ток и напряжение в электрической цепи и пр.

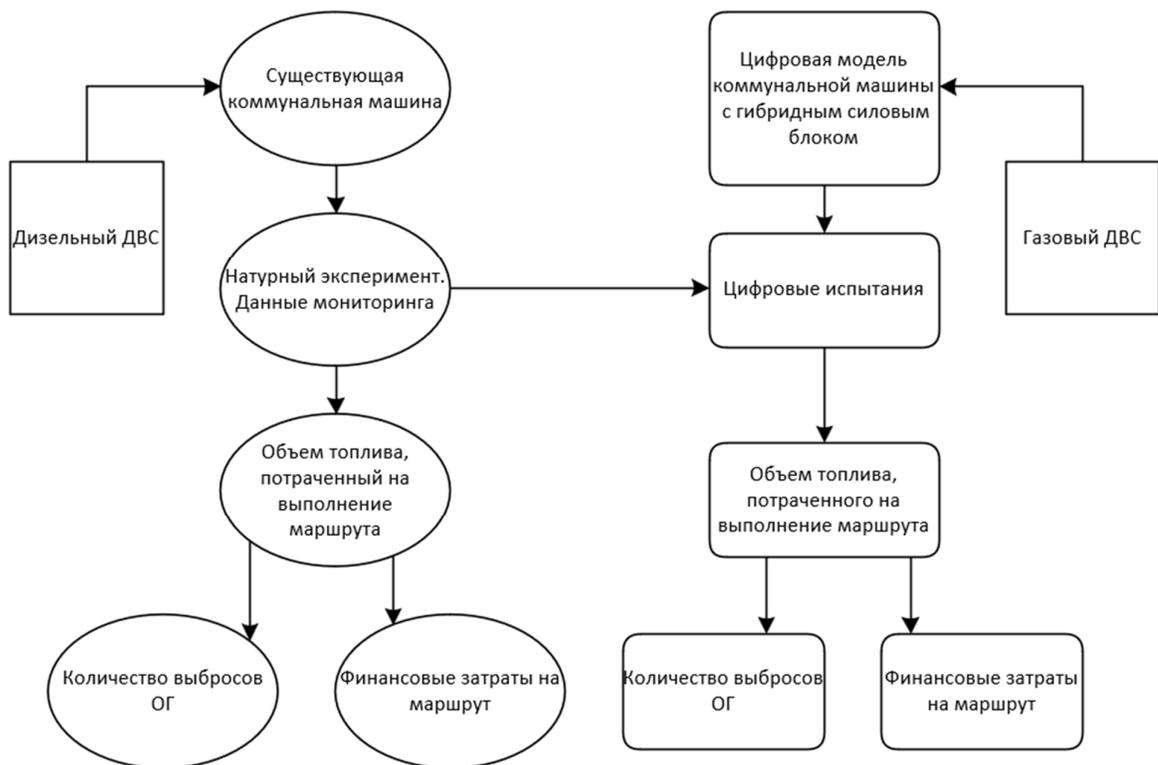


Рисунок 2.1. Границы области исследования

Общая структура границ исследования представлена на рисунке 2.1.

Критерии метода гибридизации исследуемых коммунальных машин можно разделить на глобальные и локальные. К глобальным критериям относится проблематика проводимого исследования, а именно: топливная зависимость автотранспорта от нефтепродуктов (на федеральном уровне); финансовые затраты на эксплуатацию техники (на отраслевом уровне) и экологическая обстановка в городах (на гражданском уровне). К локальным критериям 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 2.2.



Рисунок 2.2. Критерии оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на КМ

2.2 Анализ эффективности газового двигателя при различных нагрузочных режимах¹

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

2.2.1 Режим пуска

Режим пуска газового двигателя характеризуется в меру обедненной газовой смесью. При этом состав смеси изменяется в зависимости от начальной температуры ДВС:

$$1,0 \leq \alpha \leq 1,2$$

где α – коэффициент избытка воздуха.

При данном обеднении повышается температура горения газозвушной смеси и ускоряется прогрев двигателя. Обеднение до $\alpha = 1,3 \dots 1,57$ при работе на метане или пропан-бутане может привести к местным прогарам выпускных клапанов из-за повышенной температуры отработавших газов и к неустойчивому горению смеси в камере сгорания, а также к увеличению вредных выбросов и нарушению экологических норм [116]. После пуска прогрев двигателя до рабочей температуры осуществляется до 80-100°C с постепенным

¹ По итогам данного исследования автором опубликована научная статья: 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.

увеличением нагрузки [19]. Пуск газового двигателя возможен при температуре от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Не рекомендуется работа двигателя на минимальной частоте вращения холостого хода более 10-12 минут.

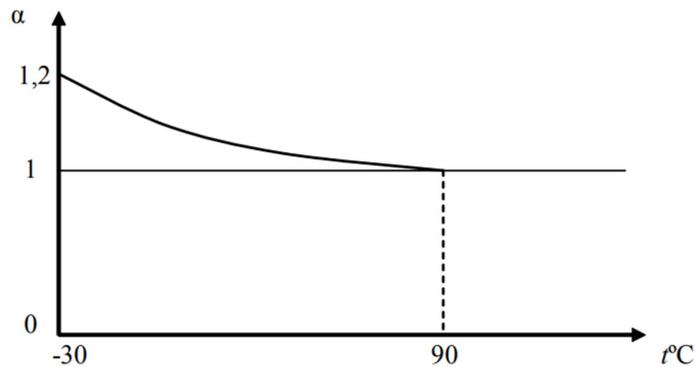


Рисунок 2.3. Изменение состава топливоздушной смеси в зависимости от температуры двигателя при пуске и прогреве на природном газе или пропан-бутане

Для сравнения, режим пуска бензинового двигателя происходит следующим образом: прогрев ДВС при работе на бензине осуществляется с соответствующим обогащением топливоздушной смеси $0,8 \leq \alpha \leq 1,0$ в зависимости от начальной температуры ДВС [116].

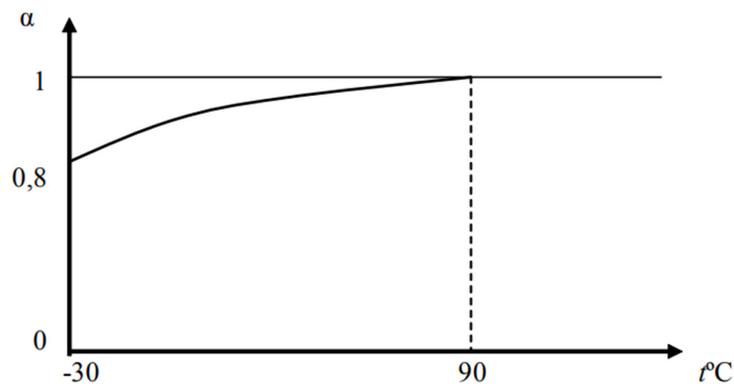


Рисунок 2.4. Изменение состава топливоздушной смеси в зависимости от температуры двигателя при пуске и прогреве на бензине

Режим пуска дизельного двигателя производится при несколько обогащенной смеси, у которой коэффициент избытка воздуха $0,85 \leq \alpha \leq 0,95$ [45].

2.2.2 Режим холостого хода

Режим холостого хода газового двигателя характеризуется наибольшим эффективным обеднением топливовоздушной смеси.

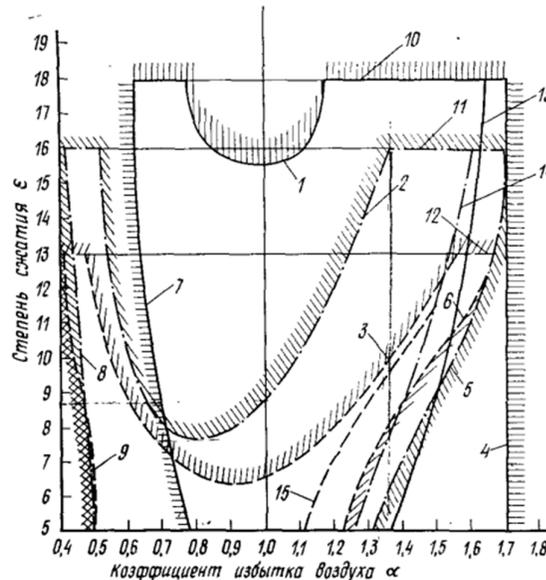


Рисунок 2.5. Диаграмма областей нормальной работы ДВС при различных видах топлива

На рисунке 2.5 показано ориентировочное положение пределов эффективного обеднения для метана, пропана и бензина (кривые 13, 14, 15 соответственно). Кривые 4, 5, 6 показывают предел обеднения по воспламенению смеси, соответственно для метана, пропана, бензина. Таким образом, наибольшее эффективное обеднение топливовоздушной смеси газового ДСВ при степени сжатия ϵ от 9 до 18 находится в диапазоне α от 1,5 до 1,57. Для сравнения, работа дизеля на холостом ходу возможна при значениях $\alpha \geq 3$.

Коэффициенты избытка воздуха в топливно-воздушной смеси, предельные по условиям воспламенения, описанные Ф. Гайнуллиным [21], представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Коэффициенты избытка воздуха в топливно-воздушной смеси, предельные по условиям воспламенения.

	Наименьший (богатый предел)	Наибольший (бедный предел)
Метан	0,65	2,00
Пропан	0,40	1,70
Природный газ	0,55-0,65	1,80-2,00
Бензин	0,30-0,35	1,65-1,75

Различие в данных строк «Метан» и «Природный газ» вызвано тем, что природный газ содержит от 70 % до 98 % метана [87], что сказывается на пределах воспламенения топливовоздушной смеси.

2.2.3 Режим средних (оптимальных) нагрузок

Анализируя график на рисунке 2.5 видно, что при $\varepsilon = 12$ в ДВС на метане максимальная экономичность достигается при $\alpha = 1,5$, а максимальная мощность при $\alpha = 1,0$. Следовательно, имеется возможность снизить мощность двигателя примерно в 1,5 раза за счет уменьшения подачи топлива, при этом топливная экономичность будет возрастать.

В зависимости от величины испытываемых нагрузок можно искать баланс стехиометрической смеси, наиболее полно удовлетворяющий условию максимальной экономичности при необходимой мощности.

2.2.4 Режим максимальных (полных) нагрузок

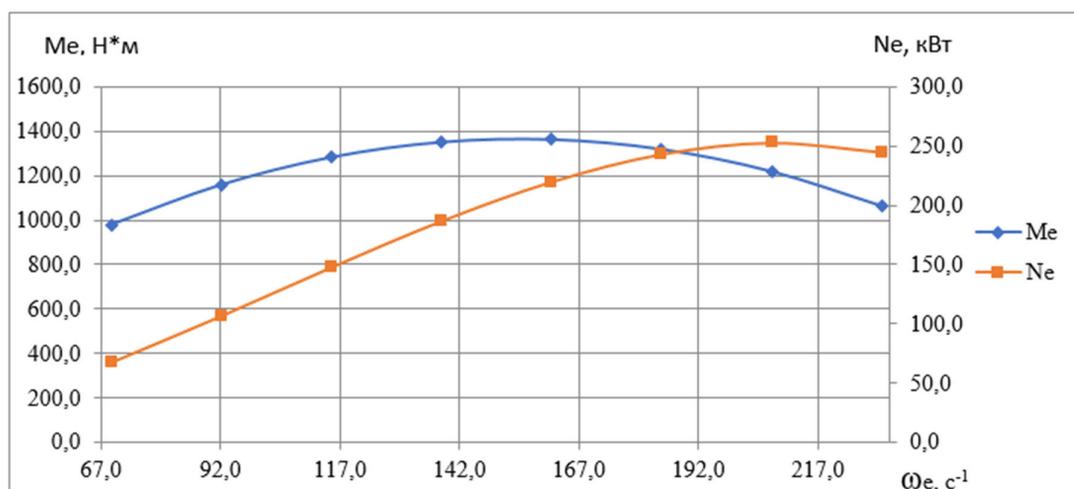


Рисунок 2.6. Внешняя скоростная характеристика газопоршневого двигателя

РГК.ЕС.820.959-340

Рассмотрим режим полных нагрузок на примере газопоршневого двигателя

RGK.ЕС.820.959-340. Внешняя скоростная характеристика данного двигателя, полученная расчетным путем [58], представлена на рисунке 2.6.

Анализируя внешнюю скоростную характеристику видно, что режим максимальных нагрузок находится в том месте графика, где двигатель развивает максимальную мощность. Максимальная мощность развивается в диапазоне угловой скорости ω от 195 с^{-1} до 215 с^{-1} , что соответствует частоте вращения двигателя (1860 – 2050 об/мин). Коэффициент α при максимальных нагрузках близок к 1,0 [59].

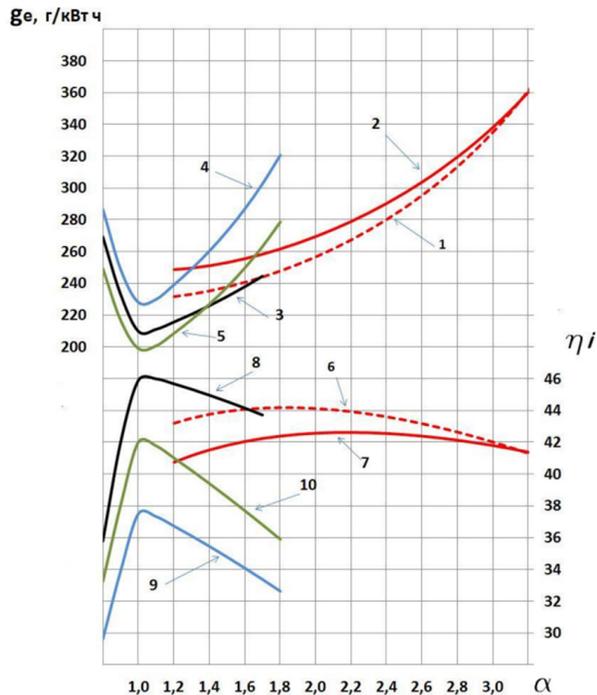


Рисунок 2.7. Изменение удельного эффективного расхода топлива и индикаторного КПД в зависимости от коэффициента избытка воздуха

В работе [50] проведен сравнительный расчетный анализ эффективных показателей (η_i , η_e и g_e) дизельного двигателя и газового двигателя, работающего по циклам Отто и Миллера. Изменение эффективных показателей двигателя при различных составах смеси показано на рисунке 2.7. Зависимости обозначены следующими цифрами: 1 и 6 - с воспламенением от сжатия, $\varepsilon = 17$, дизтопливо; 2 и 7 - с воспламенением от сжатия, $\varepsilon = 17$, дизтопливо; 3 и 8 - с

принудительным зажиганием, $\varepsilon = 17$, бензин; 4 и 9 - с принудительным зажиганием, $\varepsilon = 10,5$, метан; 5 и 10 - с принудительным зажиганием и укороченным тактом впуска (цикл Миллера), $\varepsilon_g = 17$, $\varepsilon = 10,5$; метан.

Отметим, что индикаторный КПД (η_i) газового двигателя на полных нагрузках ($\alpha = 1,0$) практически не снижается по сравнению с базовым дизельным двигателем и составляет около 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. На полных нагрузках в газовом двигателе можно ожидать увеличение η_i при существенно более высоких температурах отработавших газов по сравнению с дизельным двигателем (на 100 – 120 °С)

2.2.5 Режим экстремальных нагрузок

Режим ускорения (экстремальный режим – резкое увеличение мощности двигателя, например, при обгоне), требует значительного обогащения горючей смеси. Обогащение горючей смеси характеризуется значением $\alpha < 1,0$.

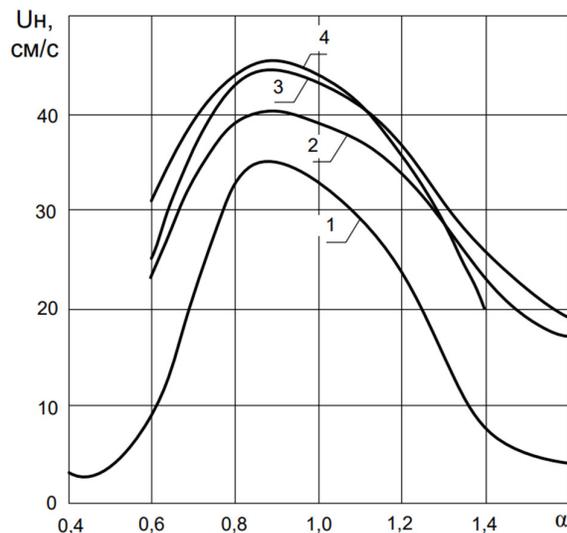


Рисунок 2.8. Нормальная скорость распространения ламинарного фронта пламени U_n в зависимости от коэффициента избытка воздуха α ($T_0 = 293$ К, $P_0 = 0,1$ МПа): 1 – метан, 2 – бутан, 3 – пропан, 4 – бензин [101]

Скорость нормального распространения пламени зависит от состава смеси (она максимальна в стехиометрической смеси), от температуры, от вида горючего газа и окислителя и имеет следующие значения: CO + воздух – 0,43 м/с; CH₄ + воздух – 0,38 м/с; H₂ + воздух – 2,65 м/с; H₂ + O₂ – 13 м/с [114].

На рисунке 2.8 показана зависимость нормальной скорости распространения ламинарного фронта пламени горючих газов с воздухом от коэффициента избытка воздуха. Видно, что у метановоздушных смесей фундаментальная скорость распространения горения заметно ниже, чем у других топлив. Из-за этой особенности метановый двигатель малоэффективен на высоких оборотах.

Для гетерогенных взвесей $U_n = 0,3 \dots 0,7$ м/с. Скорость распространения пламени увеличивается с ростом давления и температуры смеси. Разбавление смеси инертным газом снижает U_n [15].

2.2.6 Промежуточные выводы

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 газовой смеси. Прогрев до рабочей температуры 90 °С длится 2-5 минут, в зависимости от начальной температуры, что сопоставимо с дизельным и бензиновым двигателями.

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

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

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).

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 транспортно-технологические средства.

2.3 Узлы и агрегаты гибридного силового блока

Особенность исследуемой коммунальной машины – мусоровоза заключается в том, что она работает в городском ездовом цикле в режимах постоянного разгона и ускорения. Коммунальная машина выполняет технологические операции по выгрузке мусорных контейнеров в бункер, прессовке мусора и периодической транспортировке полного бункера на сортировочный полигон в черте города.

2.3.1. Выбор схемы гибридного силового блока

Электропривод исследуемых гибридных коммунальных машин работает при знакопеременных нагрузках, которые обусловлены циклами разгона и торможения, циклами загрузки и уплотнения отходов, и требует аккумулятор-

ных батарей с увеличенной емкостью. Оптимальным решением, учитывающим как требования к емкости батарей, так и простоту конструкции, является последовательная схема гибридного силового блока, изображенная на рисунке 2.9. Сплошные линии обозначают передачу механической энергии, пунктирные линии – передачу электрической энергии. Такая компоновка позволяет эффективно распределять энергетические потоки при работе в городском цикле, а также уменьшить количество узлов отказа, что является преимуществом с точки зрения обслуживания коммунальной машины и увеличению ее надежности.

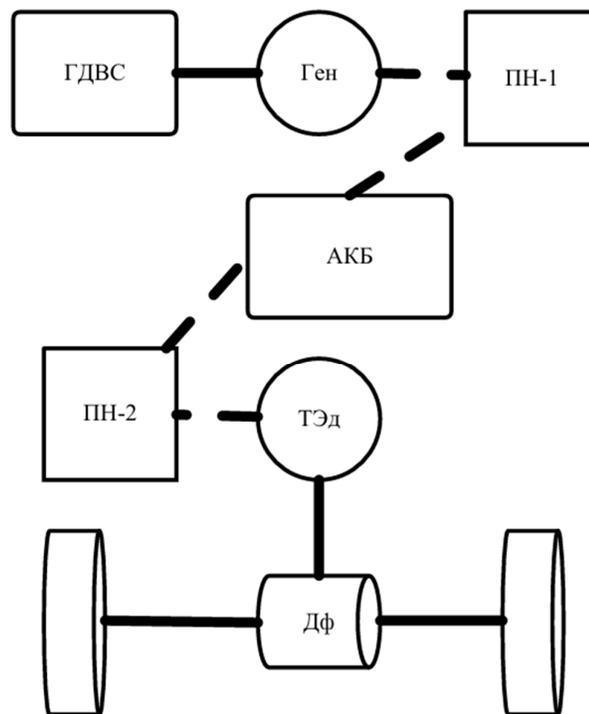


Рисунок 2.9. Последовательная схема гибридного силового блока:

ГДВС – газовый двигатель внутреннего сгорания; Ген – генератор; ПН-1 – преобразователь напряжения на генераторе; АКБ – аккумуляторная батарея; ПН-2 – преобразователь напряжения на тяговом электродвигателе; ТЭд – тяговый электродвигатель; Дф – дифференциал.

ДВС работает в паре с генератором и только подзаряжает аккумуляторную батарею – основной источник питания электродвигателя ведущих колес, всех систем электромобиля и технологического оборудования.

2.3.2. Первичный двигатель

Для коммунальной машины с последовательной схемой гибридного силового блока необходим первичный двигатель – двигатель внутреннего сгорания, работающий в номинальном режиме – режиме полной нагрузки. Такой двигатель будет запускаться с некоторой периодичностью, когда необходимо подзаряжать аккумуляторную батарею. Опираясь на проведенное исследование режимов работы газовых двигателей, в последовательном гибридном силовом блоке целесообразно применять малолитражный газовый двигатель, работающий в номинальном режиме. Таким образом, в качестве первичного двигателя в последовательном гибридном силовом блоке выбран малолитражный газовый двигатель. Подробный обзор моделей газовых ДВС, предлагаемых к применению в цифровом двойнике, представлен в разделе 3.2.3.

2.3.3. Механизм потоков энергии

Потоки мощности в исследуемом последовательном гибридном силовом блоке представлены на рисунке 2.10.

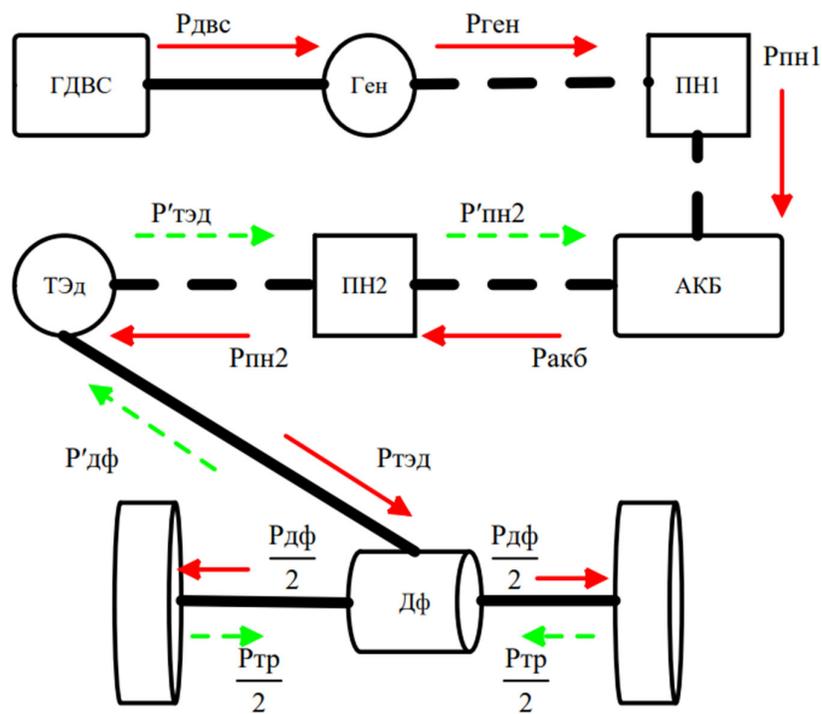


Рисунок 2.10. Потоки мощности

Сплошные красные стрелки показывают последовательную передачу мощности на колеса. Пунктирные зеленые стрелки показывают передачу мощности при рекуперативном торможении. Поток энергии в исследуемом последовательном гибридном силовом блоке делится на три ступени.

Первая ступень: механическая энергия, вырабатываемая газовым ДВС, передается на генератор. Генератор работает в паре с преобразователем напряжения и преобразует механическую энергию вращения в электрическую энергию. Электрическая энергия поступает на АКБ, запасаясь в ней. Мощность, запасаемая в АКБ, вычисляется по формуле:

$$P_{\text{акб}} = \eta_{\text{акб}} P_{\text{пн1}} = \eta_{\text{акб}} \eta_{\text{пн1}} P_{\text{ген}} = \eta_{\text{акб}} \eta_{\text{пн1}} \eta_{\text{ген}} P_{\text{двс}} \quad (2.1)$$

где $\eta_{\text{акб}} = \frac{P_{\text{акб}}}{P_{\text{пн1}}}$ – КПД АКБ;

$\eta_{\text{пн1}} = \frac{P_{\text{пн1}}}{P_{\text{ген}}}$ – КПД преобразователя напряжения №1 (ПН1);

$\eta_{\text{ген}} = \frac{P_{\text{ген}}}{P_{\text{двс}}}$ – КПД генератора;

$P_{\text{акб}}, P_{\text{пн1}}, P_{\text{ген}}, P_{\text{двс}}$ – мощности: запасаемая в АКБ, на выходе ПН1, на выходе генератора и мощность ДВС соответственно.

Вторая ступень: электроэнергия из АКБ расходуется на питание тягового электродвигателя, работающего в паре с преобразователем напряжения №2 (ПН2). Тяговый электродвигатель подсоединен к дифференциалу, который передает механическую энергию вращения на колеса коммунальной машины. Мощность, подаваемая на колеса, вычисляется по формуле:

$$P_{\text{дф}} = \eta_{\text{дф}} P_{\text{тэд}} = \eta_{\text{дф}} \eta_{\text{тэд}} P_{\text{пн2}} = \eta_{\text{дф}} \eta_{\text{тэд}} \eta_{\text{пн2}} P_{\text{акб}} \quad (2.2)$$

где $\eta_{\text{дф}} = \frac{P_{\text{дф}}}{P_{\text{тэд}}}$ – КПД дифференциала;

$\eta_{\text{тэд}} = \frac{P_{\text{тэд}}}{P_{\text{пн2}}}$ – КПД тягового электродвигателя;

$$\eta_{\text{пн2}} = \frac{P_{\text{пн2}}}{P_{\text{акб}}} - \text{КПД ПН2};$$

$P_{\text{дф}}, P_{\text{тэд}}, P_{\text{пн2}}$ – мощности: на выходе дифференциала (подаваемая на колеса), тягового электродвигателя, ПН2 соответственно.

Третья ступень: механическая мощность, снимаемая с колес при торможении, посредством дифференциала, передается на тяговый электродвигатель, работающей в режиме генератора. Тяговый электродвигатель, работающий в режиме генератора, работает совместно с преобразователем напряжения № 2 и генерирует электрическую энергию, которая запасается в АКБ. Мощность, запасаемую в АКБ посредством рекуперативного торможения, можно оценить по формуле:

$$\begin{aligned} P_3 &= \eta_{\text{акб}} P'_{\text{пн2}} = \eta_{\text{акб}} \eta_{\text{пн2}} P'_{\text{тэд}} = \eta_{\text{акб}} \eta_{\text{пн2}} \eta_{\text{тэд}} P'_{\text{дф}} \\ &= \eta_{\text{акб}} \eta_{\text{пн2}} \eta_{\text{тэд}} \eta_{\text{дф}} P_{\text{тр}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

где $P_3, P'_{\text{пн2}}, P'_{\text{тэд}}, P'_{\text{дф}}, P_{\text{тр}}$ – мощности: запасаемая в АКБ посредством рекуперации, передаваемая от ПН2 к АКБ, передаваемая от тягового электродвигателя, работающего в режиме генератора, к ПН2, передаваемая от дифференциала к электродвигателю, снимаемая с колес при торможении.

Общий КПД исследуемого последовательного гибридного силового блока $\eta_{\text{посл}}$ имеет вид:

$$\eta_{\text{посл}} = \frac{P_{\text{дф}}}{P_{\text{двс}}} = \eta_{\text{дф}} \eta_{\text{тэд}} \eta_{\text{пн2}} \eta_{\text{акб}} \eta_{\text{пн1}} \eta_{\text{ген}} \quad (2.4)$$

2.4 Расчет критериев оценки

В данном разделе приведены формулы для расчета критериев оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах. К критериям оценки относятся: энергоэффективность, экономичность,

экологичность и показатель рекуперации энергии торможения.

2.4.1 Энергоэффективность

Оценка энергоэффективности гибридного силового блока с газовым двигателем производится с помощью **коэффициента энергоэффективности** $K_{ЭЭФ}$. Коэффициент энергоэффективности применяется для численной оценки целесообразности применения гибридного силового блока в составе разработанного метода. $K_{ЭЭФ}$ вычисляется по формуле:

$$K_{ЭЭФ} = \frac{k_{ЭЭЦД}}{k_{ЭЭКМ}} \quad (2.5)$$

где $k_{ЭЭКМ}$ – коэффициент энергозатрат существующей КМ, Дж/км;

$k_{ЭЭЦД}$ – коэффициент энергозатрат переоборудованной КМ, Дж/км.

Коэффициент энергозатрат определяется как отношение энергии, затраченной на прохождение пути, к пройденному пути:

$$k_{ЭЭ} = \frac{W}{S} \quad (2.6)$$

где W – энергия, затраченная на прохождение пути, Дж;

S – пройденный путь, км.

В случае с коммунальной машиной с классической силовой установкой, $W_{КМ}$ определяется как количество выделенной энергии при сгорании дизельного топлива. По данным мониторинга коммунальных машин программой «Скаут Онлайн» количество потраченного ДТ за время прохождения маршрута известно. Тогда:

$$W_{КМ} = V_{дт} \rho_{дт} \lambda_{дт} \quad (2.7)$$

где $V_{\text{дт}}$ – объем дизельного топлива, потраченного за один маршрут, по данным мониторинга, л.;

$\rho_{\text{дт}}$ – плотность ДТ, для межсезонного ДТ выбираем 0,86 кг/л.;

$\lambda_{\text{дт}}$ – удельная теплота сгорания ДТ, из справочных данных 42,7 МДж/кг.

В случае с коммунальной машиной с гибридным силовым блоком – цифровым двойником, $W_{\text{цд}}$ определяется как количество выделенной энергии при сгорании газового топлива в сумме с потраченной из АКБ электроэнергии. По данным цифровых испытаний разработанной цифровой модели известно количество потраченного газового топлива – метана (природного газа) на выполнение маршрута. Тогда:

$$W_{\text{цд}} = V_{\text{пг}} \rho_{\text{пг}} \lambda_{\text{пг}} + V_{\text{ээ}} (1 - C_{\text{бк}}) \cdot 3,6 \quad (2.8)$$

где $V_{\text{пг}}$ – объем метана, потраченного за один маршрут, по данным цифровых испытаний, м³;

$\rho_{\text{пг}}$ – плотность метана, при нормальных условиях 0,714 кг/м³;

$\lambda_{\text{пг}}$ – удельная теплота сгорания метана, из справочных данных 50,2 МДж/кг;

$V_{\text{ээ}}$ – емкость аккумуляторной батареи, установленной на КМ с гибридным силовым блоком, 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.

