

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра Проектирование и эксплуатация автомобилей
(наименование)

13.04.03 Энергетическое машиностроение
(код и наименование направления подготовки)

Энергетические комплексы и системы управления
(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Перспективы применения гибридных силовых установок в современных
транспортных средствах

Обучающийся Н.С. Дьяченко
(Инициалы Фамилия) (личная подпись)

Научный к. т. н, доцент, А.В. Бобровский
руководитель (ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

1	Развитие автомобильного транспорта в России	6
1.1	Развитие автомобильного транспортного сектора России в контексте мировых тенденций	6
1.2	Легковые автотранспортные средства с гибридными силовыми установками	8
1.3	Перспективы развития электротранспорта	11
1.4	Перспективы развития легковых электромобилей REEV с увеличенным запасом хода	15
1.5	Концепция Range Extender	17
2	Определение основных параметров Range Extender	30
2.1	Расчет тепловых параметров силового агрегата.....	30
2.2	Расчет радиатора системы охлаждения двигателя	38
2.3	Расчет поликлинового ременного привода	40
3	Испытание гибридной силовой установки Range Extender	45
3.1	Общие сведения	45
3.2	Объект испытаний и цель работы	46
3.3	Условия и порядок проведения испытаний	47
3.4	Организация испытательного комплекса и методология тестирования	47
3.5	Метрологическое обеспечение	52
3.6	Анализ результатов испытаний	52
3.7	Испытание силового агрегата на соответствие требованиям STAGE....	60
	Заключение	69
	Список используемой литературы и используемых источников.....	70

Введение

Современная автомобильная отрасль проходит масштабные изменения, связанные с переходом к более экологически чистым технологиям. Вместо традиционных двигателей внутреннего сгорания, работающих на углеводородном топливе, всё большую популярность приобретают электромобили, которые используют аккумуляторные батареи в качестве основного источника энергии.

Практически все ведущие автоконцерны Европы уже заявили о намерении полностью отказаться от ДВС в ближайшие годы и перейти на электрический привод. Российские производители, такие как ВАЗ, КАМАЗ и ГАЗ, также начали выпускать электрические версии своих моделей. Кроме того, на рынке появляются новые стартапы (например, ZETTA, CML), которые разрабатывают конкурентоспособные электромобили, чтобы соответствовать ужесточающимся экологическим стандартам и нормам по сокращению выбросов CO₂.

Тем не менее, широкое использование электромобилей в России пока ограничено рядом факторов:

- слабо развитая сеть зарядных станций;
- повышенные энергозатраты зимой на обогрев и другие системы;
- необходимость значительного запаса хода без подзарядки из-за больших расстояний между населёнными пунктами.

По всем указанным направлениям ведутся научные исследования и проектные работы. Например, во всех крупных городах Российской Федерации уже введены в эксплуатацию зарядные станции, обеспечивающие подзарядку городских электромобилей, находящихся в частном владении. Несмотря на недостаточность их количества для стремительно возрастающей численности электромобильного транспорта, такая тенденция подтверждает оптимистические прогнозы на ближайшую перспективу и позволяет

потребителям рассматривать электромобили как реальную альтернативу автомобильному транспорту.

Тем не менее, даже появляющиеся в крупных городах России зарядные станции никак не решают проблему междугородних перевозок. В настоящее время, как и в ближайшей перспективе, даже центральную часть России нереально обеспечить достаточным числом зарядных станций.

Таким образом, особенно учитывая географическое расположение нашей страны и поистине огромные протяженности автомобильных трасс, огромный интерес вызывает возможность использования уже традиционного двигателя внутреннего сгорания в роли вспомогательного источника энергии в составе гибридной силовой установки для транспортного средства на электрической тяге.

В качестве объекта данного исследования рассматривается гибридная силовая установка современного транспортного средства, а предметом — применение ДВС как дополнительного источника питания для тягового электродвигателя.

Цель исследования заключается в создании элементов концепции гибридной силовой установки для современных автомобилей, где двигатель внутреннего сгорания выполняет функцию дополнительного источника энергии на борту транспортного средства.

Для достижения этой цели ставятся следующие задачи:

- выполнить аналитический обзор существующих мировых решений в данной области;
- провести предварительные расчеты целевых параметров Range Extender;
- разработать программу и методику испытаний гибридной силовой установки и провести её испытания.

В работе выдвигается гипотеза о том, что использование двигателя внутреннего сгорания в качестве вспомогательного источника энергии

позволит существенно увеличить запас хода автомобиля между подзарядками аккумуляторов.

Исследование носит экспериментальный характер, автор принял в нём личное участие — начиная с анализа существующих решений, проведения расчётов целевых параметров и заканчивая организацией и выполнением экспериментальных испытаний, а также обработкой полученных результатов.

Апробация и результаты: по результатам работы опубликована одна научно-техническая статья в издании журнала «Вестник науки» 8 июня 2025 года № 6 (87) Том 2 «Анализ перспектив развития электрических транспортных средств в России» (Дьяченко Н.С.) стр. 2306-2312.

На защиту выносятся: разработанные элементы концепции гибридной силовой установки для современных транспортных средств с использованием двигателя внутреннего сгорания в качестве дополнительного источника энергии.

Структура магистерской диссертации: Магистерская диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения с основными результатами и выводами по работе, содержит 59 рисунков, 10 таблиц, список используемых источников (36). Основной текст работы изложен на 74 страницах.

1 Развитие автомобильного транспорта в России

1.1 Развитие автомобильного транспортного сектора России в контексте мировых тенденций

В настоящее время мировой рынок транспортных средств развивается по трем основным направлениям:

- внедрение инновационных силовых установок, например, таких как двигатели внутреннего сгорания с дополнительным введением различных присадок;
- активное использование альтернативных видов топлива, например, таких как сжатый природный газ;
- «использование в системе управления транспортными средствами сетевых коммуникационных технологий, что значительно увеличивает их автономность» [25].

«После 2020 года, в связи с кризисом в топливной отрасли, серьезно изменились экономические требования к силовым агрегатам транспортных средств» [23]:

- «тренд 1: сокращение потребления углеводородного топлива за счёт электрификации двигателей и ускоренного внедрения полностью электрических транспортных средств» [28];
- «тренд 2: снижение выбросов вредных веществ и парниковых газов благодаря переходу на возобновляемые и альтернативные виды топлива, включая «зелёный» водород, биометан, электрометан, биодизель и другие» [23];
- «тренд 3: повышение эффективности транспортных систем и одновременное снижение рисков для человека за счёт внедрения беспилотных технологий, искусственного интеллекта и других передовых подходов» [23].

«Одной из наиболее значимых задач, стоящих перед экономикой России и всего мира, является переход к новому уровню мобильности, предполагающему качественную перевозку пассажиров и грузов с высокой эффективностью и минимальным ущербом для окружающей среды» [4].

«28 апреля 2018 года распоряжением Правительства Российской Федерации № 831-р была утверждена «Стратегия развития автомобильного сектора страны до 2025 года» (СА-25). Среди целей этой стратегии — создание и выведение на рынок транспортных средств с принципиально новыми характеристиками, включая электрические автомобили, автономные системы управления, подключённые транспортные средства, а также автомобили на газовом топливе. Кроме того, предусмотрено формирование спроса на такие решения, организация сервисного обслуживания и развитие соответствующей инженерной и транспортной инфраструктуры» [12].

В выше указанной «стратегии» особо подчеркнута приоритетная задача для Российской Федерации: активное использование природного газа в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания с целью повышения экологичности автомобильного транспорта. «В частности, для активного стимулирования этого направления Правительство Российской Федерации предусмотрело меры поддержки развития инфраструктуры для применения в качестве топлива сжиженного природного газа на федеральных автотрассах» (Постановление Правительства РФ от 29 августа 2020 года №1308).

«Программа СА-25 соответствует общемировым тенденциям автомобильной отрасли, однако, современные условия Российского рынка требуют, чтобы исследования и разработки всё активнее двигались в сторону увеличения степени электрификации транспортных средств и ускоренного внедрения возобновляемых альтернативных топлив, таких как биометан и биодизель» [4].

1.2 Легковые автотранспортные средства с гибридными силовыми установками

В крупных городах автотранспорт остаётся основным источником загрязнения воздуха: по разным данным, его доля в структуре вредных выбросов может достигать 65–95%. При этом примерно 65% всех выбросов углекислого газа в транспортной сфере приходится именно на легковые автомобили. Это подчёркивает необходимость увеличения числа электромобилей как одного из способов сокращения уровня загрязнения.

Активное распространение электрического транспорта может заметно повлиять на спрос в отношении топлив, основанных на нефтепродуктах, таких как бензин и дизельное топливо. Это связано с тем, что 2/3 всей добываемой нефти перерабатывается в топливо, на котором работает более 95% всех транспортных средств.

«Среди легковых электромобилей с высокой степенью электрификации можно выделить:

- полностью электрические машины (Battery Electric Vehicle, BEV);
- электромобили с увеличенным запасом хода (REEV), где дополнительную энергию может обеспечивать либо топливный элемент (FC-REEV), либо двигатель внутреннего сгорания (IC-REEV)» [26].

«При оценке перспектив развития полностью электрических автомобилей (BEV) на российском рынке стоит учитывать существующие барьеры, как со стороны производителей, так и со стороны потенциальных покупателей» [26].

«Современные BEV уже сегодня способны обеспечивать расход энергии на уровне 25–50 кВт·ч на 100 миль пробега по комбинированному циклу (город + трасса). Для недорогих моделей, продаваемых в США и Европе, запас хода в среднем составляет около 250 км на одной зарядке, а время полной подзарядки может достигать 7–8 часов» [25].

Следует обратить внимание, что развитие электрического транспорта, не использующего нефтепродукты в качестве топлива, сдерживается рядом факторов, которые активно изучаются ведущими исследовательскими центрами, университетами и отраслевыми институтами. Среди таких факторов:

- необходимость достижения удельной ёмкости аккумуляторов на уровне 500 Вт·ч/кг (тогда как сегодня коммерческие решения обеспечивают только 300–350 Вт·ч/кг);

- «снижение себестоимости производства аккумуляторов (по прогнозам, в 2025 году она может составить около 87 долларов США за кВт·ч)» [34].

«Если говорить о потребительских привычках европейцев, то исследования показывают, что:

- более 60% предпочитают перемещаться на автомобилях на дальние расстояния (свыше 350 км);

- среднее ежедневное расстояние поездок колеблется от 40 км (Великобритания) до 80 км (Польша);

- только 35% домохозяйств имеют больше одного автомобиля для всех нужд» [35].

«Кроме того, в России развитию полностью электрического транспорта препятствуют следующие факторы:

- высокая цена электромобилей на фоне невысоких доходов населения;

- недостаточное количество зарядных станций;

- сложные климатические условия (особенно зимой), которые уменьшают запас хода;

- большие расстояния между городами и населёнными пунктами» [31].

Таким образом, представленный анализ достоинств и недостатков электротранспортных средств имеет исключительно важное значение при принятии обоснования развития транспортной сферы на территории Российской Федерации.

На рисунке 1 систематизированы результаты анализа электротранспортных средств.

Параметр	BEV	FC-REEV	IC-REEV
Первоначальная стоимость/стоимость приобретения	+-	--	++
Стоимость эксплуатации	++	--	+-
Дальность поездки на одной заправке/зарядке	--	+-	++
Инфраструктура заправок/зарядок	+-	--	++
Эксплуатация в условиях низких температур	--	+-	++
Выбросы токсичных веществ	++	++	+-
Выбросы парниковых газов	+-	++	--
Развитость отечественных технологий	--	--	+-

Рисунок 1 - Результаты анализа электротранспортных средств

«Электромобили с топливными элементами (FC-REEV) пока имеют значительные ограничения, в том числе высокие затраты на строительство водородных заправок и дорогую эксплуатацию. Например, к 2020 году в мире насчитывалось всего 440 водородных заправок, что резко ограничивает применение таких автомобилей. При этом стоимость водорода высокой степени очистки в США колеблется от 13 до 16 долларов за килограмм, а цена самих топливных элементов для серийных электромобилей может достигать до 210 долларов за кВт, хотя при росте производства она потенциально может снизиться до 30 долларов за кВт» [21].

В России цена на водород, в отличие от продуктов нефтепереработки, не намного ниже, чем в Соединенных штатах, а, следовательно, и ограничения на использование топливных элементов те же.

«Проведённый анализ позволяет сделать вывод, что в ближайшие 20–30 лет для России наиболее перспективным направлением является использование гибридных электромобилей с удлинителем пробега на базе двигателя внутреннего сгорания (IC-REEV)» [31].

«При этом следует учитывать, что оптимальный запас хода для всех типов электромобилей составляет примерно 300 км, что должно обеспечиваться либо за счёт гибридных силовых установок, либо исключительно за счёт тяговых аккумуляторов. В условиях низких температур полностью электрические BEV будут проигрывать по запасу хода гибридным вариантам REEV» [22].

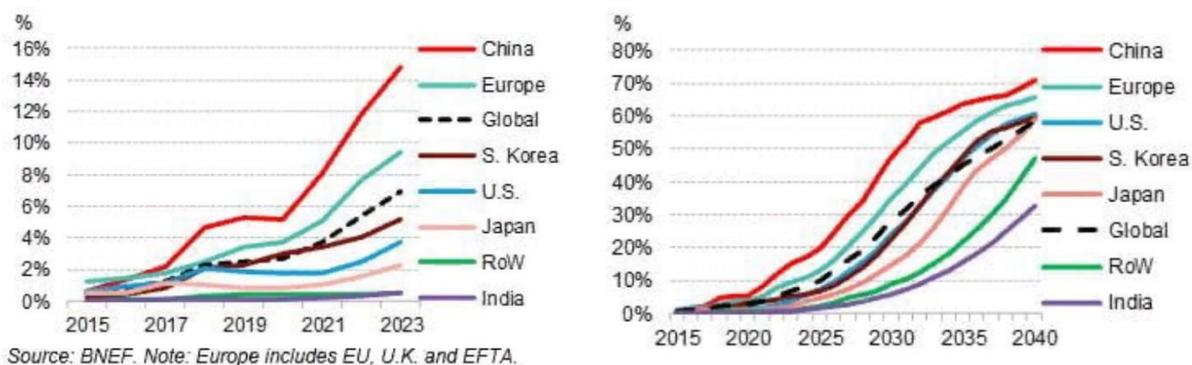
1.3 Перспективы развития электротранспорта

«Прогнозы по развитию мирового рынка электротранспорта в долгосрочной перспективе остаются положительными, даже несмотря на последствия пандемии COVID-19. Это объясняется тем, что ключевые инвестиции в проектирование, создание новых технологий и запуск производств уже были осуществлены компаниями. При этом временная задержка выпуска отдельных моделей электромобилей в краткосрочной перспективе вряд ли сильно повлияет на общие тенденции развития отрасли» [33].

«По оценкам экспертов, к концу 2025 году продажи электромобилей могут достичь примерно 10% от всех мировых продаж легковых автомобилей, к 2030 году — уже 28%, а к 2040 году — порядка 58%» [33, 35].

«Начиная с 2017 года, лидирующие позиции по производству электромобилей занимает Китай, за ним следуют Европейский союз и США (рисунок 2)» [35].

Россия на текущий момент отстает по этим показателям, однако динамика и производства, и продаж на отечественном рынке положительная.



а)

б)

Рисунок 2 – Краткосрочный а) и долгосрочный б) прогноз выпуска электромобилей в мире [35]

«По прогнозам, к середине 2020-х годов цены на новые электромобили и автомобили с традиционными двигателями внутреннего сгорания (ДВС) могут сравняться. Однако в зависимости от экономических и политических условий сроки этого процесса будут отличаться по странам. Так, например, в Японии паритет может наступить лишь к 2030 году. Наиболее быстрое вытеснение ДВС прогнозируется в сегменте грузового и лёгкого коммерческого транспорта» [35].

«В ближайшие десять лет рынки Китая и Европы обеспечат около 70% всех мировых продаж электромобилей за счет действующей специальной кредитной программы (Китай) и жестких мер и ограничений на выбросы углекислого газа (Европа)» [33].