Таким образом, для оценки локального критерия энергоэффективности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах, применяется формула, имеющая вид:

$$K_{\text{ээф}} = \frac{V_{\text{пг}} \rho_{\text{пг}} \lambda_{\text{пг}} + V_{\text{ээ}} (1 - C_{\text{бк}}) \cdot 3,6}{V_{\text{дт}} \rho_{\text{дт}} \lambda_{\text{дт}}} \quad (2.9)$$

Если $K_{\text{ээф}} < 1$, значит энергоэффективность КМ с гибридным силовым блоком с газовым двигателем выше энергоэффективности КМ с классической силовой установкой; если $K_{\text{ээф}} > 1$, значит энергоэффективность КМ с гибридным силовым блоком ниже энергоэффективности КМ с классической силовой установкой; если $K_{\text{ээф}} \approx 1$, значит энергоэффективности сравниваемых КМ сопоставимы.

2.4.2 Экономичность

Оценка экономичности гибридного силового блока с газовым двигателем производится с помощью **коэффициента экономичности** $K_{\text{ЭН}}$. Коэффициент экономичности применяется для численной оценки целесообразности применения гибридного силового блока в составе разработанного метода. $K_{\text{ЭН}}$ вычисляется по формуле:

$$K_{\text{ЭН}} = \frac{k_{\text{фзЦД}}}{k_{\text{фзКМ}}} \quad (2.10)$$

где $k_{\text{фзКМ}}$ – коэффициент финансовых затрат существующей КМ, руб./км;

$k_{\text{фзЦД}}$ – коэффициент финансовых затрат переоборудованной КМ, руб./км.

Коэффициент финансовых затрат определяется как отношение расходов, затраченных на прохождение маршрута, к пройденному пути:

$$k_{\text{фз}} = \frac{C}{S} \quad (2.11)$$

где C – расходы на топливо и электроэнергию для зарядки АКБ, руб.

В случае с коммунальной машиной с классической силовой установкой, $C_{\text{КМ}}$ определяется без учета затрат на электроэнергию:

$$C_{\text{КМ}} = P_{\text{дт}} V_{\text{дт}} \quad (2.12)$$

где $P_{\text{дт}}$ – стоимость ДТ на текущую дату, руб./л.

В случае с коммунальной машиной с гибридным силовым блоком с газовым двигателем – цифровым двойником, $C_{\text{ЦД}}$ определяется с учетом затрат на междусменный заряд АКБ:

$$C_{\text{ЦД}} = P_{\text{пг}} V_{\text{пг}} + P_{\text{ээ}} V_{\text{ээ}} \quad (2.13)$$

где $P_{\text{пг}}$ – стоимость КППГ на текущую дату, руб./м³;

$P_{\text{ээ}}$ – стоимость одного кВт·ч электроэнергии по одноставочному тарифу для предприятий на текущую дату, руб./кВт·ч.

Таким образом, для оценки локального критерия экономичности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах, применяется формула, имеющая вид:

$$K_{\text{ЭН}} = \frac{P_{\text{пг}} V_{\text{пг}} + P_{\text{ээ}} V_{\text{ээ}}}{P_{\text{дт}} V_{\text{дт}}} \quad (2.14)$$

Если $K_{\text{ЭН}} < 1$, значит экономичность КМ с гибридным силовым блоком выше экономичности КМ с классической силовой установкой; если $K_{\text{ЭН}} > 1$, значит экономичность КМ с гибридным силовым блоком ниже экономичности КМ с классической силовой установкой; если $K_{\text{ЭН}} \approx 1$, значит экономичности сравниваемых КМ сопоставимы.

2.4.3 Экологичность

Оценка экологичности гибридного силового блока с газовым двигателем производится с помощью **коэффициента экологичности $K_{\text{ЭЛ}}$** . Коэффициент экологичности применяется для численной оценки целесообразности приме-

нения гибридного силового блока в составе разработанного метода. $K_{ЭЛ}$ вычисляется по формуле:

$$K_{ЭЛ} = \frac{k_{вЦД}}{k_{вКМ}} \quad (2.15)$$

где $k_{эколКМ}$ – коэффициент выбросов существующей КМ, кг/км;

$k_{эколЦД}$ – коэффициент выбросов переоборудованной КМ, кг/км.

Коэффициент выбросов определяется как количество выбросов загрязняющих веществ на заданном маршруте, к пройденному пути:

$$k_{в} = \frac{M}{S} \quad (2.16)$$

где M – выбросы загрязняющих веществ за один маршрут, кг;

M определяется как сумма масс выбросов углекислого газа, угарного газа и оксидов азота, так как данные соединения наибольший вклад в загрязнение и зависят от количества израсходованного топлива и его типа [42,43].

$$M = M_{CO_2} + M_{CO} + M_{NO_x} \quad (2.17)$$

где M_{CO_2} – масса выбросов углекислого газа за один маршрут, кг;

M_{CO} – масса выбросов угарного газа за один маршрут, кг;

M_{NO_x} – масса выбросов оксидов азота за один маршрут, кг

Для коммунальной машины с традиционным дизельным двигателем:

$$M_{CO_2КМ} = g_{дт_CO_2} V_{дт} \rho_{дт} \cdot 10^{-3} \quad (2.18)$$

$$M_{COКМ} = g_{дт_CO} V_{дт} \rho_{дт} \cdot 10^{-3} \quad (2.19)$$

$$M_{NO_xКМ} = g_{дт_NO_x} V_{дт} \rho_{дт} \cdot 10^{-3} \quad (2.20)$$

где $g_{дт_CO2}$ – удельный выброс углекислого газа при сгорании 1 кг ДТ грузовым автомобилем полной массы более 3,5 т., г/кг;

$g_{дт_CO}$ – удельный выброс угарного газа при сгорании 1 кг ДТ грузовым автомобилем полной массы более 3,5 т., г/кг;

$g_{дт_NOx}$ – удельный выброс оксидов азота при сгорании 1 кг ДТ грузовым автомобилем полной массы более 3,5 т., г/кг.

Значения $g_{дт_CO2}$, $g_{дт_CO}$, $g_{дт_NOx}$ принимаем равными соответственно: 3090 г/кг; 8,6 г/кг; 25 г/кг в соответствии с «Инструкцией (методикой) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух» от 17.11.2006 г. (табл. 3.2) [85].

Для коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем (цифрового двойника):

$$M_{CO2ЦД} = g_{пг_CO2} V_{пг} \rho_{пг} \cdot 10^{-3} \quad (2.21)$$

$$M_{COЦД} = g_{пг_CO} V_{пг} \rho_{пг} \cdot 10^{-3} \quad (2.22)$$

$$M_{NOxЦД} = g_{пг_NOx} V_{пг} \rho_{пг} \cdot 10^{-3} \quad (2.23)$$

где $g_{пг_CO2}$ – удельный выброс углекислого газа при сгорании 1 кг КПГ грузовым автомобилем полной массы более 3,5 т., г/кг;

$g_{пг_CO}$ – удельный выброс угарного газа при сгорании 1 кг КПГ грузовым автомобилем полной массы более 3,5 т., г/кг;

$g_{пг_NOx}$ – удельный выброс оксидов азота при сгорании 1 кг КПГ грузовым автомобилем полной массы более 3,5 т., г/кг.

Значения $g_{пг_CO2}$, $g_{пг_CO}$, $g_{пг_NOx}$ принимаем равными соответственно: 2500 г/кг; 140 г/кг; 20 г/кг в соответствии с «Инструкцией (методикой) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух» от 17.11.2006 г. (табл. 3.4) [85].

Таким образом, для оценки локального критерия экологичности приме-

нения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах, применяется формула, имеющая вид:

$$K_{ЭЛ} = \frac{V_{пг} \rho_{пг} (g_{пг_CO2} + g_{пг_CO} + g_{пг_NOx})}{V_{дт} \rho_{дт} (g_{дт_CO2} + g_{дт_CO} + g_{дт_NOx})} \quad (2.24)$$

Если $K_{ЭЛ} < 1$, значит экологичность КМ с гибридным силовым блоком с газовым двигателем выше экологичности КМ с классической силовой установкой; если $K_{ЭЛ} > 1$, значит экологичность КМ с гибридным силовым блоком ниже экологичности КМ с классической силовой установкой; если $K_{ЭЛ} \approx 1$, значит экологичности сравниваемых КМ сопоставимы.

2.4.4 Показатель рекуперации энергии торможения

Для подсчета показателя рекуперации энергии торможения $P_{ре}$ 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 $P_{ре}$ вычисляется по формуле:

$$P_{ре} = \frac{W_{ре}}{W_{п}} \cdot 100\% = \frac{\int_0^T I_{ре}(t) U_{ре}(t) dt}{\int_0^T I_{п}(t) U_{п}(t) dt} \cdot 100\% \quad (2.25)$$

где $W_{ре}$ – суммарное количество энергии, вернувшейся в АКБ при рекуперативном торможении, Втч;

$W_{п}$ – суммарное количество энергии, потраченное на движение, Втч;

$I_{ре}$ – мгновенная сила тока на клеммах АКБ при рекуперативном торможении, А;

U_{pe} – мгновенное напряжение на клеммах АКБ при рекуперативном торможении, В;

$I_{п}$ – мгновенная сила тока на клеммах АКБ при движении, А;

$U_{п}$ – мгновенное напряжение на клеммах АКБ при движении, В;

T – продолжительность маршрута, с.

Графическая интерпретация показателя рекуперации энергии торможения представлена в разделе 3.4 диссертационного исследования.

2.5 Интегральный коэффициент гибридизации

В данном разделе описывается впервые вводимый **коэффициент гибридизации коммунальных машин $K_{ГИБР}$** . Коэффициент гибридизации позволяет обобщить оценку исследуемых критериев применения гибридного силового блока на коммунальных машинах. Коэффициент гибридизации коммунальных машин $K_{ГИБР}$ является средним коэффициентом энергоэффективности, экономичности и экологичности на всех исследуемых маршрутах для машины одной типоразмерной группы, и вычисляется по формуле:

$$K_{ГИБР} = \frac{1}{3n} \cdot \sum_{i=1}^n (K_{ЭЭФ} + K_{ЭЛ} + K_{ЭН})_i \quad (2.26)$$

где n – количество исследованных маршрутов.

Пороговое значение коэффициента гибридизации, оценивающее целесообразность применения гибридного силового блока с газовым двигателем на 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.

2.6 Расчет экономического и экологического эффектов

Для расчета экономического эффекта от переоборудования КМ на гибридный силовой блок с газовым двигателем, необходимо найти разницу операционных затрат существующей КМ и переоборудованной КМ. Операционные затраты считаются как сумма затрат на топливо (и электроэнергию) и затраты на ТО. Операционные затраты считаются в рамках одного календарного года.

Для традиционной КМ значение годовых затрат на топливо $C_{КМТ}$ посчитаем как средние ежедневные затраты на топливо для n маршрутов, умноженные на количество рабочих дней машины в году.

$$C_{КМТ} = 365 \cdot P_{дт} \frac{\sum_{i=1}^n V_{дт} i}{n} \quad (2.27)$$

Для переоборудованной КМ значение годовых затрат на топливо и электроэнергию $C_{Цдт}$ посчитаем как усредненные ежедневные затраты на топливо и электроэнергию для n маршрутов, умноженные на количество рабочих дней машины в году.

$$C_{Цдт} = 365 \left(P_{пг} \frac{\sum_{i=1}^n V_{пг} i}{n} + P_{ээ} \frac{\sum_{i=1}^n (V_{ээ} (1 - C_{бк})) i}{n} \right) \quad (2.28)$$

Для традиционной КМ значение годовых затрат на ТО $C_{КМто}$ посчитаем как сумму затрат на обслуживание узлов и агрегатов на протяжении календарного года.

$$C_{КМто} = C_{двс} + C_{сц} + C_{кпп} + C_{моч} + C_{пр} \quad (2.29)$$

где $C_{двс}$ – годовая стоимость обслуживания дизельного ДВС, руб/год;

$C_{\text{СЦ}}$ – годовая стоимость обслуживания сцепления, руб/год;

$C_{\text{КПП}}$ – годовая стоимость обслуживания КПП, руб/год;

$C_{\text{Моч}}$ – годовые затраты на приобретение мочевины, руб/год;

$C_{\text{пр}}$ – прочие годовые затраты: замена резины, страховка, ежегодный технический осмотр, мойка, замена сальников, тормозных колодок и т.д., руб/год.

Для переоборудованной КМ значение годовых затрат на ТО $C_{\text{ЦДто}}$ посчитаем как сумму затрат на обслуживание узлов и агрегатов на протяжении календарного года.

$$C_{\text{ЦДто}} = C_{\text{ГДВС}} + C_{\text{ГА}} + C_{\text{АКБ}} + C_{\text{ОБ}} + C_{\text{пр}} \quad (2.30)$$

где $C_{\text{ГДВС}}$ – годовая стоимость обслуживания газового ДВС, руб/год;

$C_{\text{ГА}}$ – годовая стоимость обслуживания сцепления, руб/год;

$C_{\text{АКБ}}$ – годовая стоимость обслуживания АКБ, руб/год;

$C_{\text{ОБ}}$ – годовые затраты на освидетельствование газовых баллонов, руб/год.

Годовой экономический эффект $\text{ЭН}_Г$ от переоборудования КМ на гибридный силовой блок является разницей операционных затрат сравниваемых машин и вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{ЭН}_Г = C_{\text{КМГ}} + C_{\text{КМто}} - C_{\text{ЦДт}} - C_{\text{ЦДто}} = \frac{365}{n} (P_{\text{дт}} \sum_{i=1}^n V_{\text{дт}} i - \\ P_{\text{пг}} \sum_{i=1}^n V_{\text{пг}} i - P_{\text{ээ}} \sum_{i=1}^n (V_{\text{ээ}} (1 - C_{\text{бк}})) i) + C_{\text{ДВС}} + C_{\text{СЦ}} + C_{\text{КПП}} + C_{\text{Моч}} - \\ C_{\text{ГДВС}} - C_{\text{ГА}} - C_{\text{АКБ}} - C_{\text{ОБ}} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Для оценки экологического эффекта, посчитаем годовые выбросы для традиционной коммунальной машины и для цифрового двойника. Для традиционной машины значение годовых выбросов $M_{\text{КМГ}}$ посчитаем как средний ежедневный выброс для n маршрутов, умноженный на количество рабочих дней машины в году.

$$M_{\text{КМГ}} = \frac{365}{n} \sum_{i=1}^n M_{\text{КМ}} i \quad (2.32)$$

где $M_{\text{КМ}}$ – выбросы загрязняющих веществ традиционной КМ за один маршрут, кг.

Для переоборудованной КМ значение годовых выбросов $M_{\text{ЦДГ}}$ посчитаем как усредненный ежедневный выброс для n маршрутов, умноженный на количество рабочих дней машины в году.

$$M_{\text{ЦДГ}} = \frac{365}{n} \sum_{i=1}^n M_{\text{ЦД}} i \quad (2.33)$$

где $M_{\text{ЦД}}$ – выбросы загрязняющих веществ традиционной КМ за один маршрут, кг.

Годовой экологический эффект $\text{ЭЛ}_Г$ от переоборудования КМ на гибридный силовой блок вычисляется следующим образом:

$$\text{ЭЛ}_Г = M_{\text{КМГ}} - M_{\text{ЦДГ}} = \frac{365}{n} \sum_{i=1}^n (M_{\text{КМ}} - M_{\text{ЦД}}) i \quad (2.34)$$

Окупаемость $\text{ОК}_Г$ переоборудования КМ на гибридный силовой блок вычисляется следующим образом:

$$\text{ОК}_Г = \frac{\text{КЗ}_Г}{\text{ЭН}_Г} \quad (2.35)$$

где $\text{КЗ}_Г$ – капитальные затраты на переоборудование КМ на гибридный силовой блок с газовым двигателем, руб.

Капитальные затраты на переоборудование КМ на гибридный силовой блок с газовым двигателем вычисляются по формуле:

$$KЗ_r = C_{ГА} + C_{ГДВС} + C_{ГН} + C_{ПН1} + C_{АКБ} + C_{ТЭ} + C_{ПН2} + C_{БЛ} + C_p \quad (2.36)$$

где $C_{ГА}$ – стоимость газовой аппаратуры, руб;

$C_{ГДВС}$ – стоимость газового ДВС, руб;

$C_{ГН}$ – стоимость генератора, руб;

$C_{ПН1}$ – стоимость преобразователя напряжения №1, руб;

$C_{АКБ}$ – стоимость АКБ, руб;

$C_{ТЭ}$ – стоимость тягового электродвигателя, руб;

$C_{ПН2}$ – стоимость преобразователя напряжения №2, руб;

$C_{БЛ}$ – стоимость кассеты баллонов для КПП, руб;

C_p – стоимость работ по демонтажу штатного оборудования и монтажу гибридного силового блока, руб.

2.7 Метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на КМ

Разработанный метод позволяет оценить целесообразность 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 ги-

бридизации КМ предложены формулы расчета экономического и экологического эффектов, а также срока окупаемости гибридного силового блока.

2.8 Выводы к главе 2

1. Описаны границы области проводимого исследования. Сформулированы критерии оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах.

2. Проведен анализ эффективности газового двигателя при различных нагрузочных режимах. Сделан вывод о целесообразности применения газового ДВС на строительной и грузовой технике, длительное время работающей в режимах полной нагрузки, а также на гибридных транспортно-технологических средствах.

3. Опираясь на проведенное исследование режимов работы газовых двигателей, в гибридном силовом блоке целесообразно применять малолитражный газовый двигатель, работающий в режиме полных нагрузок. Таким образом, в качестве первичного двигателя в гибридном силовом блоке выбран малолитражный газовый двигатель. Наглядно показан механизм потоков энергии в исследуемом последовательном гибридном силовом блоке. Произведен расчет его КПД.

4. Выведены формулы расчета коэффициентов для локальных критериев оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах. К локальным критериям оценки относятся: энергоэффективность, экономичность, экологичность, показатель рекуперации энергии торможения.

5. Введен интегральный коэффициент гибридизации коммунальных машин. Коэффициент гибридизации позволяет обобщить критерии применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах и численно оценить целесообразность гибридизации коммунальной машины.

6. Осуществлен расчет экономического и экологического эффекта гибридизации КМ, учитывающий капитальные и операционные затраты. Предложена формула расчета срока окупаемости переоборудования КМ на гибридный силовой блок.

7. Описан метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах и показана последовательность действий для использования разработанного метода.

ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ КОММУНАЛЬНОЙ МАШИНЫ С ГИБРИДНЫМ СИЛОВЫМ БЛОКОМ С ГАЗОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

3.1 Описание модели²

Модель разработана с целью создания цифрового двойника коммунальной машины с гибридным силовым блоком. Цифровой двойник позволяет провести цифровые испытания, и, по полученным данным, используя разработанный метод оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах, сравнить имеющиеся коммунальные машины с классической силовой установкой и коммунальные машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем.

3.1.1 Исходная гипотеза

Согласно п. 6.6 ГОСТ Р 57700.37–2021 в случае невозможности проведения физических испытаний изделия цифровые испытания следует проводить в обязательном порядке. Цифровые испытания проводят с участием цифровой модели изделия – коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем. Двухсторонние информационные связи цифровой модели и реальных коммунальных машин с гибридным силовым блоком позволяют создать цифровой двойник моделируемого изделия, провести его испытания на реальных маршрутах движения, получить и проанализировать полученные данные. Анализ полученных данных и их оценка проводится в соответствии с разработанным в главе №2 методом.

² По итогам данного исследования автором опубликована научная статья: 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.

3.1.2 Основные допущения

Для построения модели необходимо ввести допущения, позволяющие упростить реальную систему и облегчить последующее математическое описание. В цифровой модели коммунальной машины с гибридным силовым блоком приняты следующие основные допущения:

- отсутствуют потери напряжения в проводах электросистемы КМ;
- не осуществляется расчет охлаждения для узлов и агрегатов модели;
- не учитываются габаритные размеры узлов и агрегатов, а также их расположение на КМ;
- колебания скорости вращения тягового электродвигателя из-за механической нагрузки не влияют на подаваемый на него крутящий момент;
- в тяговом электродвигателе не учтены потери на вихревые токи и гистерезисные потери;
- колеса базового шасси осуществляют только продольное движение и не включают в себя развал, поворот или боковое движение;
- предполагается что колеса КМ находятся в постоянном зацеплении с опорной поверхностью, без проскальзывания;
- не учитывается продольное и поперечное качение кузова КМ;
- предполагается, что скорость ветра равно нулю;
- предполагается что газовый ДВС разогревается до рабочей температуры и набирает номинальные обороты вращения мгновенно;
- в генераторе не учтены потери на вихревые токи и гистерезисные потери;
- возможная разбалансировка ячеек АКБ не учитывается;
- не учитывается старение АКБ;
- не учитывается изменение параметров АКБ в зависимости от окружающей температуры воздуха;
- не учитывается количество запасенного в баллонах КПП;
- не учитываются электрические потери на понижающем трансформаторе для привода гидронасоса;

- при остановке КМ для загрузки мусорных баков масса загружаемого мусора фиксирована на каждой остановке;
- длительное стояние КМ в пробке, на светофоре, на парковке в течение смены считается остановкой;
- кратковременные погрузки мусорных баков (менее 80 секунд) не считается остановкой.

3.1.3 Ограничения

Ограничения модели делятся на искусственные (которые могут быть изменены) или естественные. К искусственным ограничениям относятся:

- частота дискретизации модели находится в диапазоне от 1 до 0,001 секунды;
- количество изменяемых параметров модели конечно, представлено в разделе 3.2.4;
- масса КМ не может превышать 11980 кг;
- максимальная кратковременная сила тока в системе не должна превышать 288 ампер;
- если в течение 80 секунд заданная скорость не превышает 4 км/ч, данный участок движения считается остановкой;
- количество полных циклов загрузки и разгрузки бункера не должно быть больше шести;
- плотность воздуха составляет 1,25 кг/м³;
- ускорение свободного падения принято за 9,81 м/с².

К естественным ограничениям относятся:

- исходные данные заданной скорости движения могут иметь только положительные значения;
- исходные данные подаются строго в «.xlsx» формате: в первом столбце скорость в км/ч, во втором столбце соответствующий скорости момент времени в секундах;
- моделируемое движение КМ является поступательным и происходит в

горизонтальной плоскости;

- модулируемая КМ имеет колесную формулу 4х2.

3.1.4 Структура модели

Модель состоит из основных элементов: грузовое шасси, газовый ДВС, генераторная установка, АКБ, тяговый электродвигатель, блок управления моделью, блок ввода исходных данных, блок для измерения и графического отображения параметров модели, таблица переменных параметров модели.

Для функционирования цифровой модели и проведения цифровых испытаний используются исходные данные – данные ежедневного мониторинга коммунальных машин для вывоза ТКО. Структура модели представлена в виде блок-схемы на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1. Структура цифровой модели КМ с гибридным силовым блоком с газовым двигателем

Данные мониторинга КМ обрабатываются в файле MS Excel и импортируются в программу для компьютерного моделирования. Данные мониторинга являются исходными данными для работы цифровой модели и представляют собой последовательность значений мгновенных скоростей, изменяющихся с течением времени. Программа получает на вход эту последовательность, преобразует ее в необходимый крутящий момент на тяговом электродвигателе. Цифровой двойник коммунальной машины движется по заданному маршруту, и программа может строить графики интересующих параметров цифрового двойника КМ и производить подсчет интересующих показателей. При низком заряде АКБ включается газовый ДВС, связанный с генератором, который производит заряд АКБ.

3.1.5 Инструмент построения

Для создания цифровой модели коммунальной машины с гибридным силовым блоком использована среда математического и компьютерного моделирования MathWorks MATLAB Simulink версии R2023a – academic use.



Рисунок 3.2. Используемые библиотеки Simulink

В разработанной цифровой модели используются официальные библиотеки, изображенные на рисунке 3.2.

Доступ к ПО MATLAB Simulink предоставлен сайтом «Центр Инженерных Технологий и Моделирования «Экспонента» [109], в целях академического пользования студентами и аспирантами ВУЗов России. Аспиранты СПбГАСУ имеют возможность установки и использования данного ПО.

3.2 Содержание цифровой модели³

В данном разделе представлено содержание цифровой модели: графическое отображение модели, логика работы, математическая модель, исходные данные для моделирования, обоснование выбора основных узлов и агрегатов.

3.2.1 Компьютерная модель

Согласно определению, цифровая модель состоит из двух частей: математической модели и компьютерной модели. При этом, компьютерная модель включает в себя пользовательский интерфейс и перечень входных данных, который возможно корректировать.

Разработанная цифровая модель коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем представлена на рисунке 3.3. Исходные данные для цифровых испытаний подготавливаются в среде MS Excel и конвертируются в файлы формата «.mat» с помощью функционала MATLAB. Эти файлы загружаются в блок «Сценарий движения», который позволяет выбирать различные режимы тестирования. На рисунке 3.4 в качестве примера показан сценарий движения по тестовому маршруту длительностью 41820 секунд.

³ По итогам данного исследования автором опубликована научная статья: 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.

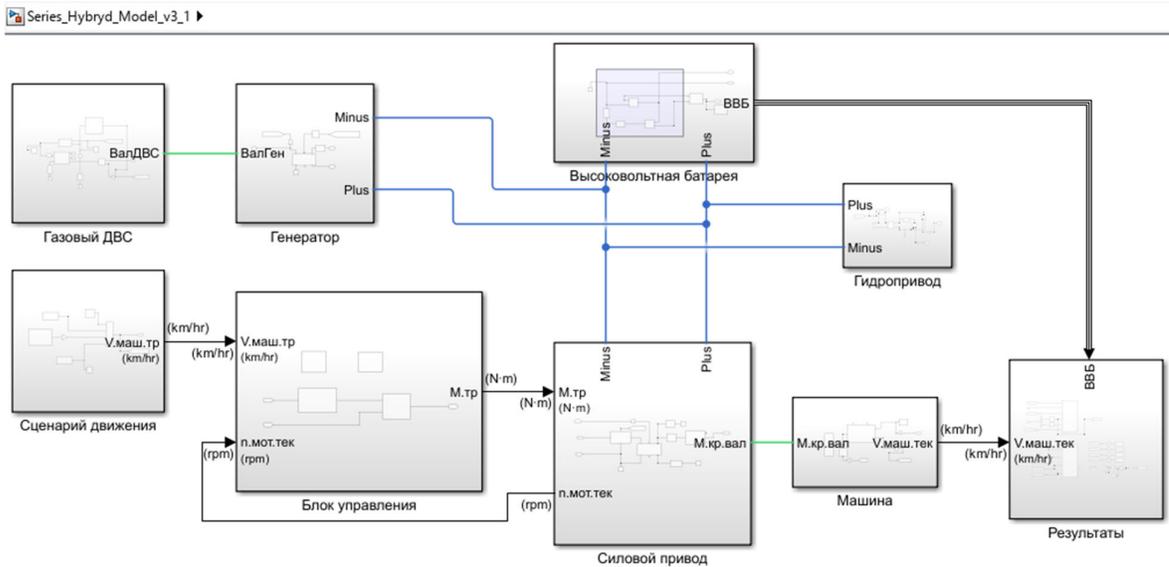


Рисунок 3.3. Цифровая модель в MATLAB Simulink

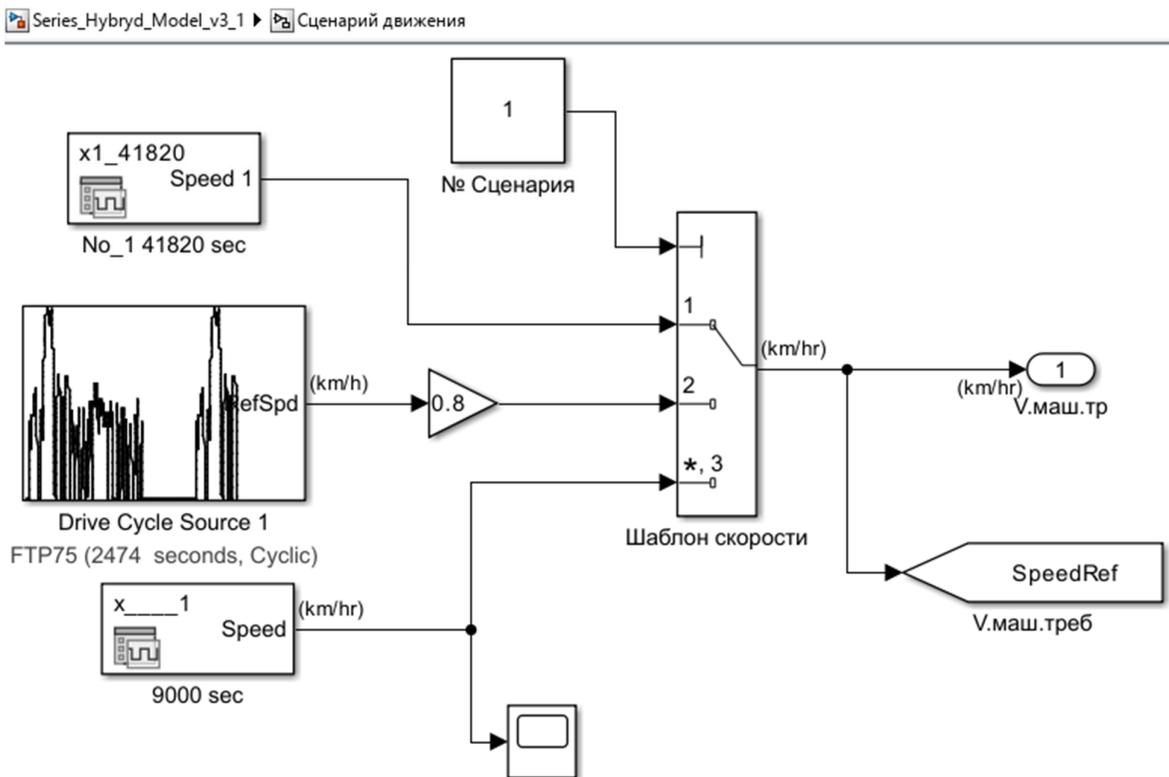


Рисунок 3.4. Содержание блока «Сценарий движения»

Основные логические элементы цифровой модели находятся в блоке «Блок управления», представленном на рисунке 3.5. В блоке находятся субблоки – subsystemы, в них описана логика работы контроллера включения и

выключения ДВС, генератора. Также, подсистема с управлением гидропривода коммунальной машины. Также в Блоке управления присутствует контроллер скорости движения машины, который, в соответствии с заданным графиком скорости движения, подает сигнал на тяговый электродвигатель в виде необходимого крутящего момента на последнем.

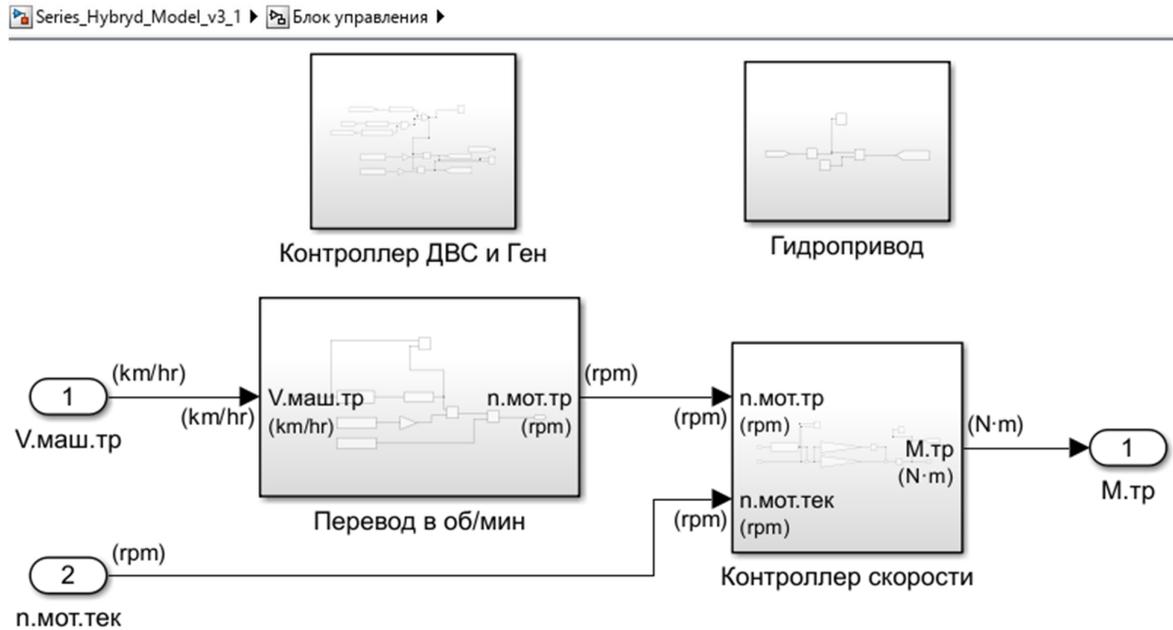


Рисунок 3.5. Содержание блока «Блок управления»

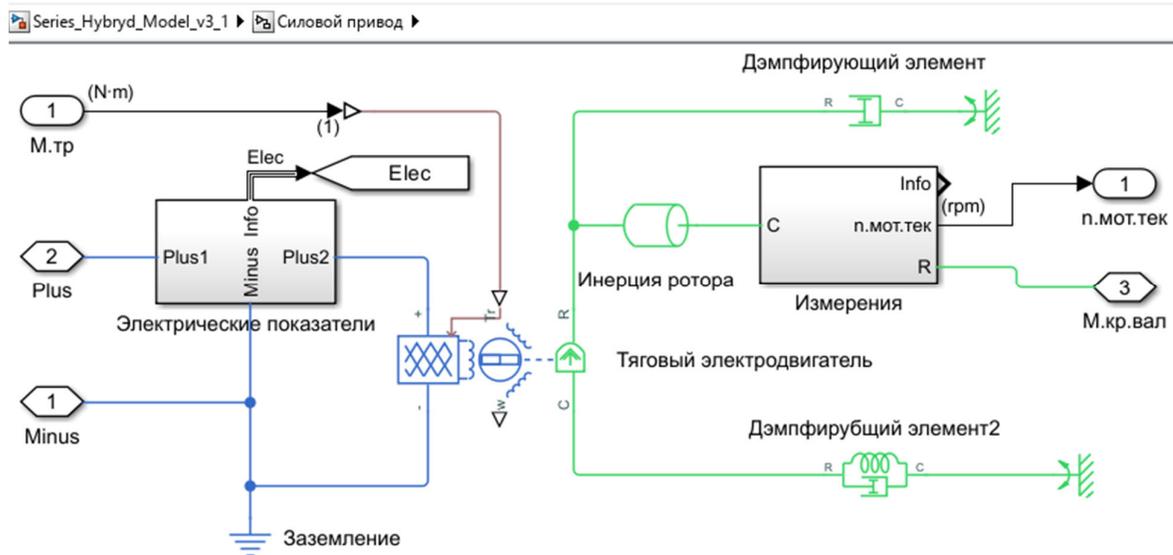


Рисунок 3.6. Содержание блока «Силовой привод»

Силовая установка – тяговый электродвигатель, представлена на рисунке 3.6. Блок тягового электродвигателя получает сигнал крутящего момента от Блока управления, и создает соответствующий крутящий момент на валу, при этом потребляя или воспроизводя постоянный электрический ток.

Газовый ДВС, запускающийся при низком заряде батареи, находится в блоке «Газовый ДВС» и представлен на рисунке 3.7. Блок Газовый ДВС получает сигнал о включении от Блока управления при низком заряде батареи. Порог заряда батареи указывается в параметрах модели. При запуске ДВС выдает крутящий момент на валу, подсоединенному к генератору.

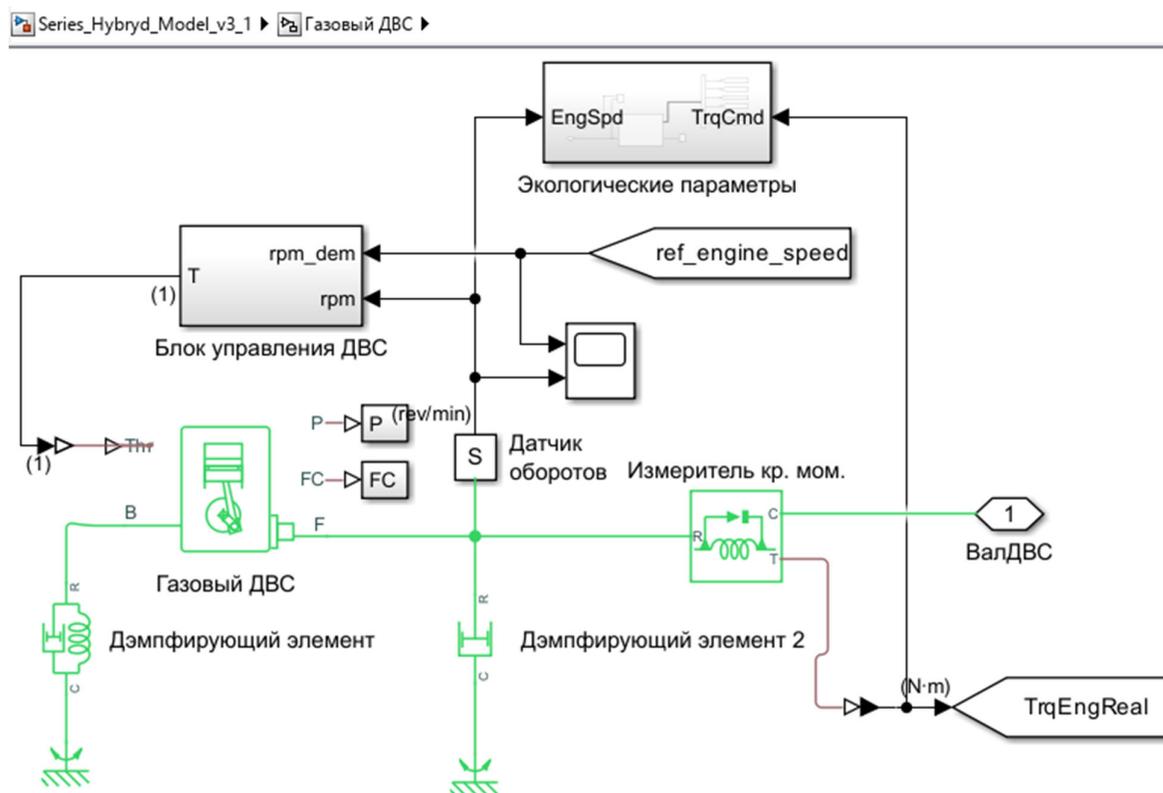


Рисунок 3.7. Содержание блока «Газовый ДВС»

Коммунальная машина имитируется блоком «Машина», представленным на рисунке 3.8. В блоке находится редуктор с заданным понижающим коэффициентом. Блок «Блок имитации машины» получает на вход крутящий момент на валу, содержит в себе параметры транспортного средства и выдает на

выходе текущую скорость машины, которая обрабатывается в Блоке управления, рассмотренным ранее, и сопоставляется с заданной скоростью движения (графиком скорости) коммунальной машины.



Рисунок 3.8. Содержание блока «Машина»

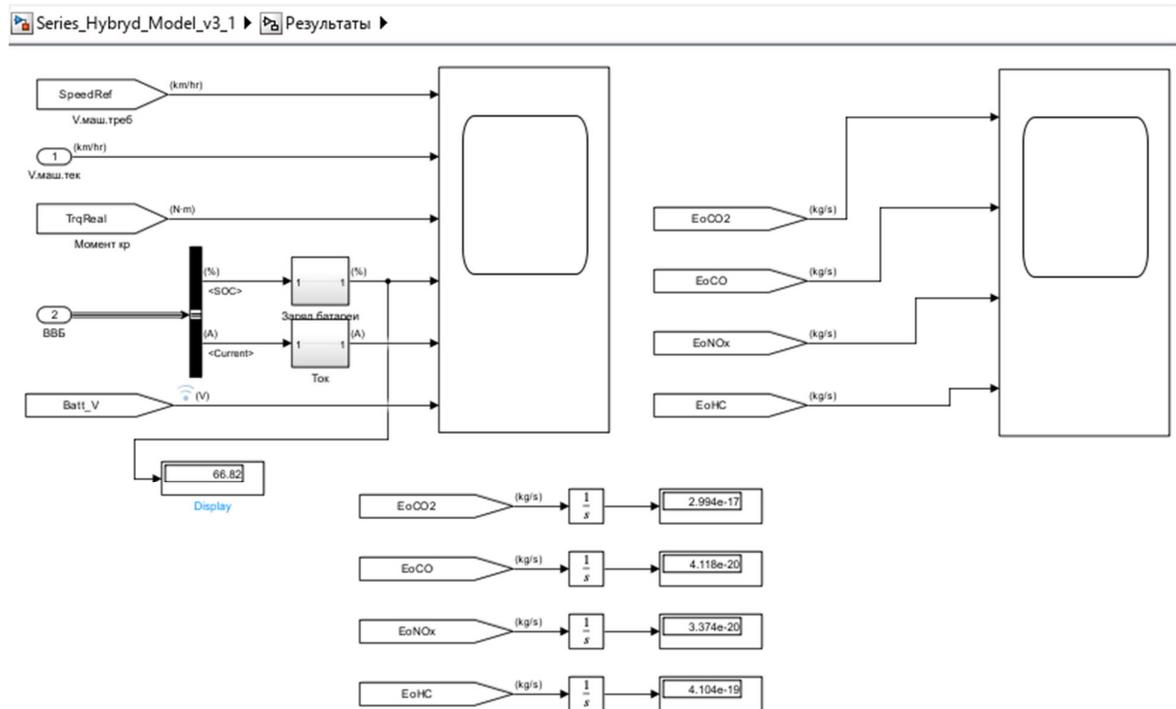


Рисунок 3.9. Содержание блока «Результаты»

Результаты измерений собираются в блоке «Результаты», представленном на рисунке 3.9. В данном блоке аккумулируются сигналы со всех блоков и subsystem модели и выводятся в виде графиков или численных значений.

3.2.2 Математическая модель движения КМ

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, соотношений, с помощью которых моделируется работа коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем. Укрупненный алгоритм разработанной математической модели движения КМ, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем, учитывающей изменяемые во времени параметры машины представлен на рисунке 3.10.

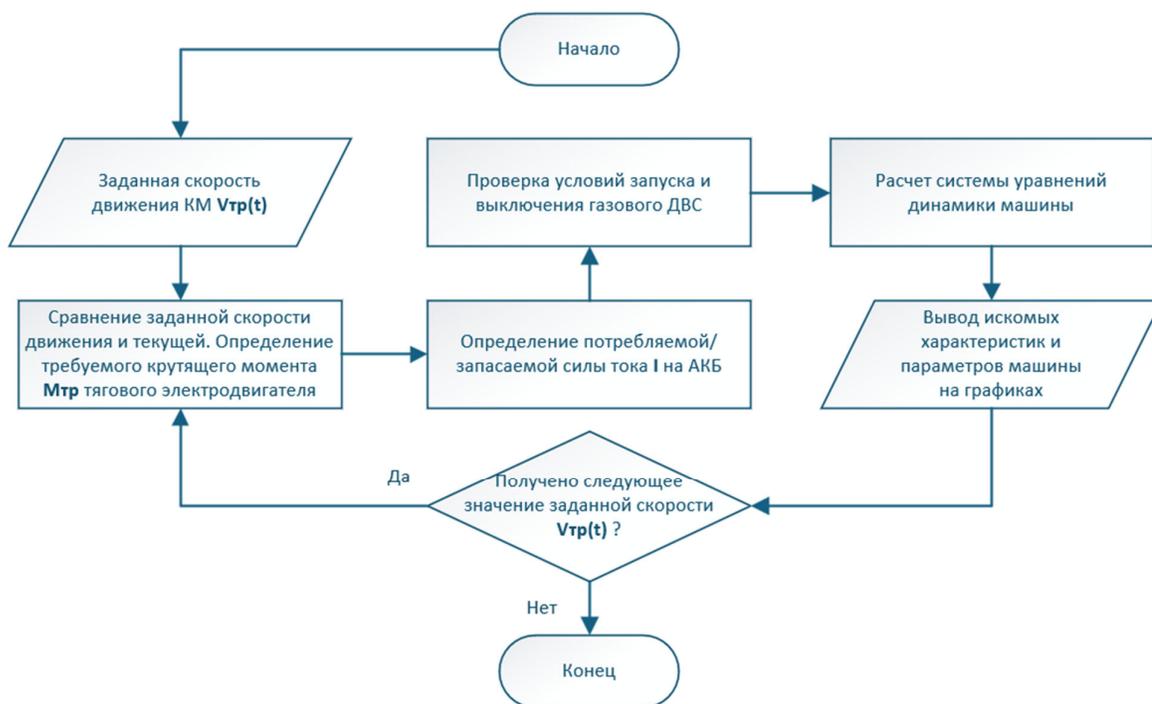


Рисунок 3.10. Укрупненный алгоритм новой математической модели движения КМ, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем, учитывающей изменяемые во времени параметры машины

На входе в модель задаются исходные данные в виде зависимости скорости КМ от времени $V_{\text{тр}}(t)$. Пример исходных данных показан в приложении А.

Частота дискретизации модели Δt варьируется от 0,001 до 1 секунды. Решатель цифровой модели уменьшает частоту дискретизации для повышения точности при определенных событиях во время моделирования, таких как быстрые изменения состояния, события перехода через ноль и т. д. Решатель увеличивает частоту дискретизации, чтобы избежать ненужных шагов, когда состояния модели изменяются медленно.

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 $n_{\text{тр}}$ по формуле:

$$n_{\text{тр}} = 2,65 \frac{V_{\text{тр}}}{R} K \quad (3.1)$$

где $V_{\text{тр}}$ – 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 $M_{\text{тр}}$ удовлетворяет условиям:

$$M_{\text{тр}} \propto (n_{\text{тр}} - n_{\text{тек}})k_{\text{ус}} \quad (3.2)$$

$$-M_{\text{макс}} \leq M_{\text{тр}} \leq M_{\text{макс}} \quad (3.3)$$

где $n_{\text{тек}}$ – текущая частота вращения вала тягового электродвигателя, об/мин;

$k_{\text{ус}}$ – коэффициент усиления;

$M_{\text{макс}}$ – 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 $M_{\text{макс}}$ и $N_{\text{макс}}$ 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 $P_{\text{эл}}$, электрическая мощность, теряемая во время работы $P_{\text{пот}}$ определяются по формулам:

$$I = \frac{P_{\text{эл}}}{U} \quad (3.4)$$

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{пот}} + \omega_{\text{рот}} M'_{\text{тр}} \quad (3.5)$$

$$P_{\text{пот}} = k M'_{\text{тр}}{}^2 \quad (3.6)$$

$$k = \frac{\omega_{\text{ном}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{эд}}}{100}\right)}{M_{\text{ном}} \frac{\eta_{\text{эд}}}{100}} \quad (3.7)$$

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:

$$M_{\text{ин}} = J \frac{d\omega_{\text{рот}}}{dt} \quad (3.8)$$

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:

$$P_{\text{трД}} = (1 - \eta_{\text{дф}}) \frac{2\pi M'_{\text{тр}} n_{\text{тек}}}{60} \quad (3.9)$$

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

Дифференциал соединен с осями колес машины. Оси с колесами обчитываются в блоке машины. Блок машины рассчитывает движение цифрового двойника КМ следующим образом: движение транспортного средства является результатом суммарного эффекта всех сил и моментов, действующих на него. Точки приложения сил схематично изображены на рисунке 3.11.

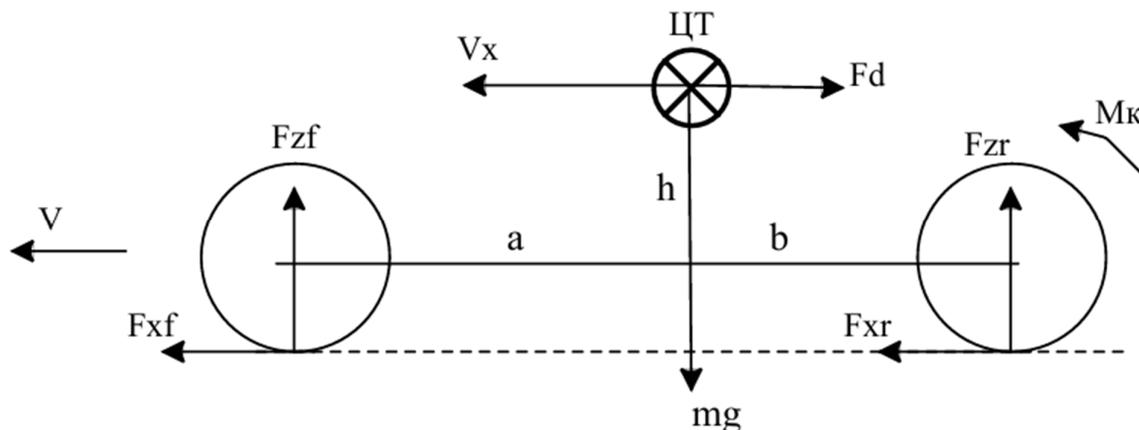


Рисунок 3.11. Схема приложения сил к моделируемой КМ,

где: V_x – текущая скорость цифрового двойника 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 цифрового двойника 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 ЦТ. Независимо от того, движется ли транспортное средство вперед или назад, аэродинамическое сопротивление замедляет его. Динамика транспортного средства описывается уравнениями:

$$m\dot{V}_x = F_x - F_d \quad (3.10)$$

$$F_x = 2(F_{xf} + F_{xr}) \quad (3.11)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A V_x^2 \quad (3.12)$$

$$F_{zf} = \frac{-h(F_d + m\dot{V}_x) + bmg}{2(a+b)} \quad (3.13)$$

$$F_{zr} = \frac{+h(F_d + m\dot{V}_x) + amg}{2(a+b)} \quad (3.14)$$

где C_d – коэффициент сопротивления воздуха;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

A – площадь передней части КМ, м²;

Нормальные силы, действующие на колеса, удовлетворяют равенству:

$$F_{zf} + F_{zr} = \frac{mg}{2} \quad (3.15)$$

Уравнение поступательного движения нескользящей, неподатливой шины имеет вид:

$$V_x = R\Omega \quad (3.16)$$

где Ω – угловая скорость колеса, об/сек.

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

$$F_{ск} = F_z \mu \quad (3.17)$$

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:

$$Q_{\text{ост}} = Q_{\text{нач}} - \int_0^T I(t) dt \quad (3.18)$$

$$Q = \frac{Q_{\text{ост}}}{Q_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad (3.19)$$

где $Q_{\text{нач}}$ – стартовый заряд АКБ, А·ч;

I – сила тока на клеммах АКБ, А;

$Q_{\text{ном}}$ – номинальный заряд АКБ, А·ч.

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

$$P_{\text{акб}} = I^2 R_{\text{вн}} \quad (3.20)$$

где $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление батареи, Ом;

Условие запуска газового ДВС имеет вид:

$$\begin{cases} Q \leq B_{\text{н}} \\ B = 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

Условие выключения газового ДВС имеет вид:

$$\begin{cases} Q \geq B_{\text{в}} \\ B = 1 \end{cases} \quad (3.22)$$

где B – показатель состояний газового ДВС. $B = 0$, когда ДВС выключен; $B = 1$, когда ДВС включен;

$B_{\text{н}}$ – нижняя граница запуска газового ДВС, %;

$B_{\text{в}}$ – верхняя граница запуска газового ДВС, %;

Эффективная мощность N_e и эффективный крутящий момент M_e газового ДВС определяются по формуле:

$$N_e = N_{\text{ном}} \left(s_1 \frac{n_e}{n_N} + s_2 \frac{n_e^2}{n_N} - s_3 \frac{n_e^3}{n_N} \right) \quad (3.23)$$

$$M_e = 3 \cdot 10^4 \frac{N_e}{\pi n_e} \quad (3.24)$$

где $N_{\text{ном}}$ – номинальная мощность газового ДВС, Вт;

n_e – текущая частота вращения вала газового ДВС, об/мин;

n_N – номинальная частота вращения вала газового ДВС, об/мин;

s_1, s_2, s_3 – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа двигателя.

Для двигателей с газовой топливной системой: $s_1=0,094$; $s_2= 3,469$; $s_3= 2,583$.

[12]

Крутящий момент от газового ДВС передается к генератору. Генератор представлен соответствующим блоком, объединяющим бесколлекторный (вентильный) двигатель и привод с замкнутым контуром регулирования крутящего момента. Блок объединяет в себе электродвигатель, приводную электронику и систему управления. Максимальные допустимые значения мощности и крутящего момента генератора обозначены $M_{\text{мг}}$ и $N_{\text{мг}}$ соответственно. Блок генератора подсоединен идеальными проводами к АКБ. При подаче на блок генератора крутящего момента, блок генерирует электроэнергию и запасает ее в АКБ. Расчет показателей силы тока I_{Γ} , электрической мощности, рассчитываемой блоком $P_{\text{элг}}$, электрической мощности, теряемой $P_{\text{пт}}$ на генераторе осуществляется следующим образом:

$$I_{\Gamma} = \frac{P_{\text{элг}}}{U_{\Gamma}} \quad (3.25)$$

$$P_{\text{элг}} = P_{\text{пт}} + \omega_{\text{рг}} M_e \quad (3.26)$$

$$P_{\text{пт}} = k_{\Gamma} M_e^2 \quad (3.27)$$

$$k_{\Gamma} = \frac{\omega_{\text{нг}} \left(1 - \frac{\eta_{\Gamma}}{100} \right)}{M_{\text{нг}} \frac{\eta_{\Gamma}}{100}} \quad (3.28)$$

где U_r – напряжение на клеммах генератора, В;

$\omega_{рг}$ – угловая скорость ротора генератора, рад/с;

k_r – коэффициент пропорциональности для потерь сопротивления на генераторе, рад/Нм·с;

$\omega_{нг}$ – номинальная угловая скорость ротора генератора, рад/с;

$M_{нг}$ – номинальный крутящий момент генератора, Нм;

η_r – КПД генератора.

Остановка цифрового двойника длится 80 секунд и наступает при выполнении следующих условий:

$$\begin{cases} V_x \leq 4 \frac{\text{км}}{\text{ч}} \\ \Delta T \geq 80 \text{ с} \\ S = 0 \end{cases} \quad (3.29)$$

где S – показатель остановки КМ. $S = 0$, когда условие остановки не наступало в течение последних 80 секунд моделирования; $S = 1$, когда условия остановки были выполнены в течение последних 80 секунд моделирования;

ΔT – промежуток времени, на котором скорость КМ была ≤ 4 км/ч, с.

Каждая остановка увеличивает счетчик остановок $S_{ост}$ на 1.

Во время остановки цифрового двойника 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:

$$P_{гн} = \frac{U_{гн}^2}{R_{гн}} = \frac{U^2}{k_{гн}^2 R_{гн}} \quad (3.30)$$

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:

$$m = m_{сн} + m_{кон} (S_{ост} \text{ mod } S_{пц}) \quad (3.31)$$

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 за один цикл [63].

3.2.3 Выбор узлов и агрегатов

В качестве базового шасси выбран грузовик категории N2 – JAC N120. Выбор данного транспортного средства обусловлен тем, что в АО «Автопарк №1 «Спецтранс» основную часть мусоровозов класса N2 составляют модели JAC N120 с объемом бункера 10 м³. Также, на базе предприятия уже проводились исследования по электрификации данной модели и имеются технические наработки по переоборудованию на электрическую тягу.

Таблица 3.1 – Массогабаритные характеристики шасси JAC N120

Параметр	Значение
Модель двигателя	ISF3.8S5168
Мощность двигателя, кВт	125
Объем двигателя, л	3,76
Масса двигателя нетто, кг	416
Экологический класс двигателя	Евро-5
КПП	6DS60T-D
Масса КПП, кг	130
Масса карданного вала, кг	50
Колесная база, мм	4700
Снаряженная масса шасси (кг)	4230
Грузоподъемность шасси (кг)	7750
Полная масса (кг)	11980

Массогабаритные характеристики шасси JAC N120 представлены в таблице 3.1.

Гидропривод кантователя и пресса JAC N120 осуществляется tandemным гидронасосом OMFV NPH 17 с рабочим объемом 17 куб. см. Характеристики гидронасоса представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики гидронасоса OMFV NPH 17

Параметр	Значение
Расход, л/мин	17
Давление, МПа	29
Частота вращения макс., об/мин	2500
КПП	6DS60T-D
Рабочий объем гидронасоса, куб. см.	17,04
Масса, кг	9,6
Потребляемая мощность	8.95 кВт

Для привода гидронасоса необходимо рассмотреть 10 кВт электродвигатель, вместо штатного привода от ДВС. Ввиду широкого предложения 10 кВт ВИД на рынке, в диссертационной работе не будет рассматриваться выбор данного электродвигателя и его расчет.

Выбор газового ДВС.

Ввиду того, что один из основных акцентов исследования сделан на экологичности транспортно-технологического средства, ДВС необходимо выбрать из стандартной линейки газовых двигателей, доступных для приобретения в России. Ярославским моторным заводом выпускаются двигатели серии ЯМЗ-530 CNG, но их мощность начинается от 150 л.с. [36]. Самые малолитражные газовые двигатели представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Малолитражные газовые ДВС

Модель двигателя	Номинальная мощность, кВт (л.с.)
ЯМЗ-53424	110 (150)
ЯМЗ-53444	110 (150)
Weichai WP5NG165E51	121/165
Weichai WP5NG180E51	132/180
Weichai WP2.3NG102E300	75/102

В главе 2.1 были исследованы режимы работы газовых двигателей. Рассматривалась эффективность двигателя в зависимости от нагрузки. По результатам исследования был сделан вывод, что целесообразно эксплуатировать газовый двигатель при постоянных нагрузках. Таким образом, для разрабатываемой модели последовательного гибрида будет применен газовый двигатель Weichai WP2.3NG102E300. Для достижения максимального КПД, двигатель будет работать в номинальном режиме. Характеристики выбранного двигателя представлены в таблице 3.4

Таблица 3.4 – Характеристики газового двигателя Weichai
WP2.3NG102E300

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВт	74,8
Частота вращения для Номинальной мощности, об/мин	2300
Максимальный крутящий момент, Нм	380
Частота вращения для Максимального крутящего момента, об/мин	1400
Степень сжатия	12
Объем двигателя, л	2.289

Тепловой расчет выбранного двигателя в рамках данного диссертационного исследования не осуществляется, так как делается допущение, что поставляемой с двигателем штатной системы охлаждения будет достаточно для его охлаждения. При необходимости можно осуществить тепловой расчет в соответствии с методикой теплового расчета рабочего цикла автомобильных газовых двигателей [41].

Выбор генератора.

В главе 2.5 рассмотрены преимущества и недостатки электродвигателей, приведено обоснование выбора вентильно-индукторного привода. Таким образом, в качестве генератора рассматривается электродвигатель, работающей в режиме генератора. Так как газовый ДВС имеет мощность 75 кВт, то генератор должен быть сопоставимой мощности. Перечень подходящих ВИД приведен в таблице 3.5. Данные взяты из источников [8, 9].

Таблица 3.5 – Вентильно-индукторные двигатели

Модель двигателя / характеристика	SPM ДВИТ 110	ВМЭД-01	Rawsun RSTM420	Rawsun RSTM423	Rawsun RSTM262-J
Номинальная мощность, кВт	110	120	115	70	50
Пиковая мощность, кВт			150	120	90
Масса, кг	275	165	134	87	64
КПД, %	94,7	96	97,1	96,4	95,7
Номинальная частота вращения, об/мин	3000	1415	2000	2000	3000
Максимальная частота вращения, об/мин	6000		4500	4500	6000
Номинальный крутящий Момент, Нм			550	335	160
Максимальный крутящий Момент, Нм	800		1000	600	350
Номинальный ток, А			200	165/210	140
Максимальный ток, А			340	295/370	300
Габариты (гл., диам.), мм	313x682		369x557	283x513	369x290
Рабочее напряжение батареи, В		300	540	540/380	380
Инерция ротора, 10 ⁻⁴ кг.м			3643	2278	410

В качестве генератора выбираем Rawsun RSTM262-J номинальной мощностью 50 кВт.

Выбор преобразователя частоты.

Таблица 3.6 – Преобразователи частоты

Модель двигателя	Rawsun RMC120	ЧЕРГОС ПТСД 202-М-АВЕ-130	ЧЕРГОС ПТСД-202М-150
Характеристика			
Рекомендуемая мощность, кВт	80	130	150
Пиковая мощность, кВт	120	220	250
Масса, кг	11,5	20	25
КПД, %	97	99,2	
Высоковольтный диапазон, В	260-720		
Габариты (ДШГ.), мм	380x280x98		402x402x157
Номинальный ток, А	250		
Максимальный ток, А	400		

Подходящие по характеристикам преобразователи частоты представлены в таблице 3.6. Для генератора выбираем преобразователь Rawsun RMC120.

Выбор аккумуляторной батареи.

Для АКБ основными параметрами являются: номинальное напряжение батареи, номинальный и максимальный токи, отдаваемые батареей. Параметры АКБ подбираются для соответствия характеристикам работы тягового электродвигателя. В зависимости от количества и схемы подключения аккумуляторных ячеек достигаются необходимые характеристики АКБ. Также, у батареи должна присутствовать возможность заряжаться от сети предприятия 220 В. АКБ собирается из аккумуляторных ячеек LT LFP72, так как в Спецтрансе ранее успешно проведены эксперименты по эксплуатации электромобиля, АКБ которого состояла из вышеуказанных ячеек. Также, существует альтернатива с ячейками Ni-MH, описанная Капустиным А.А. в учебном пособии [22].

Оптимальным решением, с точки зрения необходимых параметров АКБ, ее массы и габаритов, будет следующее: по правому и левому борту коммунальной машины, крепится по одному аккумуляторному блоку. Каждый блок состоит из 120 последовательно соединенных ячеек LT LFP72 (LiFePO₄, 72Ah, 3.2V, 1.8 кг). Блоки соединены параллельно. АКБ оснащена системой контроля заряда-разряда (СКЗ, BMS – Battery Management System). Итоговые характеристики АКБ представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Характеристики АКБ

Параметр	Значение
Количество ячеек LT LFP72, шт.	240
Общая масса АКБ, кг	450 (225x2)
Номинальное напряжение АКБ, В	384
Номинальный ток, А	144
Максимальный кратковременный ток, А	288
Емкость АКБ, кВтч (Ач)	55,3 (144)
Количество циклов заряда-разряда, шт.	>3000

Способ расчета количества параллельно и последовательно соединенных ячеек для АКБ подробно описан в источнике [118].