«Также в этих регионах реализуются программы по ограничению использования традиционного транспорта в городах. В таких мегаполисах, как Лондон, Париж и Сеул, развиваются концепции Car-free, предполагающие частичный или полный запрет въезда автомобилей с ДВС в центр города с акцентом на общественный и электротранспорт» [5].

«Стоит отметить, что пик продаж легковых автомобилей с ДВС пришёлся на 2017 год. После этого их продажи сокращаются, хотя общее количество автомобилей будет продолжать расти приблизительно до 2030 года. По оценкам специалистов, к 2040 году электромобили будут составлять

более 30% мирового автопарка, причём в Китае и Европе их доля может превысить 50%» [32].

«На рисунке 3 представлена динамика изменения доли продаж транспортных средств с различными силовыми установками» [33].

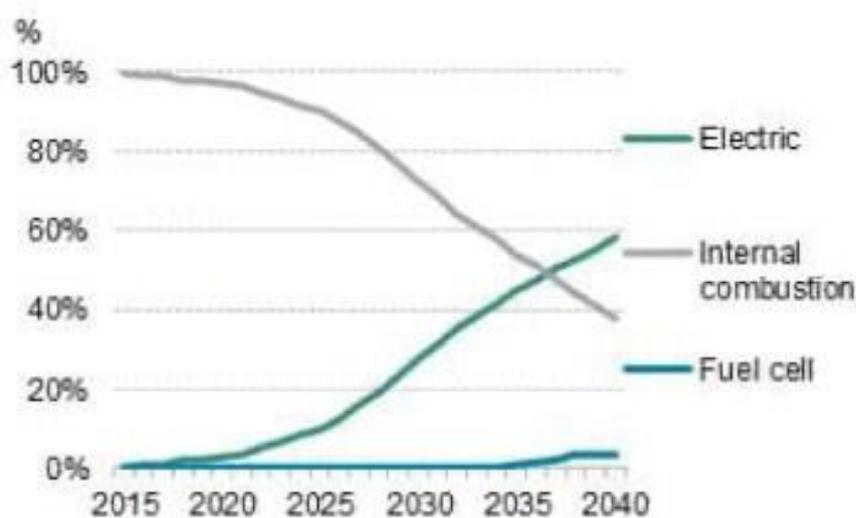


Рисунок 3 – Динамика изменения долей автомобилей с ДВС, электромобилей и машин на топливных элементах [33].

«Таким образом, можно сделать вывод, что рынок электромобилей будет постоянно расширяться и уже в течение следующего десятилетия может по объёмам сравняться с рынком традиционных автомобилей» [33].

По статистике за девять месяцев 2019 года в стране было продано всего 2646 электромобилей, при этом только 261 из них — новые, а остальные были с пробегом. Низкие объёмы продаж объясняются высокой ценой электромобилей и ограниченными производственными возможностями, поскольку большая часть выпускаемых электромобилей направляется на рынки Японии, США и Европы. На данный момент доля электромобилей в общем парке автомобилей в РФ составляет лишь около 0,01%.

На рисунке 4 представлены статистические данные по продажам электротранспортных средств на территории Российской Федерации. Рост продаж электромобилей обусловлен развитием инфраструктуры, причем

увеличение количества зарядных станций для электротранспортных средств обеспечивается дорожной картой ПАО «Россети».

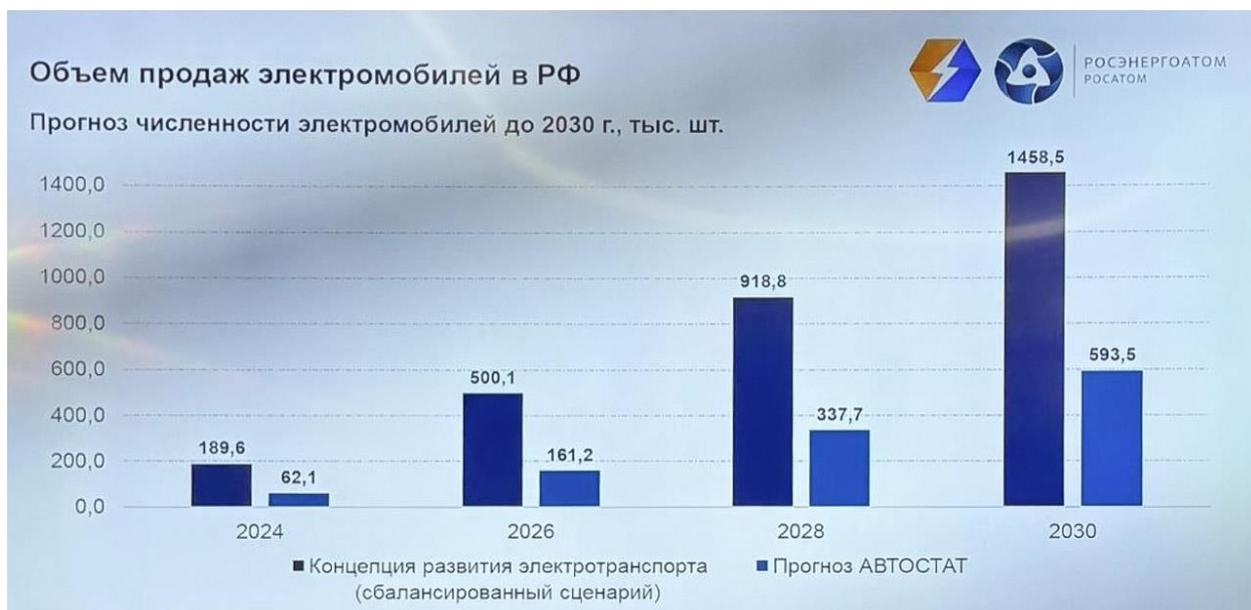


Рисунок 4 – Продажи электромобилей в РФ [13]

Эксперты считают, что существенный рост продаж возможен при условии снижения стоимости электромобилей и увеличения их запаса хода. Если цена опустится ниже 1 миллиона рублей, а запас хода вырастет до 500 км и более, можно ожидать резкий рост продаж вплоть до 10% всего автомобильного рынка. Этот тренд уже просматривается в странах Европейского союза. При выполнении этих условий специалисты прогнозируют ежегодное увеличение продаж электромобилей в России на уровне 30–60 тысяч единиц.

Альтернативным решением улучшения экологии в крупных городах и мегаполисах может стать лишь отказ от автомобильного транспорта. И во многих европейских странах идут и на такие крайние меры. В качестве примера можно привести такие города как Осло, Лондон, Париж, Мадрид.

«17 января 2017 года из-за высокого уровня загрязнения воздуха городской совет Осло частично запретил использовать дизельные автомобили, за исключением грузовых машин, такси, полицейских и других служб города.

Шесть основных улиц города оставались доступными для всех видов транспорта, но даже с учетом исключений трафик снизился на 30%, а уровень загрязнения воздуха снизился на 25%. В Мадриде с ноября 2018 года запрещен въезд в центр города для нерезидентов. Копенгаген размечал пешеходные зоны еще с 1960 года, а сейчас велосипедами в качестве основного ежедневного транспорта пользуются больше половины горожан. На текущий момент в Копенгагене более 320 километров велодорожек и самый низкий процент владения автомобилями в Европе. В 2014 году Париж в качестве эксперимента на один день запретил движение машин с четными номерами, как результат — загрязнение воздуха снизилось на 30%. С тех пор город старается полностью убрать автомобили с центральных улиц» [5].

Такая тенденция характерна для всех крупных городов всех континентов. Даже в России за последнее десятилетие количество велосипедных дорожек существенно возросло.

Тем не менее, мало кто из наших современников готов преодолевать существенные расстояния исключительно на мускульной тяге. Велосипедисты, не смотря на активную пропаганду здорового образа жизни, не стали привычным явлением на улицах российских городов. Комфорт и скорость передвижения остаются преобладающими факторами при выборе транспортного средства простыми людьми. Для грузового же транспорта такие решения не применимы в принципе.

1.4 Перспективы развития легковых электромобилей REEV с увеличенным запасом хода

Учитывая российские реалии — стоимость топлива, климатические условия и особенности эксплуатации — наиболее рациональным решением для электрического легкового транспорта считается модель IC-REEV, которая предполагает генерацию электричества за счет ДВС, работающего в статическом режиме с использованием в качестве топлива нефтепродуктов.

Это позволяет не устанавливать на такие транспортные средства тяжелые емкости для хранения газообразных топлив, а использовать классический топливный бак.

Статистика доказывает, что системы хранения газа под высоким давлением снижают удобства эксплуатации. В большинстве случаев потребители выбирают сжиженный углеводородный газ (СУГ) вместо сжатого.

По статистическим данным эксплуатации электромобилей, максимальный пробег IC-REEV на одном заряде составляет примерно 300 км. Это меньше, чем у традиционных автомобилей, которые могут проезжать до 450–500 км без дозаправки, что создаёт определённые неудобства для пользователей при поездках на большие расстояния. Водителям таких электромобилей приходится чаще останавливаться для подзарядки или заправки.

Кроме того, из-за ограниченной мощности силовой установки движение на высокой скорости в течение длительного времени затруднено, и машина может поддерживать лишь средний городской темп.

Для устранения подобных ограничений предлагается инновационный вариант — использование прицепа REEV [30], который отвечает принципам «новой мобильности».

Существует несколько подходов к увеличению дальности хода «электромобилей с использованием прицепа REEV:

- установка в прицепе генератора, работающего либо на базе ДВС либо на топливном элементе;
- использование более мощной аккумуляторной батареи за счет увеличенного количества секций» [29, 36].

1.5 Концепция Range Extender

В настоящее время большинство крупных европейских автоконцернов заявляют о планах полностью перейти с традиционных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на электродвигатели с аккумуляторным питанием. «Российские компании — такие как ВАЗ, КАМАЗ и ГАЗ — также начали внедрять электрические версии своих автомобилей. Помимо известных брендов, на рынок выходят и стартапы, например ZETTA и CML, которые разрабатывают конкурентоспособные решения для устойчивой мобильности в условиях ужесточения экологических требований и борьбы с углеродными выбросами» [34].

Тем не менее, в России полный переход на электрический транспорт сталкивается с рядом серьёзных ограничений, среди которых основными следует считать недостаточно развитую инфраструктуру и географические условия России.

Наиболее перспективными решениями принято считать использование гибридных силовых установок в составе двигателя внутреннего сгорания и тягового электродвигателя. При этом возможно использование этих агрегатов как в параллельном режиме (попеременное подключение к оси ведущих колес любого из этих силовых агрегатов), так и в последовательном (к оси ведущих колес подключен только тяговый электропривод, а двигатель внутреннего сгорания используется для генерации электроэнергии на борту транспортного средства).

Первый вариант давно реализован на практике. Среди примеров — Toyota Prius и RAV4, Hyundai Ioniq, Mitsubishi Outlander PHEV, Lexus RX450h. В ближайших планах такие проекты заявлены у Ford (Transit), Mercedes-Benz (eSprinter) и УАЗа (Профи-гибрид).

На рисунках 5 и 6 показаны примерные схемы таких гибридных автомобилей.

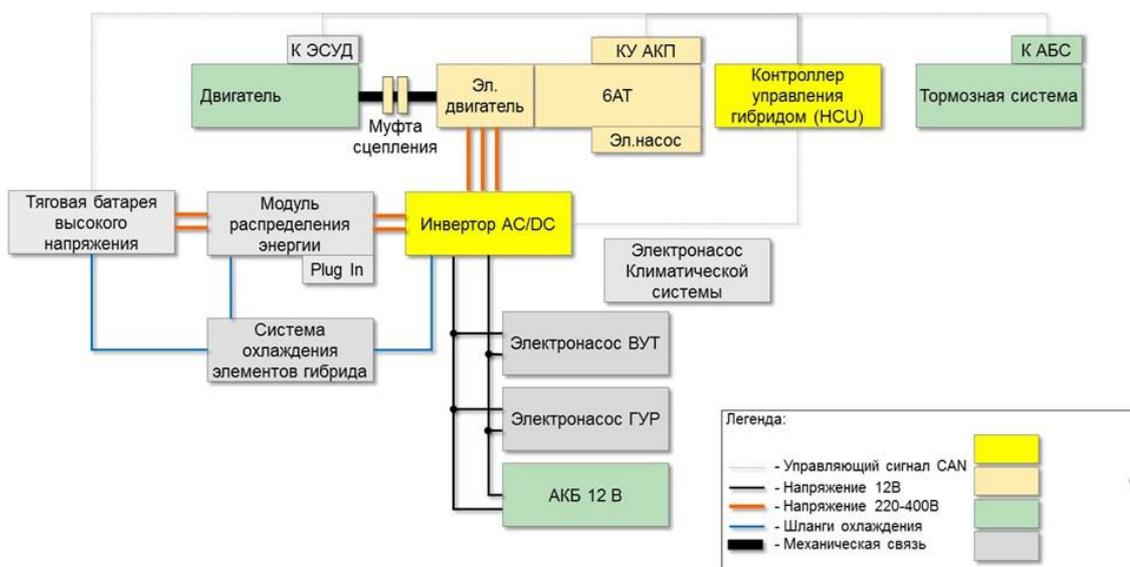


Рисунок 5 – «Схема ключевых компонентов гибридной силовой установки» [24]

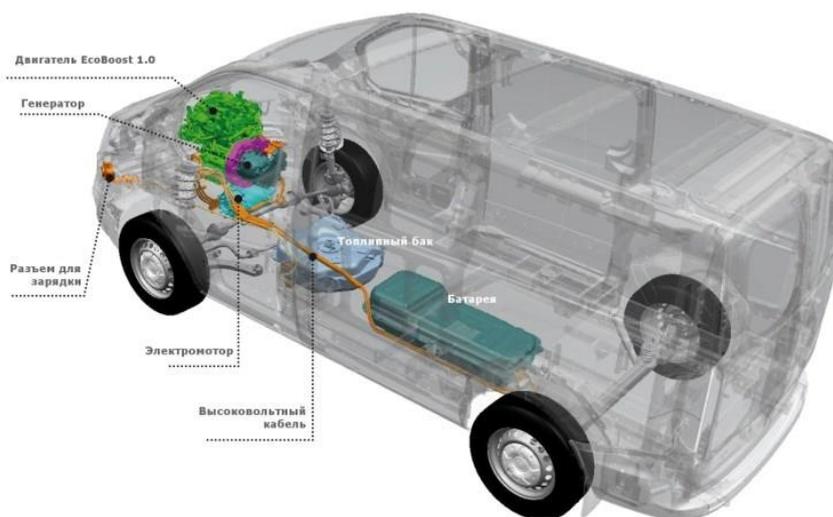


Рисунок 6 – «Возможная компоновка Ford Transit» [24]

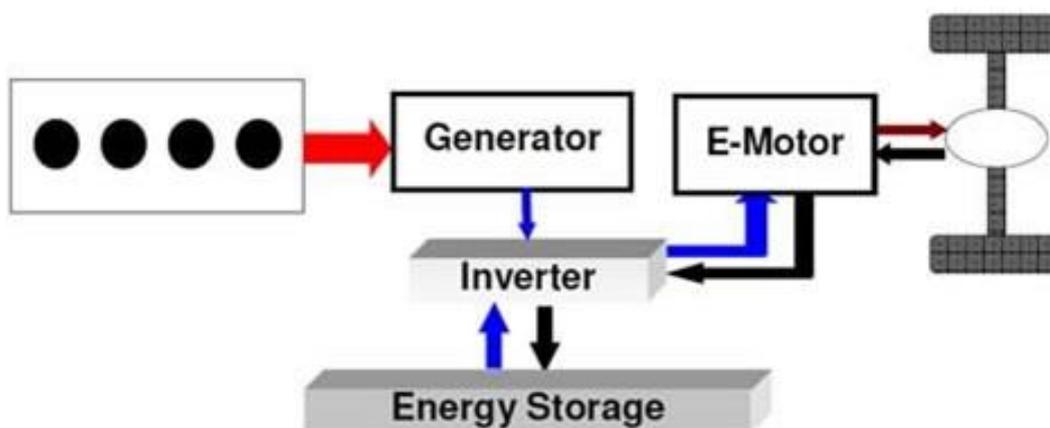
Гибридная или, как ее еще часто называют, комбинированная силовая установка параллельного типа (первый вариант) при всех своих

преимуществах (сниженный расход топлива, повышенный пробег и улучшенные экологические показатели транспортного средства), тем не менее имеет ряд недостатков:

- значительно увеличенную массу транспортного средства и, как следствие снижение его грузоподъемности и проходимости, что особенно критично в условиях Российского бездорожья;
- повышенные капитальные и текущие затраты.