Выбор тягового электродвигателя.

Выбор тягового электродвигателя обусловлен выбором по мощности и вольт-амперным характеристикам собранной АКБ. По данным таблицы 3.5 выбираем тяговый электродвигатель Rawsun RSTM423 номинальной мощностью 70 кВт и рабочим напряжением 380 В.

Для тягового электродвигателя выбираем преобразователь ЧЕРГОС ПТСД 202-М-AVE-130.

Переоборудование базового шасси на гибридный силовой блок

Для подготовки шасси к переоборудованию на гибридный силовой блок потребуется: произвести демонтаж ДВС, маховика, сцепления, КПП, карданного вала, бака для ДТ, бака для мочевины и т.д. По приблизительным подсчетам масса демонтируемого оборудования составляет около 0,68 тонны, таблице 3.8. Масса монтируемого оборудования составляет 0,96 тонны. Таким образом снаряженная масса коммунальной машины увеличивается примерно на 250-300 кг, что несущественно и сопоставимо с загрузкой партии ТКО на одной остановке (2-3 полных мусорных контейнера).

Таблица 3.8 – Монтаж и демонтаж узлов и агрегатов

Наименование узла/агрегата	Демонтаж, кг	Монтаж, кг
ДВС ISF3.8S5168	416	
Маховик ISF 3.8 5259641	20	
Сцепление ISF	32	
КПП 6DS60T-D	130	
Карданный вал	50	
Бак для ДТ	30	
Бак для мочевины	5	
Газовая аппаратура		5
Газовый ДВС WP2.3NG102E300		225
Вентильный генератор RSTM262-J		64
Преобразователь напряжения генератора RMC120		12
Высоковольтные АКБ, 2 шт. в сборе		450
Тяговый электродвигатель RSTM423		87
Преобразователь напряжения электродвигателя ПТСД 202-М-AVE-130		20

Окончание таблицы 3.8.

Кассета полимеркомпозитных баллонов для КПП		100
Итого масса:	-683	+963

Стоит дополнить, что в случае применения кассеты с цельнометаллическими баллонами, а не с полимеркомпозитными, масса кассеты будет в 2 раза больше. Кассету баллонов можно монтировать по схеме, предложенной А. Л. Пенкиным [69].

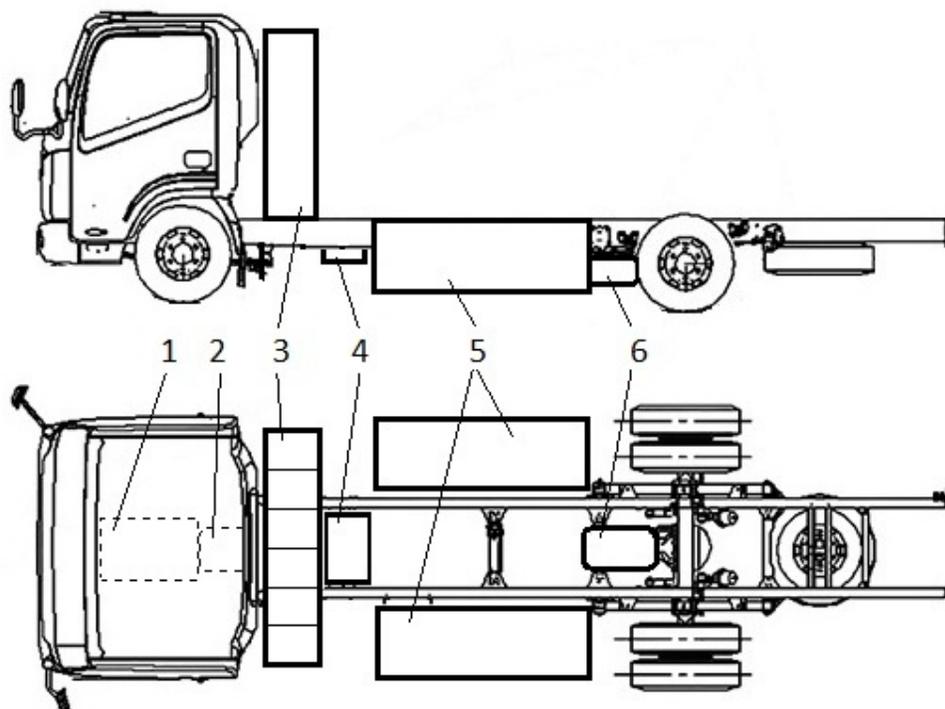


Рисунок 3.12. Компонировочная схема гибридного мусоровоза:

1 – газовый ДВС малой мощности; 2 – генератор; 3 – кассета баллонов КПП; 4 – преобразователь напряжения; 5 – высоковольтные батареи; 6 – электромотор (генератор).

Монтируемые узлы и агрегаты: газовый ДВС, генератор, преобразователи напряжения генератора, высоковольтные АКБ, электродвигатель, преоб-

разователь напряжения электродвигателя, кассета баллонов для КПП. Компонентная схема переоборудованного шасси представлена на рисунке 3.12.

3.2.4 Параметры цифровой модели

Цифровая модель содержит параметры, которые возможно корректировать. Изменяя значения показателей можно выбирать необходимые параметры машины и параметры агрегатов и силовых установок. За счет этого возможно провести цифровые испытания не только различных маршрутов движения, но и различных конфигураций транспортных средств. Часть значений параметров выбрана исходя из характеристик базового шасси. Перечень параметров представлен в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Перечень параметров цифровой модели

Параметр	Значение	Обозначение в компьютерной модели	Обозначение в математической модели
Номинальное напряжение батареи, В	384	BatNominalVoltage V	U
Номинальный заряд батареи, А/ч	144	BatNominalCharge Ahr	$Q_{ном}$
Внутреннее сопротивление батареи, Ом	0.021	BatInternalResistance Ohm	$R_{вн}$
Радиус колеса, м	0.392	TireRollingRadius m	R
Передаточное число дифференциала	4.875	ReductionGearRatio	$K_{\partial\phi}$
Стартовый заряд батареи, А/ч	144	InitialBatCharge Ahr	$Q_{нач}$
Максимальный крутящий момент электродвигателя, Нм	600	ElMotorTrqMax Nm	$M_{макс}$
Максимальная мощность электродвигателя, кВт	120	ElMotorPowerMax kW	$N_{макс}$
Инерция ротора электродвигателя, кг*м ²	0.0005	ElMotorInertia kg m ²	J
КПД электродвигателя	96.4	ElMotorEfficiency pct	$\eta_{эд}$
Номинальная частота вращения электродвигателя, об/мин	2000	ElMotorSpdEff rpm	$\omega_{ном} * 60/2\pi$
Номинальный крутящий момент электродвигателя, Нм	335	ElMotorTrqEff Nm	$M_{ном}$
КПД редуктора	0.98	ReductionGearEff	$\eta_{\partial\phi}$
Снаряженная масса КМ	4500	VehicleMass kg	$m_{сн}$
Коэффициент сопротивления качению колеса	0.017	TireRollingCoeff	μ
Коэффициент сопротивления воздуха	0.31	AirDragCoeff	C_d

Окончание таблицы 3.9.

Площадь передней части КМ, м ²	5.65	VehicleFrontArea m2	A
Нижний порог запуска ДВС, % батареи	30	ICELowTreshhold	B_n
Верхний порог остановки ДВС, % батареи	70	ICEMaxTreshhold	B_v
Номинальная мощность газового ДВС, кВт	74.8	ICENominalPower kW	$N_{ном}$
Номинальная частота вращения вала газового ДВС, об/мин	2300	ICENominalSpeed rpm	n_N
Максимальная мощность генератора, кВт	90	GenMaxPower kW	$N_{мг}$
Максимальный крутящий момент генератора, Нм	350	GenMaxTorque Nm	$M_{мг}$
КПД генератора	95.7	GenEff	$\eta_{г}$
Номинальная частота вращения генератора, об/мин	3000	GenNominalSpeed rpm	$\omega_{нг} * 60/2\pi$
Номинальный крутящий момент генератора, Нм	160	GenNominalTorque Nm	$M_{нг}$
Масса погрузки мусора за остановку, кг	250	ContainerM kg	$m_{кон}$
Количество загрузок за один цикл	21	ContainerCount	$S_{пц}$
Плотность воздуха	1.25	AirDensity kgpm ³	ρ
Высота центра тяжести КМ над землей, м	1.2	CGHeight m	h
Расстояние от передней и задней осей до точки нормальной проекции центра тяжести КМ на общую плоскость осей, м	4.5 2.5	CGtoFrontAxle CGtoRearAxle	a, b
Резистор гидронасоса, Ом	1	HydroPumpResist Ohm	$R_{гн}$
Коэффициент понижающего трансформатора гидронасоса	4	StepDownTransKoeff	$k_{гн}$

3.3 Выводы к главе 3

1. Разработана цифровая модель коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем. Описание модели состоит из исходной гипотезы, основных допущений, применяемых ограничений, структуры модели и инструмента построения.

2. Разработана математическая модель движения коммунальной машины, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем, учитывающая изменяемые во времени параметры машины.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

4.1 Эксплуатационные испытания (натурный эксперимент)

Эксплуатационные испытания выполняются с участием коммунальных машин организации АО «Автопарк №1 «Спецтранс». АО «Автопарк №1 «Спецтранс» (далее по тексту – Спецтранс) – самый крупный на Северо-Западе России поставщик услуг в области обращения с отходами, работает в Санкт-Петербурге с 1936 года. Производственная база предприятия включает в себя 388 единиц спецтехники (по состоянию на октябрь 2024 года), автоматизированный комплекс по сортировке и переработке отходов, современный лицензированный полигон, завод по производству спецоборудования. Ежегодно предприятие вывозит более 4,3 млн. м³ отходов (43-45% всех ТКО города).

4.1.1 Исходная гипотеза и границы

Предпосылкой для проведения эксплуатационных испытаний послужила необходимость получить «треки» существующих маршрутов коммунальных машин. Под треками подразумевается зависимость мгновенной скорости коммунальной машины от времени движения. То-есть трек представляет собой шаблон изменения скорости коммунальной машины, в зависимости от маршрута.

Получение треков необходимо в дальнейшем для проведения исследования цифровой модели. По заданным трекам – зависимости скорости КМ от времени, тестируется разрабатываемая цифровая модель.

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.

4.1.2 Планирование и подготовка

Для проведения эксплуатационных испытаний были выбраны бункерные мусоровозы категории N2 на платформе JAC N120 с задним типом погрузки, обслуживающие 12 различных маршрутов в центре Санкт-Петербурга. Выбранные машины были дооборудованы маячковыми трекерами модели «Scout MT-850+», рисунок 4.1.



Рисунок 4.1 Маячковый трекер Scout

Эксплуатационные данные машины, такие как: запас топлива, координаты местонахождения, мгновенная скорость с помощью маячковых трекеров собираются в единую базу мониторинга. Обработку полученных данных и формирование отчета мониторинга производит специализированное программное обеспечение «Скаут Онлайн». Данные мониторинга дооборудованных машин, рисунок 4.2, можно загружать в личном кабинете на сайте «online.scout-gps.ru» [54].



Рисунок 4.2 Дооборудованный маячковым трекером мусоровоз JAC N120

4.1.3 Проведение испытаний

Эксплуатационные испытания можно представить в двух видах: в графическом отображении треков коммунальных машин и в виде отчета с эксплуатационными показателями.

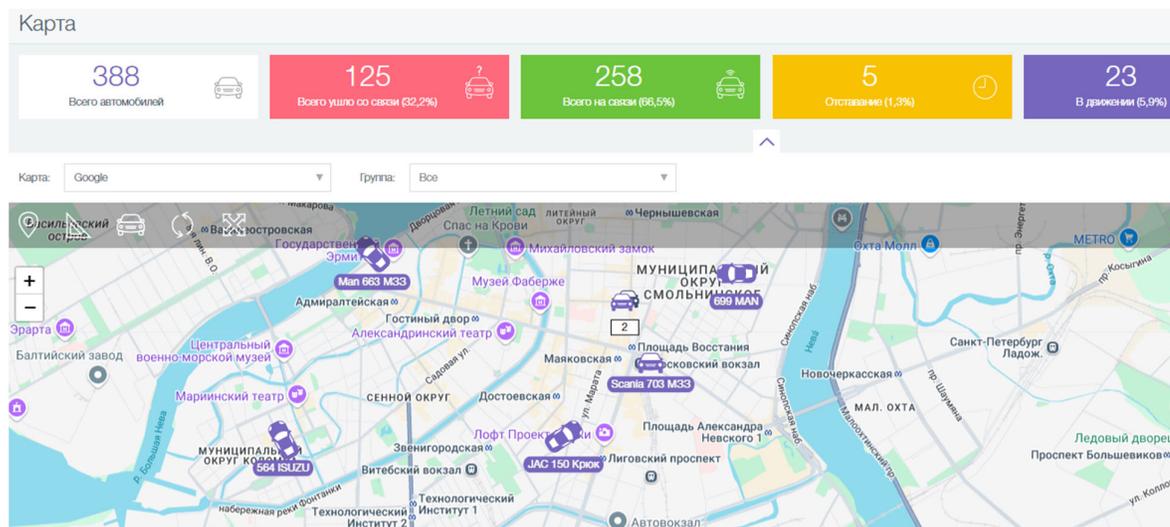


Рисунок 4.3. Интерфейс мониторинговой программы «Скаут Онлайн».

Интерфейс мониторинговой программы «Скаут Онлайн» представлен на рисунке 4.3.

На рисунке 4.4 представлен трек коммунальной машины по одному из исследуемых маршрутов.

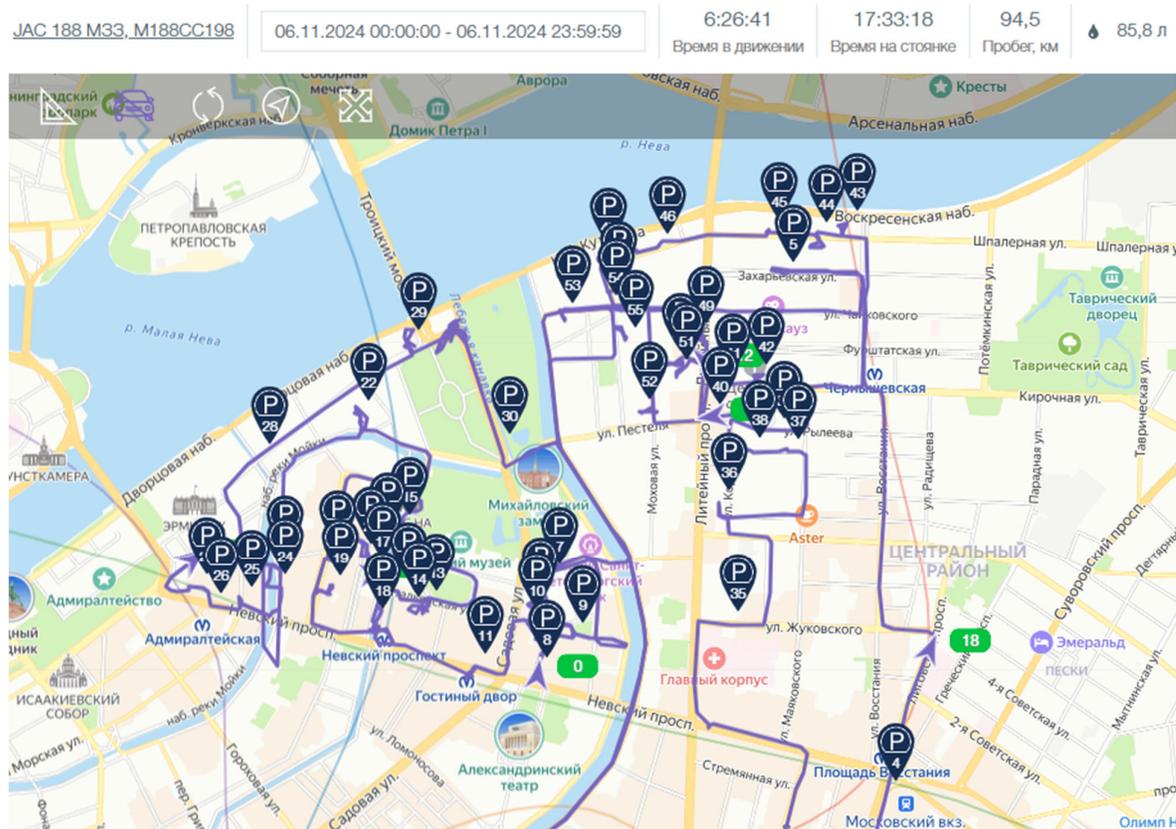


Рисунок 4.4. Трек мусоровоза 188 JAC (M188CC198) за 06.11.2024 г.

4.1.4 Результаты

Результаты исследования 12-ти маршрутов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты исследования маршрутов 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

Окончание таблицы 4.1.

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 4.5, 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.

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 07:10:54	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 4.5. Часть отчета движения и стоянок мусоровоза 188 JAC за 06.11.2024 г.

Таким образом, по результатам эксплуатационных испытаний получены значения мгновенных скоростей движения исследуемых машин по 12 маршрутам. Полученные данные можно использовать для проведения цифровых испытаний коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем и применения разработанного метода оценки.

4.2 Цифровые испытания

Цифровые испытания проводятся с использованием цифровой модели коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем. Зарубежные ученые тестируют цифровые модели набором стандартных ездовых циклов: The New European Drive Cycle (NEDC) – 1200 sec; The United States Federal Test Procedure (US-FTP) drive cycle – 1000 sec; The Australian urban drive cycle – 1400 sec; Mixed driving cycle – 7000 sec [7]. В данном диссертационном исследовании, ввиду специфики работы коммунальных машин и наличию ездовых циклов исследуемых машин, для тестирования цифровой модели используется ездовые циклы на основе реальных данных программы мониторинга.

4.2.1 Исходные данные

Исходные данные для цифровых испытаний получены по результатам эксплуатационных испытаний. Для маршрута № 6 исходные данные представлены в приложении А. Для остальных маршрутов данные в диссертационном исследовании не приводятся в связи с их большим объемом.

Для каждого из 12-ти маршрутов проводятся цифровые испытания. Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ [63], осуществляющая расчет движения коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем по заданным исходным данным (по 12-ти маршрутам).

Для примера, графическая интерпретация движения за первые 100 секунд по маршруту № 6 представлена на рисунке 4.6. Жирной зеленой линией показан график заданной скорости по мгновенным значениям, тонкой синей линией показан график скорости цифрового двойника. Как видно из рисунка, график скорости цифрового двойника практически соответствует заданному графику движения. Незначительные расхождения вызваны тем, что цифровой двойник машины стремится соответствовать значениям заданной скорости, но

это не всегда возможно в силу наличия инерции модели и возможных погрешностей маячковых трекеров на реальной машине.

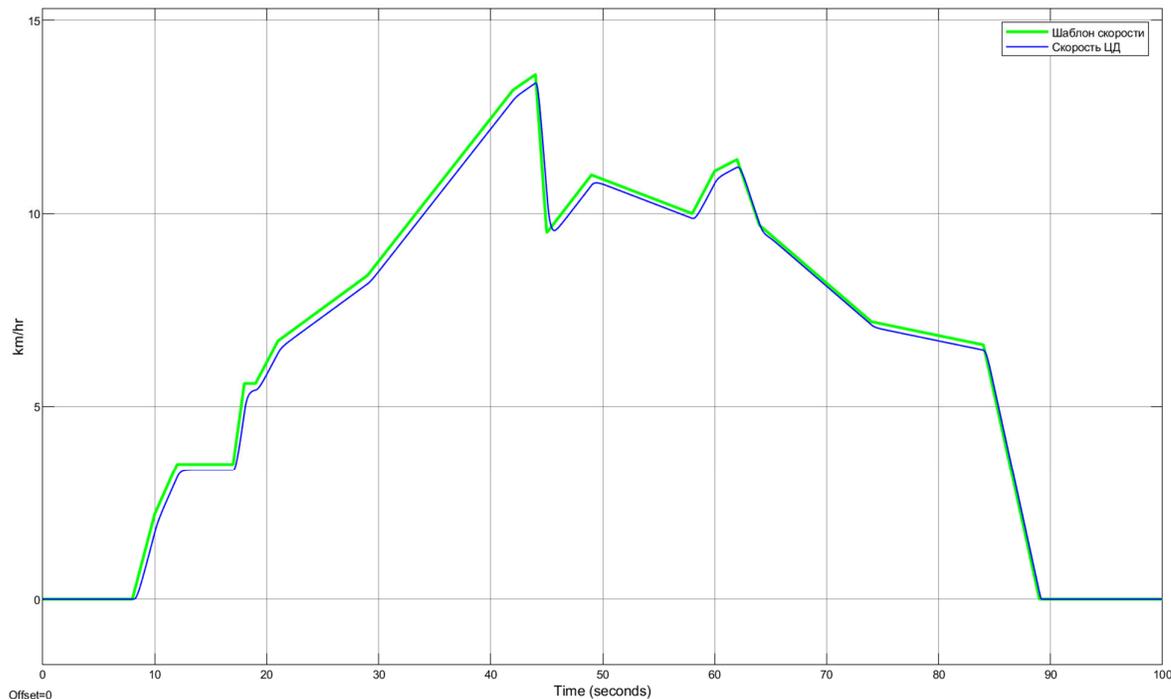


Рисунок 4.6. Графическая интерпретация движения мусоровоза 188 JAC за 06.11.2024 г. в промежуток времени с 07:09:40 по 07:11:19.

4.2.2 Графическое отображение испытаний

Результаты цифровых испытаний отображаются в виде графиков и в виде численных показателей измеряемых величин. На рисунке 4.7 представлены графики: заданной (шаблонной) скорости, скорости действительной, крутящего момента тягового электродвигателя, заряда батареи, силы тока отдачи (приема) батареи, напряжения на клеммах батареи. Графики получены по результатам цифровых испытаний цифровой модели, протестированной на маршруте № 6 за первый час движения цифрового двойника машины.

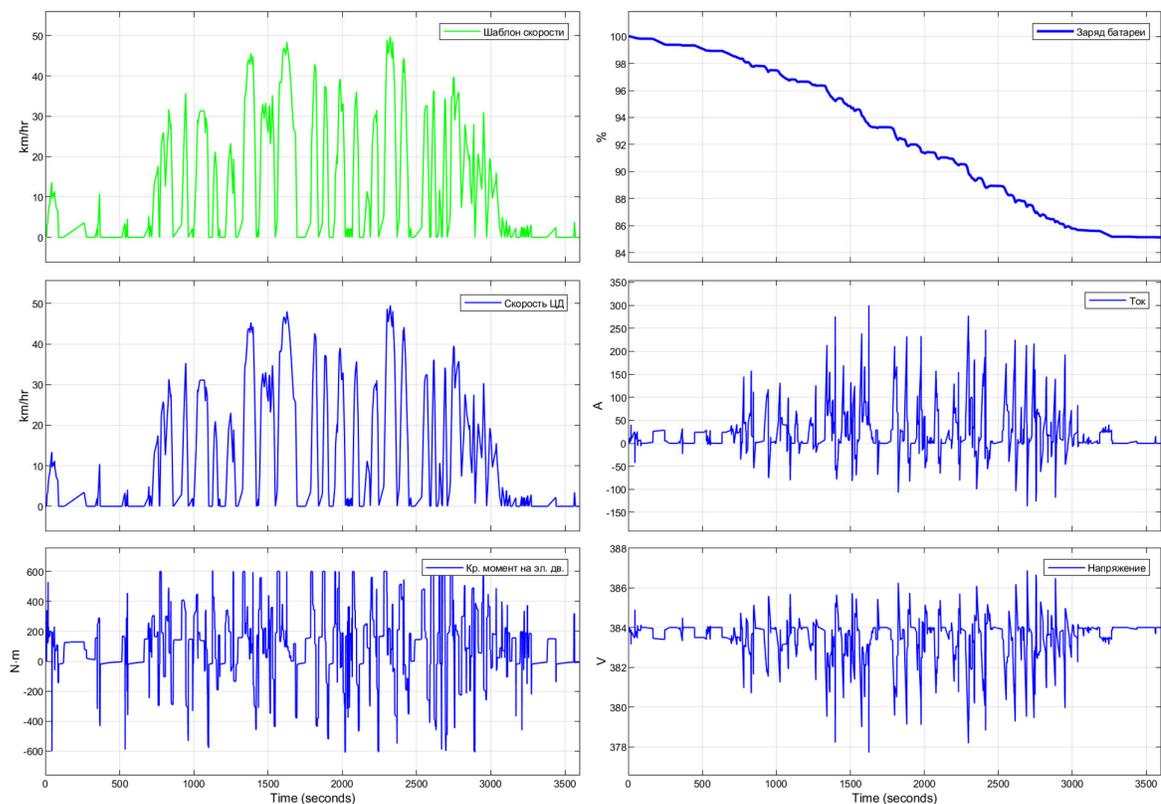


Рисунок 4.7. Результаты работы цифровой модели, протестированной на маршруте № 6 за первые 3600 секунд движения.

На рисунке 4.8 показано наложение заданной скорости и скорости цифрового двойника машины при первых 3600 секундах движения. Как видно из рисунка, расхождение скоростей ничтожно (визуально не идентифицируется).

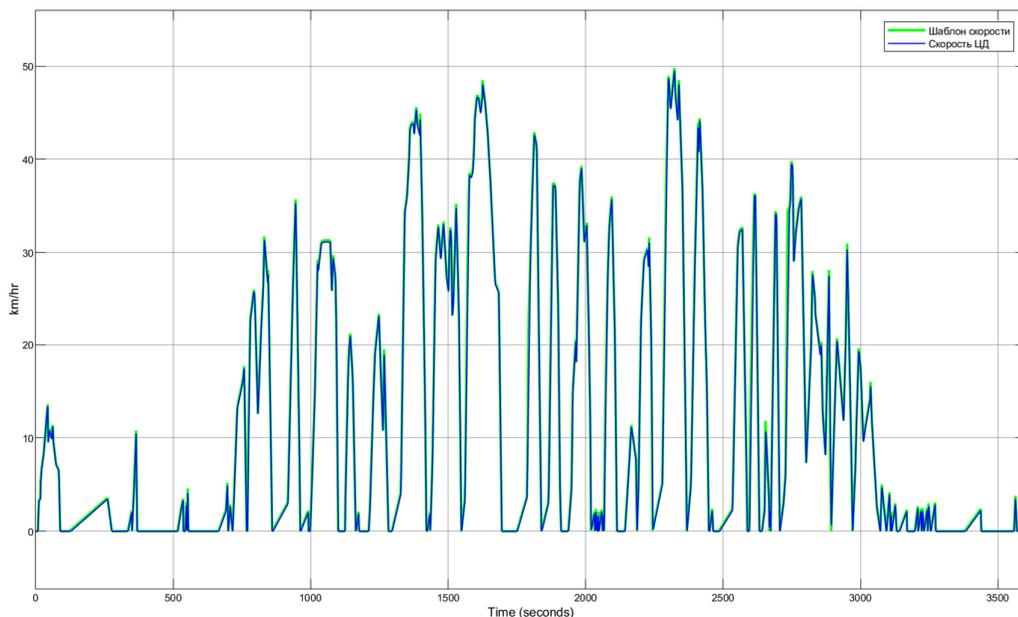


Рисунок 4.8 График наложения заданной и действительной скорости цифрового двойника машины, на маршруте № 6 за первые 3600 секунд движения.

Всего маршрут № 6 длится 13 часов 13 минут. За весь маршрут газовый двигатель цифрового двойника машины запускается два раза и подзаряжает АКБ. График заряда АКБ представлен на рисунке 4.9. По вертикальной оси представлен заряд батареи, в процентах, а по горизонтальной время компиляции модели, в секундах.

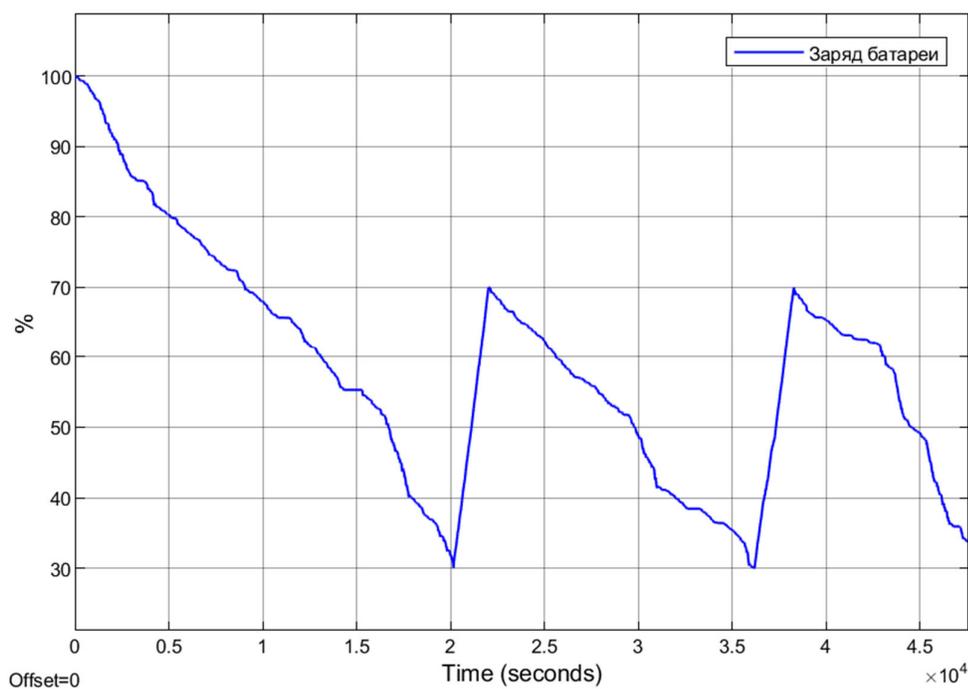


Рисунок 4.9. График заряда АКБ цифрового двойника машины на маршруте № 6.

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 цифрового двойника машины представлен на рисунке 4.10. Как видно из графика, цифровой двойник успел четыре раза осуществить разгрузку ТКО и пятый раз разгрузится перед

окончанием смены.