Гибридная силовая установка последовательного типа (второй вариант) способна частично устранить перечисленные недостатки, сохраняя преимущества гибридной технологии.

Суть концепции Range Extender (удлинителя пробега) заключается в установке компактного генератора на электромобиль. Таким образом автомобиль превращается в последовательный гибрид с простейшей архитектурой. «Принципиальная схема Range Extender показана на рисунке 7» [35].



Range-Extended Electric Vehicle

Рисунок 7 – «Принципиальная схема системы Range Extender» [35]

На практике встречаются разные варианты реализации этой концепции. В одних системах энергия от Range Extender идёт на зарядку аккумуляторов, в

других — сразу поступает на питание тягового электродвигателя. Каждый вариант имеет свои достоинства и недостатки. «На рисунке 8 приведены примеры существующих электротранспортных средств, реализующих концепцию Range Extender» [35].

 <p style="text-align: center;">Hummer H3</p>	<p>Электромотор: 200 кВт Аккумулятор: 41 кВтч Пробег на батареях: 40 миль (64 км) Мощность удлинителя пробега (Range Extender): 100 кВт Совокупный пробег: 300 миль (480 км)</p>
 <p style="text-align: center;">Fiat 500</p>	<p>Электромотор: 75 кВт Аккумулятор: 12 кВтч Пробег на батареях: 60 миль (96 км) Мощность удлинителя пробега (Range Extender): 20 кВт Совокупный пробег: 200 миль (320 км)</p>
 <p style="text-align: center;">Dodge Caliber</p>	<p>Электромотор: 125 кВт Аккумулятор: 21 кВтч Пробег на батареях: 40 миль (64 км) Мощность удлинителя пробега (Range Extender): 75 кВт Совокупный пробег: 300 миль (480 км)</p>

Рисунок 8 – «Примеры прототипов электромобилей, в которых применяются Range Extender» [35]

Если использовать ДВС только для генерации энергии, то двигатель можно сделать относительно небольшим и маломощным, что благоприятно скажется на массе автомобиля и его компоновке.

Такой мотор будет работать в одном стабильном режиме, без пиковых нагрузок, что даёт возможность оптимально его настроить и отказаться от

дорогих элементов систем управления, подавления вибраций и детонации, а также сложных алгоритмов работы системы топливоподачи. Такая система может легко устанавливаться в качестве дополнительной опции на уже серийно выпускаемые электротранспортные средства.

Кроме того, такая система может являться и заводской комплектацией электротранспортного средства, что уже реализовано рядом автоконцернов, например BMW и AUDI (рисунок 9, 10, 11).

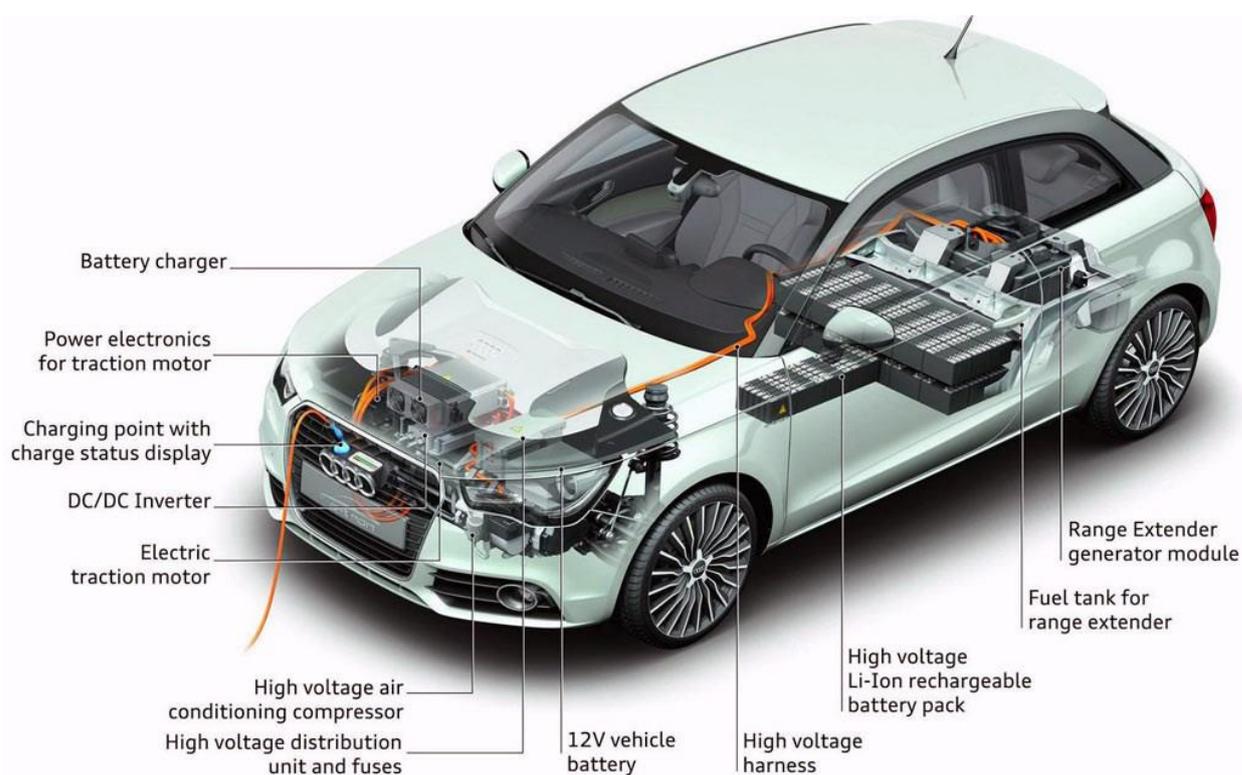


Рисунок 9 – «Схема компоновки автомобиля AUDIA1 e-tron» [10]

Мощность тяговой аккумуляторной батареи автомобиля с комбинированной силовой установкой производства фирмы BMW почти в два раза выше при практически равных остальных характеристиках, но при этом общий (совокупный) пробег увеличивается незначительно.



Рисунок 10 – Схема компоновки автомобиля BMW i3» [16]

AUDI A1 e-tron	Электропривод: 85 кВт Аккумулятор: 13,3 кВт ч Пробег на батареях: 50 км Мощность удлинителя пробега (Range Extender): 25 кВт Совокупный пробег: 250 км
BMW i3	Электропривод: 125 кВт Аккумулятор: 22 кВт ч Пробег на батареях: 160 км Мощность удлинителя пробега (Range Extender): 25 кВт Совокупный пробег: 300 км

Рисунок 11 – «Основные характеристики серийных моделей автомобилей с системой Range Extender» [10, 16]

«Компания MAHLE ещё с 2010 года ведёт разработки и улучшение систем Range Extender для электромобилей (концепция представлена на рисунке 12)» [17–20].

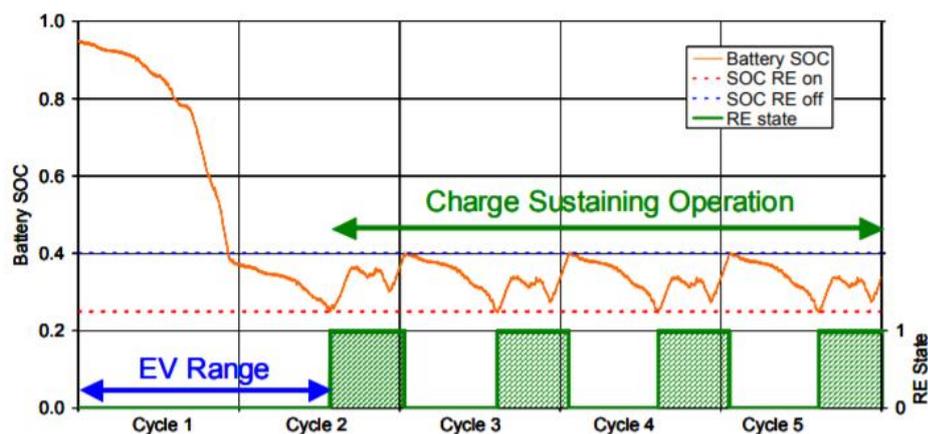


Рисунок 12 – «Концепция Range Extender от компании MANLE» [20]

«При разработке концепции электромобиля MANLE были учтены требования к мощности гибридной силовой установки для обеспечения движения транспортного средства с необходимой скоростью (рисунок 13). В качестве исходных параметров при проектировании были приняты следующие значения:

- масса транспортного средства – 1500 кг;
- максимальная скорость движения – 120-160 км/ч;
- запас хода на одной зарядке аккумуляторной батареи – не менее 65 км;
- мощность тягового электродвигателя – не более 100 кВт;
- емкость аккумуляторной батареи – 15,2 кВт*ч» [20].

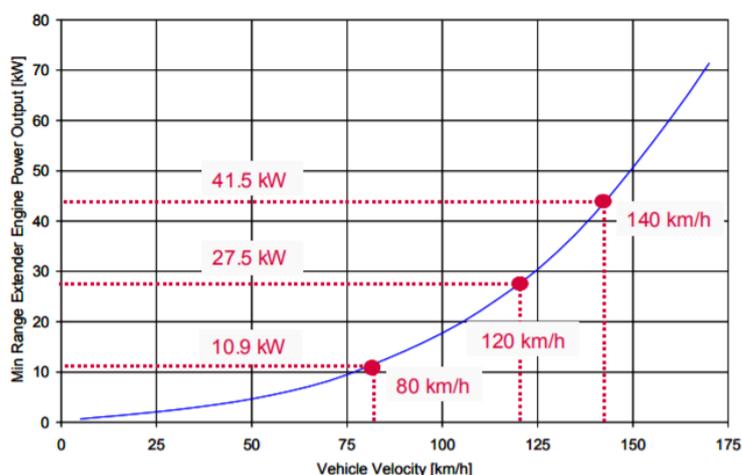
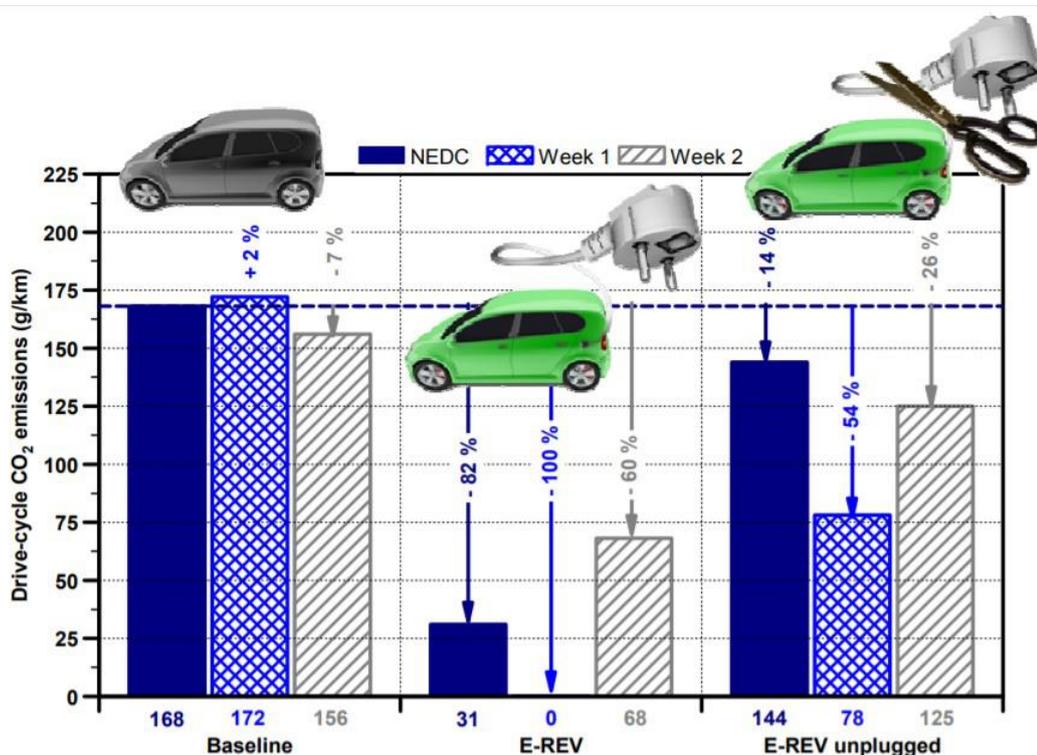


Рисунок 13 – «Зависимость необходимой минимальной мощности RE от скорости движения автомобиля» [20]

«По итогам исследований удалось подтвердить снижение выбросов CO₂, результаты отражены на рисунке 14. Для анализа использовались следующие тестовые циклы:

- NEDC (New European Driving Cycle) — европейский стандартный цикл для смешанных режимов (город + трасса);
- Week1 — Week1 — городской режим с двумя короткими поездками в день;
- Week2 — аналогичный, но с большим пробегом и частотой поездок» [20].



«Baseline – бензиновый автомобиль;

E-REV – электромобиль с Range Extender и возможностью зарядки от сети;

E-REV unplugged - электромобиль с Range Extender без зарядки от сети.

Рисунок 14 – «Снижение выбросов CO₂ в разных режимах движения» [20]

«Дополнительные исследования уровня токсичности выбросов у электромобилей с удлинителем пробега (BEV) и гибридных автомобилей (PHEV), проведённые группой учёных Познаньского технологического университета, привели к следующим выводам: автомобили PHEV и BEV с

ДВС в роли удлинителя пробега соответствуют требованиям ЕВРО 6b при испытаниях по циклу RDE (рисунок 15). Причем PHEV продемонстрировали более высокую экологичность» [27].

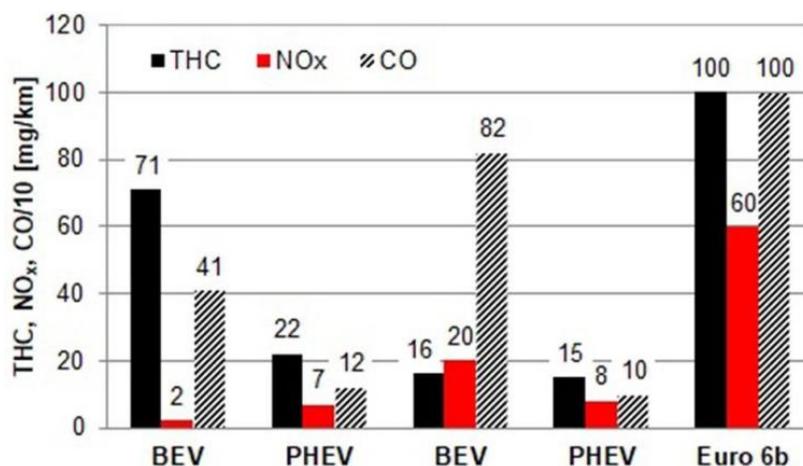


Рисунок 15 – «Сравнение токсичных выбросов» [19]

«На конференции «Electromobility+» 23 был представлен доклад, посвященный жизнеспособности технологии электромобилей с Range Extender. Цель этого доклада заключалась в оценке потенциала электромобилей с Range Extender, включая вопросы оптимального размера и стоимости батарей, а также гарантии пробега. В нём были показаны ключевые диаграммы, представленные на рисунках 16–19» [22].

«На рисунках 16 и 17 представлены статистические данные о годовом пробеге электромобилей в Германии и Франции соответственно [22], которые показывают, что в среднем суточный пробег не превышает 300 км.»

Причем, для Европейский стран более характерен значительно меньший среднесуточный пробег, что наглядно и показывают представленные статистические данные.

«Рисунок 19 отражает сравнительную стоимость электромобилей по разным схемам (чистый электромобиль и электромобиль с RE)» [32].

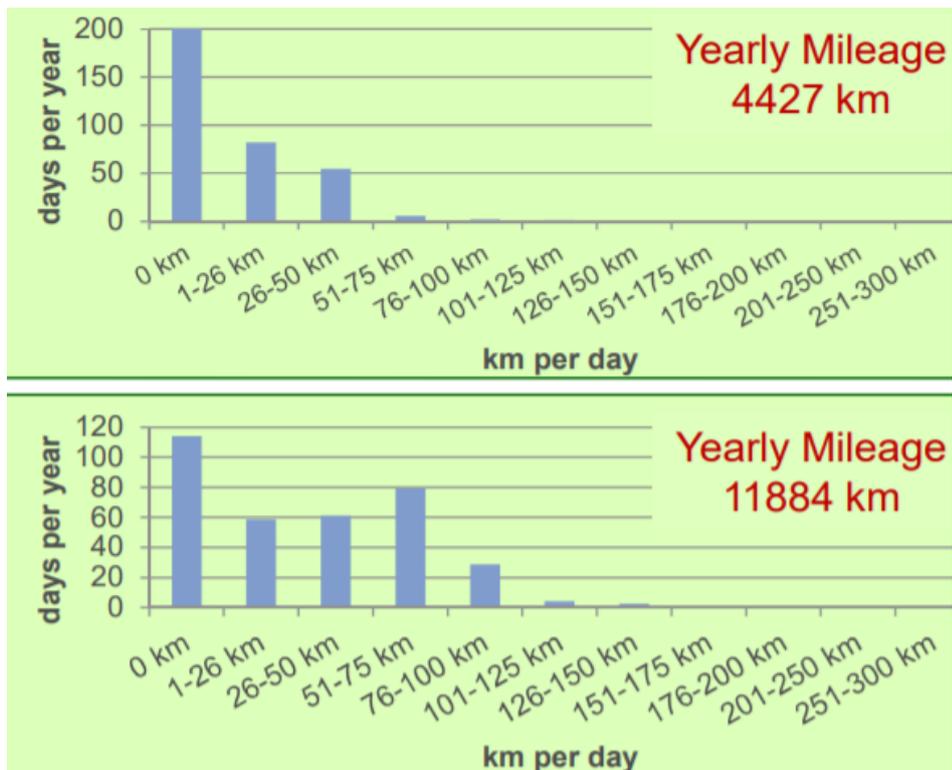


Рисунок 16 – «Годовой пробег автомобилей во Франции» [32]



Рисунок 17 – «Годовой пробег автомобилей в Германии» [32]

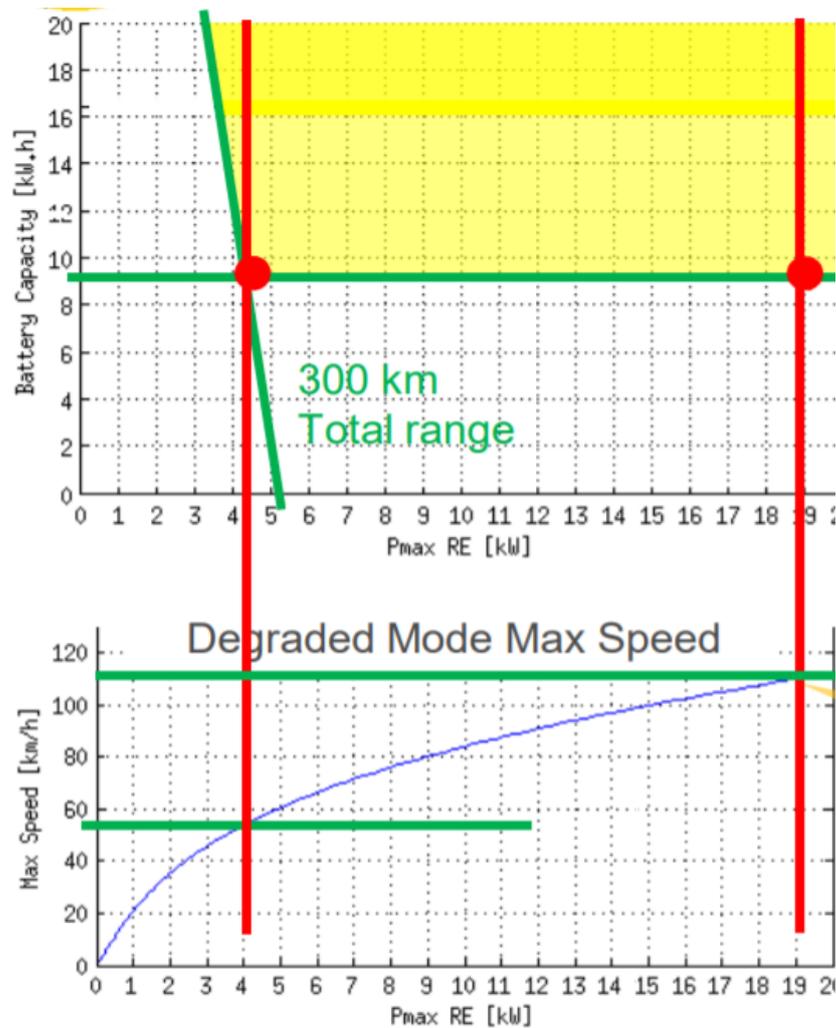
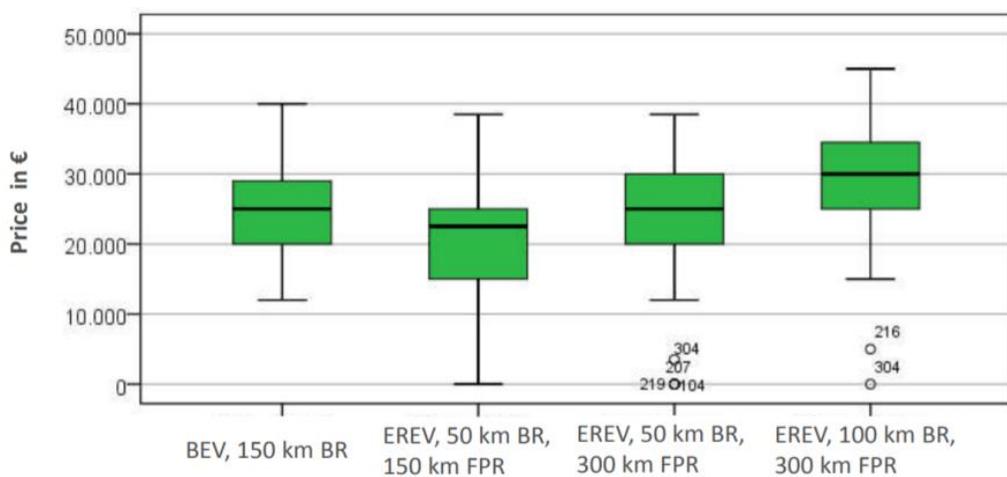


Рисунок 18 – «Требуемая мощность Range Extender в зависимости от скорости и ёмкости батарей (пробег 300 км)» [32]



«BEV – чистый электромобиль; EREV – электромобиль с удлинителем пробега; FPR – общий пробег; BR – только на батареях

Рисунок 19 – Сравнение стоимости электромобилей» [32]

При расчётном пробеге около 300 км наиболее выгодным является вариант с аккумуляторным запасом хода в 50 км плюс Range Extender мощностью 4–5 кВт для добавочных 100 км либо 19–20 кВт для увеличения пробега на 250 км.

На рисунке 20 в табличную форму сведены результаты сравнительного анализа эксплуатационных расходов гибридного автомобиля с удлинителем пробега и чистого электротранспортного средства с аналогичными характеристиками.

Small Class	Reference BEV 	Cluster 2 ICE Cost Based 	Cluster 2 ICE Cost Based 
Battery Size (kW.h)	16	9	9
RE Size (kW)	-	5	5
Weight	1200	1159	1159
Yearly elec. Consumption (kW.h/y)	 771 / 904	628	767
Yearly gasoline Consumption (L/y)	-	52	49
12 years Total Cost (€)	 30820 / 32210	27070	28280
<i>Purchase</i>	29600	25150	25150
<i>Energy during 12y</i>	1200 / 2600	1920	3130

Рисунок 20 - «Сравнение общей стоимости владения автомобилем с Range Extender» [32]

Проанализировав все представленные выше сведения можно предложить концепцию гибридного транспортного средства с удлинителем пробега, основные параметры которой систематизированы на рисунке 21.

В качестве предлагаемых элементов концепции представлены параметры тягового электрического привода и аккумуляторной батареи.

Параметры	Привод	Мощность электропривода, кВт	Емкость батарей, кВт ч	Мощность RE, кВт	Сухой вес RE, кг	Дальность хода, км
L7-024D/ L7-024D (RE)	Передний	15	10/5	3-5	-/70	250
L7-024/ L7-024 (RE)	Передний	15	10/5	5-7	-/100	350
L7-0241/ L7-0241 (RE)	AWD 4x4	15	20/10	5-7	-/100	450

Рисунок 21 – Параметры удлинителя пробега (RE)

Таким образом, на основе проведенного анализа тенденций развития электромобильного транспорта в мире в целом, и в России в частности, предложены элементы концепции гибридного автомобиля с Range Extender. Однако, для подтверждения жизнеспособности предложенного решения необходимо подтвердить его экологическую эффективность.

2 Определение основных параметров Range Extender

2.1 Расчет тепловых параметров силового агрегата

«В качестве топлива для силовой установки необходимо использовать бензин с октановым числом не ниже 92 (АИ-92-К4(К5)) или 95 (АИ-95-К4(К5)), соответствующий требованиям ГОСТ 32513» [2].

«Элементарный состав топлива и его молекулярная масса определяются по методике из источника» [6].

Принимаем $C = 0,855$; $H = 0,145$ и $m_T = 115$ кг/моль.

«Минимальная теплота сгорания топлива рассчитывается на основе этих данных по формуле (1).

$$H_U = 33,91C + 125,60H - 10,89(O - S) - 2,51 \cdot (9H + W) = 33,91 \cdot 0,855 + 125,6 \cdot 0,145 - 2,51 \cdot 9 \cdot 0,145 = 43,93 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 43930 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (1)$$

Далее вычисляются параметры рабочего тела. В первую очередь определяется теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания единицы массы топлива (1 кг) – этот расчёт проводится по формуле (2).

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = \frac{1}{0,208} \left(\frac{0,855}{12} + \frac{0,145}{4} \right) = 0,516 \frac{\text{кмоль возд}}{\text{кг топл}};$$
$$I_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3}C + 8H - O \right) = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} + 0,855 + 8 \cdot 0,145 \right) = 14,957 \frac{\text{кг возд}}{\text{кг топл}};$$

При дальнейшем анализе примем коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$.

$$M_1 = \alpha \cdot l_0 + \frac{1}{m_T} \frac{\text{кмоль гор.см}}{\text{кг топл.}} \quad (2)$$

Для случая недостатка воздуха ($\alpha = 0,5$) следует определить количество молей отдельных продуктов сгорания топлива; соответствующие зависимости приведены формулами (3)–(7)

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} - 2 \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 L_0 \frac{\text{кмоль } CO_2}{\text{кг топл}} \quad (3)$$

$$M_{CO} = 2 \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 \frac{\text{кмоль } CO}{\text{кг топл}} \quad (4)$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} - 2 \cdot K \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 \frac{\text{кмоль } H_2O}{\text{кг топл}}; \quad (5)$$

$$M_{H_2} = 2 \cdot K \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 \frac{\text{кмоль } H_2}{\text{кг топл}}; \quad (6)$$

$$M_{N_2} = 0,792 \cdot \alpha \cdot L_0 \frac{\text{кмоль } N_2}{\text{кг топл}}; \gg \quad (7)$$

Результаты расчётов приведены на рисунке 22.

M , кмоль/кг топл.	n , об/мин			
	1500	3000	4500	6000
M_I	0,53	0,53	0,53	0,53
M_{CO_2}	0,07	0,07	0,07	0,07
M_{CO}	0	0	0	0
M_{H_2}	0	0	0	0
M_{N_2}	0,41	0,41	0,41	0,41
M_{H_2O}	0,07	0,07	0,07	0,07
M_2	0,55	0,55	0,55	0,55

Рисунок 22 – Состав и общее количество продуктов сгорания

Параметры окружающей среды в расчётах принимаются равными:

Давление (P_0) составляет 0,1 МПа.

Температура (T_0) равна 293 К.

Для остаточных газов задаются фиксированные характеристики – их температура и давление берутся согласно рисунку 23.

n , об/мин	1500	3000	4500	6000
T_r , К°	950	1000	1100	1200
P_r , МПа	0,1064	0,1150	0,1294	0,1495

Рисунок 23 – «Значения температуры и давления остаточных газов» [6]

«Расчёт процесса впуска включает определение плотности заряда на впуске по формуле (8)

$$\rho_k = p_k \cdot 10^6 / R_B T_k; \text{ кг/м}^3 \quad (8)$$

где $R_B = 287$ Дж/кг · град - удельная газовая постоянная для воздуха» [6].

«При расчёте коэффициента остаточных газов (γ_r) для двигателя по методике, представленной в [7], предполагается, что коэффициент очистки отработавших газов ($\varphi_{оч}$) равен 1. Кроме того, на номинальном режиме работы двигателя коэффициент дозарядки ($\varphi_{доз}$) принимается равным 1,1.

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} = \frac{\varphi_{оч} p_r}{\varepsilon \varphi_{доз} p_a - \varphi_{оч} p_r} \quad (9)$$

$$\text{Температура в конце впуска: } T_a = (T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r) / (1 + \gamma_r) \quad (10)$$

Коэффициент наполнения цилиндра:

$$\eta_V = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \frac{1}{\varepsilon - 1} \frac{1}{p_0} (\varphi_{доз} \varepsilon p_a - \varphi_{оч} p_r) \gg \quad (11)$$

Результаты расчёта параметров свежего заряда на впуске сведены на рисунке 24.

n , об/мин	1500	3000	4500	6000
Δp_a , МПа	0,002	0,0082	0,0184	0,0326
p_a , МПа	0,1	0,09	0,08	0,07
$\varphi_{доз}$	1,0	1,1	1,1	1,1
γ_r	0,036	0,040	0,047	0,065
T_a , К°	325	328	335	352
η_V	0,94	0,97	0,84	0,65

Рисунок 24 – Параметры свежего заряда на впуске

В ходе анализа процесса сжатия определена средняя адиабатическая степень сжатия (K_1). Значение K_1 получено при принятой степени сжатия $\varepsilon = 9,7$, что соответствует характерному значению для типичных бензиновых ДВС рабочего объёма 250–650 см³.

«Средний показатель политропы сжатия (n_1) выбирается [6] несколько меньше, чем K_1 , и определяется по графической зависимости от температуры заряда (T_a).

$$\text{Давление в конце сжатия: } p_c = p_a \varepsilon^{n_1} \quad (12)$$

$$\text{Температура в конце сжатия: } T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1} \quad (13)$$

Средняя молярная теплоемкость в конце сжатия вычисляется отдельно для отдельных компонентов [6]:

а) свежей смеси

$$(m_{c_v})_{t_0}^{t_c} = 20,600 + 0,002638t_c \quad (14)$$

где $t_c = T_c - 273$ °C;

б) остаточных газов

$$(m_{c_v}^{\prime\prime})_{t_0}^{t_c} - \text{определяется методом экстраполяции}$$

в) полной рабочей смеси

$$(m_{c_v}^{\prime})_{t_0}^{t_c} = \frac{1}{1+\gamma_r} [(m_{c_v})_{t_0}^{t_c} + \gamma_r (m_{c_v}^{\prime\prime})_{t_0}^{t_c}] \quad \gg \quad (15)$$

Расчётные показатели состояния рабочей смеси в конце сжатия приведены на рисунке 25.

n , об/мин	1500	3000	4500	6000
n_l	1,375	1,376	1,376	1,377
P_c , МПа	2,23	2,09	1,86	1,54
T_c , К	769	770	787	828
t_c , °C	496	497	514	555
$(m_{c_v})_{cc}$, кДж/кг	21,909	21,912	21,958	22,066
$(m_{c_v})_{ог}$, кДж/кг	24,235	24,232	24,196	24,108
$(m_{c_v})_{рс}$, кДж/кг	22,000	22,000	22,060	22,190

Рисунок 25– Параметры конца сжатия

«При рассмотрении процесса сгорания по методике [6] вводятся коэффициенты молекулярного изменения: для горючей $\mu_0 = M_2/M_1$ и рабочей смеси $\mu = (\mu_0 + \gamma_r)/(1 + \gamma_r)$

Количество теплоты, теряемое вследствие химически неполного сгорания топлива:

$$\Delta H_u = 119950(1 - \alpha) \cdot L_0 \quad (16)$$

Теплота сгорания рабочей смеси:

$$H_{\text{раб.см}} = (H_u - \Delta H_u)/[M_1(1 + \gamma_r)] \quad (17)$$

Средняя молярная теплоемкость продуктов сгорания:

$$(mc_v'')_{t_0}^{t_z} = \left(\frac{1}{M_2}\right)[M_{CO_2}(mc_{vCO_2}'')_{t_0}^{t_z} + M_{CO}(mc_{vCO}'')_{t_0}^{t_z} + M_{H_2O}(mc_{vH_2O}'')_{t_0}^{t_z} + M_{H_2}(mc_{vH_2}'')_{t_0}^{t_z} + M_{N_2}(mc_{vN_2}'')_{t_0}^{t_z}] \quad (18)$$

Значение коэффициента использования теплоты (ξ_z) выбирается на основании рекомендаций – его значение принимается в диапазоне от 0,70 до 0,95.