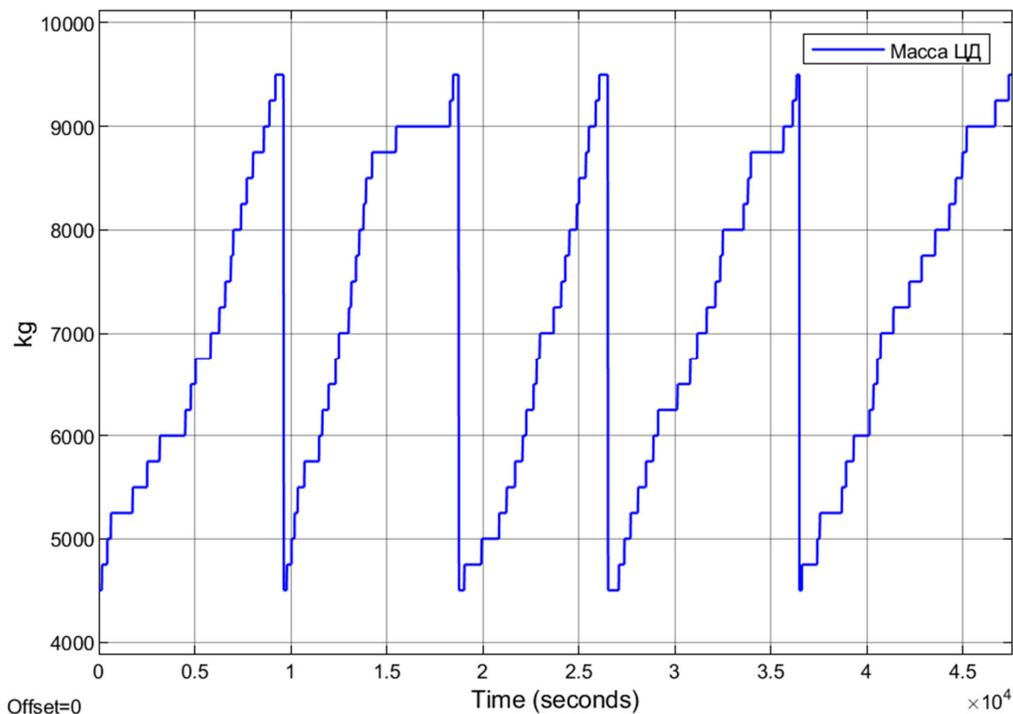


Рисунок 4.10. График изменения массы цифрового двойника машины на маршруте № 6.

4.2.3 Обработка результатов

В данном разделе приведены результаты расчетов коэффициентов энергоэффективности, экономичности и экологичности для коммунальных машин с дизельным ДВС, по исходным данным мониторинга, и для цифровой модели коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем по результатам цифровых испытаний.

В приведенных расчетах ниже были использованы значения показателей, представленные в таблице 4.2. Основные физические показатели взяты из справочных данных, стоимости топлива и электроэнергии указаны на дату проведения испытаний.

Удельные выбросы соответствующих веществ выбраны по методике «Инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ

автотранспортными средствами в атмосферный воздух» от 17.11.2006 г. (таблица 3.10) [85].

Таблица 4.2 – Значения основных показателей при расчетах

Показатель	Ед. изм.	Значение
Удельный эффективный расход метана	г/кВтч	220
Плотность метана	кг/м ³	0,714
Плотность ДТ	кг/л	0,86
Удельная теплота сгорания ДТ	МДж/кг	42,7
Удельная теплота сгорания метана	МДж/кг	50,2
Стоимость ДТ 01.11.2024	руб/л	67,34
Стоимость КПП 01.11.2024	руб/м ³	27,7
Одноставочный тариф ЭЭ	руб/кВтч	6,19
Удельный выброс CO ₂ ДТ	г/кг	3090
Удельный выброс CO ДТ	г/кг	8,6
Удельный выброс NO _x ДТ	г/кг	25
Удельный выброс CO ₂ КПП	г/кг	2500
Удельный выброс CO КПП	г/кг	140
Удельный выброс NO _x КПП	г/кг	20

Исходные данные для расчетов представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные данные для расчетов

№ маршрута	Обозначение машины	Длительность маршрута, с	Время работы ГДВС, с	Остаток заряда АКБ, %	Показатель рекуперации, %	Остановки
1	610 JAC	32072	2026	39,99	20,57	46
2	610 JAC	44490	4124	56,01	20,96	66
3	610 JAC	33717	2016	32,34	21,27	54
4	188 JAC	32336	1915	49,37	19,22	34
5	188 JAC	35600	1887	36,25	18,12	39
6	188 JAC	47599	4277	58,8	17,67	57
7	173 JAC	36193	2065	35,28	20,8	48
8	173 JAC	39108	3649	58,49	17,83	66
9	173 JAC	50359	6486	65,15	21,53	88
10	566 JAC	70967	10610	46,08	20,11	110
11	566 JAC	54635	8554	61,86	19,99	90
12	566 JAC	68791	11600	67,66	20,08	141

Значения коэффициентов энергоэффективности представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4 – Таблица расчета коэффициентов энергоэффективности

№ маршрута	Длина маршрута, км	Фактический расход ДТ, л	Теоретический расход КПП, м3	Коэффициент энергозатрат КМ, МДж/км	Коэффициент энергозатрат ГСУ, МДж/км	Коэффициент энергоэффективности
1	68,1	30,9	12,9	16,66	8,02	0,48
2	86,7	39,4	26,5	16,69	11,66	0,7
3	69,6	34,4	12,9	18,15	8	0,44
4	62,4	45,3	12,2	26,66	8,14	0,31
5	69,1	45,1	12	23,97	7,51	0,31
6	94,5	49,6	27,4	19,27	11	0,57
7	76,7	31,1	13,1	14,89	7,3	0,49
8	83,9	36,5	23,3	15,98	10,64	0,67
9	120,6	63,2	41,5	19,24	12,74	0,66
10	161,7	95,1	68	21,6	15,54	0,72
11	155,8	79,8	54,9	18,81	12,97	0,69
12	156,4	97	74,2	22,78	17,29	0,76

Значения коэффициентов экономичности представлены в таблице 4.5

Таблица 4.5 – Таблица расчета коэффициентов экономичности

№ маршрута	Длина маршрута, км	Фактический расход ДТ, л	Теоретический расход КПП, м3	Коэффициент фин. затрат КМ, руб/км	Коэффициент фин. затрат ГСУ, руб/км	Коэффициент экономичности
1	68,1	30,9	12,9	30,56	8,76	0,29
2	86,7	39,4	26,5	30,6	11,23	0,37
3	69,6	34,4	12,9	33,28	8,58	0,26
4	62,4	45,3	12,2	48,89	9,25	0,19
5	69,1	45,1	12	43,95	8,28	0,19
6	94,5	49,6	27,4	35,34	10,57	0,3
7	76,7	31,1	13,1	27,3	7,85	0,29
8	83,9	36,5	23,3	29,3	10,55	0,36
9	120,6	63,2	41,5	35,29	11,52	0,33
10	161,7	95,1	68	39,6	13,13	0,33
11	155,8	79,8	54,9	34,49	11,3	0,33
12	156,4	97	74,2	41,76	14,67	0,35

Для оценки экологичности посчитана промежуточные значения выбросов загрязняющих веществ, представленные в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Таблица расчета выброса загрязняющих веществ

№ маршрута	Масса CO ₂ КМ, кг	Масса СО КМ, кг	Масса NO _x КМ, кг	Масса CO ₂ ГСУ, кг	Масса СО ГСУ, кг	Масса NO _x ГСУ, кг
1	82,1	0,2	0,7	23	1,3	0,2
2	104,7	0,3	0,8	47,3	2,6	0,4
3	91,4	0,3	0,7	23	1,3	0,2
4	120,4	0,3	1	21,8	1,2	0,2
5	119,8	0,3	1	21,4	1,2	0,2
6	131,8	0,4	1,1	48,9	2,7	0,4
7	82,6	0,2	0,7	23,4	1,3	0,2
8	97	0,3	0,8	41,6	2,3	0,3
9	167,9	0,5	1,4	74,1	4,1	0,6
10	252,7	0,7	2	121,4	6,8	1
11	212,1	0,6	1,7	98	5,5	0,8
12	257,8	0,7	2,1	132,4	7,4	1,1

Значения коэффициентов экологичности представлены в таблице 4.7

Таблица 4.7 – Таблица расчета коэффициентов экологичности

№ маршрута	Длина маршрута, км	Фактический расход ДТ, л	Теоретический расход КПГ, м ³	Коэффициент выбросов КМ, кг/км	Коэффициент выбросов ГСУ, кг/км	Коэффициент экологичности
1	68,1	30,9	12,9	1,22	0,36	0,3
2	86,7	39,4	26,5	1,22	0,58	0,48
3	69,6	34,4	12,9	1,33	0,35	0,26
4	62,4	45,3	12,2	1,95	0,37	0,19
5	69,1	45,1	12	1,75	0,33	0,19
6	94,5	49,6	27,4	1,41	0,55	0,39
7	76,7	31,1	13,1	1,09	0,32	0,29
8	83,9	36,5	23,3	1,17	0,53	0,45
9	120,6	63,2	41,5	1,41	0,65	0,46
10	161,7	95,1	68	1,58	0,8	0,51
11	155,8	79,8	54,9	1,38	0,67	0,49
12	156,4	97	74,2	1,67	0,9	0,54

По результатам цифровых испытаний рассчитаны исследуемые коэффициенты. 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 гибридной машины, по сравнению с базовой машиной.

4.3 Оценка адекватности модели

Адекватность цифровой модели оценивается на основании корреляции результатов проведенного исследования с результатами схожих исследований других ученых. В качестве сравниваемого показателя выбран критерий – показатель рекуперации энергии торможения.

Как было описано в разделе 2.4.4, показатель рекуперации энергии торможения P_{pe} вычисляется по формуле 2.25. Физический смысл формулы заключается нахождении отношения накопленной электрической мощности при рекуперативном торможении к общей потраченной электрической мощности на движение и привод рабочего оборудования.

Значения мгновенных величин силы тока и напряжения на клеммах АКБ измеряются в цифровой модели. Далее подсчитывается мгновенная электрическая мощность. В специальных расчетных блоках происходит интегрирование функций измеренных значений по времени, с выводом показателя рекуперации в динамике на графике. 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 4.11. и 4.12.

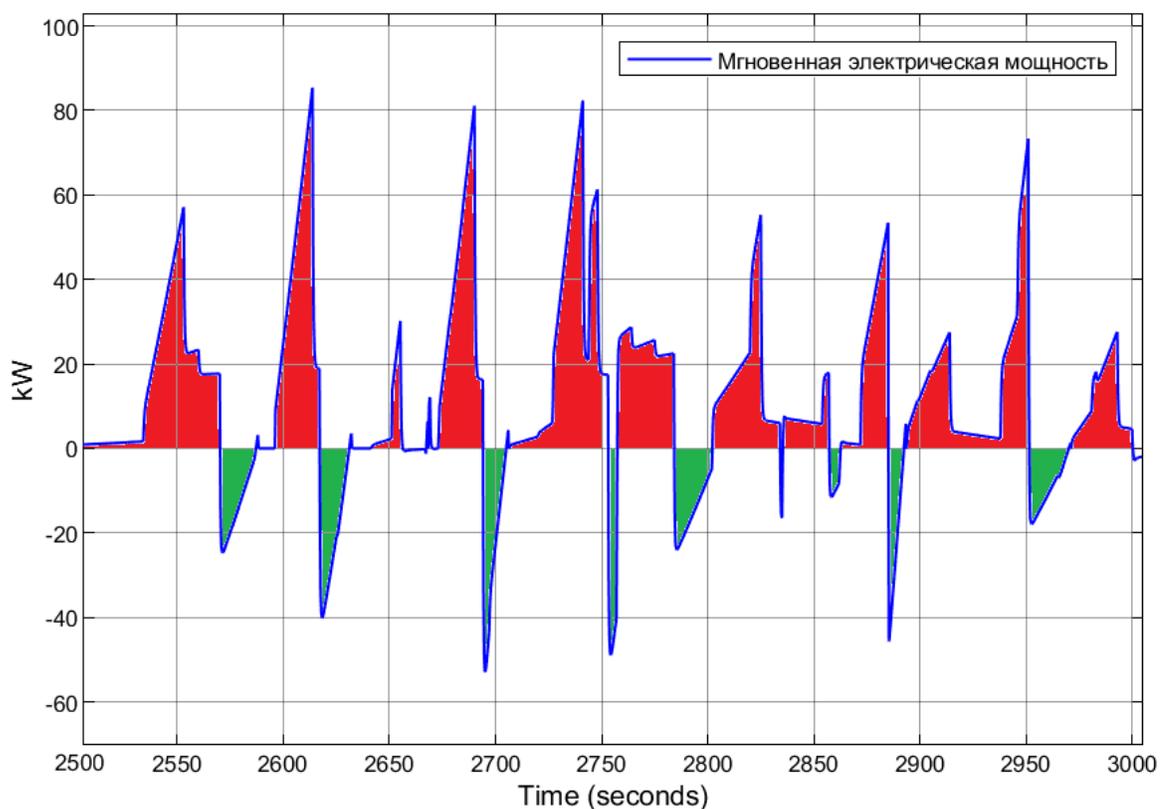


Рисунок 4.11. График мгновенной электрической мощности на маршруте № 6 от 06.11.2024 в интервале движения с 1000 с. по 1500 с.

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

Значения показателей рекуперации цифровой модели при прохождении цифровых испытаний по исследуемым маршрутам представлены в таблице 4.8.

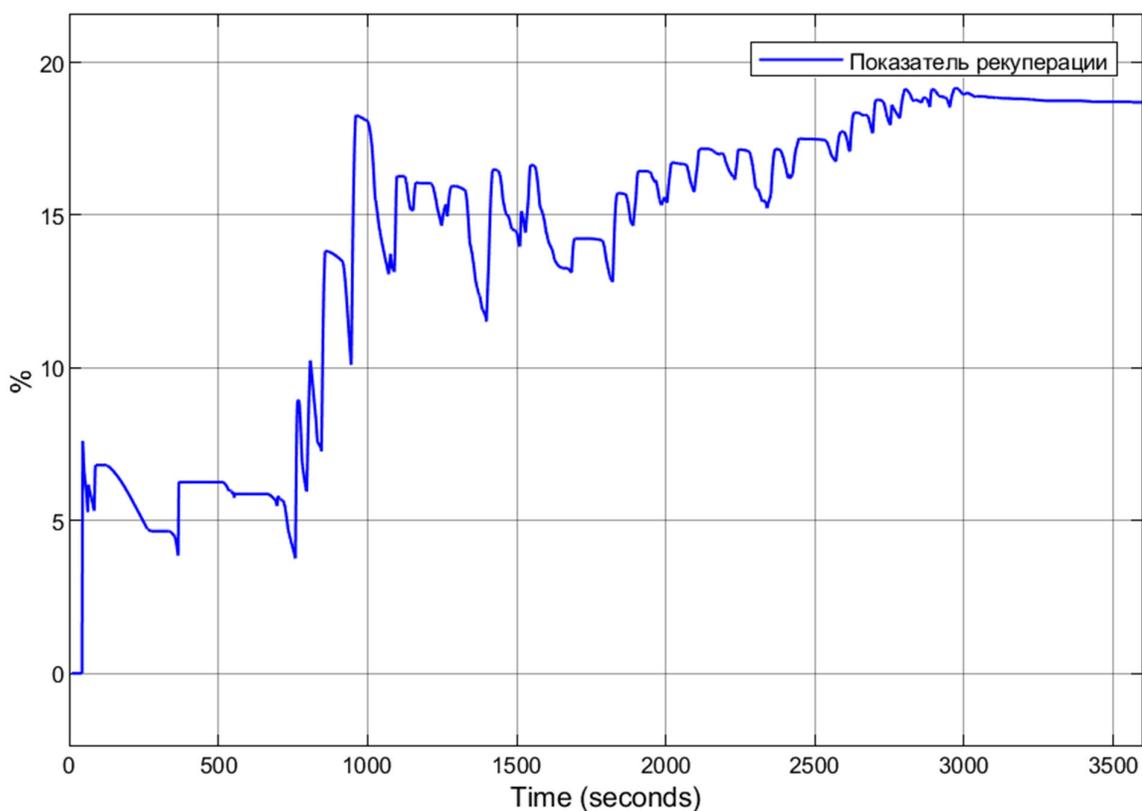


Рисунок 4.12. График изменения показателя рекуперации на маршруте № 6 от 06.11.2024 за 1 час.

Таблица 4.8 – Значения показателей рекуперации

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

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

Полученные значения показателей рекуперации находят сопоставимы с результатами исследований ряда ученых в области гибридных транспортных средств. Так, в исследованиях Ракова В.А. [81] показатель рекуперации энергии торможения подсчитывается двумя различными подходами и составляет

24% для первого подхода оценки и 36% для второго. В исследованиях Сидорова К.М. [96] показатель рекуперации энергии торможения исследуемого гибридного автомобиля на базе ГАЗ-2705 с полной массой 3,5 т. в городском цикле составил 28,6 %. В исследованиях Бахмутова С.В. показатель рекуперации автомобиля УАЗ, переоборудованного на гибридный силовой блок, составил 23% [14].

Таким образом, присутствует корреляция результатов проведенного исследования с результатами схожих исследований других ученых, что подтверждает адекватность разработанной математической модели движения КМ.

4.4 Оценка коэффициента гибридизации

По результатам цифровых испытаний получено значение коэффициента гибридизации для исследованных маршрутов, значение представлено в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Коэффициенты гибридизации в зависимости от маршрутов

№ маршрута	Коэффициент энергоэффективности	Коэффициент экономичности	Коэффициент экологичности	Среднее арифметическое
1	0,48	0,29	0,3	0,36
2	0,7	0,37	0,48	0,52
3	0,44	0,26	0,26	0,32
4	0,31	0,19	0,19	0,23
5	0,31	0,19	0,19	0,23
6	0,57	0,3	0,39	0,42
7	0,49	0,29	0,29	0,36
8	0,67	0,36	0,45	0,49
9	0,66	0,33	0,46	0,48
10	0,72	0,33	0,51	0,52
11	0,69	0,33	0,49	0,5
12	0,76	0,35	0,54	0,55
Коэффициент гибридизации				0,42

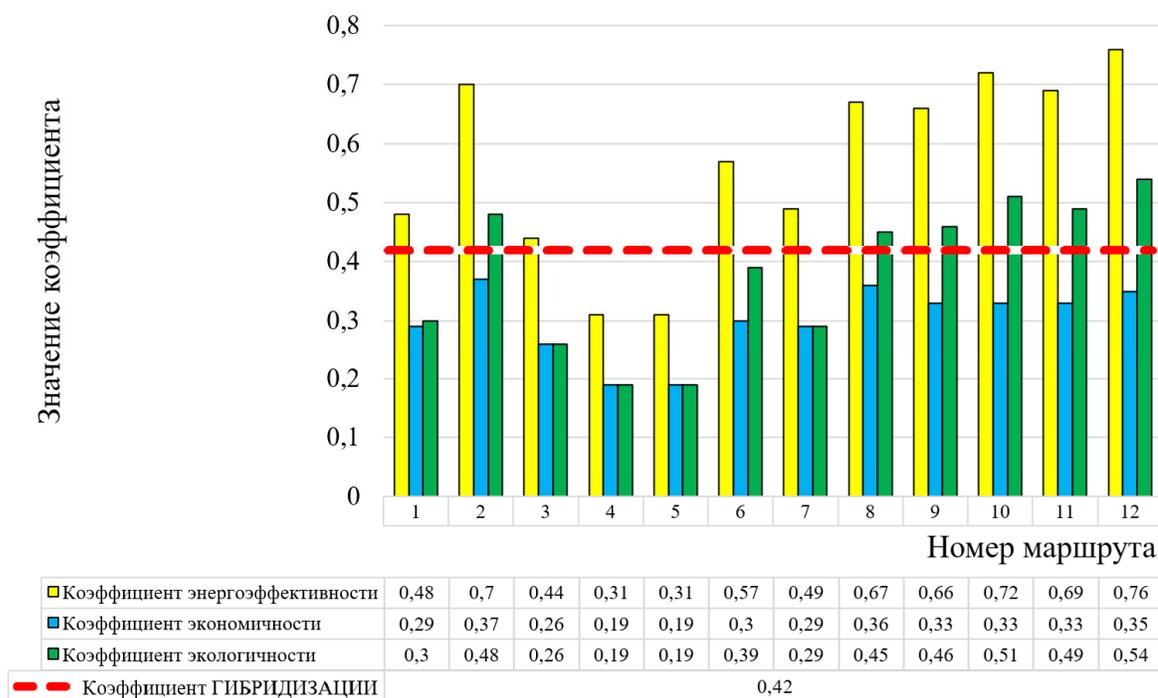


Рисунок 4.13. Критерии оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем.

Таким образом, по результатам цифровых испытаний цифрового двойника коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем, с использованием разработанного Метода оценки, произведен подсчет коэффициента гибридизации. Коэффициент гибридизации исследуемых 12-ти маршрутов $K_{\text{ГИБР}} = 0,42$ (Показан пунктирной линией на рисунке 4.13). Полученное значение является положительным результатом исследования и свидетельствует о целесообразности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на рассмотренных коммунальных машинах.

4.5 Экономический и экологический эффект

Расчет экономического и экологического эффектов, а также окупаемости, произведен в соответствии с разделом 2.6 диссертации. Исходные данные для расчета капитальных и операционных затрат представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Исходные данные для расчета капитальных и операционных затрат

Показатель	Значение, руб	Показатель	Значение, руб
С ДВС	50 000	Ц ГА	50 000
С СЦ	7 000	Ц ГДВС	990 000
С КПП	10 000	Ц ГН	330 000
С Моч	5 000	Ц ПН1	420 000
С ГДВС	75 000	Ц АКБ	2 160 000
С ГА	5 000	Ц ТЭ	430 000
С АКБ	50 000	Ц ПН2	510 000
С ОБ	12 000	Ц БЛ	250 000
С пр	100 000	Ц р	300 000

Результаты расчетов представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Показатели затрат и выбросов

	Традиционная КМ	Цифровой двойник КМ	Результат сравнения
Годовые затраты на топливо и ЭЭ, руб	1 326 042	362 428	
Годовые затраты на ТО, руб	172 000	242 000	
Годовой экономический эффект, руб			893 615
Сокращение операционных затрат, раз			2,77
Годовые выбросы, кг	52 898	21 888	
Годовой экологический эффект, кг			31 010
Сокращение выбросов, раз			2,42
Капитальные затраты на переоборудование, руб		5 440 000	
Окупаемость, лет			6,09

Таким образом, коммунальная машина с гибридным силовым блоком с газовым двигателем обеспечивает уменьшение финансовых затрат на топливо (и электроэнергию) в 2,77 раза и сокращение выбросов в 2,42 раза по сравнению с традиционной коммунальной машиной. Экономический эффект от переоборудования одной коммунальной машины на гибридный силовой блок с газовым двигателем составляет 893 тысячи рублей в год экономии на топлив-

ных затратах в ценах ноября 2024 года. Экологический эффект показывает сокращение вредных выбросов на 31 тонну в год. Окупаемость переоборудования составляет 6,09 года.

4.6 Выводы к главе 4

1. Проведены цифровые испытания коммунальной машины с гибридным силовым блоком с газовым двигателем. Описаны исходные данные, заданные на вход в модель, показано графическое отображение результатов цифровых испытаний и основных параметров модели, проведена обработка результатов цифровых испытаний. В соответствии с разработанным методом оценки 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 цифрового двойника находится в диапазоне от 17,67 % до 21,53 %. Полученный диапазон значений коррелирует с исследованиями ряда ученых и свидетельствует об адекватности разработанной цифровой модели.

4. Выполнена оценка адекватности цифровой модели, опираясь на рассчитанный показатель рекуперации энергии торможения и на анализ результатов аналогичных исследований эффективности гибридных решений.

5. 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.

6. Проведен сравнительный расчет экономического и экологического эффектов от переоборудования коммунальной машины на гибридный силовой блок с газовым двигателем. Получены результаты: 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 составляет 6,09 года.

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 КМ 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ.

BLDC – Brushless DC electric motor

HSD – Hybrid Synergy Drive

PSD – Power Split Device

АГЗС – автоматическая газозаправочная станция,

АГНКС – автомобильная газонаполнительная компрессорная станция,

АГНС – автомобильная газонаполнительная станция,

АКБ – аккумуляторная батарея

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом

ВИД – вентильно-индукторный двигатель

ВИП – вентильно-индукторный привод

ГБО – газобаллонное оборудование

ГСУ – гибридная силовая установка

ГТС – газотранспортная система

ДВС – двигатель внутреннего сгорания

ДМ – делитель мощности

ДПР – датчик положения ротора

ЕТО – ежедневное техническое обслуживание

ЖЦ – жизненный цикл

КМ – коммунальная машина

КПГ – компримированный природный газ

КПП – коробка переключения передач

КриоАЗС – криогенная автомобильная заправочная станция

КриоПАГЗ – криогенный передвижной автоматический газовый заправщик

МГЗУ – модульная газозаправочная установка

МРКЕ – модульная установка разгрузки криогенных емкостей

МТП – машинно-тракторный парк

ОГ – отработавшие газы
ОЖ – охлаждающая жидкость
ПГЗУ – передвижная газозаправочная установка
ПДВ – предельно допустимые выбросы
ПДК – предельно допустимая концентрация
ПДС – предельно допустимые сбросы
ПК – персональный компьютер
ПНГ – попутные нефтяные газы
ПО – программное обеспечение
ПО КМ – программное обеспечение компьютерного моделирования
РЭ – руководство по эксплуатации,
СДПМ – синхронный двигатель на постоянных магнитах
СКЗ – система контроля заряда-разряда
СО – сезонное техническое обслуживание
СПГ – сжиженный природный газ (от англ. LNG – liquid natural gas)
СТО – станция технического обслуживания
СУГ – сжиженный углеводородный газ
ТКО – твердые коммунальные отходы
ТО – техническое обслуживание
ТО-1 – первое техническое обслуживание
ТО-2 – второе техническое обслуживание
ТОиР – техническое обслуживание и ремонт
ТРТС – Технический регламент таможенного союза
ТС – транспортное средство
ТТМ – транспортно-технологическая машина
ТТС – транспортно-технологическое средство
ЦД – цифровой двойник
ШИМ – широтно-импульсная модуляция
ЭБУ – электронный блок управления
ЭДО – Электронный документооборот

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Allison Transmission to Unveil Fully"Automatic Hybrid for Commercial Vehicles / Allison Transmission — Investor Relations — News Release. — 2013. — March 5.
2. Gianfranco, P. Electric and hybrid vehicles power sources, models, sustainability, infrastructure and the market [Текст]/ P. Gianfranco. Rome. Elsevier. 2010. – 645 P.
3. GIIGNL Annual Report 2020 Edition.
4. Liquefied Natural Gas: Understanding the Basic Facts (англ.). US Department of Energy (DOE) Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory (August 2005).
5. Mehrdad, E. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design [Текст]// Mehrdad, E. Yimin G., Sebastien E. Ali E. CRC Press, West Florida. 2008. – 419 P.
6. Moghadasi S. et al. Design and performance analysis of hybrid electric class 8 heavy-duty regional-haul trucks with a micro-pilot natural gas engine in real-world highway driving conditions //Energy Conversion and Management. – 2024. – Т. 309. – С. 118451.
7. Pistoia G. Electric and hybrid vehicles. Power sources, models, sustainability, in frastructure and the market. / G Pistoia. – Oxford: Th e Netherlands Linacre House, 2010.
8. Rawsun Technolodgy (Shantou) Co., LTD. Electric vehicle motor catalog: электронный каталог – URL: <https://www.rawsuns.com/download/> (дата обращения: 29.09.2024).
9. SPM – электрический тяговый привод – URL: <https://spmruussia.com/tech/dvit-37/> (дата обращения: 29.09.2024).
10. Zhang B. Receding horizon optimal control of HEVs with onboard prediction of driver’s power demand / B. Zhang, F. G. Xu, T. L. Shen. – Текст : непосредственный // IET Intelligent Transport Systems. – 2020. – Volume 14 (12).

–Р. 1534–1545

11. Автосалон ООО «Большегруз Сервис СПб» – URL: <https://bg98.ru/> дата обращения 09.02.2025.
12. Антипин М. И. Согласование режимов работы газовых, газодизельных двигателей и рабочего оборудования пожарно-спасательных автомобилей при механической передаче энергии на этапе эскизного проектирования / М. И. Антипин, Л. Г. Малышевская // Modern Science. – 2020. – № 5-1. – С. 503-509.
13. Баловнев В.И. Определение оптимальных параметров и выбор дорожно-строительных машин методом анализа четвертой координаты: учеб. пособие / В.И. Баловнев. – М.: МАДИ, 2014 – 180 с.
14. Бахмутов С. В. Совершенствование процесса рекуперации энергии гибридного автомобиля / С. В. Бахмутов, А. И. Филонов, Е. Е. Баулина // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 7. – С. 101-114.
15. Блинов Е. А. Топливо и теория горения. Раздел – подготовка и сжигание топлива //СПб.: Изд-во СЗТУ. – 2007. – 119 с.
16. Бухаров Д.Б. Экономический эффект переоборудования транспорта коммунального хозяйства на газомоторное топливо // журнал: «Транспорт на альтернативном топливе». 2015. № 2(44). С. 37-40.
17. В СПГ-стратегию вписали возможные проекты «Роснефти» почти на 100 млн т. – URL: <https://www.rbc.ru/business/02/02/2021/601917309a79470e4a3878e6> РБК (дата обращения: 05.04.2024).
18. Газобаллонная техника. Официальный сайт ПАО «Камаз» – URL: <https://kamaz.ru/production/gazoballonnyaya-tekhnika/> (дата обращения: 20.06.2024).
19. Газовые двигатели ЯМЗ-53414, ЯМЗ-53424, ЯМЗ-53444 и их комплектации Руководство по эксплуатации 53404.3902150 РЭ, ПАО "Автодизель" (ЯМЗ), Ярославль, 2016

20. Газовый бизнес. Журнал союза организаций нефтегазовой отрасли «Российское газовое общество» №4 2020 год. Подписано в печать: 11.12.2020 С. 62.
21. Гайнуллин Ф. Г. и др. Природный газ как моторное топливо на транспорте //М.: Недра. – 1986. – Т. 250. – С. 5.
22. Гибридные автомобили: учебное пособие / А.А. Капустин, В.А. Раков; М-во образ. и науки РФ, Вологод. гос. ун-т. – Вологда: ВоГУ, 2016. – 96 с. ISBN 978–5–87851–653–2.
23. Гибридные силовые установки мобильных машин - конкурентоспособное направление развития машиностроения Беларуси / А. А. Дюжев, П. Л. Мариев, Л. Г. Красневский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 2(27). – С. 5-11.
24. ГОСТ 25646-95. Эксплуатация строительных машин. Общие требования. Дата введения 1997-07-01.
25. ГОСТ 31972-2013 Автомобильные транспортные средства. «Порядок и процедуры методов контроля установки газобаллонного оборудования»
26. ГОСТ Р 54202-2010. Ресурсосбережение. Газообразные топлива. Наилучшие доступные технологии сжигания. Дата введения 2012-01-01.
27. ГОСТ Р 56163—2014. ВЫБРОСЫ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ. Метод расчета выбросов от стационарных дизельных установок. Дата введения 2022-01-01.
28. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Дата введения 2017-07-01
29. ГОСТ Р 57700.1-2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Дата введения 2018-05-01.
30. ГОСТ Р 57700.2-2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Дата введения 2018-05-01.
31. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование.

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Дата введения 2022-01-01.

32. Гуртяк М. А. Анализ загрязнения атмосферного воздуха автомобильно-дорожным комплексом / М. А. Гуртяк // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 9-1. – С. 32-35.
33. Гусаков С. В. Гибридные силовые установки на основе ДВС // М.: Изд-во Российского университета дружбы народов. – 2008. – Т. 207.
34. Дьяконов В. Моделирование в MATLAB+ Simulink электронных компонентов, устройств и систем // Компоненты и технологии. – 2011. – №. 4. – С. 146-156.
35. Ерохов В. И. Однотопливный газобаллонный автомобиль, работающий на компримированном природном газе. Часть 1 / В. И. Ерохов // Грузовик. – 2018. – № 2. – С. 2-10.
36. Жигин В. И. Газовые двигатели в Российском автопроме / В. И. Жигин // Научный альманах. – 2020. – № 4-1(66). – С. 32-37.
37. Закон Санкт-Петербурга от 31.05.2010 N 273-70 "Об административных правонарушениях в Санкт-Петербурге".
38. Зорин В. А. Анализ отказов узлов и агрегатов специализированного автотранспорта, возникающих в процессе эксплуатации / А. Н. Котомчин, В. А. Зорин // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса 2021 : Материалы VII международной научно-практической конференции, в рамках 7-го Международного научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: Инфраструктурное и социально-экономическое развитие», Горловка, 25 мая 2021 года. с. 72-75.
39. Иванов В.Н. Концепция эффективного использования парка машин дорожно-строительных организаций/ автореферат на соискание ученой степени д.т.н.: СибАДИ, 2005.
40. Игнатов С. Д., Котыкин С. В. Моделирование механических систем при помощи расширений Simulink. – 2016.

т «НАМИ», 2015.

51. Лутонин А. С. Структура и алгоритмы энергоэффективного управления электротехническим комплексом транспортного средства с использованием мотор-колес с синхронными двигателями: спец. 05.09. 03 «Электротехнические комплексы и системы» : дис. – Санкт-Петербург : АС Лутонин, 2020.
52. Магнитоэлектрический вентильный электродвигатель для тягового автотранспортного электропривода / А. А. Афанасьев, А. Г. Бабак, В. А. Нестерин, А. В. Николаев // Электричество. – 2010. – № 7. – С. 41-44.
53. Мовчан В.Н., Зубкова П.С., Калинина И.К., Кузнецова М.А., Шейнерман Н.А. Оценка и прогноз экологической ситуации в Санкт-Петербурге по показателям загрязнения атмосферного воздуха и изменения здоровья населения // Вестник СПбГУ. Науки о Земле.
54. Мониторинг коммунальных машин АО «Автопарк №1 «Спецтранс» сервисом «Скаут Online» – URL: <https://online.scout-gps.ru/> (дата обращения: 06.11.2024).
55. О перспективах развития гибридомобилей серии Toyota Prius / И. В. Зинченко, А. А. Данникер, В. Д. Червенчук, А. И. Забудский // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК: Сборник материалов Международной научно-практической конференции обучающихся, посвященной 90-летию со дня рождения Е.П. Огрызкова, Омск, 15 января 2019 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2019. – С. 132-139.
56. Оборудование для метановых заправок – URL: https://agnks.com/agnks_map (дата обращения: 20.10.2024).
57. Образцов Н. А. Анализ эффективности инвестиций в техническое вооружение строительной организации / В. А. Образцова, Н. А. Образцов // Экономика и управление в строительстве: сохраняя прошлое, создаем будущее: Материалы Всероссийской научно-практической конференции,

- Санкт-Петербург, 17 октября 2019 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – С. 178-187.
58. Образцов Н. А. Выбор базовой машины для газового двигателя RGK.ЕС.820.959-340 / Н. А. Образцов // Грузовик. – 2023. – № 7.
 59. 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.
 60. 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.
 61. 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.
 62. Образцов Н. А. Предпосылки, реальность и перспективы СПГ / Н. А. Образцов // Грузовик. – 2022. – № 3. – С. 44-46.
 63. 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.
 64. 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 г.
 65. 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.
66. Образцов Н. А. Способы утилизации автомобильных масляных фильтров / Н. А. Образцов, В. А. Образцова, В. Э. Поляченко // Магистратура - автотранспортной отрасли: Материалы IV Всероссийской межвузовской конференции, Санкт-Петербург, 24–25 октября 2019 года. Том Часть I. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – С. 190-197.
67. Образцова В. А., Образцов Н. А. Перспективы развития электронного документооборота в РФ / В. А. Образцова, Н. А. Образцов // Экономика и управление: тенденции и перспективы: материалы I Межвузовской научно-практической конференции факультета экономики и управления, Санкт-Петербург, 02–03 марта 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – С. 254-262.
68. Панкратов В. В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза //Электронные компоненты. – 2007. – №. 2. – С. 68-77.
69. Пенкин А. Л. Патент на полезную модель № 134857 U1 Российская Федерация, МПК В60К 15/07, F17C 13/08. Устройство для крепления газовых баллонов к раме транспортного средства и защиты их от коррозии: № 2013130835
70. Постановление Правительства РФ от 10.09.2016 N 903 (ред. от 06.05.2024) О порядке разработки и реализации межрегиональных и региональных программ газификации жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и иных организаций.
71. Постановление правительства РФ от 13 июня 2020 г. n 857 О признании

не действующими на территории Российской Федерации актов и отдельных положений актов, изданных центральными органами государственного управления РСФСР и СССР, а также об отмене акта федерального органа исполнительной власти Российской Федерации.

72. Постановление Правительства РФ от 13 мая 2020 г. № 669 (в редакции от 19.08.2023 № 1354) «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета производителям техники, использующей природный газ в качестве моторного топлива».
73. Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 N 321 (ред. от 27.02.2025) "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие энергетики"
74. Постановление Правительства РФ от 6 апреля 2019 г. N 413 "Об утверждении Правил внесения изменений в конструкцию находящихся в эксплуатации колесных транспортных средств и осуществления последующей проверки выполнения требований технического регламента Таможенного союза "О безопасности колесных транспортных средств".
75. Правительство Российской Федерации. Постановление от 4 февраля 2021 г. № 115 “Об утверждении правил предоставления субсидий из Федерального бюджета производителям техники, использующей природный газ в качестве моторного топлива”, Москва.
76. Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 13 мая 2013 г. № 767-р, Москва.
77. Презентация эффективной разработки РариТЭК и EControls // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 1(55). – С. 62-63.
78. Приказ МЧС РФ ОТ 10.07.2009 N 404 "Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах"
79. Приложение № 2 к Приказу МВД России от 7 декабря 2000 г. № 1240 «Порядок контроля за внесением изменений в конструкцию транспорт-

ных средств, зарегистрированных в государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации».

80. 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: X Международная научно-техническая конференция, Вологда, 24–25 марта 2015 года. – Вологда: Федеральное государственного бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный университет», 2015. – С. 161-166.
81. Раков В. А. Результаты исследования рекуперации гибридных силовых установок / В. А. Раков // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы девятой Международной научно-технической конференции, Вологда, 18–19 марта 2014 года. – Вологда: Федеральное государственного бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный университет», 2014. – С. 186-190.
82. Раков В.А. Исследование автопарка гибридных автомобилей // Транспорт на альтернативном топливе. 2013. №1 (31).
83. Раков В.А. Эксплуатация и обслуживание автомобилей с гибридными силовыми установками: монография / В.А. Раков. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 143 с.
84. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года №3363-р "Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года"
85. Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух: утв. ОАО «НИИАТ» 17.11.2006 / Министерство транспорта РФ. – Москва,

2006. – 55 с.
86. Репин С. В. Надежность и эффективность эксплуатации транспортно-технологических машин / С.В. Репин, С.А. Евтюков, А.В. Зазыкин, К.В. Рулис / XXXXX. – СПб., 2017. – 273 с.
 87. Роддатис К. Ф., Полтарецкий А. Н. Справочник по котельным установкам малой производительности. – Энергоатомиздат, 1989.
 88. Родионов К. Проблемы и перспективы СПГ-проектов в России. Отчет АО «ПрайсвоटरхаусКуперс Аудит», 2017.
 89. Рожнова О. В., Карпухин К. Е., Фролова Е. С. Экономические предпосылки создания автомобилей с гибридной силовой установкой в России // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2009. – Т. 1. – №. 1. – С. 228-230.
 90. Росстандарт. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии – URL: <https://clck.ru/3ESqSV> (дата обращения: 07.11.2024).
 91. Руководство по эксплуатации тяговой литий-ионной аккумуляторной батареи. Шифр AA-09-2020RU. Sammers Group.
 92. Руководство по эксплуатации. Вентильные (синхронные) электродвигатели. ДВУ5М215. РЭ-3311145-33108830-2017. ООО «Электротехнические системы 1».
 93. Савенков Н. В. Исследование эффективности применения в конструкции АТС категории N3 гибридной силовой установки / Н. В. Савенков, О. О. Золотарев, М. С. Трубников // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2024. – № 6(170). – С. 47-57.
 94. СанПиН 2.1.3684-21 "Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению населения, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий".
 95. Сжиженный природный газ (СПГ), технологии сжижения - Техническая

- библиотека Neftegaz.RU – URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/141460-szhizhennyu-prirodnyu-gaz-spg-tekhnologii-szhizheniya/> (дата обращения: 05.01.2024).
96. Сидоров К. М. Энергетическая и топливная эффективность автомобилей с гибридной силовой установкой/ автореферат на соискание ученой степени к.т.н.: МАДИ, 2010.
97. Смоленская Н.М., Смоленский В.В. Токсичность отработавших газов в бензиновых двигателях при работе на сжатом природном газе и бензине // журнал: «Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: машиностроение». 2018. №18(4). С. 57-65.
98. СП 156.13130.2014 Станции автомобильные заправочные. Требования пожарной безопасности. Дата введения 2014-07-01.
99. СПб ГУП «Пассажиравтотранс» – URL: <https://www.avtobus.spb.ru/> (дата обращения: 21.10.2024).
100. Тенденции развития коммунальных транспортных средств с электрической трансмиссией / Ю. В. Рождественский, К. В. Гаврилов, И. Г. Леванов [и др.] // Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, Ижевск, 28–29 апреля 2023 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2023. – С. 504-512.
101. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств».
102. Трофименко Ю. В. Расчетная оценка энергопотребления автотранспортного средства с гибридной энергоустановкой / Ю. В. Трофименко, С. В. Шелмаков Д. А. Деянов // Проектирование автомобильных дорог : Сборник докладов 80-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 24–28 января 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "А-проджект", 2022. – С. 280-292.

103. Тягач Daupin: Руководство пользователя, 2017 – 76 с.
104. Указ Президента Российской Федерации от 13.05.2017 г. № 208. О стратегии экологической безопасности до 2030 года. Президент России.
105. Федеральная служба государственной статистики – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 20.10.2024).
106. Фирсова Л.Н., Манилкин И.Г., Куцак М.Ю. Журнал «Криогенное и газовое оборудование» ООО «Криогазтех» г. Санкт-Петербург, 2020. С. 41.
107. Францев С. М., Кавторев А. Ю. Повышение предела эффективного обеднения газового двигателя за счет изменения характеристик искрового разряда систем зажигания // Вестник евразийской науки. – 2014. – №. 4 (23). – С. 2.
108. Хрикулов А. Использование СПГ в качестве топлива для карьерных самосвалов и железнодорожного транспорта // Доклад 10-й юбилейной международной практической конференции Intra-Tech Online.
109. Центр Инженерных Технологий и Моделирования «ЦИТМ Экспонента» – URL: <https://exponenta.ru/> (дата обращения: 12.05.2024).
110. Черанев С. В. Использование программного обеспечения для математического моделирования при проектировании автомобилей с гибридными силовыми установками // Известия МГТУ. 2011. №1.
111. Червенчук В. Д. О перспективах производства гибридных автомобилей в России и их эксплуатации в условиях Сибири / В. Д. Червенчук // Современное научное знание в условиях системных изменений: материалы Второй Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 155-летию со дня рождения П.А. Столыпина, Тара, 13–14 апреля 2017 года. – Тара: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2017. – С. 113-118. – EDN YTDFBH.
112. Червенчук В.Д. Анализ схем сопряжения «ДВС – электродвигатель» в силовых установках для современных гибридомобилей // В сборнике: Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов II Международной

- научно-практической конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)». 2017. С. 127 – 134
113. Червенчук В.Д., Забудский А.И. К вопросу о специфике технического обслуживания и ремонта гибридных энергетических силовых установок // Вестник ОмГАУ. 2018. №3 (31).
114. Шарипов И.И. Теория горения: учеб. пособие / И.И. Шарипов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – 99 с.
115. Шевкунова А. В. Совершенствование проектирования активной части вентильно-индукторной машины: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.09. 01 : дис. – б. и., 2017.
116. Шишков В. А. Особенности пуска двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на газовом топливе //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королева (национального исследовательского университета). – 2011. – №. 6. – С. 174-185.
117. Шурпяк В. К. Анализ характерных опасностей установок регазификации сжиженного природного газа на судах-газовозах / В. К. Шурпяк, А. А. Власов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2016. – № 44-45. – С. 111-120.
118. Электротранспорт. Онлайн-форум. – URL:
<https://electrotransport.ru/index.php?topic=61988.0> (дата обращения:
10.08.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Данные мониторинга движения КМ по маршруту № 6. Начало маршрута 06.11.2024 07:09:40, окончание 06.11.2024 20:18:47.

Т, с	V, км/ч	Т, с	V, км/ч	Т, с	V, км/ч	Т, с	V, км/ч	Т, с	V, км/ч	Т, с	V, км/ч
0	0	7500	2,9	14822	0	23046	0	30557	0	38352	7,6
8	0	7501	0	14824	0	23132	0	30566	2,1	38367	36,8
10	2,2	7504	3,1	14832	0	23268	0	30568	0	38371	44,7
12	3,5	7507	0	14843	0	23285	2,7	30576	2,4	38379	44,9
17	3,5	7509	3,6	14877	0	23286	0	30585	16,4	38388	32,7
18	5,6	7512	5,4	14893	0	23312	0	30596	29,6	38406	0
19	5,6	7519	7,8	14954	0	23343	2,6	30598	29,1	38409	0
21	6,7	7527	12,1	14964	0	23351	0	30610	29,1	38445	0
29	8,4	7531	13,8	14987	0	23361	3,3	30611	29,1	38446	3
42	13,2	7537	6,8	15002	0	23367	22,6	30622	19	38447	4,1
44	13,6	7538	6,8	15011	0	23377	32,5	30627	0	38466	7,2
45	9,5	7540	0	15045	0	23388	24	30659	2,8	38471	6
49	11	7551	4,9	15047	0	23403	0	30665	19,4	38476	9,4
58	10	7554	0	15107	0	23405	0	30671	23,2	38484	12,6
60	11,1	7571	2,4	15124	0	23412	9,8	30674	24,3	38491	4
62	11,4	7573	0	15169	0	23429	21,8	30683	23	38494	0
64	9,7	7577	0	15182	0	23441	8,7	30692	13,6	38495	0
74	7,2	7581	0	15286	0	23452	24,1	30696	16,5	38504	3,3
84	6,6	7584	3,5	15299	0	23473	14,4	30706	29,2	38513	14,3
89	0	7587	0	15303	20	23478	16,1	30712	33	38520	0
99	0	7588	4,2	15304	20	23492	0	30723	32,9	38525	0
106	0	7610	6,2	15307	42,9	23493	0	30736	11,3	38530	0
122	0	7616	10	15309	44,7	23498	8,2	30740	0	38532	3,9
261	3,6	7621	10,7	15312	46,3	23506	11,5	30802	2,6	38542	13,2
277	0	7627	4,4	15321	47,4	23512	15,4	30818	0	38559	8,9
303	0	7628	0	15323	46,2	23519	22,7	30838	3,1	38564	25,9
311	0	7706	0	15328	48	23521	22,1	30848	14,4	38574	25,9
335	0	7712	0	15336	16,9	23527	16,5	30852	20,3	38577	26,2
349	2,2	7751	2,5	15338	15,3	23538	10,9	30861	35	38581	26,9
350	0	7752	0	15340	34,5	23558	0	30867	39,6	38588	14,4
357	4,4	7783	2,2	15343	33,6	23577	0	30875	42,7	38594	20,7
365	10,8	7784	0	15345	33,1	23578	3,1	30880	50	38599	24,1
369	0	7793	2,1	15352	15,6	23591	15,5	30882	50,4	38608	27,3
377	0	7796	0	15356	11,2	23602	11,3	30889	53	38612	29,7
428	0	7797	2,8	15357	0	23606	21	30895	52,5	38626	15,6
484	0	7799	0	15359	0	23610	24	30898	51,5	38637	0
501	0	7800	2,2	15363	0	23617	0	30905	51,8	38663	0
516	0	7802	0	15379	4,9	23651	0	30913	40,6	38685	0
529	2,5	7807	2,1	15380	4,9	23670	0	30923	12,6	38712	0
536	3,5	7809	0	15383	3,7	23674	2,3	30933	20	38715	2,9
537	0	7821	3,1	15388	0	23677	0	30955	35,5	38727	25,1
544	0	7823	3,7	15391	3,3	23703	0	30963	40,8	38739	25,4
548	3,1	7825	0	15409	6,3	23716	2,6	30969	43,3	38750	5,6
550	0	7833	3,7	15410	0	23718	0	30977	52,7	38752	0
553	4,6	7852	11,8	15421	2,3	23731	0	30979	53,9	38757	0
555	0	7853	10,8	15422	0	23747	0	30985	48,3	38807	0
564	0	7855	0	15424	3	23751	0	30993	50,1	38812	2,2
588	0	7870	0	15427	0	23771	2,9	31000	50,3	38824	27,1
637	0	7873	2,2	15438	0	23779	0	31008	47,1	38836	20,4
664	0	7874	0	15462	0	23782	0	31016	31,5	38843	3,6
692	2,3	7887	5,1	15491	0	23788	2,5	31019	16,2	38846	0
697	5,2	7892	0	15543	0	23791	0	31027	2,7	38849	0
700	0	7893	0	15552	0	23809	0	31032	8,3	38953	2,3

707	2,9	7897	0	15577	2,6	23836	2,9	31076	8,1	38966	31,5
716	0	7902	3,9	15593	0	23837	2,3	31110	0	38969	24,2
721	3,7	7909	0	15603	2,2	23839	0	31126	0	38973	31,1
733	13,3	7916	2,6	15605	0	23855	0	31127	0	38984	32,8
753	16,2	7919	0	15622	2,3	23866	2,2	31141	0	38987	32,7
758	17,7	7928	2,7	15638	7	23867	0	31159	0	38997	32,7
767	0	7935	0	15639	5,9	23888	0	31162	0	38998	32,7
770	0	7940	2,1	15643	0	23933	0	31177	0	39008	0
772	8,2	7951	0	15644	2,6	23943	0	31196	0	39042	5,7
780	22,7	7960	2,6	15651	7,6	23957	2,2	31213	0	39049	27,4
793	26	7962	0	15654	0	23964	3,5	31297	0	39063	0
796	25,6	7963	4,4	15688	0	23966	0	31394	0	39070	0
808	12,6	7970	0	15717	3,3	23970	0	31526	2,7	39097	3
820	21,9	7972	2,4	15724	11,4	23974	2,9	31532	8,3	39106	15,7
828	26,8	7975	2,3	15743	0	23980	2,8	31533	10,5	39111	23,9
831	31,7	7977	0	15767	0	23988	0	31534	10,6	39121	12,8
844	26,8	7980	2,2	15780	6,4	23999	6,7	31535	10,5	39128	7,1
845	28,1	7982	0	15786	20	24004	23,2	31537	7,4	39137	6,3
847	25,1	7988	2,3	15792	19,5	24013	10,4	31547	6,5	39152	10
860	0	7990	2,2	15797	10,8	24015	0	31550	2,7	39156	0
917	3,1	7991	0	15803	14,2	24031	0	31551	0	39167	5,7
932	22,2	7997	2,1	15809	0	24036	0	31561	3	39168	5,8
936	27	7999	0	15819	8,7	24042	0	31571	13,7	39170	3,4
940	31,1	8000	2,4	15828	17,4	24054	0	31574	14,3	39173	0
945	35,7	8002	0	15832	26,8	24061	0	31582	8,1	39174	0
947	32,2	8004	0	15835	29,4	24063	0	31587	8,2	39181	0
960	6,1	8014	2,9	15836	29,4	24071	2,1	31589	0	39202	2,5
962	0	8018	0	15841	7,4	24072	0	31606	0	39212	17
991	2,2	8020	0	15843	0	24152	3,8	31610	2,9	39235	6,4
992	0	8021	2,3	15855	7	24157	0	31623	0	39247	0
998	0	8023	0	15858	0	24159	2,8	31650	0	39249	4,2
1005	5,7	8025	2,9	15893	0	24165	0	31659	3,9	39252	0
1015	14,8	8026	0	15895	2,6	24167	2,2	31675	3	39286	0
1025	29,2	8032	2,2	15896	0	24170	0	31677	0	39307	2,7
1027	28,1	8034	0	15898	2,2	24171	0	31686	0	39309	0
1039	31,2	8035	2,3	15899	0	24172	0	31689	0	39340	2,8
1050	31,3	8038	0	15902	2,2	24173	0	31706	0	39341	2,8
1060	31,3	8049	3	15905	3,9	24175	0	31712	0	39344	0
1071	31,3	8051	0	15906	6,2	24179	0	31740	0	39345	3,6
1077	25,9	8052	2,4	15913	13,6	24215	2,2	31755	0	39349	2,5
1081	29,7	8053	0	15917	7,5	24217	6,3	31834	0	39350	0
1090	27,4	8060	2,2	15925	7,9	24219	7,5	31841	0	39356	2,8
1093	22,4	8061	0	15930	0	24226	0	31856	2,4	39359	0
1100	0	8064	0	15931	7,9	24241	2,7	31864	7,6	39368	0
1125	0	8073	0	15935	5	24257	2,1	31865	2,6	39382	0
1126	3,3	8074	0	15941	11,5	24260	0	31866	0	39529	0
1135	15,7	8080	0	15948	13	24266	2,4	31867	0	39538	0
1139	19,4	8087	0	15959	10,4	24269	0	31873	4,1	39589	0
1144	21,2	8097	2,4	15965	14,9	24332	0	31902	10,7	39622	0
1153	16,3	8101	0	15972	0	24352	0	31911	11,3	39710	0
1164	0	8102	2,3	15986	6,8	24399	0	31924	10,1	39746	0
1174	2,1	8103	0	15988	0	24416	2,8	31933	11,8	39761	3,7
1176	0	8109	0	16008	5,6	24419	0	31936	10,3	39764	0
1190	0	8123	0	16045	5,3	24425	2,8	31944	10,5	39770	3,2
1207	0	8133	0	16050	0	24434	10,4	31958	10,5	39772	0
1211	0	8144	0	16055	0	24441	0	31966	11	39774	0
1216	3	8146	2,2	16059	7,7	24444	3,9	31974	7,6	39787	2,2
1228	14,6	8147	0	16066	0	24447	0	31984	8,9	39790	0
1234	19,2	8159	0	16071	8,5	24476	2,4	32007	17,8	39865	3,9
1248	23,3	8182	0	16078	6,1	24477	0	32012	15,3	39881	6,4

1255	17,1	8195	0	16080	11,9	24481	0	32017	14,2	39887	5,1
1263	10,8	8200	0	16086	9,1	24499	2,6	32024	8,1	39891	4,9
1267	19,5	8208	2,5	16094	0	24503	0	32026	0	39893	0
1283	0	8209	0	16095	4,5	24516	2,2	32035	9	39894	3,3
1284	0	8215	2,1	16104	0	24517	0	32044	7,4	39898	21,3
1295	0	8216	0	16106	2,3	24521	0	32050	0	39906	4,1
1328	4,2	8231	0	16117	0	24524	2,3	32075	0	39907	0
1342	34,4	8234	2,3	16118	2,2	24531	0	32086	0	39916	5,4
1350	36	8235	0	16121	0	24534	2,7	32101	0	39932	6,7
1358	40,3	8254	0	16134	2,9	24546	0	32116	0	39937	0
1361	43,4	8301	0	16138	0	24559	2,1	32244	2,5	39941	4,2
1368	44	8344	2,7	16141	6,9	24561	0	32249	2,2	39974	12,2
1374	44	8349	0	16143	0	24579	0	32257	0	39985	0
1376	42,8	8352	3,5	16145	2,4	24604	2,4	32258	0	40002	2,2
1384	45,6	8355	0	16149	0	24605	0	32261	2,7	40004	0
1388	43,9	8365	2,7	16150	2,1	24609	0	32262	0	40007	2,2
1397	42,7	8366	0	16151	0	24612	2,1	32267	0	40011	0
1398	44,9	8390	2,1	16158	0	24617	0	32269	0	40013	2,5
1406	33,7	8393	0	16159	2,3	24623	3,1	32274	0	40016	0
1416	13,5	8435	0	16161	0	24624	0	32276	3	40025	3,5
1421	0	8486	0	16162	2,9	24626	2,8	32278	0	40039	10,8
1424	0	8492	2,1	16164	0	24627	0	32293	2,7	40045	0
1434	2,1	8494	0	16167	0	24628	2,3	32295	0	40056	9,6
1435	0	8502	0	16168	2,1	24629	0	32296	3	40063	0
1443	7,8	8512	0	16170	0	24653	0	32297	4,3	40072	0
1454	29,3	8518	2,4	16177	0	24656	2,6	32298	0	40073	0
1464	33	8519	2,4	16183	2,2	24658	0	32304	2,1	40076	2,4
1473	29,4	8524	4,3	16197	5,2	24664	2,1	32305	0	40079	0
1483	33,3	8532	0	16202	0	24665	0	32316	2,5	40089	0
1494	27,6	8534	0	16212	0	24682	2,5	32320	0	40114	2,5
1501	25,9	8565	0	16214	2,1	24683	0	32326	2,3	40117	0
1504	30,1	8580	4	16217	0	24685	2,3	32329	0	40123	0
1508	32,7	8582	0	16221	0	24686	0	32331	4	40127	0
1511	32	8586	0	16223	3,4	24692	3,9	32337	0	40144	2,6
1515	23,1	8592	3,9	16224	0	24711	0	32339	2,3	40149	3,3
1519	24,9	8597	0	16225	2,2	24720	4,5	32341	0	40180	3,5
1529	35,2	8606	0	16226	0	24722	0	32350	3,6	40182	0
1539	23,5	8615	0	16229	2,6	24726	3,2	32352	0	40187	0
1548	0	8618	3,6	16238	0	24747	0	32353	0	40206	2,5
1561	3,6	8619	3,7	16240	2,9	24748	3,6	32369	0	40208	0
1569	25,2	8621	0	16246	0	24755	4,5	32377	3	40216	2,7
1576	38,6	8632	0	16249	6,8	24757	0	32390	0	40225	0
1584	38,2	8633	0	16252	0	24759	2,3	32393	3,7	40240	4,4
1589	38,7	8636	0	16266	0	24760	0	32394	0	40244	0
1593	40,5	8654	11,7	16279	4,5	24766	2,2	32407	5,2	40248	2,1
1594	41,3	8661	3,4	16283	0	24770	0	32412	6,1	40249	0
1597	44,6	8670	14,3	16289	6,9	24772	0	32423	7,1	40254	0
1605	46,9	8682	20,8	16294	18	24780	8,3	32434	0	40262	3,5
1611	46,7	8688	26	16298	27,3	24788	4,4	32438	4	40265	0
1618	45,1	8693	23,6	16307	37,1	24793	0	32448	0	40268	3,3
1625	47,1	8698	17,7	16317	31,2	24795	7,2	32478	0	40271	0
1625	48,5	8703	19,7	16327	32,8	24800	24,9	32521	0	40278	4,3
1632	46,7	8707	19,5	16344	14,8	24807	22,7	32659	0	40282	2,8
1634	46,3	8709	20,6	16354	0	24812	0	32840	0	40290	0
1644	42,8	8713	19,9	16416	4,1	24813	9,4	33014	0	40345	2,4
1650	39,5	8718	18,4	16424	19,8	24824	0	33021	0	40349	0
1653	38,1	8734	20,4	16429	0	24836	0	33034	0	40354	2,6
1671	26,8	8744	11,9	16446	0	24847	0	33085	0	40356	0
1684	25,8	8753	11,2	16470	0	24862	0	33116	0	40391	3,3
1695	0	8758	9,2	16495	3,2	24924	0	33202	0	40394	0

1750	0	8764	22,3	16503	8,2	24929	3,4	33294	0	40417	2,4
1787	3,8	8768	24,9	16511	7,4	24932	0	33314	0	40431	2,5
1792	22,3	8771	24,1	16516	0	24933	2,5	33331	4,6	40435	3
1805	35,8	8778	4,1	16522	3,8	24935	4,4	33341	9,8	40438	3
1813	42,9	8792	11,8	16532	25,6	24938	0	33380	10,2	40456	4,9
1822	41,5	8796	11,7	16543	31,2	24940	0	33382	9,7	40476	4,3
1831	18,4	8803	13,4	16546	17,3	24945	3,7	33402	10	40488	0
1839	0	8804	13,4	16557	7,7	24958	0	33411	10,3	40499	2,4
1865	3,2	8817	0	16561	0	24961	3,5	33420	8,2	40501	0
1881	37,5	8820	0	16569	8,8	24964	0	33428	9	40503	2,1
1890	37,2	8977	0	16583	37,9	25020	3,1	33438	8,6	40504	0
1900	24,4	8980	0	16591	42,9	25024	0	33448	10,8	40505	2,1
1907	3,9	8984	2,3	16599	43,4	25032	5,4	33452	10,7	40506	0
1911	0	8990	11,2	16608	30,6	25040	0	33465	9,1	40524	2,5
1913	0	8996	10,3	16621	0	25054	2,2	33482	5,7	40542	0
1922	0	9004	9,4	16627	0	25056	0	33495	7,7	40545	2,4
1930	0	9009	17,5	16633	0	25059	3,4	33517	0	40546	0
1937	0	9014	19,2	16653	0	25063	0	33539	0	40557	0
1949	4,9	9019	20	16660	7,1	25067	2,6	33559	0	40576	2,1
1952	14,5	9022	23,1	16673	18	25070	0	33563	2,1	40578	0
1964	20,6	9024	19,9	16683	24,8	25073	2,2	33564	6,1	40583	0
1966	18,1	9030	11,8	16695	30,2	25076	0	33565	0	40585	2,7
1977	35,4	9035	0	16708	30	25078	2,1	33569	4,3	40588	0
1978	37,6	9040	10,9	16717	31,4	25097	0	33576	0	40592	2,1
1985	39,3	9046	14,8	16720	30,7	25109	10	33585	0	40594	0
1995	31,2	9047	14,8	16731	24,7	25120	5,6	33623	0	40606	3,2
2004	33,2	9053	14,5	16733	19,6	25125	19,5	33650	0	40610	0
2013	19,1	9055	20,6	16740	0	25139	0	33680	0	40616	0
2017	11,4	9065	30,4	16750	7,1	25143	0	33700	2,4	40619	0
2019	0	9067	34,8	16768	20,2	25144	14,1	33711	7,3	40621	3,5
2032	2,1	9072	33,9	16774	23,5	25150	20,3	33713	0	40624	0
2033	0	9075	29,6	16785	37,2	25167	0	33724	0	40625	2,8
2037	2,4	9084	0	16795	32,2	25181	2,5	33725	3,8	40626	0
2038	0	9094	0	16797	34,5	25184	3,1	33733	16,1	40641	2,7
2040	2,1	9101	3,1	16807	43,9	25185	0	33734	16,2	40642	0
2042	0	9105	0	16808	44,5	25188	0	33744	9,2	40644	2,4
2045	0	9107	3,4	16815	40,6	25193	8,2	33745	9,9	40649	0
2047	2,1	9122	5,1	16819	39,5	25202	17,1	33752	0	40652	2,6
2048	0	9127	0	16821	39,7	25212	31,1	33784	0	40655	4,1
2058	2,3	9139	2,2	16833	26,4	25216	22,7	33793	0	40656	0
2062	0	9147	0	16840	37,8	25236	9,8	33797	2,7	40657	4
2065	2,1	9152	2,3	16850	39,9	25237	8,8	33810	0	40676	0
2067	0	9155	0	16859	29,4	25244	5,2	33867	5,7	40696	2,4
2071	13,1	9157	0	16871	0	25245	0	33882	4,9	40699	0
2081	28,4	9337	0	16872	2,7	25252	8,4	33883	0	40702	0
2086	32,9	9427	0	16881	16,2	25256	0	33887	2,7	40703	0
2095	36	9490	2,2	16887	22,3	25272	3,1	33896	0	40716	0
2106	21,4	9502	6,9	16888	23,7	25273	0	33918	0	40734	0
2111	7,9	9503	6,9	16900	30,4	25282	3,1	33925	0	40752	0
2114	0	9510	0	16912	27,5	25285	0	33966	0	40758	0
2143	0	9513	0	16922	11,2	25297	4,7	33969	0	40764	0
2158	7,2	9516	2,1	16929	0	25300	6,4	33970	0	40770	0
2166	11,4	9518	3,4	16956	4,2	25301	0	33971	0	40782	0
2183	7,8	9528	19,7	16965	20,2	25304	2,4	33972	0	40797	0
2187	0	9536	20	16981	26,7	25308	0	33973	0	40942	3,3
2192	4,7	9544	0	16989	31,5	25320	2,9	33974	0	40947	0
2201	21,9	9550	10,5	16997	16,8	25325	0	33975	0	40962	2,3
2202	23,2	9557	5,4	17010	0	25331	2,1	33976	0	40965	0
2212	29,3	9560	0	17015	6,5	25333	0	33977	0	40977	2,5
2225	30,5	9565	0	17033	30,1	25338	2,2	33978	0	40978	2,5