Температура в конце видимого процесса сгорания $\xi_z H_{\text{д\`a\`a.\`n\`i}} + (mc_v')_{t_0}^{t_c} t_c = \mu (mc_v'')_{t_0}^{t_z} t_z$.

откуда $T_z = t_z + 237 = 2440,6 + 273 = 2713,6$ К;

Теоретически максимальное давление сгорания:

$$p_z = p_c \mu T_z / T_c \quad (19)$$

Действительное максимальное давление сгорания:

$$p_{zД} = 0,9 \cdot p_z \text{ МПа} \quad (20)$$

Степень повышения давления при сгорании:

$$\lambda = \frac{p_z}{p_c} \quad (21)$$

Для определения среднего показателя адиабаты расширения k_2 используется номограмма, которая показывает значение 1,27 при заданной степени сжатия и при соответствующих значениях α и T_z :

Давление и температура в конце процесса расширения:

$$p_b = p_z / \varepsilon^{n_2} \quad (22)$$

$$T_b = T_z / \varepsilon^{n_2 - 1} \quad (23)$$

Проверка параметров температурных показателей остаточных газов:

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{\frac{p_b}{p_r}}} \gg \quad (24)$$

Все рассчитанные параметры процесса сгорания, в том числе температура и давление, сведены в табличную форму на рисунках 26 и 27.

n , об/мин	1500	3000	4500	6000
μ_0	1,052	1,052	1,052	1,052
μ	1,050	1,050	1,050	1,049
ΔH_u , кДж/кг	0	0	0	0
$H_{рс}$, кДж/кмоляр _{раб} см	80360	80376	79809	78493
ξ	0,85	0,95	0,93	0,80
t_z , °C	2511	2726	2681	2402
T_z , К	2784	2999	2954	2675
P_z , МПа	8,47	8,56	7,33	5,21
$P_z \delta$, МПа	7,62	7,70	6,60	4,69
λ	3,80	4,09	3,94	3,39

Рисунок 26 – Параметры процесса сгорания

n , об/мин	1500	3000	4500	6000
n_2	1,254	1,254	1,250	1,25
P_b , МПа	0,49	0,50	0,43	0,30
T_b , К°	1563	1684	1674	1516
T_r , К°	939	1035	1123	1196
Δ	-1,12	3,50	2,13	-0,34

Рисунок 27 – Температура и давление в конце процесса расширения, температура остаточных газов

«В ходе расчёта было принято, что используемое в модели значение температуры газов может отличаться максимум на 5% [6].

Теоретическое среднее индикаторное давление:

$$p'_i = \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \left[\frac{\lambda}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right] \text{ МПа}; \quad (25)$$

Среднее индикаторное давление: $p_i = \varphi \cdot p'_i$ МПа,

где коэффициент полноты диаграммы принят $\varphi = 0,95$

Индикаторный коэффициент полезного действия:

$$\eta_i = \frac{p_i \cdot l_0 \cdot \alpha}{H_u \cdot \rho_0 \eta_v}; \quad (26)$$

Индикаторный удельный расход топлива:

$$g_i = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_i} \frac{\text{г}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \gg \quad (27)$$

Значения основных индикаторных параметров цикла приведены на рисунке 28.

n , об/мин	1500	3000	4500	6000
$p_{\text{ср}}^i$, МПа	1,29	1,33	1,13	0,77
p_i , МПа	1,22	1,26	1,08	0,73
η_i	0,37	0,37	0,37	0,32
g_i , г/кВт·ч	220	220	222	253

Рисунок 28 – Индикаторные параметры рабочего цикла

«Для вычисления среднего давления механических потерь в двигателе необходимо предварительно определить среднюю скорость поршня. В бензиновом двигателе средняя скорость поршня, как правило, не превышает ~20 м/с при частоте вращения до 6000 об/мин. При этом отношение хода поршня S к диаметру цилиндра D обычно не превышает 1 (что свидетельствует о короткоходной конструкции). В одноцилиндровых двигателях искрового зажигания ход поршня редко превышает 90 мм» [6, 3, 9].

«Все рассчитанные эффективные показатели работы двигателя приведены на рисунке 29. Отметим, что удельная мощность бензиновых двигателей (с принудительным зажиганием) обычно составляет порядка 25...30 кВт на литр рабочего объема» [3].

n , об/мин	1500	3000	4500	6000
V_n , м/с	4,5	9,0	13,5	18
p_M , МПа	0,08	0,14	0,19	0,24
p_e , МПа	1,14	1,13	0,89	0,49
η_M	0,93	0,89	0,83	0,67
η_e	0,35	0,33	0,31	0,22
g_e , г/кВт*ч	236	245	267	375

Рисунок 29 – Эффективные показатели

На основе проведённых расчётов можно оценить необходимый рабочий объём двигателя V_h , для обеспечения заданных режимов работы. При известных значениях требуемой частоты вращения двигателя такая зависимость выражается формулой:

$$V_h = \frac{30\tau N_e}{\rho_e n}, \text{ л.} \quad (28)$$

«Эффективная мощность двигателя далее рассчитывается при следующих допущениях [5]:

- коэффициент полезного действия (КПД) генератора находится в диапазоне от 0,75 до 0,85.

- мощность RE , определенная посредством анализа потребляемой мощности, составляет 3-5 кВт или 5-7 кВт в зависимости от выбранной концепции. Крутящий момент: $M_e = \frac{3 \cdot 10^4 N_e}{\pi n}$ Нм

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4 N_e}{\pi n} \text{ Нм} \quad (29)$$

$$\text{Часовой расход топлива: } G_T = N_e g_e \cdot 10^{-3} \text{ кг/ч} \quad (30)$$

Результаты соответствующих расчетов сведены на рисунке 30.

Вариант	Мощность RE, кВт	Мощность двигателя, кВт	Частота вращения двигателя, мин-1	Рабочий объем двигателя, V_h , см ³	Крутящий момент M_e , Нм	Часовой расход топлива G_T , кг/ч
1	3 - 5	4-6	1500	350-450	38,22	1,42
2	5-7	6-9	1500	500-650	57,32	2,12
3	3 - 5	4-6	3000	250 -350	19,11	1,47
4	5-7	6-9	3000	350-500	28,66	2,21
5	3 - 5	4-6	4500	200-250	12,74	1,60
6	5-7	6-9	4500	250 -350	19,11	2,40
7	3 - 5	4-6	6000	250-350	9,55	2,25
8	5-7	6-9	6000	350-450	14,33	3,38

Рисунок 30 – Результаты теплового расчета

Перечень серийных двигателей, характеристики которых соответствуют рассчитанным параметрам систематизированы на рисунке 31.

Мощность RE, кВт	Класс ТС	Вариант	Рабочий объем двигателя, V_h , см ³	Производитель	Марка ДВС
3-5	L7	1	249,0	Lifan	177MM
		2	249,6	Zongshen	ZS177
		3	292	Loncin	YF300
		4	248,8	Bajaj	Dominar
5-7	L7, M1, N1	1	349,5	Lifan	263MP
		2	377,7	Zongshen	ZS400GY
		3	450,3	Zongshen	NC450
		4	373,0	Bajaj	Dominar
		5	600	Gaokin	GK194MS

Рисунок 31 –Двигатели с указанными параметрами

2.2 Расчет радиатора системы охлаждения двигателя

«Система охлаждения двигателя предназначена для активного отвода тепла от нагретых деталей с целью поддержания их рабочей температуры и стабильной работы всего агрегата. Большая часть тепла уходит именно через систему охлаждения, тогда как меньшая доля распределяется по системе смазки и теряется в окружающей среде. При проектировании системы охлаждения её ключевые параметры рассчитываются на основе количества тепла, которое необходимо отвести от двигателя за определённое время, определяемого тепловым балансом двигателя» [15].

«Для уточнения параметров системы охлаждения используют результаты теплового анализа либо данные экспериментальных исследований теплообмена двигателя. Тепловые потери, которые требуется вывести в окружающую среду, рассчитываются по следующему выражению» [7]:

$$f_{\text{охлж}} = F_{\text{охлж}}/V_h \quad (31)$$

где: $F_{\text{охлж}}$ – площадь охлаждаемых поверхностей ДВС;

V_h –рабочий объем цилиндров ДВС.

«Количество теплоты $q_{\text{охлж}}$, отводимое системой охлаждения, определяется исходя из отношения площадей, которые участвуют в процессе теплообмена (рисунок 32)» [14].

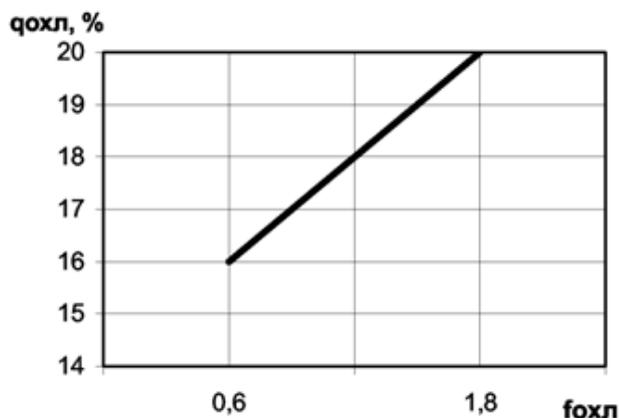


Рисунок 32 - «Зависимость $q_{\text{охлж}}$ от относительной площади Охлаждения» [14]

«Эффективность отвода тепла зависит сразу от нескольких факторов: вязкости охлаждающей жидкости, разницы температур, коэффициента теплопередачи, теплоёмкости материалов и самой жидкости. Чтобы выявить их функциональные зависимости, требуются углублённые исследования, что делает актуальным постоянное совершенствование конструкции и рабочих режимов системы охлаждения. Практический опыт показывает, что грамотно спроектированная система охлаждения способна увеличить мощность двигателя примерно на 5%, а также снизить расход топлива на 4–6%» [14].

Рабочий объем двигателя, V_h см ³	$f_{\text{охлж}}$	$q_{\text{охлж}}$ %	Расход топлива G_T , кг/ч	Количество тепла, отводимого от двигателя охлаждающей жидкостью $Q_{\text{в}}$, Дж/с
350,0	7,5	30	1,47	5381
600,0	8,9	30	2,21	8100

Рисунок 33 – Количество теплоты, отводимой от двигателя охлаждающей жидкостью

«Итоговые результаты расчёта по известным методикам [7, 14] систематизированы на рисунке 34.»

Рабочий объем двигателя, V_h , см ³	350	600
Количество тепла, отводимого от двигателя охлаждающей жидкостью Q_v , Дж/с	5381	8100
Циркуляционный расход охлаждающей жидкости $G_{ж}$, м ³ /с	0,128 10 ⁻³	0,195 10 ⁻³
Расчетная производительность насоса $G_{ж.р.}$, кг/с	0,16	0,24
Количество воздуха, проходящего через радиатор $G_{возд.}$, м ³ /с	0,215	0,324
Средняя температура охлаждающего воздуха, проходящего через радиатор: $T_{ср.возд.}$, К	325	325
Средняя температура жидкости в радиаторе $T_{ср.ж.}$, К	365	365
Поверхность охлаждения радиатора, м ²	0,9	1,35

Рисунок 34 – Результаты расчёта параметров системы охлаждения

2.3 Расчет поликлинового ременного привода

Передаваемая мощность: $P_1 = 7$ кВт

Частота вращения: $n_1 = 3000$ об/мин

«Для выбора оптимального сечения клинового ремня (рисунок 2.2) вводится коэффициент, характеризующий влияние переменной нагрузки на работу передачи [10].

При осуществлении тяжелого режима двухсменной работы устанавливается коэффициент равный 1,3.

$$P_{1p} = P_1 C_p = 7 \cdot 1,3 = 9,1 \text{ кВт} \quad (38)$$

Исходя из данных, представленных на графике (рисунок 35), произведём определение сечения ремня.

Диаметр ведущего шкива:

$$d_1 = (25 + 30) \sqrt[3]{T_1} = 27 \cdot \sqrt[3]{22,282} = 75,977 \text{ мм.} \quad (39)$$

$$T_1 = \frac{P_1 \cdot 30}{\pi \cdot n_1} = 22,282 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (40)$$

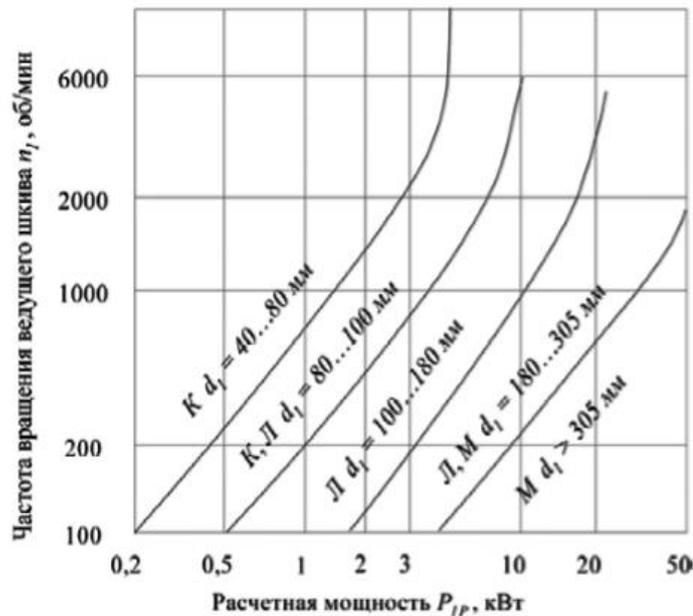


Рисунок 35 – «Выбор сечения ремня» [10]

«На рисунке 35 представлена схема выбора профиля ремня [10]. По результатам расчёта выбираем диаметр малого шкива d_1 :

Принимаем d_1 равным 128 мм.

$$\text{Диаметр большого шкива: } d_2 = d_1 \frac{n_1}{n_2} = 126 \cdot 1 = 126 \text{ мм.} \quad (41)$$

Уточненное передаточное отношение привода:

$$i = \frac{d_2}{d_1(1-\xi)} = \frac{126}{128 \cdot (1-0,015)^2} = \frac{126}{128 \cdot 0,465} = 1 \quad (42)$$

$\xi = 0,01 \dots 0,02$ – коэффициент упругого проскальзывания ремня.

Определение ширины ремня:

$$V = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n_1}{60 \cdot 10^3} = \frac{3,1415 \cdot 128 \cdot 3000}{60 \cdot 10^3} = 20,106 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (43)$$

Межосевое расстояние между шкивами:

$$\alpha_{min} = 0,55 \cdot (d_1 + d_2) + H = 0,55 \cdot (128 + 126) + 4,6 = 144,3 \text{ мм} \quad (44)$$

где H – толщина ремня.

$$\alpha_{max} = 2 \cdot (d_1 + d_2) = 2 \cdot (128 + 126) = 508 \text{ мм} \quad (45)$$

В результате расчёта принимаем межосевое расстояние $a = 260$ мм.

Длина ремня:

$$L = 2a + \pi \frac{d_1 + d_2}{2} + \frac{\Delta^2}{a^2} = 2 \cdot 260 + 3,1415 \cdot \frac{128 + 126}{2} + \frac{1}{260^2} = 520 + 348,47 + 0,00384 = 918,97434 \text{ мм} \quad (46)$$

$$\Delta = \frac{d_2 - d_1}{2} = \frac{128 - 126}{2} = 1 \text{ мм} \quad (47)$$

Полученное значение длины округляется до ближайшего стандартного размера $L = 900$.