2229	28,5	9573	2,2	17038	34,2	25342	0	33979	0	40979	0
2231	31,6	9576	0	17049	39,2	25353	3,3	33980	0	40983	2,1
2239	19,9	9601	0	17056	36,9	25358	0	33982	0	40998	0
2243	0	9618	0	17068	10,6	25362	3	33983	0	40999	0
2279	5,2	9636	2,7	17072	0	25364	0	33985	0	41017	0
2286	22,1	9638	0	17132	2,8	25369	2,5	33988	0	41030	0
2292	36,7	9642	0	17137	13,4	25370	0	33990	0	41042	0
2293	38,5	9650	0	17138	14,3	25377	2,6	33992	0	41050	0
2295	40,6	9683	0	17141	17	25379	0	33993	0	41055	2,4
2301	48,9	9690	0	17147	17,9	25382	3,7	33994	0	41056	0
2302	48,9	9698	0	17149	19,6	25383	2,5	33995	0	41064	0
2309	45,5	9705	0	17155	0	25384	0	33996	0	41072	0
2318	48,4	9706	0	17169	0	25397	2,3	33997	0	41100	0
2323	49,8	9719	7	17178	0	25400	0	33998	0	41106	0
2327	46,8	9724	0	17184	2,4	25414	2,5	33999	0	41140	0
2335	44,3	9736	3,5	17195	25,1	25419	0	34001	0	41158	0
2339	48,5	9737	0	17204	28,2	25420	0	34002	0	41164	0
2343	44,7	9780	2,2	17213	34,3	25424	2,4	34003	0	41254	0
2352	36,9	9781	0	17224	35,6	25426	0	34004	0	41273	0
2367	3,1	9795	2,8	17229	35,2	25428	2,9	34005	0	41279	0
2368	0	9796	0	17239	32,3	25446	0	34006	0	41300	0
2383	5,1	9798	0	17247	17,5	25451	7,6	34008	0	41309	4,6
2397	28,8	9801	2,2	17248	16,3	25455	0	34010	0	41317	0
2400	32,4	9803	0	17253	19,1	25481	0	34012	0	41331	0
2409	43,9	9815	2,3	17258	24,2	25506	3,4	34013	0	41339	0
2412	40,8	9816	0	17267	31,9	25508	0	34014	0	41352	2,3
2414	44,4	9846	2,1	17275	0	25515	2,8	34015	0	41355	0
2415	44,4	9847	0	17283	0	25517	0	34016	0	41366	2,2
2425	36,8	9851	2,1	17301	4,1	25530	2,5	34018	0	41368	0
2435	21,9	9853	0	17310	24,9	25533	0	34021	0	41373	2,1
2441	15,2	9878	0	17321	37,9	25547	2,2	34022	0	41374	0
2448	0	9918	2,4	17322	37,9	25549	0	34023	0	41432	2,6
2450	0	9920	0	17332	15,1	25555	2,4	34024	0	41435	0
2460	2,4	9928	2,7	17350	18,9	25557	0	34025	0	41444	2,3
2464	0	9930	0	17351	18,3	25567	0	34026	0	41446	2,4
2471	0	9943	6,3	17356	0	25580	2,1	34027	0	41447	0
2473	0	9947	0	17358	0	25581	0	34028	0	41462	0
2484	0	9953	7,9	17359	0	25587	2,3	34029	0	41485	3
2534	2,4	9961	0	17366	6,8	25589	0	34030	0	41488	0
2553	30,7	9985	3	17381	0	25596	2,4	34032	0	41497	0
2560	32,4	9987	0	17384	4,2	25597	0	34033	0	41498	2,6
2570	32,7	9990	2,3	17391	19,5	25609	2,5	34034	0	41500	0
2586	4,8	9991	0	17396	30,1	25612	0	34035	0	41503	2,7
2588	0	10009	0	17405	43	25624	7,1	34037	0	41511	0
2596	0	10012	0	17411	50,2	25632	22,9	34038	0	41520	0
2598	11,1	10024	3,1	17418	53,1	25634	27,9	34039	0	41523	3,1
2610	32	10027	0	17425	28,6	25639	15,7	34040	0	41529	0
2613	36,3	10047	2,1	17431	9,6	25646	0	34042	0	41562	2,2
2617	36,3	10050	0	17437	4,5	25647	3,1	34044	0	41570	0
2625	17,6	10053	2,1	17441	0	25650	0	34045	0	41581	2,1
2632	0	10054	0	17442	3,8	25662	0	34047	0	41582	0
2641	0	10059	0	17452	0	25663	4,8	34049	0	41583	0
2651	2,4	10071	3,5	17485	0	25665	16,2	34051	0	41588	2,2
2653	9,9	10076	0	17488	6,3	25672	0	34052	0	41589	0
2654	11,9	10081	3	17493	20,7	25676	8,7	34053	0	41590	0
2667	3,3	10082	0	17494	22	25683	0	34055	0	41594	2,1
2668	0	10093	2,7	17503	35,7	25689	10,5	34056	0	41595	0
2669	2,7	10096	0	17513	33,9	25705	0	34057	0	41596	2,5
2673	0	10102	3,8	17524	25,2	25718	2,7	34058	0	41599	0
2674	2,5	10103	3,8	17529	15,8	25720	0	34059	0	41612	0

2684	22,3	10106	0	17532	13,6	25733	0	34060	0	41628	0
2690	34,4	10109	4,6	17544	38,3	25734	8,1	34061	0	41646	0
2694	34,2	10116	0	17553	45,2	25751	0	34062	0	41680	0
2697	24,5	10119	0	17567	15,5	25757	6,8	34064	0	41701	0
2706	0	10121	7,3	17577	23,1	25760	0	34065	0	41706	0
2720	3,2	10124	0	17580	23,2	25765	0	34066	0	41780	2,1
2727	6,2	10146	0	17584	30,8	25766	7,4	34067	0	41782	0
2732	23,2	10148	14,7	17586	35,4	25771	0	34068	0	41794	2,9
2734	34,3	10153	0	17590	37,9	25779	7,9	34069	0	41796	0
2744	35,2	10160	0	17599	30,8	25786	0	34070	0	41841	0
2748	39,8	10182	0	17612	30	25787	0	34071	0	41844	0
2753	39,3	10186	3,6	17622	35,7	25788	0	34072	0	41848	2,5
2757	29	10190	0	17631	44,6	25796	10,5	34074	0	41851	0
2764	32,1	10191	2,5	17639	47,5	25805	9,7	34075	0	41854	0
2775	34,9	10193	0	17647	41,8	25811	0	34077	0	41855	0
2784	36	10198	0	17654	38,1	25820	2,1	34079	0	41857	2,1
2802	7,3	10227	3,6	17655	38,1	25821	0	34080	0	41858	0
2820	20	10239	8,7	17666	19,3	25841	0	34082	0	41875	0
2825	28	10241	7	17677	11,2	25843	0	34085	0	41882	0
2834	25,1	10262	14,6	17700	31,1	25844	0	34086	0	41909	0
2835	23,5	10264	17,6	17710	35,9	25851	0	34087	0	41919	2,3
2854	19	10272	24,4	17712	35,5	25856	2,2	34089	0	41921	0
2857	20,3	10283	14,6	17716	37,3	25857	0	34090	0	41938	0
2862	12,9	10289	0	17727	24,3	25862	0	34091	0	41947	0
2872	8,2	10302	2,9	17743	29,5	25873	0	34093	0	41956	0
2881	22	10304	0	17754	38,5	25888	0	34094	0	41964	0
2885	28,1	10308	0	17762	40,6	25899	4,3	34095	0	41986	0
2889	8,9	10316	2,6	17771	47,9	25901	6,8	34096	0	42007	0
2893	0	10318	0	17773	48,9	25910	0	34097	0	42015	0
2899	6,5	10320	0	17780	44	25966	4,4	34098	0	42024	0
2905	12,5	10333	2,2	17787	14,1	25977	20,8	34099	0	42062	0
2914	20,7	10336	0	17795	3,5	25993	0	34100	0	42085	0
2938	11,9	10339	2,2	17798	0	26022	3	34101	0	42089	0
2946	20,8	10340	0	17809	3,8	26024	2,2	34102	0	42133	2,6
2951	31	10350	0	17824	8,6	26025	2,1	34103	0	42144	4,6
2965	10,4	10356	0	17842	9,9	26026	0	34104	0	42148	0
2971	0	10389	0	17869	9,6	26030	0	34105	0	42242	0
2981	7	10404	2,5	17890	6,8	26036	2,1	34106	0	42359	0
2982	8,4	10405	0	17893	5,9	26037	0	34107	0	42408	0
2983	9,7	10420	2,6	17895	0	26054	0	34108	0	42409	0
2993	19,6	10422	10,1	17905	3,3	26076	2,1	34109	0	42411	2,1
3000	17,6	10432	0	17913	15,1	26078	0	34110	0	42413	0
3010	9,7	10443	6,6	17923	5,8	26148	2,5	34112	0	42414	0
3016	11	10452	0	17924	5,8	26151	0	34113	0	42417	2,1
3035	14,4	10481	20	17932	5,3	26205	0	34114	0	42418	0
3036	16	10487	19,1	17934	0	26206	0	34115	0	42420	2,7
3041	11,8	10494	0	17941	0	26215	0	34116	0	42422	0
3059	2,7	10517	0	17946	4,8	26225	4,4	34117	0	42424	2,3
3072	0	10518	0	17951	0	26232	0	34118	0	42442	0
3074	2,3	10523	3,3	17959	5,6	26244	3,4	34119	0	42445	2,9
3077	5	10536	5,6	17965	5,2	26251	27,5	34120	0	42465	0
3094	0	10543	16,1	17969	0	26255	25,5	34121	0	42472	2,3
3105	4,2	10546	15,8	18009	3,4	26260	19	34122	0	42476	0
3109	0	10557	13,2	18029	10,4	26274	0	34123	0	42490	0
3111	2,1	10562	0	18032	0	26283	0	34124	0	42510	0
3113	0	10572	0	18042	2,9	26333	0	34125	0	42538	0
3126	3	10585	2,8	18072	9,7	26335	2,3	34126	0	42603	0
3131	0	10595	3,7	18073	10	26348	0	34127	0	42671	5,7
3139	0	10601	0	18081	10,5	26356	13	34128	0	42677	0
3140	0	10603	0	18101	11,3	26380	19,7	34130	0	42680	0

3168	2,3	10614	0	18105	7,8	26387	21,9	34132	0	42682	0
3169	0	10616	6,7	18120	10,1	26401	7,2	34134	0	42686	0
3197	0	10626	8,3	18127	10,3	26405	20,2	34136	0	42708	2,1
3208	2,7	10632	0	18134	19,7	26408	21,3	34138	0	42729	0
3209	0	10633	2,8	18138	13	26411	27,8	34140	0	42751	4,1
3219	2,4	10634	0	18145	13,7	26414	27,5	34141	0	42773	14,2
3222	0	10640	0	18166	0	26419	6,1	34142	0	42780	0
3225	2,5	10644	0	18183	4,1	26425	0	34143	0	42784	0
3230	0	10653	0	18192	10,7	26439	2,5	34144	0	42785	0
3242	2,5	10661	0	18198	11,4	26441	0	34145	0	42810	2,2
3244	0	10668	0	18209	12,2	26443	0	34146	0	42813	0
3247	3	10672	0	18218	5,7	26445	10,5	34147	0	42834	0
3255	0	10684	0	18220	0	26448	5	34148	0	42876	0
3271	3,1	10686	0	18229	3,3	26451	0	34149	0	42900	2,7
3273	0	10687	2,2	18232	0	26458	0	34150	0	42904	13
3378	0	10688	0	18254	0	26461	0	34151	0	42907	17,8
3437	2,4	10702	0	18336	3	26468	3	34152	0	42911	20,8
3439	0	10728	0	18340	0	26473	0	34153	0	42913	21,3
3558	0	10730	0	18352	2,3	26476	2,6	34154	0	42916	25,4
3563	3,8	10769	3,1	18356	0	26482	0	34155	0	42927	38,5
3569	0	10771	0	18357	2,5	26485	0	34156	0	42936	41,7
3677	0	10783	0	18358	0	26497	2,2	34157	0	42940	36,5
3689	2,2	10789	0	18373	5,8	26498	0	34158	0	42949	9,3
3699	13,6	10795	0	18377	0	26507	2,5	34159	0	42950	0
3704	24,4	10963	0	18435	0	26508	0	34160	0	42951	0
3723	0	11143	0	18491	2,6	26528	2,3	34161	0	42953	0
3725	0	11163	0	18502	14,2	26531	0	34162	0	42965	0
3728	0	11196	2,4	18505	13,4	26534	2,3	34163	0	42970	0
3734	2,6	11198	0	18512	0	26536	0	34164	0	42973	0
3739	2,7	11202	0	18522	9,9	26555	3	34165	0	42979	5
3742	0	11324	0	18529	9,5	26556	0	34166	0	42980	10,2
3745	2,3	11359	0	18537	16,9	26563	0	34167	0	42994	37,4
3760	0	11385	2,3	18542	18,3	26568	0	34168	0	43002	45,9
3763	2,9	11387	0	18557	11,5	26574	0	34170	0	43004	46,9
3786	13,9	11388	2,2	18566	18,4	26581	2,6	34171	0	43011	40,2
3792	5,5	11389	0	18571	14	26583	0	34172	0	43021	21,8
3799	20,2	11393	0	18577	12,6	26588	0	34173	0	43027	20,5
3808	22	11395	0	18589	10,3	26594	0	34174	0	43032	24,1
3814	0	11397	0	18595	13,8	26604	2,6	34175	0	43040	0
3824	9,5	11399	2,3	18615	8,5	26606	0	34176	0	43047	0
3829	5,7	11402	4,5	18621	8,2	26608	2,1	34177	0	43059	0
3834	0	11404	0	18645	8,2	26609	0	34178	0	43100	0
3846	6,1	11414	2,2	18651	0	26611	2,5	34179	0	43116	4,9
3861	26,1	11416	0	18663	6,2	26613	0	34180	0	43125	20
3864	31,4	11417	2,8	18671	14,8	26619	0	34181	0	43129	26
3867	36,6	11420	0	18684	0	26626	0	34182	0	43143	0
3874	42,4	11422	0	18707	2,6	26627	0	34183	0	43145	0
3875	33,7	11431	2,6	18723	0	26632	3,2	34184	0	43148	0
3885	31,5	11442	0	18727	2,8	26635	0	34185	0	43154	10,3
3891	35,7	11445	2,2	18730	0	26638	2,9	34186	0	43161	15,5
3896	38,3	11447	0	18760	0	26640	3,3	34188	0	43164	20,3
3899	34,4	11460	3,3	18796	0	26646	0	34198	0	43168	21,6
3905	18,8	11466	0	18804	2,4	26649	0	34232	3,2	43180	37,2
3910	0	11475	0	18812	0	26654	0	34240	2,7	43184	45
3920	0	11476	3	18837	0	26656	0	34241	0	43192	47,3
3921	0	11478	0	18854	0	26660	0	34242	2,9	43199	45,6
3968	4,9	11501	0	18857	0	26663	2,2	34243	2,9	43208	45
3978	14,2	11503	3,1	18864	2,3	26665	0	34246	0	43217	36,9
3994	13,9	11505	3	18877	0	26669	0	34263	3,2	43218	36,9
4008	33,1	11507	0	18910	0	26699	0	34268	0	43229	4,5

4027	11,1	11525	4,2	18916	0	26748	0	34272	0	43230	0
4030	0	11527	0	18920	3,3	26784	3	34288	0	43232	0
4032	0	11528	2,7	18936	7,7	26786	0	34469	0	43247	5,7
4037	0	11529	0	18939	0	26792	0	34501	0	43264	24
4040	0	11530	0	18941	0	26803	2,9	34646	7,1	43282	7,1
4046	0	11532	4,2	18946	3,2	26805	0	34650	7,2	43290	0
4053	2,7	11535	2,1	18955	12,5	26808	0	34654	7,1	43294	2,7
4059	0	11539	0	18965	7,3	26817	4	34656	4,6	43311	12
4067	3,2	11548	0	18973	0	26828	0	34657	0	43318	5,2
4070	24,3	11550	3,5	18977	0	26830	3,3	34661	0	43325	5,7
4075	0	11569	25,4	18980	0	26832	0	34666	0	43332	0
4085	0	11577	0	18993	0	26840	0	34670	3,7	43333	2,7
4088	0	11588	2,4	19002	0	26853	2,7	34679	6,7	43342	14,8
4100	0	11589	0	19026	0	26863	0	34684	5,3	43349	15,3
4105	2,8	11591	0	19030	0	26873	4,8	34685	4,9	43354	15,5
4107	0	11609	0	19051	3,8	26878	8,6	34687	5,5	43359	13,1
4111	5,3	11612	2,1	19063	0	26882	0	34688	5,2	43364	13,1
4118	18,5	11613	0	19089	0	26883	2,3	34689	0	43379	0
4121	25,5	11616	2,7	19110	0	26884	0	34690	0	43385	0
4130	35,8	11625	0	19116	2,1	26897	2,9	34695	0	43423	0
4141	31,5	11628	0	19135	8,5	26906	0	34696	0	43437	2,8
4149	13,1	11629	2,5	19144	0	26914	3,3	34698	0	43451	10
4154	23,6	11630	0	19153	4,3	26921	13,2	34701	5,5	43489	9,2
4158	33,7	11632	3,1	19158	7,4	26929	12,3	34741	9,7	43498	0
4163	41,8	11638	0	19168	7,6	26935	0	34752	10,7	43499	0
4166	49,5	11641	3,2	19204	9,2	26949	0	34762	7,7	43506	0
4173	55,8	11643	0	19242	8,3	26952	3	34771	9,9	43537	2,1
4179	41,2	11648	2,5	19256	10,7	26957	8,6	34787	0	43538	0
4189	39,7	11651	0	19264	22,3	26966	5,5	34797	0	43548	2,2
4194	42,8	11663	0	19276	28,7	26975	7,7	34803	2,3	43557	0
4197	54,1	11686	0	19294	11,9	26983	0	34804	0	43573	3
4204	58,3	11720	3,8	19313	30	26998	0	34808	2,5	43594	18
4210	54	11726	0	19326	19,6	27000	2,3	34810	0	43607	0
4218	52,5	11727	2,4	19335	31,7	27002	2,2	34814	7,5	43672	2,9
4222	43	11732	0	19336	31,7	27008	5,2	34818	0	43682	20,9
4224	40,5	11791	3,2	19338	34,6	27014	4	34820	5,2	43687	25,2
4229	19,9	11795	0	19344	42,9	27019	0	34830	6,7	43690	27,5
4232	11,6	11804	2,7	19351	45,9	27031	2,6	34843	6,4	43702	35,8
4234	0	11808	0	19356	35,6	27037	0	34852	11,5	43703	36,2
4235	0	11812	6,1	19367	31,4	27040	3,1	34858	0	43712	41,2
4281	0	11817	0	19386	14,3	27047	0	34861	2,3	43721	40,5
4286	2,1	11828	0	19402	9	27050	0	34867	0	43723	39,9
4300	12,8	11833	3,1	19413	31,9	27053	2,4	34878	0	43731	42,8
4309	17,7	11844	15,5	19424	35,1	27054	0	34889	6,2	43740	45,2
4313	21,2	11856	11,5	19425	35,1	27061	2,3	34894	13,7	43748	47,1
4318	28,5	11860	18,8	19434	44,8	27066	0	34903	10,7	43756	45,5
4321	27,9	11865	15,8	19435	44,8	27071	2,3	34925	9,5	43758	45,7
4324	23,8	11867	10,1	19443	49,6	27073	0	34938	0	43766	43,1
4328	20,1	11872	13,3	19446	50,5	27074	2,5	34956	0	43776	40
4331	31	11878	25,2	19451	38	27075	0	34960	0	43785	38,2
4341	30,4	11883	8,2	19475	0	27080	2,7	34973	2,6	43793	45,3
4344	26	11886	14,7	19490	4,3	27081	0	34992	0	43796	46,2
4353	10,3	11892	8,7	19517	17,2	27088	2,4	35001	6	43805	43,4
4355	10,2	11898	0	19519	20,9	27089	0	35009	6,1	43809	43,5
4368	10,8	11911	2,4	19534	0	27109	0	35011	4,9	43810	43,5
4381	5,9	11915	0	19544	0	27117	2,1	35012	4	43815	39
4384	0	12029	2,1	19581	2,7	27122	0	35014	0	43817	37,9
4396	2,9	12030	0	19602	22	27148	2,4	35021	0	43824	40
4407	7,9	12036	3,1	19616	10,8	27154	0	35023	2,3	43832	44,3
4415	6,7	12040	0	19617	10,8	27155	0	35033	10	43837	47,6

4428	0	12044	2,1	19622	27,2	27200	2,7	35048	0	43840	48,4
4435	7,6	12045	0	19630	46,7	27201	0	35050	0	43846	46,8
4445	0	12046	0	19637	45,5	27203	2,4	35072	2,4	43851	45,6
4446	3,5	12047	0	19641	42	27204	0	35080	12,4	43856	44,4
4450	0	12049	4,9	19652	0	27227	0	35099	12	43864	45,3
4453	0	12054	12,3	19675	0	27235	0	35111	13,6	43868	44,6
4461	0	12064	6	19692	2,2	27243	2,9	35114	13,2	43877	47,2
4496	0	12070	16,1	19699	22,2	27248	0	35129	0	43878	47,5
4530	3,2	12071	19,6	19709	0	27253	2,5	35133	7,7	43884	51,8
4534	0	12080	19	19716	13,4	27255	0	35141	6,2	43892	50,1
4582	0	12085	16,9	19721	24,2	27259	2,2	35146	6,6	43898	47,8
4641	0	12094	7,2	19728	29,5	27260	0	35175	0	43902	46
4654	2,4	12099	13,1	19740	35,4	27264	0	35177	2,3	43910	48
4655	0	12108	10,1	19743	35,1	27269	2,2	35189	2,3	43916	47,8
4657	2,7	12111	6,4	19753	36,8	27272	0	35192	7,4	43918	46
4671	8,7	12120	23,7	19760	39,5	27287	0	35212	18,8	43926	44,6
4682	7,7	12137	13,8	19770	36,7	27289	2,5	35239	10,1	43935	35,7
4686	0	12142	16,8	19773	39,8	27291	0	35246	0	43945	27,8
4715	6,4	12146	28	19781	42,6	27292	0	35249	3,1	43956	29,5
4716	4,2	12154	38	19783	42,2	27294	2,2	35251	3	43963	21,5
4720	0	12165	27,4	19786	41,5	27301	6,6	35257	0	43975	36,3
4726	2,1	12166	27,4	19788	41,8	27303	0	35259	2,5	43978	40,1
4729	0	12173	14,1	19789	42,1	27305	3,9	35272	0	43986	48,2
4755	0	12176	25,7	19791	42,9	27309	0	35276	3,3	43987	48,1
4760	2,1	12179	30,9	19800	41,8	27313	2,1	35286	5,5	43993	41,5
4764	0	12184	33,7	19808	45,4	27314	0	35289	0	43996	40,3
4821	0	12185	24,9	19810	45,5	27317	2,8	35301	0	43999	43
4903	2,5	12191	0	19817	47	27319	0	35310	2,7	44000	43,9
4905	0	12195	0	19825	49,9	27325	3	35340	12	44002	45,5
4908	0	12213	3,2	19832	38,2	27326	0	35345	12,8	44004	48,4
4917	2,6	12222	4,7	19846	26,2	27331	3,3	35366	15,9	44008	45,8
4923	2,2	12228	12,8	19849	27,4	27335	0	35372	13,7	44013	30,8
4951	6,6	12233	23,7	19850	30,5	27338	2,4	35380	4,5	44020	17,4
4959	11,2	12236	32,6	19862	16	27341	0	35382	0	44021	16,8
4966	0	12239	36,7	19868	0	27342	2,2	35392	0	44029	9,5
4981	0	12240	37,2	19872	0	27350	0	35410	2,1	44033	21,6
4985	2,6	12242	38,9	19879	0	27355	0	35415	4,2	44036	23,8
4988	0	12249	33,6	19896	0	27361	2,1	35419	0	44039	36,7
5001	2,6	12252	28	19958	0	27362	0	35422	2,2	44044	37,2
5002	0	12262	0	19959	3,9	27387	0	35425	0	44048	40,6
5010	0	12269	0	19963	14,5	27391	2,1	35430	2,3	44052	37
5017	2,3	12273	3,1	19966	21,1	27392	0	35453	19,3	44056	34,5
5022	0	12275	0	19967	21,1	27415	0	35468	27,9	44060	32
5023	3,1	12277	0	19973	33,4	27421	2,4	35470	28,2	44063	33,2
5026	0	12281	2,7	19981	38,2	27422	0	35484	6,5	44069	34
5028	3,3	12282	0	19986	38,2	27471	0	35490	0	44082	26,8
5029	3,3	12288	0	19994	0	27477	2,7	35493	0	44088	26,4
5033	0	12291	2,4	19997	0	27481	0	35530	2,7	44098	30,8
5037	2,2	12293	0	20035	5,6	27489	2,2	35552	19,4	44099	32,2
5038	0	12297	3,2	20042	14,6	27491	0	35557	21,4	44117	20,5
5043	0	12302	3	20046	25	27503	2,6	35560	21,9	44128	31,7
5055	0	12304	0	20056	29,9	27505	0	35574	17,4	44141	27,7
5059	2,1	12306	2,3	20060	33,4	27521	0	35594	0	44144	29,7
5062	0	12307	2,3	20068	33,6	27528	2,7	35597	0	44145	29,7
5068	0	12308	0	20079	31,9	27530	0	35607	0	44148	32,5
5081	2,1	12312	3,5	20083	33,3	27538	2,2	35623	0	44161	25,4
5082	0	12319	0	20086	20,7	27539	0	35644	0	44173	8,8
5087	2,4	12321	2,7	20087	17,5	27541	2,9	35649	0	44179	10,9
5089	0	12326	3,2	20093	24,1	27543	0	35670	3	44184	0
5118	0	12333	0	20094	28,4	27554	2,6	35674	15,6	44194	0

5132	2,1	12334	2,4	20096	30,9	27556	0	35677	21,2	44200	6,5
5133	0	12335	0	20107	30,7	27557	2,5	35693	26,7	44209	27,9
5152	0	12346	0	20120	0	27559	0	35705	24,9	44215	27
5182	0	12347	2,6	20126	8,3	27569	2,7	35713	20	44222	23,7
5217	2,4	12357	0	20138	41,6	27571	3,7	35718	0	44227	19,5
5224	0	12367	2,1	20145	41	27573	0	35719	0	44228	11,1
5226	2,4	12370	0	20148	49,1	27576	6,9	35733	0	44232	0
5248	0	12371	0	20154	59,7	27582	0	35734	0	44234	0
5261	2,1	12390	0	20161	62,3	27593	3,7	35737	2,4	44247	0
5262	0	12403	0	20167	52	27599	0	35743	0	44256	0
5263	0	12409	0	20173	40,9	27605	0	35745	0	44266	0
5275	0	12417	0	20183	9,1	27616	2,5	35755	0	44270	0
5280	2,1	12420	2,3	20186	0	27624	0	35761	2,9	44271	0
5281	0	12421	0	20216	2,1	27626	6,7	35768	25,7	44273	0
5289	0	12427	6,5	20225	20,2	27630	0	35772	39,3	44401	2,9
5307	2,7	12430	0	20234	30,7	27638	0	35775	43,2	44409	12,2
5308	2,7	12435	0	20240	16	27642	0	35785	39,5	44414	18,6
5309	0	12445	2,3	20247	21,6	27644	4	35793	8,8	44415	19,7
5316	2,3	12446	0	20249	23,3	27649	0	35796	0	44417	23,3
5320	0	12449	0	20261	18,4	27651	0	35800	0	44419	28,4
5339	3,6	12452	2,1	20268	0	27653	0	35801	0	44420	28,4
5340	3,7	12453	0	20277	5,1	27660	2,5	35810	0	44422	30
5358	0	12460	0	20293	34,3	27661	0	35818	4	44427	26,3
5362	2,2	12475	0	20294	34,3	27665	2,2	35819	0	44428	27,2
5363	4	12497	0	20303	36,2	27666	0	35824	5,1	44430	29,1
5377	0	12506	0	20316	19,5	27668	0	35838	39,4	44433	28,9
5388	2,3	12510	2,5	20320	12,5	27676	2,2	35843	42,7	44445	20
5390	0	12511	0	20322	0	27680	0	35845	44	44451	12
5391	2,2	12523	2,3	20336	3,3	27681	2,9	35852	49,1	44462	7,8
5399	0	12524	0	20353	20,7	27684	0	35859	49,1	44473	0
5406	3,5	12533	0	20362	0	27687	2,1	35867	49,5	44486	2,2
5413	22,3	12542	2,2	20395	2,8	27689	0	35874	45,7	44493	6,4
5420	22,9	12544	0	20404	22,7	27690	3,7	35882	46,4	44502	6,6
5429	22,8	12566	0	20412	37,2	27693	0	35888	42,6	44511	6,9
5435	0	12589	0	20419	36,1	27699	3,5	35896	41,7	44518	7,5
5437	0	12632	0	20421	36,5	27719	0	35903	47	44527	11,4
5440	8,8	12682	0	20426	32	27721	0	35910	48,8	44536	7,2
5445	19	12703	2,7	20437	0	27734	3,8	35915	41,5	44538	0
5448	26,9	12705	0	20452	2,7	27739	0	35916	41,5	44547	7,2
5451	27,5	12706	2,2	20456	12,5	27743	3,4	35926	11	44554	10,4
5456	28	12712	0	20473	0	27744	0	35930	22,6	44559	8,1
5465	26	12715	2,1	20476	2,7	27757	3,6	35932	28,1	44566	0
5478	27,1	12716	0	20480	0	27763	0	35947	17,2	44578	0
5483	15,8	12719	3	20494	6,3	27777	3,4	35965	17,7	44583	0
5488	21,7	12720	0	20510	9,1	27780	0	35986	2,7	44590	0
5493	29,6	12730	0	20518	12,6	27800	2,5	35997	0	44609	0
5503	9,8	12732	2,9	20523	0	27810	0	36019	3,1	44623	0
5509	0	12738	7,6	20531	12,8	27827	2,2	36020	3,8	44679	2,5
5510	0	12739	10,9	20541	26,5	27832	5,4	36025	0	44683	0
5518	2,9	12744	7,3	20553	33	27840	5,4	36035	2,2	44699	0
5524	0	12751	0	20560	32,8	27841	0	36039	0	44770	0
5525	0	12766	0	20590	15,4	27857	9,1	36047	4	44859	3,2
5537	2,2	12768	0	20599	0	27859	4,4	36054	16	44868	11,1
5540	5,7	12770	0	20601	0	27860	0	36057	28,4	44869	11,1
5543	5,7	12787	3	20609	4,6	27867	0	36068	0	44871	9,7
5548	7,6	12794	3,3	20611	0	27870	6,1	36073	0	44879	11,1
5555	5,3	12803	4,7	20614	0	27874	22,7	36081	0	44884	8,1
5556	5,3	12807	0	20617	2,3	27883	33,7	36095	0	44891	0
5565	7,6	12809	4,7	20618	0	27894	21	36117	0	44895	11,5
5566	0	12813	3,8	20620	2,1	27900	0	36118	0	44903	8,1