Уточнённое межосевое расстояние:

$$a = 0,25 \cdot \left[L - \pi \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} + \sqrt{(L - \pi \cdot \frac{d_1 + d_2}{2})^2 - 8\Delta^2} \right] = 0,25 \left[900 - 3,1415 \cdot \frac{126 + 128}{2} + \sqrt{(900 - 3,1415 \cdot \frac{126 + 128}{2})^2 - 8 \cdot 1} \right] = 0,25 \cdot \left[501,0295 + \sqrt{251022,55987} \right]^2 = 250,513 \text{ мм.} \quad (48)$$

«Угол обхвата ремнём ведущего шкива α_1 по методике [10]:

$$\alpha_1 = 180 - \gamma = 180 - 2 \frac{\Delta}{a} \cdot 57,3^\circ = 180 - 2 \frac{1}{250,513} \cdot 57,3^\circ = 179,54^\circ \quad (35)$$

Для учёта влияния увеличенного диаметра большого шкива вводится поправочный коэффициент мощности, снижающийся при уменьшении изгиба ремня на большом шкиве [10]; этот коэффициент рассчитывается по формуле:

$$\Delta P_1 = 0,0001 \Delta T_1 U_1 = 0,0001 \cdot 0,1 \cdot 3000 = 0,03 \text{ кВт} \quad (49)$$

$$\Delta T_1 = 0,1 \text{ по рисунку 36}$$

Допускаемая передаваемая мощность для выбранного ремня (с числом клиньев 10) рассчитывается по формулам:

$$[P_{10}] = ([P_{10}]_0 \cdot C_\alpha \cdot C_L + \Delta P_1) C_p \quad (50)$$

$$[P_{10}]_0 = 15 \text{ кВт} \quad [P_{10}]_{0(k)} = 7 \text{ кВт} \quad (51)$$

C_α – коэффициент, учитывающий угол обхвата ремнём ведущего шкива.

C_L – коэффициент, учитывающий длину ремня.

$L_0 = 1600 \text{ мм.}$ »

Значение коэффициента длины ремня определяется по формуле:

$$\frac{L_p}{L_0} = \frac{900}{1600} = 0,56 \quad (52)$$

и для рассчитанной конструкции $C_L = 0,86$

Для выбранного ремня дополнительно проверяются условия работоспособности по формулам

$$K = \frac{L_p}{L_{0(k)}} = \frac{900}{700} = 1,27 \quad (53)$$

$$[P_{10}]_л = (15 \cdot 1 \cdot 0,97 + 0,03) \cdot 1,3 = 18,954 \text{ кВт} \quad (54)$$

$$[P_{10}]_к = (7 \cdot 1 \cdot 0,89 + 0,03) \cdot 1,3 = 7,87 \text{ кВт} \quad (55)$$

«На рисунке 36 приведены значения поправки ΔT_1 к крутящему моменту на быстроходном валу в зависимости от числа ручьев ремня» [10].

Сечение ремня	ΔT_1 при передаточном отношении i передачи							
	1,03...1,07	1,08...1,13	1,14...1,20	1,21...1,30	1,31...1,40	1,41...1,60	1,61...2,39	$\geq 2,40$
К	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6	0,7
Л	0,9	1,9	2,7	3,6	4,0	4,5	5,0	5,4
М	7,0	13,8	20,7	27,6	31,0	34,5	38,0	41,4

Рисунок 36 – «Поправка ΔT_1 к моменту на быстроходном валу, Нм» [10]

Необходимое число клиновых ручьев ремня для передачи рассчитанной мощности определяется по формулам:

$$Z = 10 \frac{P_1}{[P_{10}]} = 10 \frac{7}{18,954} = 3,69 \quad (56)$$

Принимаем $Z = 4$.

$$Z_k = 10 \frac{7}{7,87} = 8,9 \quad (57)$$

Принимаем $Z_k = 9$.

Требуемая сила предварительного натяжения ремня вычисляется по формулам:

$$F_{0(k)} = 780 \cdot \frac{9,1 \cdot 0,86}{20,1 \cdot 1} + \frac{0,09 \cdot 9 \cdot 20,1^2}{10} = 303,42 + 32,72 = 336,14 \text{ Н.} \quad (58)$$

$$F_{0(l)} = 780 \cdot \frac{9,1 \cdot 0,48}{20,1 \cdot 1} + \frac{0,46 \cdot 4 \cdot 20,1^2}{10} = 165,36 + 72,72 = 238,08 \text{ Н.} \quad (59)$$

Все полученные результаты и расчетные зависимости позволяют полностью определить основные параметры поликлинового ременного привода для силовой установки Range Extender.

Все расчеты велись по известным и многократно апробированным методикам [6, 7, 10, 14].

Таким образом, проведенные расчеты позволили определить некоторые целевые параметры гибридной тяговой системы транспортного средства с Range Extender для проектирования опытного образца силовой установки и проведения дальнейших исследований.

3 Испытание гибридной силовой установки Range Extender

3.1 Общие сведения

Реализация данного проекта проходила поэтапно и включала два основных шага. На первом этапе основное внимание было сосредоточено на подборе и усовершенствовании генераторных установок. На втором этапе проводилось усовершенствование оборудования, предназначенного для проведения испытаний, и непосредственно сами испытания силовых установок.

На первом этапе были выбраны генераторы для интеграции в состав системы REEV. «Исследования российского рынка показали наличие ключевых поставщиков генераторов: итальянских брендов «Linz», «NSM», «Mess Alte», а также производителей из КНР. Проведённая техническая оценка выявила несоответствие характеристик имеющихся на рынке генераторов специфическим требованиям, предъявляемым к устройствам, функционирующим в составе REEV. Это обстоятельство обусловило необходимость проведения комплексной модернизации оборудования» [4].

Процесс усовершенствования генераторов был направлен на достижение двух основных стратегических целей:

- организация функционирования силовой установки в режиме выработки постоянного электрического тока;
- увеличение выходной мощности генератора посредством увеличения частоты вращения и усиления магнитного поля ротора за счет внедрения неодимовых магнитов.

В ходе проектных работ было проанализировано более десятка альтернативных решений по модернизации. После тщательного отбора для последующих экспериментальных испытаний были выбраны наиболее перспективные решения, которые приведены на рисунке 37.

Наименование	Фотография	Примечание
Генератор MeccAlte T16F (Вариант 1)		Серийная синхронная модель Постоянная мощность 7,5 кВА Страна производства - Италия.
Генератор на постоянных магнитах (Вариант 2)		Пиковая мощность 4 кВА (Напряжение - 60В, 12 магнитов, 18 катушек) Страна производства - Китай.
Генератор на постоянных магнитах (Вариант 3)		Модернизированный вариант с неодимовыми магнитами. (Напряжение - 60В, 24 магнита, 18 катушек)

Рисунок 37 – Генераторы, отобранные для тестирования

3.2 Объект испытаний и цель работы

В рамках программы экспериментальных испытаний были определены следующие типы генераторных установок для проведения испытаний:

- базовый вариант (Вариант 1) — промышленный трёхфазный синхронный генератор модели T16F с двумя полюсами. Его номинальная мощность составляет 7,5 кВА, а максимальная — 8,3 кВА при скорости вращения 3000 об/мин.
- генератор с ферритовыми магнитами (Вариант 2) — конструкция состоит из вращающегося и неподвижного элементов.
- генератор с неодимовыми магнитами (Вариант 3) — аналогичная по конструкции схема, включающая ротор и статор.

Целью данной работы является комплексная оценка рабочих характеристик всех рассматриваемых генераторов в условиях лабораторных испытаний для дальнейшего анализа их пригодности к использованию в составе силовой установки типа Range Extender.

3.3 Условия и порядок проведения испытаний

Экспериментальная программа выполняется с использованием специализированного испытательного оборудования при следующих климатических условиях: температура окружающего воздуха поддерживается в пределах 20–30 °С, а атмосферное давление соответствует нормальным природным колебаниям.

Всё техническое сопровождение испытаний — начиная от обслуживания генераторных установок и их вспомогательных систем, заканчивая обеспечением стабильной работы стендового оборудования и измерительной аппаратуры — выполняется квалифицированными специалистами федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «ТГУ».

3.4 Организация испытательного комплекса и методология тестирования

Подготовка к проведению экспериментов включала последовательное выполнение ряда технических мероприятий. В первую очередь была проведена модернизация испытательного стенда, что потребовало установки дополнительного измерительного оборудования и настройки систем нагрузки.

Визуальное представление аккумуляторного комплекса представлено на рисунке 38, принципиальные схемы стенда для проведения испытаний представлена на рисунках 39, 40 и 41.

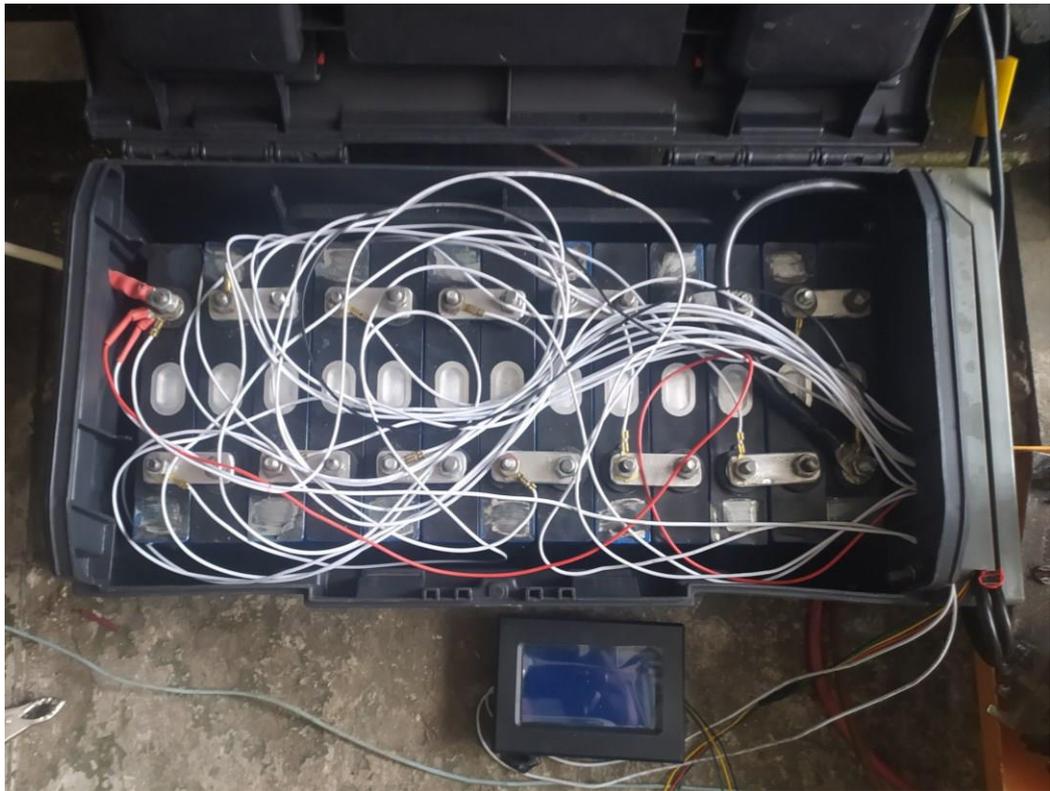


Рисунок 38 – Внешний вид аккумуляторного комплекса с BMS

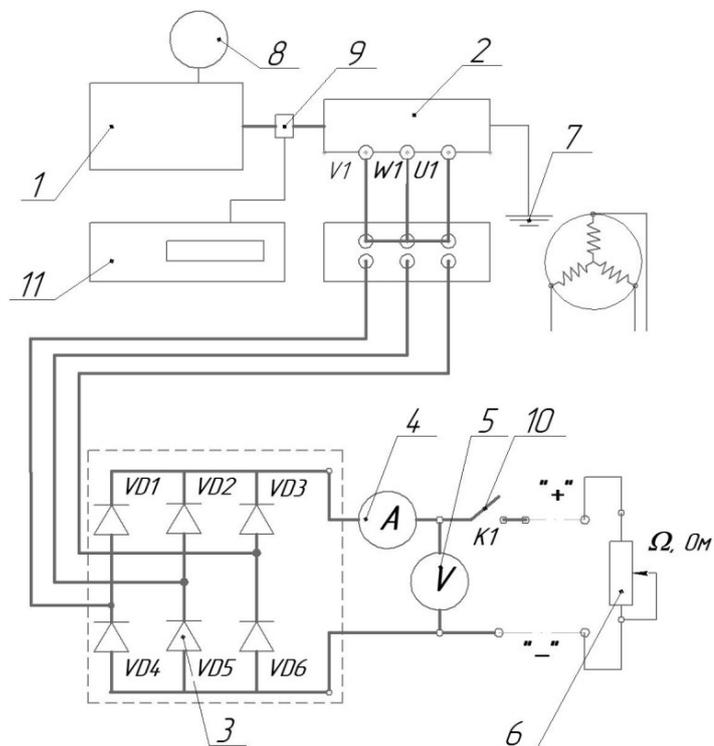


Рисунок 39 – Схема для испытаний генератора Месс Alte T16F (Вариант 1) с переменной нагрузкой.

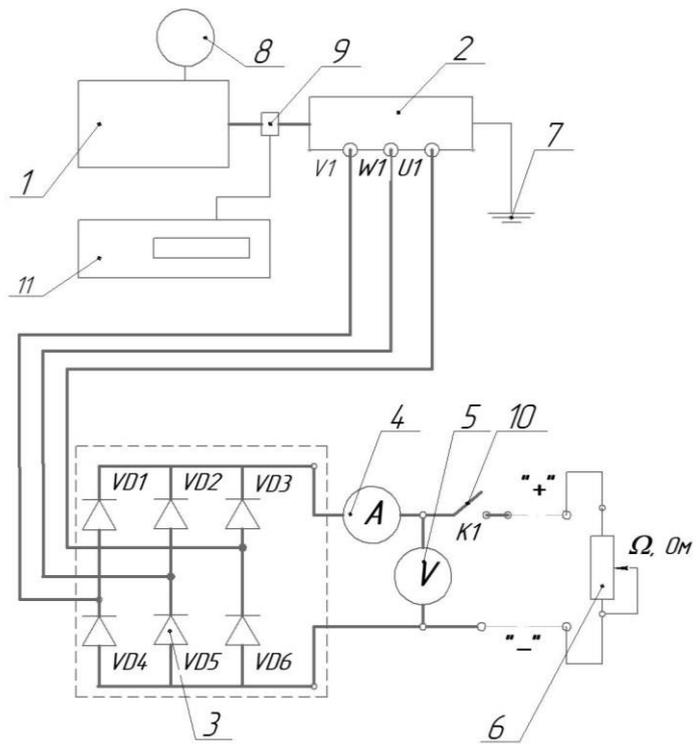


Рисунок 40 – Схема для генераторов на постоянных магнитах (Варианты 2 и 3) с переменной нагрузкой

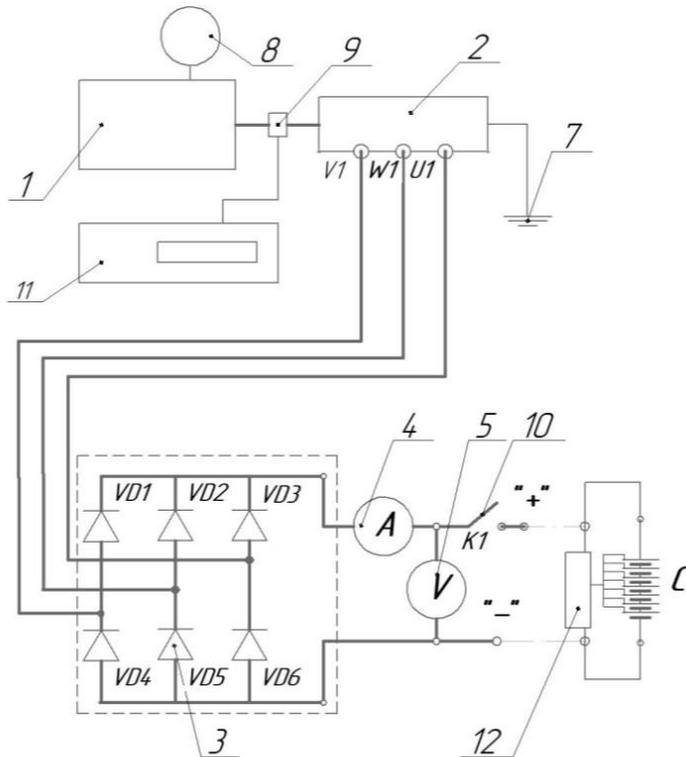


Рисунок 41 – Схема для генераторов на постоянных магнитах (Варианты 2 и 3) с нагрузкой, имитирующей зарядку аккумуляторов

В состав стенда входят:

- 1 – динамометрический электрический стенд;
- 2 – генератор;
- 3 – диодный мост;
- 4 – амперметр;
- 5 – вольтметр;
- 6 – регулируемая активная нагрузка;
- 7 – заземление;
- 8 – измерительная головка динамометрического стенда;
- 9 – датчик оборотов вала генератора/динамометрического электрического стенда;
- 10 – управляющий ключ для включения/выключения нагрузки;
- 11 – частотомер;
- 12 – аккумуляторные батареи.

Для того чтобы корректно установить генераторы на испытательный стенд необходимо было спроектировать и изготовить специализированное устройство (приводы), позволяющие надёжно закрепить генераторы.

Для генераторов типов Вариант 2 и 3 дополнительно был разработан подшипниковый узел, обеспечивающий стабильную работу оборудования в процессе испытаний (рисунок 42).

На рисунках 43 и 44 показаны генераторы, уже установленные на стенде и готовые к тестированию.

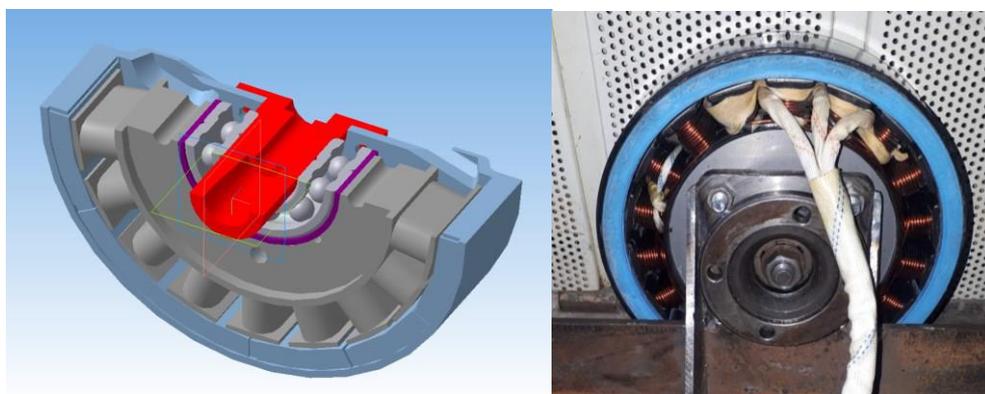


Рисунок 42 – Конструкция подшипникового узла для Вариантов 2 и 3

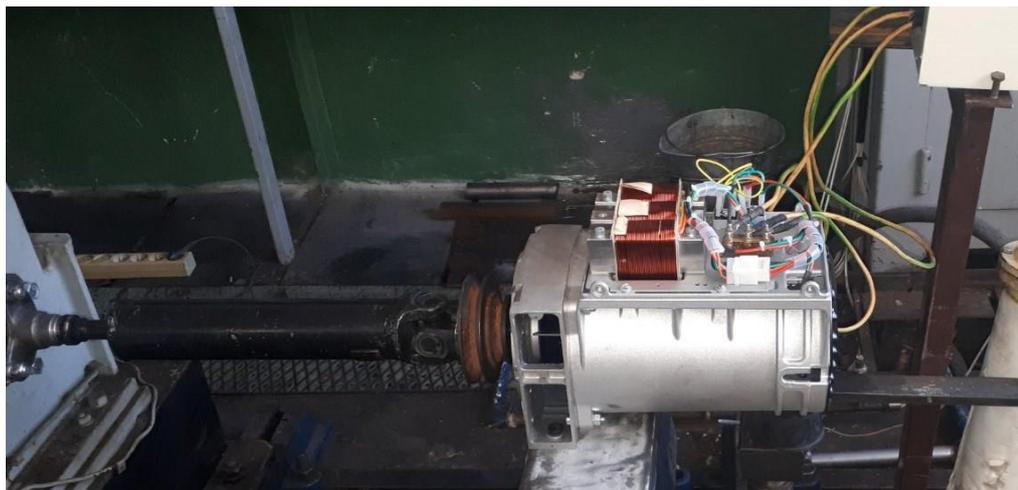


Рисунок 43 - Генератор Т16F (Вариант 1) на испытательном стенде



Рисунок 44 - Генератор Вариант 2 и 3 на стенде

После завершения всех подготовительных работ был проведён цикл предварительных тестов. Экспериментальный процесс включал в себя следующую последовательность действий: Эти тесты позволили откорректировать основные параметры работы стенда и проверить функционирование измерительного оборудования.

На финальном этапе осуществлялось комплексное исследование характеристик генераторов.

3.5 Метрологическое обеспечение

Во время испытаний производится замер ряда параметров, на рисунке 45 систематизированы контролируемые параметры и используемые средства измерений.

Наименование средств измерений	Тип, фирма	Класс точности или погрешность	Диапазон измерения
Температура окружающей среды: - <u>термосопротивление</u>	ТСП-Н Pt100	$\pm 2 \%$	$(-50 \div 400)^\circ\text{C}$
Давление окружающей среды: - <u>барометр-анероид</u>	МД-49-2 №154	± 1	$(600 \div 800)$ <u>ммрт.ст.</u>
Измеритель влажности окружающего воздуха	Гигрометр психометрический ВИТ-2	0,2	$(10 \div 100) \%$ <u>относ. влаж.</u>
Канал измерения числа оборотов: - тахометр цифровой - датчик числа оборотов	ТЦ - 5 Датчик индуктивного типа 40904.3847010 DG-6-K	± 10 мин-1	$(0 \div 6000)$ мин -1
Динамометрический стенд - крутящий момент	MEZ MS 2812-4	$\pm 0,1$	$(0 \div 20)$ <u>кг.с</u>
Напряжение - вольтметр	Lini-T UT-203	$\pm 0,1$	$(0 \div 600)$ В
Сила тока - амперметр	ГОСТ 8711	<u>кл. т.</u> 1,5	диапазон: 0-500 А диапазон: 0-100 А

Рисунок 45 – Контролируемые параметры и применяемые средства измерений

3.6 Анализ результатов испытаний

В процессе проведения испытаний результаты измерений протоколировались, на их основе были построены графические зависимости. Из-за большого объема экспериментальных данных в данной работе они приведены лишь частично.

Результаты испытаний представлены в таблицах 1-6.

Таблица 1 – Результаты испытаний генератора Вариант 2 (тип нагрузки: активная) №1

n, мин ⁻¹	Параметры							Параметры окружающей среды	
	P, кгс	Мкр, Нм	U, В	I, А	Ω, Ом	P, кВА	Ne, кВт	Температура воздуха, t _{возд}	24
1052	1,00	9,82	15,00	40,00	0,4	0,60	1,08		
1732	1,20	11,78	20,00	50,00	0,4	1,00	2,14		
940	1,00	9,82	20,00	30,00	0,7	0,60	0,97	Барометрическое давление, мм Hg	755
1530	1,20	11,78	30,00	40,00	0,7	1,20	1,89		
2384	1,30	12,77	35,00	50,00	0,7	1,75	3,19		
565	0,60	5,89	12,00	20,00	0,7	0,24	0,35	Влажность воздуха, %	71
1062	1,00	9,82	20,00	30,00	0,7	0,60	1,09		
1516	1,10	10,80	28,00	40,00	0,7	1,12	1,71		

Таблица 2 – Результаты испытаний генератора Вариант 2 (тип нагрузки: активная) №2

n, мин ⁻¹	Параметры							Параметры окружающей среды	
	P, кгс	Мкр, Нм	U, В	I, А	Ω, Ом	P, кВА	Ne, кВт	Температура воздуха, t _{возд}	24
1010	0,50	4,91	29,00	14,00	2,30	0,41	0,52		
1457	0,70	6,87	41,00	18,00	2,30	0,74	1,05		
1694	1,00	9,82	47,00	27,00	2,30	1,27	1,74	Барометрическое давление, мм Hg	755
2366	0,90	8,84	60,00	28,00	2,30	1,68	2,19		
3025	1,10	10,80	75,00	34,00	2,30	2,55	3,42		
3430	1,30	12,77	80,00	40,00	2,30	3,20	4,58	Влажность воздуха, %	71
1038	0,10	0,98	39,00	0,00	0,00	0,00	0,11		
1731	0,10	0,98	66,00	0,00	0,00	0,00	0,18		
1489	0,10	0,98	55,00	0,00	0,00	0,00	0,15		

Таблица 3 – Результаты испытаний генератора Вариант 2 (тип нагрузки: активная) №3

n, мин ⁻¹	Параметры				Параметры окружающей среды	
	U, В	I, А	Ω, Ом	P, кВА	Температура воздуха, t _{возд}	24
996	26,00	18,00	1,40	0,47		
1488	37,00	26,00	1,40	0,96		
1655	41,00	29,00	1,40	1,19		
2067	49,00	32,50	1,40	1,59	Барометрическое давление, мм Hg	760
2250	54,00	36,00	1,40	1,94		
2350	58,00	38,00	1,40	2,20		
1029	39,00	0,00	0,00	0,00	Влажность воздуха, %	59
1507	57,00	0,00	0,00	0,00		
1700	65,00	0,00	0,00	0,00		

Таблица 4 – Результаты испытаний генератора Вариант 2 (тип нагрузки: АКБ) №4

n, мин ⁻¹	Параметры						Параметры окружающей среды	
	P, кгс	Мкр, Нм	U, В	I, А	P, кВА	Ne, кВт	Температура воздуха, t _{возд}	24
1482	0,25	2,46	48,10	5,40	0,26	0,38		
1607	0,40	3,93	48,40	10,70	0,52	0,66		
1758	0,58	5,70	48,70	16,70	0,81	1,05		
1885	0,70	6,87	48,90	21,20	1,04	1,36		
2006	0,85	8,35	49,20	25,60	1,26	1,75	Барометрическое давление, мм Hg	760
2164	1,00	9,82	49,50	30,60	1,51	2,22		
2281	1,05	10,31	49,70	33,20	1,65	2,46		
2506	1,10	10,80	50,00	37,30	1,87	2,83		
2738	1,10	10,80	50,30	40,40	2,03	3,10	Влажность воздуха, %	73
3021	1,12	11,00	50,50	43,30	2,19	3,48		

3251	1,12	11,00	50,80	45,00	2,29	3,74		
3463	1,13	11,10	51,10	46,20	2,36	4,02		

Таблица 5 – Результаты испытаний генератора Вариант 1 (тип нагрузки: активная) №5

n, мин ⁻¹	Параметры							Параметры окружающей среды	
	P, кгс	Мкр, Нм	U, В	I, А	Ω, Ом	P, кВА	Ne, кВт	Температура воздуха, t _{возд}	24
1500	1,85	18,17	230,00	10,00	2,30	0,41	0,52		
2000	2,80	27,50	330,00	14,35	2,30	0,74	1,05		
2500	3,70	36,33	429,00	18,65	2,30	1,27	1,74		
3000	4,50	44,19	525,00	22,83	2,30	1,68	2,19	Влажность воздуха, %	59
1000			122,00	2,00	2,30	2,55	3,42		
1500	0,90	8,84	242,00	5,00	2,30	3,20	4,58		
2000	1,45	14,24	340,00	6,50	0,00	0,00	0,11		
2500	1,80	17,68	450,00	9,00	0,00	0,00	0,18		
3000	2,25	22,10	545,00	10,00	0,00	0,00	0,15		

Таблица 6 – Результаты испытаний генератора Вариант 3 (тип нагрузки: АКБ) №6

n, мин ⁻¹	Параметры						Параметры окружающей среды	
	P, кгс	Мкр, Нм	U, В	I, А	P, кВА	Ne, кВт	Температура воздуха, t _{возд}	24
650	0,50	4,91	42,40	5,10	0,22	0,33		
754	1,2	11,78	43,6	15,4	0,67	0,93		
905	2	19,64	44,9	28,6	1,28	1,86		
1040	2,5	24,55	46	37,4	1,72	2,67	Влажность воздуха, %	59
1158	2,7	26,51	46,8	42,6	1,99	3,21		
1275	2,8	27,50	47,4	46	2,18	3,67		
1500	3,1	30,44	50	50	2,50	4,78		
1800	3,2	31,42	60	52	3,12	5,92		

На рисунках 46-52 в графическом виде представлены основные характеристики испытываемых генераторов.

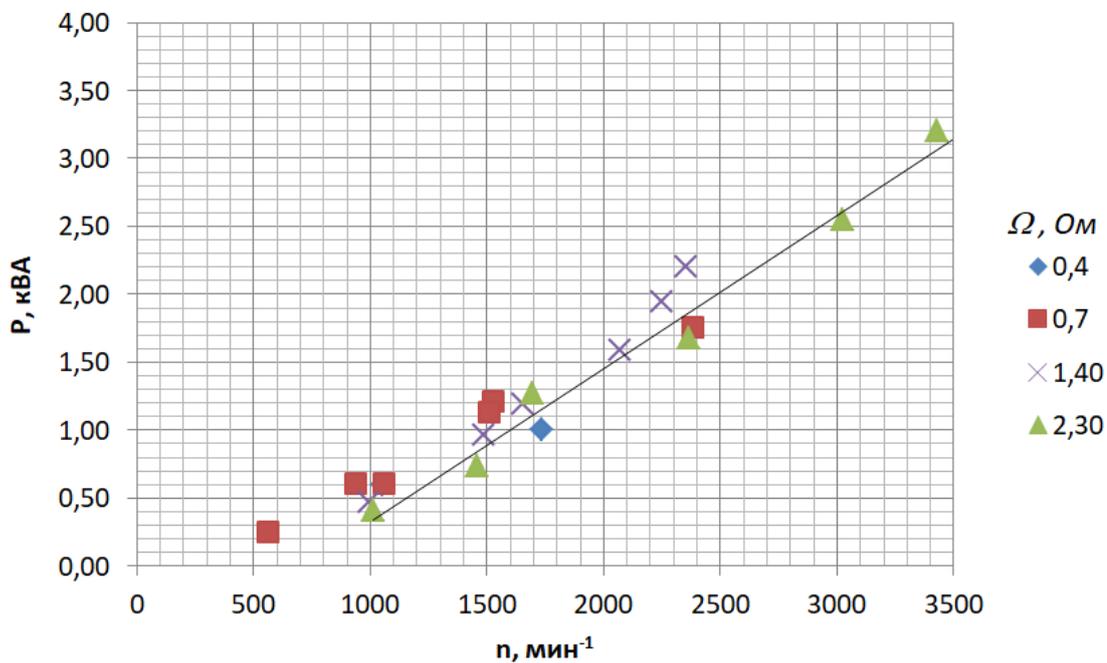


Рисунок 46 – Зависимость мощности генератора от частоты вращения (активная нагрузка, вариант 2)