5570	6,4	12817	9,2	20623	0	27902	0	36150	3	44918	9,5
5579	21	12829	18,9	20624	2,4	27906	6,5	36151	0	44919	0
5592	0	12832	27,5	20625	0	27910	14,8	36173	6,3	44945	0
5602	3,8	12844	10,9	20628	2,2	27914	21,6	36179	26,2	44950	0
5606	0	12861	21,5	20630	0	27925	31,8	36189	39,2	44965	3,9
5607	0	12870	18,2	20637	2,3	27929	17,9	36190	40,8	44973	0
5610	3,6	12875	32,4	20648	0	27940	14,2	36198	38,9	44981	0
5614	0	12878	0	20650	0	27942	12,6	36209	16,1	44992	0
5620	9,5	12882	9,4	20659	2,6	27945	0	36214	0	45008	0
5629	10,5	12884	0	20661	0	27947	0	36216	0	45027	2,1
5637	15,5	12891	14,1	20665	0	27956	2,2	36252	3	45042	0
5644	11,6	12894	16	20671	8,5	27957	0	36263	26	45097	2,5
5648	0	12897	7	20680	11,3	27968	0	36276	0	45112	5,1
5659	5	12899	0	20686	30,2	27970	2,7	36351	0	45119	14,8
5669	5,7	12907	13,3	20691	29,7	27973	0	36389	2,7	45126	25,6
5674	5	12908	15,2	20696	11,9	27975	0	36395	15,3	45130	21,4
5679	0	12912	16,7	20701	0	27976	0	36416	0	45131	7
5681	2,3	12914	0	20714	2,2	27982	0	36446	0	45132	7
5707	3,7	12930	15,2	20715	0	27988	3,1	36457	0	45133	0
5718	10,5	12931	0	20720	2,6	27997	0	36523	3,8	45134	0
5724	9,7	12935	16,8	20738	24,4	28007	3,6	36529	17	45151	0
5747	7,8	12950	15	20749	36,1	28008	5,5	36530	20,2	45159	0
5748	0	12951	15	20751	31,8	28009	0	36546	0	45168	0
5756	0	12952	14,9	20758	7,7	28013	4	36556	0	45171	0
5759	6,7	12955	6,7	20762	22,5	28014	5,3	36581	0	45172	0
5760	0	12957	0	20765	25,2	28021	0	36598	0	45174	0
5763	0	12970	2,7	20775	14,9	28177	5,2	36637	0	45178	0
5782	0	12973	0	20779	0	28179	0	36662	4,1	45315	0
5791	0	12982	0	20781	0	28180	2,6	36673	11,3	45319	2,9
5804	0	12990	2,4	20787	0	28187	0	36675	9,6	45320	0
5835	0	12992	0	20913	0	28189	2,1	36677	11,8	45342	3,9
5866	2,6	12997	0	20962	0	28193	0	36679	16,6	45346	19,1
5868	0	13020	0	20973	2,2	28195	0	36685	17,1	45347	19,1
5896	0	13049	3,5	20974	0	28199	0	36687	15,4	45348	23,1
5904	0	13056	0	20976	2,2	28208	5,2	36688	17,9	45350	25,2
5912	2,4	13057	6,5	20989	12,8	28214	0	36689	20,4	45352	32,2
5924	6,6	13061	11,4	20993	26,3	28221	0	36690	20,4	45356	37,3
5931	4,2	13066	0	20995	28,7	28235	0	36693	30,5	45358	38,7
5934	6,1	13079	5,1	20996	22,4	28248	2,5	36697	34,8	45360	38,9
5937	3,7	13082	0	20997	22,4	28256	20,2	36703	39,1	45363	37,9
5938	0	13094	2,2	20998	17,8	28263	26,1	36710	40,3	45364	38,9
5944	0	13095	0	21007	11,7	28276	25,8	36713	37,7	45365	39,4
5947	4	13103	2,2	21011	21,3	28279	25,3	36723	29,1	45376	20,4
5955	0	13104	0	21023	30,2	28292	28,7	36727	11,2	45384	8,7
5963	2,7	13118	2,3	21034	25,6	28305	7,2	36732	6,2	45386	8,3
5975	8,5	13119	0	21043	20	28314	10,2	36733	8,2	45393	13,5
5991	8,7	13126	2,1	21048	20,7	28318	0	36737	25,2	45397	25,4
6006	5	13127	0	21049	16,4	28339	2,8	36745	44	45401	34
6010	7,3	13128	2,7	21050	14,2	28357	0	36748	42,2	45410	44,2
6030	3,1	13131	0	21051	14,2	28376	0	36751	46,5	45413	46
6042	0	13133	0	21052	4,3	28381	2,3	36753	45,5	45422	38,9
6047	2,6	13140	2,8	21053	3	28389	24,3	36755	43	45429	36,7
6057	13,5	13141	0	21054	0	28395	30,5	36765	32,5	45430	33,9
6066	9,9	13145	3,3	21066	2,1	28406	33,7	36785	14,8	45431	29,2
6071	0	13146	0	21074	5,2	28411	25	36797	37,3	45432	24
6072	2,9	13151	2,3	21082	19,1	28420	0	36802	45	45448	26,4
6080	0	13154	0	21086	32,2	28426	0	36810	47,1	45457	37
6082	2,5	13167	2,2	21094	24,5	28442	0	36818	24,9	45460	40,9
6084	4,2	13170	0	21099	8,8	28448	2,1	36822	0	45463	41,7
6090	0	13183	2,8	21105	20,1	28458	0	36824	0	45470	41,8

6139	3,1	13185	0	21114	6,1	28487	0	36828	10	45474	37,6
6140	0	13191	2,1	21116	0	28489	2,5	36841	42,3	45477	36,1
6154	6,6	13194	0	21125	7,7	28490	0	36849	33,5	45481	39
6165	9,6	13200	2,2	21132	0	28492	2,4	36861	7	45487	43,2
6172	19,5	13204	0	21141	0	28495	0	36871	16	45491	41,2
6180	7,2	13214	3,9	21142	0	28497	2,5	36885	40,3	45494	42,2
6183	0	13220	0	21144	0	28498	0	36893	42	45496	41,7
6189	7,4	13231	2,1	21150	2,4	28557	0	36899	37,3	45503	34,5
6195	23,2	13235	0	21155	2,9	28593	3	36909	36,2	45504	34,5
6205	13,9	13254	2,1	21158	0	28598	0	36917	44,7	45506	32,1
6208	0	13257	0	21159	2,8	28615	3,8	36926	43	45510	36,8
6212	0	13263	2,2	21173	5,5	28618	0	36929	41,2	45517	35,8
6213	0	13267	0	21177	0	28738	0	36933	33,6	45524	34,2
6223	0	13276	2,1	21227	2,2	28739	0	36936	25,6	45533	41,6
6265	0	13278	0	21230	0	28748	5	36942	14,6	45543	42,1
6272	0	13279	4,5	21232	2,4	28754	0	36972	10,5	45554	38,4
6322	0	13283	0	21234	0	28759	2,2	36999	10	45564	34,9
6323	0	13288	3,3	21271	0	28760	0	37015	8,5	45574	17,8
6348	0	13296	18,3	21325	0	28761	4,5	37024	7,6	45578	15,2
6358	0	13302	21,7	21333	0	28763	5,2	37036	8,2	45582	15,5
6359	0	13308	8,3	21396	2,5	28772	0	37047	10,2	45587	22,8
6393	0	13311	0	21400	0	28787	2,3	37049	11,7	45588	24
6413	0	13314	0	21405	0	28791	10,4	37078	7,3	45598	37,4
6427	5,3	13318	6,7	21442	2,8	28801	29	37086	11,3	45603	24,1
6428	0	13325	0	21446	0	28815	8,2	37092	8,1	45608	14,9
6434	0	13329	2,3	21447	2,3	28817	0	37116	25,4	45613	19,1
6441	0	13331	0	21451	0	28824	0	37128	32,1	45623	35,6
6446	0	13332	0	21471	2,1	28847	0	37137	31,3	45631	43,1
6448	2,3	13334	0	21473	0	28862	0	37146	41,2	45633	44,7
6449	0	13336	3,5	21478	2,6	28881	0	37152	41,8	45634	44,7
6456	8,2	13341	0	21479	0	28904	0	37160	44,5	45638	43,6
6457	8,8	13347	0	21481	2,4	28906	0	37169	37,4	45646	44,9
6463	0	13358	3,4	21483	0	28920	0	37176	42,5	45650	44,6
6468	0	13364	0	21484	2,9	28928	0	37179	42	45654	43,6
6472	4,5	13382	2,2	21486	0	28961	2,2	37180	42,6	45663	41,6
6476	0	13383	0	21487	2,2	28963	3,9	37188	47	45672	32,8
6480	0	13391	0	21488	0	28970	20,1	37196	47,6	45676	20
6487	5,9	13393	0	21490	3,2	28974	25,6	37200	44,3	45686	14,5
6496	4,8	13396	3,5	21493	0	28975	25,2	37202	45,1	45697	34,5
6511	4	13403	0	21500	2,2	28979	0	37204	43	45707	42,4
6512	0	13415	3	21506	4,1	28984	0	37206	41,6	45712	44,4
6514	5,7	13419	0	21514	23,2	29003	3,6	37209	42,2	45718	43,9
6515	5,7	13425	11,4	21522	40	29009	2,3	37213	46,1	45725	42,7
6520	0	13430	22,4	21523	39,9	29019	0	37214	46,1	45735	32,5
6546	0	13436	21,8	21532	29,2	29023	2,4	37215	47,6	45739	22
6613	0	13440	0	21547	10,6	29033	0	37218	48,3	45742	29,6
6620	0	13447	0	21552	18,1	29036	3,8	37220	47,6	45743	29,6
6627	0	13448	6,7	21556	20,2	29043	0	37227	51,1	45748	31,1
6640	0	13454	9	21562	16,2	29044	0	37233	51,1	45752	29,5
6644	0	13456	0	21578	16	29049	8,6	37236	49,2	45756	32,9
6653	0	13466	0	21582	29,3	29056	0	37238	47,9	45766	18,5
6659	0	13469	0	21587	13,5	29057	0	37241	47,3	45769	23,3
6664	0	13474	0	21596	21,5	29060	0	37243	50,9	45771	30,2
6666	0	13491	14,6	21606	0	29094	0	37246	47,1	45777	31,8
6675	0	13495	12,3	21615	3,5	29111	0	37249	48,7	45780	27,9
6686	0	13498	0	21619	0	29116	0	37251	46,2	45782	30,3
6688	2,1	13519	0	21627	3,1	29156	0	37255	45,1	45794	26,8
6690	3,2	13522	0	21630	0	29223	0	37258	47	45801	24,3
6697	14,4	13547	0	21669	0	29290	0	37265	52,9	45817	0
6701	0	13611	0	21675	0	29339	0	37273	47,9	45857	0

6709	7,3	13634	2,3	21687	0	29369	0	37274	47,6	45867	0
6718	3,7	13641	0	21718	2,4	29374	2,5	37275	47,6	45885	8,3
6726	16,9	13644	4,5	21725	0	29384	0	37276	46,6	45906	23,4
6730	26,4	13651	0	21726	2,4	29389	0	37284	46,7	45909	31,5
6737	27,2	13653	2,2	21727	0	29404	0	37286	43,8	45913	35,2
6747	0	13654	0	21752	0	29413	0	37289	45,4	45921	35,8
6751	0	13656	2,5	21763	0	29430	0	37292	44,4	45934	16,9
6785	2,5	13657	0	21778	0	29439	2,3	37296	41,5	45942	0
6787	4,9	13661	2,4	21795	0	29450	0	37299	34,6	45944	0
6795	11,7	13663	0	21821	0	29459	2,2	37300	34,6	45951	10,1
6800	19,9	13664	2,2	21864	0	29462	0	37305	29,5	45969	16,2
6806	23,2	13665	0	21867	0	29472	0	37309	23,7	45973	17,5
6808	21,5	13671	3,1	21908	0	29490	2,3	37313	20,2	45975	19,3
6813	13,1	13672	4,8	21927	0	29495	2,5	37319	10	45988	33,3
6816	0	13676	15,9	21940	2,1	29498	0	37327	0	45997	32,9
6838	2,8	13682	13,5	21941	0	29501	2,1	37337	0	46007	30,6
6846	0	13687	0	21959	2,2	29525	13,2	37338	5,5	46017	27,5
6855	3,7	13697	6,5	21968	0	29534	10,4	37360	2,9	46024	24,9
6860	0	13698	8,2	21972	0	29547	15,7	37365	0	46028	23,9
6866	2,5	13704	11,6	21975	2,1	29548	16,2	37366	2,7	46033	21,8
6877	0	13712	14,9	21986	19,3	29553	16,1	37368	0	46038	18,5
6894	3,9	13717	15,7	22001	0	29561	16,1	37372	2,4	46050	30,1
6895	0	13722	0	22003	0	29570	23,5	37378	0	46051	28,5
6899	0	13724	0	22008	6,5	29577	22,8	37425	0	46064	29,7
6900	3,3	13745	0	22017	0	29582	16,6	37427	2,3	46076	23,6
6902	0	13752	0	22018	0	29585	15,7	37441	0	46084	0
6904	0	13761	0	22036	2,6	29598	24,7	37442	2,1	46156	7,2
6907	2,3	13771	0	22037	0	29600	24,3	37443	0	46176	34,2
6917	0	13781	0	22048	0	29615	23,5	37477	2,2	46181	31,3
6920	0	13784	0	22049	0	29635	21,4	37481	5,6	46186	32,9
6928	4,7	13798	2,7	22065	0	29638	24,8	37503	2,6	46195	38,5
6945	0	13799	0	22074	0	29647	39	37505	0	46203	41,4
6955	2,6	13800	0	22095	2,2	29658	33,8	37509	0	46210	49,6
6963	0	13812	3,5	22100	2,8	29668	34,5	37513	2,5	46211	39,6
6988	0	13824	7,6	22103	0	29680	29	37521	0	46215	46,3
7007	0	13829	8,7	22104	2,4	29689	0	37540	0	46219	41,5
7014	0	13857	3	22105	0	29736	4,7	37543	3	46229	20,7
7019	0	13871	2,2	22108	2,1	29744	15,9	37551	0	46235	6,7
7032	0	13872	0	22113	4,5	29749	15	37574	2,1	46239	0
7034	0	13875	2,6	22124	0	29763	31	37575	2,7	46241	0
7043	2,4	13876	0	22129	0	29766	30,2	37582	4,8	46278	0
7045	0	13877	2,3	22131	7,9	29771	30,2	37585	0	46283	3,1
7049	0	13881	0	22138	12,4	29782	28	37603	0	46292	21,8
7057	2,4	13889	0	22146	9,9	29788	26,1	37604	2,7	46301	37,6
7058	0	13944	0	22152	20,2	29790	27	37616	7,1	46309	42,5
7076	2,3	13950	4,2	22154	23,3	29799	25,2	37626	8,2	46318	31,9
7077	0	13955	0	22156	19,6	29816	0	37628	9,1	46332	3,2
7080	2,1	13960	6,7	22160	10,9	29843	5,1	37641	0	46333	0
7081	0	13964	0	22164	24,4	29861	21	37646	2,8	46343	17,2
7088	3,4	13970	3,9	22169	22,1	29873	32,4	37653	3,6	46356	36,4
7101	0	13979	6,9	22172	26,2	29880	32,8	37674	6,1	46360	38,7
7102	2,5	13984	0	22177	18,5	29888	32,6	37688	0	46370	28,6
7109	0	14002	4,7	22197	0	29890	33,9	37690	0	46379	0
7137	20	14009	0	22225	0	29899	32,7	37714	0	46400	0
7138	39	14018	0	22228	0	29909	35,7	37721	0	46434	5,4
7149	15,5	14021	6,6	22245	0	29916	32,7	37723	7,4	46448	38,1
7156	10,7	14029	10,5	22278	0	29934	0	37742	6,2	46455	42,7
7159	8,7	14036	15,9	22303	0	29940	2,8	37743	6,2	46462	42
7161	0	14038	20	22337	0	29947	20,6	37754	0	46471	42,2
7162	0	14040	20	22391	2,2	29961	25,5	37761	2,9	46478	41

7168	0	14045	17,5	22400	17,3	29974	31	37763	5,3	46491	0
7190	0	14051	23,4	22408	20,1	29985	25,2	37777	0	46497	0
7193	0	14060	27,2	22413	15,9	29997	0	37782	2,6	46500	4,2
7217	0	14063	27,9	22419	16	30000	0	37793	0	46515	33,5
7218	0	14066	25,2	22421	21,5	30011	5,5	37805	2,9	46524	40,8
7229	2,7	14071	23,2	22429	8,1	30018	19,4	37811	0	46534	20,7
7237	12,7	14076	24,5	22433	3,2	30031	27,9	37817	0	46542	12,4
7245	0	14080	25,9	22443	10,3	30033	28,1	37846	5,1	46544	0
7256	2,2	14083	24,1	22459	9,3	30045	18,5	37885	10	46554	7,5
7261	0	14087	20,7	22464	10,7	30064	26,2	37902	8,1	46566	38,9
7266	2,1	14092	20,6	22473	14,7	30073	0	37906	0	46570	40,3
7267	0	14097	22,1	22479	14,8	30128	0	37956	0	46578	33,8
7269	0	14101	20,2	22486	15,8	30155	2,2	37966	2,3	46579	33,9
7273	2,1	14111	21,1	22490	20,1	30162	13,6	37978	14,2	46580	34,8
7274	0	14115	25,6	22494	16,1	30176	32,5	37983	13,8	46592	19
7279	3,4	14124	21,5	22497	21,8	30183	34,6	37997	24,7	46605	0
7280	0	14131	18,5	22505	0	30184	31,8	38012	0	46616	0
7282	0	14134	20,9	22513	12,1	30185	26,9	38078	5	46619	4,4
7293	0	14137	23,3	22519	0	30186	21,1	38083	15,7	46621	0
7299	3,8	14138	22,2	22543	2,7	30205	34,7	38085	19,5	46634	0
7300	0	14145	25,1	22558	0	30214	39,8	38086	20,4	46651	0
7302	4,3	14149	26,5	22565	9,5	30222	41,8	38087	20,4	46658	0
7313	0	14153	0	22571	0	30231	42,8	38089	19,9	46681	2,1
7314	0	14157	0	22581	0	30232	42,7	38092	21,2	46685	0
7317	0	14158	8,6	22588	0	30242	26,5	38100	19	46708	0
7319	0	14160	0	22590	0	30245	22,9	38104	23,7	46716	0
7320	9,8	14169	0	22611	0	30252	0	38108	10,5	46735	0
7321	0	14194	0	22650	0	30266	7,6	38111	9	46761	0
7326	7	14218	0	22656	7,3	30280	34,8	38113	0	46942	0
7336	0	14219	0	22667	13,5	30283	37,5	38145	0	47122	0
7338	0	14287	0	22677	17	30289	42,9	38182	2,1	47134	4,5
7349	0	14331	0	22682	0	30298	42,1	38193	33,7	47136	7
7350	0	14335	0	22706	2,5	30306	37,5	38202	38,7	47141	21,8
7357	0	14342	0	22714	12,6	30309	26,2	38203	38,7	47148	0
7368	0	14348	0	22716	0	30317	0	38215	4,4	47170	0
7369	2,2	14350	0	22723	7,9	30323	8,4	38216	0	47181	4,5
7370	0	14352	0	22729	19,3	30336	13	38218	0	47187	15,7
7379	2,5	14353	0	22737	0	30342	18,7	38219	8	47197	22,4
7380	0	14365	0	22771	0	30350	32	38225	0	47200	23,2
7383	2,6	14399	0	22780	0	30359	16,6	38232	0	47210	29,9
7384	0	14435	0	22812	0	30363	0	38238	2,2	47213	33,7
7398	0	14440	0	22868	0	30364	0	38249	13	47217	36,3
7399	2,6	14486	0	22880	3,8	30384	0	38256	14,9	47223	23,7
7400	0	14489	0	22887	23,6	30385	3,7	38261	20,3	47241	25,7
7405	2,6	14495	0	22893	28,2	30394	26,8	38264	17,5	47247	27,2
7406	0	14508	0	22904	0	30401	36,1	38267	5	47258	33,5
7414	2,2	14522	0	22939	3,4	30408	35,5	38268	0	47260	36,2
7425	0	14550	0	22949	0	30419	34	38271	8,1	47269	29,3
7428	0	14572	0	22951	0	30434	0	38273	12,1	47275	23,1
7444	2,1	14579	0	22968	0	30465	0	38277	21,7	47285	39,2
7445	0	14594	0	22982	2,4	30476	2,6	38282	13,1	47295	20,8
7446	2,5	14642	0	22985	0	30487	6,9	38292	5,9	47298	17
7447	2,5	14669	0	22988	0	30490	7	38299	26,9	47301	13,9
7448	0	14693	0	23015	0	30501	7,8	38309	33	47303	14,5
7464	0	14725	0	23026	0	30511	22,2	38321	37,4	47307	28,7
7465	2,5	14787	0	23032	2,1	30523	23	38331	29,8	47308	31
7466	0	14799	0	23033	0	30535	27,8	38336	23,8	47312	34,1
7492	2,6	14809	0	23037	2,9	30543	18,5	38350	0	47321	0
7498	0	14818	0	23040	0	30556	2,3	38351	3,2	47347	0

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025661360

**Цифровая модель коммунальной машины с гибридной
трансмиссией с газовым двигателем**

Правообладатель: **Образцов Никита Артемович (RU)**

Автор(ы): **Образцов Никита Артемович (RU)**



Заявка № **2025619340**

Дата поступления **21 апреля 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **05 мая 2025 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В
АКТЫ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В УЧЕБНОМ И
ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССАХ



ООО «БОЛЬШЕГРУЗ»

Факт адрес: 197246 г. Санкт-Петербург, Московское шоссе дом 13ДБ

Юр адрес : 196246, г. Санкт-Петербург, вн.тер.г. муниципальный округ Звездное, ш. Московское, д. 13Д литера

А, помещ. 1Н, офис А.5

ИНН/КПП 781 098 05 44 / 781 001 001 ОГРН 123 780 006 94 51

ОКВЭД 46.69 ; 45.32 ; 45.31; 45.20 ; 45.11

Тел. +7 (812) 309-09-97 +7 921 945-0-888

www.bg78.ru info@bg78.ru

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы на тему «Метод оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах» аспиранта ФГБОУ ВО СПбГАСУ Образцова Никиты Артемовича

Полученные результаты научных исследований аспиранта ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» Образцова Н.А. используются в ООО «Большегруз» для прогнозной оценки целесообразности приобретения и содержания газомоторной и гибридной спец. техники. В диссертационном исследовании Образцова Н.А. приведен раздел о программах субсидирования при покупке газомоторной техники, используемый в производственной деятельности ООО «Большегруз». Также, научные труды Образцова Н.А. в области газомоторной техники написаны, опираясь на совместный производственный опыт с ООО «Большегруз».

Приведенные в научных трудах Образцова Н.А. расчеты об экологической и экономической эффективности применения КПГ и СПГ на транспортных средствах являются обоснованными и проверенными на практике. Финансовые затраты на топливо при эксплуатации транспортных средств на СПГ могут быть ниже в 1,56 раза, а при эксплуатации транспортных средств на КПГ ниже в 2,62 раза, по сравнению с транспортными средствами на ДТ, при одинаковой производительности соответствующих машин.

Генеральный директор

м. п. «23» мая 2025 г.



Филь А. Л.



Акционерное Общество «Автопарк № 1 «Спецтранс»
ИНН 7830002705 / КПП 781001001
Люботинский пр.7, Санкт-Петербург, 196105
e-mail: remont@spest1.ru www.spest1.ru

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы на тему «Метод оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах» аспиранта ФГБОУ ВО СПбГАСУ Образцова Никиты Артемовича

Полученные результаты научных исследований аспиранта ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» Образцова Н.А. используются для планирования модернизации автопарка коммунальных машин (1 колонна ресурсе АТЭ), состоящих из бункерных мусоровозов с задней погрузкой, осуществляющих вывоз твердых коммунальных отходов из центральной и южной частей г. Санкт-Петербурга.

Была проведена совместная работа Общества и соискателя с использованием данных ежедневного мониторинга автопарка АО «Автопарк № 1 «Спецтранс» с помощью программы «Скаут Онлайн». По результатам анализа данных мониторинга и личной работы Образцова Н.А. на производстве внедрен «Метод оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах», описывающий концепцию переоборудования существующего автопарка на гибридную трансмиссию с газовым двигателем. Дана общая оценка, на основании внедренного метода (с помощью коэффициента гибридизации), характеризующая целесообразность переоборудования эксплуатируемых машин на исследованных 12-ти маршрутах. Оценено необходимое количество трудовых и финансовых затрат для переоборудования. Экологический эффект показывает сокращение вредных выбросов на 31 тонну в год. Экономический эффект от переоборудования одной коммунальной машины на гибридную трансмиссию с газовым двигателем составляет 893 тысячи рублей в год экономии на топливных затратах. Рассчитан срок окупаемости переоборудования, составляющий 6,09 лет, с учетом капитальных и операционных затрат.

Зам. директора по производству
АО «Автопарк №1 «Спецтранс»



Усов В.И.
«12» мая 2025 г.



ООО «Грин-Трак Спб»
ИНН 7810939144 / КПП 781001001
196006, г. Санкт-Петербург, пр-кт Люботинский, д.7, лит. А, пом.44
e-mail: info@greentruck.org <https://greentruck.org/>

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы на тему «Метод оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах» аспиранта ФГБОУ ВО СПбГАСУ Образцова Никиты Артемовича

Полученные результаты научных исследований аспиранта ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» Образцова Н.А. используются для модернизации ремонтных мастерских с целью подготовки технического и кадрового оснащения для переоборудования на гибридную трансмиссию с газовым двигателем коммунальных машин для вывоза ТКО и их последующего обслуживания.

В результате внедрения на производстве «Метода оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах» предложено техническое решение для модернизации эксплуатируемых коммунальных машин. Получена необходимая информация по используемым для переоборудования моделям узлов и агрегатов. Метод содержит рекомендации по выбору типа гибридной трансмиссии, по компоновке узлов и агрегатов и содержит соответствующие математические и физические расчеты. Посчитаны теоретические значения показателей рекуперации энергии торможения переоборудованных машин. Показатели рекуперации для предлагаемых к переоборудованию машин на 12-ти маршрутах находятся в диапазоне от 17,67 % до 21,53 %. Операционные затраты на обслуживание переоборудованной машины меньше в 2,77 раза по сравнению с базовой машиной, за счет существенной экономии на топливе.

Директор по производству
ООО «Грин-Трак Спб»



Воробьев С. А.
«12» мая 2025 г.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)

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

09.09.2025 № 08.22/25/25

[Акт внедрения материалов диссертации
в учебный процесс]



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Метод оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах» Образцова Никиты Артемовича, в учебный процесс Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

Комиссия в составе

Председателя:

кандидата технических наук, доцента Зазыкина А.В. – декана автомобильно-дорожного факультета.

Членов комиссии:

доктора технических наук, профессора Евтюкова С.С. – заведующего кафедрой транспортных систем и дорожно-мостового строительства;

доктора технических наук, доцента Куракиной Е.В. – заведующего кафедрой наземных транспортно-технологических машин;

кандидата технических наук, доцента Черняева И.О. – заведующего кафедрой технической эксплуатации транспортных средств.

Настоящим подтверждает внедрение материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Метод оценки применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах» Образцова Никиты Артемовича (научный руководитель: доктор технических наук, доцент Грушецкий Станислав Михайлович), в учебный процесс выпускающей кафедры наземных транспортно-технологических машин автомобильно-дорожного факультета в рабочие программы дисциплин Б1.В.10 «Программные системы инженерного анализа» и Б1.О.36 «Моделирование сложных процессов» по направлению подготовки 15.03.03 «Прикладная механика» (направленность «Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг») и специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства (специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование»).

Внедрение результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук обсуждено на заседании учебно-методической комиссии автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета 09 сентября 2025 года (протокол № 1).

Основные положения диссертационного исследования, позволяющие развивать научно-методические подходы в области оценки возможности применения гибридного силового блока с газовым двигателем на коммунальных машинах; математического и компьютерного моделирования движения коммунальной машины, оснащенной гибридным силовым блоком с газовым двигателем с учетом изменяющихся во времени параметров машины для подготовки специалистов в области дорожно-строительных машин, обладающих различными компетенциями как исполнителя, так и руководителя, изложены в следующих печатных трудах:

1. Образцов Н. А. Предпосылки, реальность и перспективы СПГ / Н. А. Образцов // Грузовик. – 2022. – № 3. – С. 44-46.
2. 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.
3. Образцов Н. А. Выбор базовой машины для газового двигателя RGK.EC.820.959-340 / Н. А. Образцов // Грузовик. – 2023. – № 7. – С. 3-5.
4. Образцов Н. А. Цифровая модель гибридной трансмиссии с газовым двигателем на коммунальных машинах / Н. А. Образцов // Сборник статей IX Международной научно-практической конференции, Омск, 24–25 апреля 2025 года. С. 744-751.
5. 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.

Председатель комиссии:
Декан АДФ, к.т.н., доцент

Зазыкин А.В.

Члены комиссии:
Заведующий кафедрой ТСидМС,
д.т.н., профессор

Евтюков С.С.

Заведующий кафедрой НТТМ,
д.т.н., доцент

Куракина Е.В.

Заведующий кафедрой ТЭТС,
к.т.н., доцент

Черняев И.О.