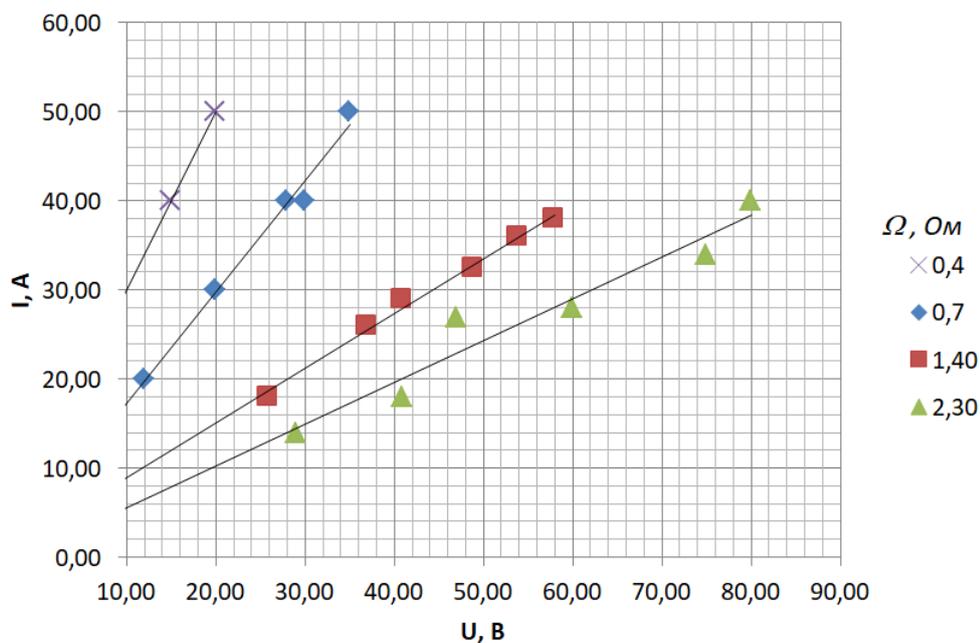


Рисунок 47 – Вольт-амперная характеристика генератора (активная нагрузка, вариант 2)

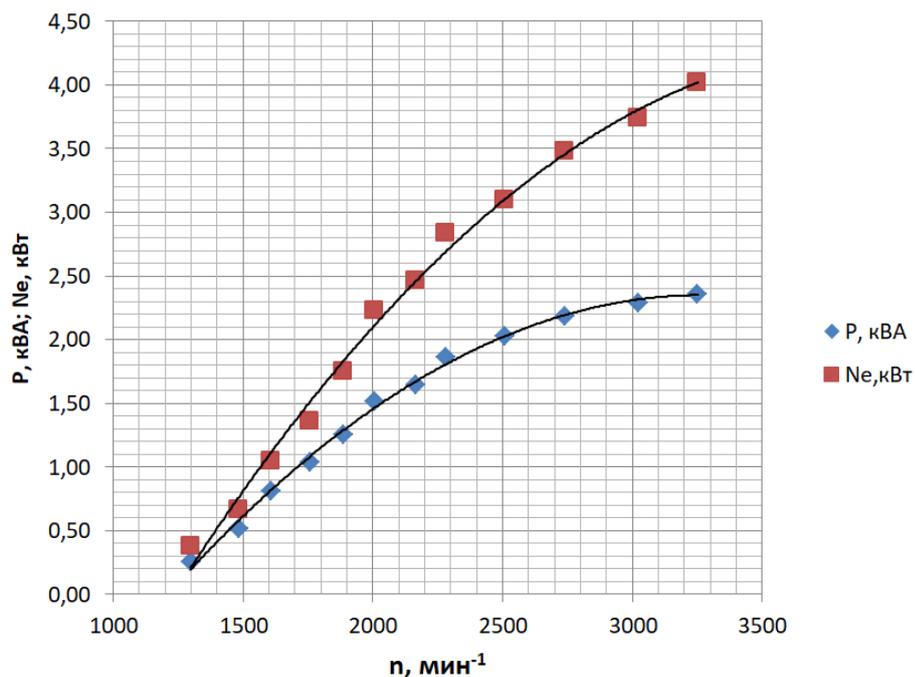


Рисунок 48 – Зависимость механической и электрической мощности генератора от частоты вращения (нагрузка АКБ, вариант 2)

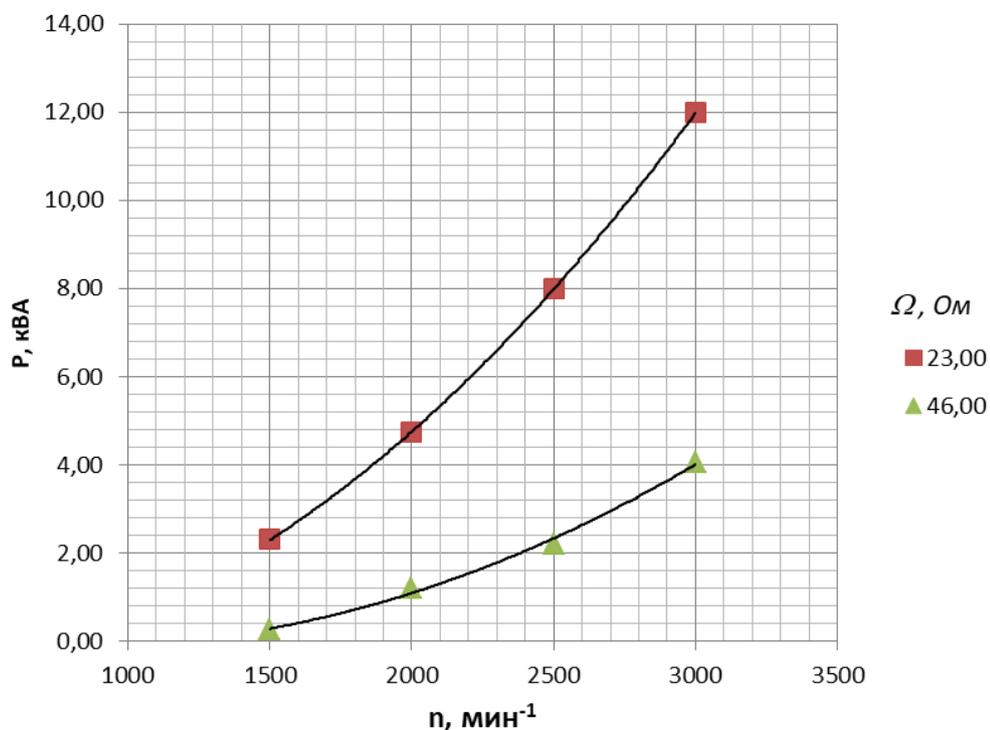


Рисунок 49 – Зависимость электрической мощности генератора от частоты вращения (активная нагрузка, вариант 1)

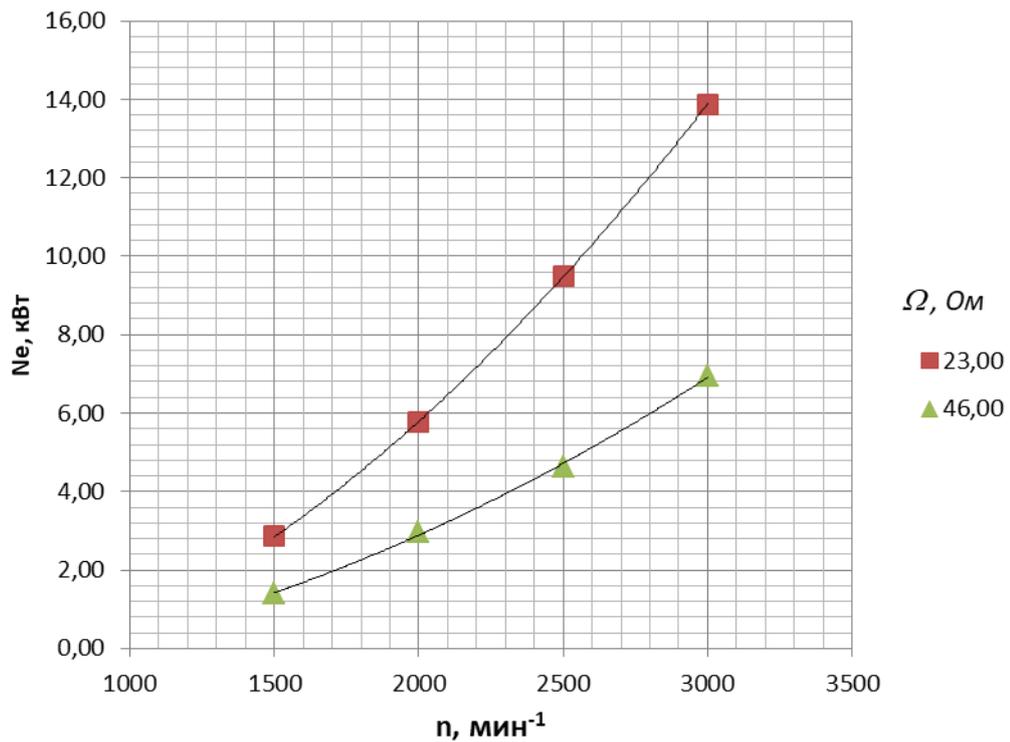


Рисунок 50 – Зависимость механической мощности генератора от частоты вращения (активная нагрузка, вариант 1)

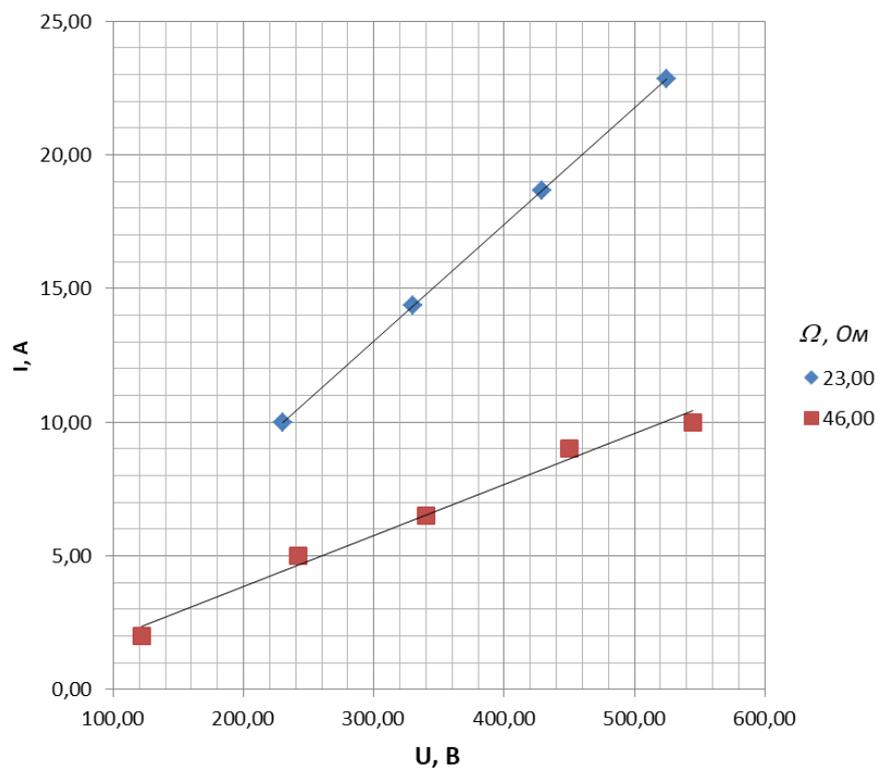


Рисунок 51 – Вольт-амперная характеристика генератора (активная нагрузка, вариант 1)

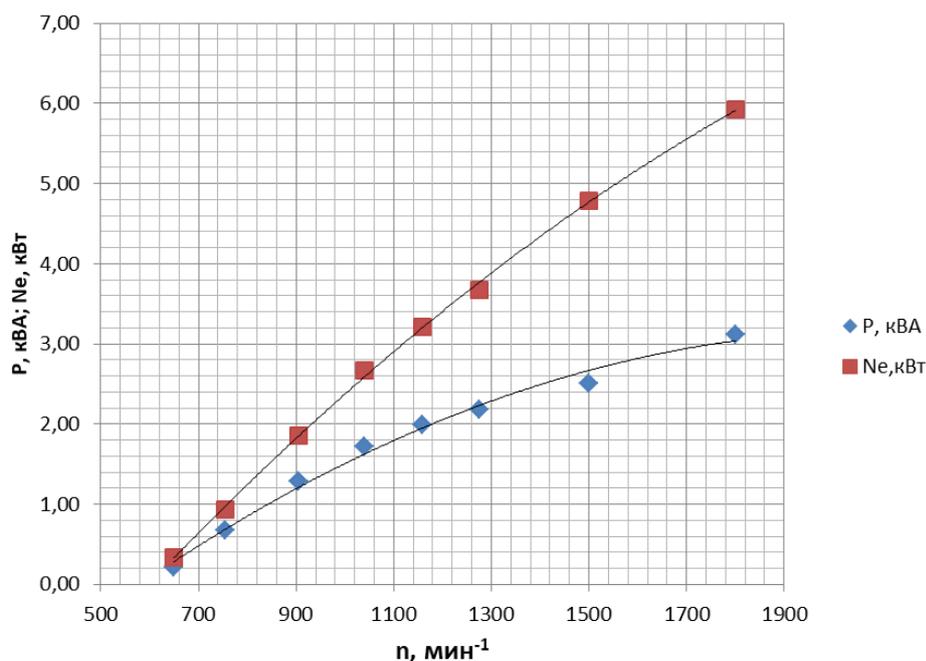


Рисунок 52 – Зависимость механической и электрической мощности генератора от частоты вращения (нагрузка АКБ, вариант 3)

«Анализ результатов экспериментальных исследований показывает:

- для генератора Вариант 1:

- пиковая кратковременная мощность: достигает 12 кВА при частоте вращения вала 3000 мин⁻¹.
- максимальная потребляемая механическая мощность: составляет 14 кВт при той же частоте вращения вала 3000 мин⁻¹.
- коэффициент полезного действия (КПД): варьируется в диапазоне от 0,78 до 0,85 при изменении частоты вращения от 1000 до 3000 мин⁻¹.

- для генератора Вариант 2:

- пиковая кратковременная мощность при активной нагрузке: 3,1 кВА.
- максимальная мощность при нагрузке от АКБ: 2,4 кВА при частоте вращения вала 3200 мин⁻¹.

- максимальная потребляемая механическая мощность при нагрузке от АКБ: 4 кВт при той же частоте вращения вала 3200 мин⁻¹.
- КПД: в диапазоне частот от 1500 до 2300 мин⁻¹ составляет от 0,68 до 0,75. При превышении частоты вращения 3000 мин⁻¹ наблюдается существенное снижение КПД до уровня 0,5–0,6.
- для генератора Вариант 3:
 - максимальная мощность при нагрузке от АКБ: 3,1 кВА при частоте вращения вала 1800 мин⁻¹.
 - максимальная потребляемая механическая мощность при нагрузке от АКБ: 5,9 кВт при той же частоте вращения вала 1800 мин⁻¹.
 - КПД: в диапазоне частот от 1500 до 1800 мин⁻¹ варьируется от 0,52 до 0,72» [4].

3.7 Испытание силового агрегата на соответствие требованиям STAGE

Для исследования характеристик двигателя внутреннего сгорания был выбран экспериментальный метод. Такой подход позволил получить наиболее точные данные, максимально приближённые к реальным рабочим параметрам агрегата. Использование исключительно теоретических методов в данном случае показалось нецелесообразным.

Цель эксперимента – определение характеристик ДВС в составе Range Extender, получение экспериментальной зависимости токсичности ДВС от режимов работы.

Объектом испытаний являлся поршневой двигатель внутреннего сгорания с одноцилиндровой конструкцией, работающий по четырёхтактному циклу и оснащённый системой принудительного зажигания топливной смеси. Рабочий объём данного двигателя (V_h) составляет 0,6 литра.

Все механические элементы этого двигателя (за исключением электронного блока управления) были разработаны конструктором самостоятельно. В ходе проектирования были тщательно определены и установлены все рабочие параметры агрегата.

Структурная схема стенда для испытания ДВС представлена на рисунке 53. Стенд содержит следующие структурные элементы:

- ГА-1, ГА-2 - газоанализаторы;
- МЗ - манометр и/или датчик давления;
- ТН - топливный насос;
- РД - регулятор давления в топливной системе;
- УКТ - универсальный измеритель температуры;
- λ_1 - широкополосный кислородный датчик;
- λ_2 - штатный датчик кислорода ЭСУД;
- t_1, t_2, t_3 – температурные датчики;
- ИРГА - измеритель расхода воздуха;
- ТУ - тормозное устройство;
- ЭСУД - электронная система управления двигателем;
- ДВС - двигатель внутреннего сгорания

Режимы испытания соответствуют требованиям международного стандарта ГОСТ ISO 8178-4-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах»

Результаты испытаний включают в себя параметры, систематизированные на рисунке 54.

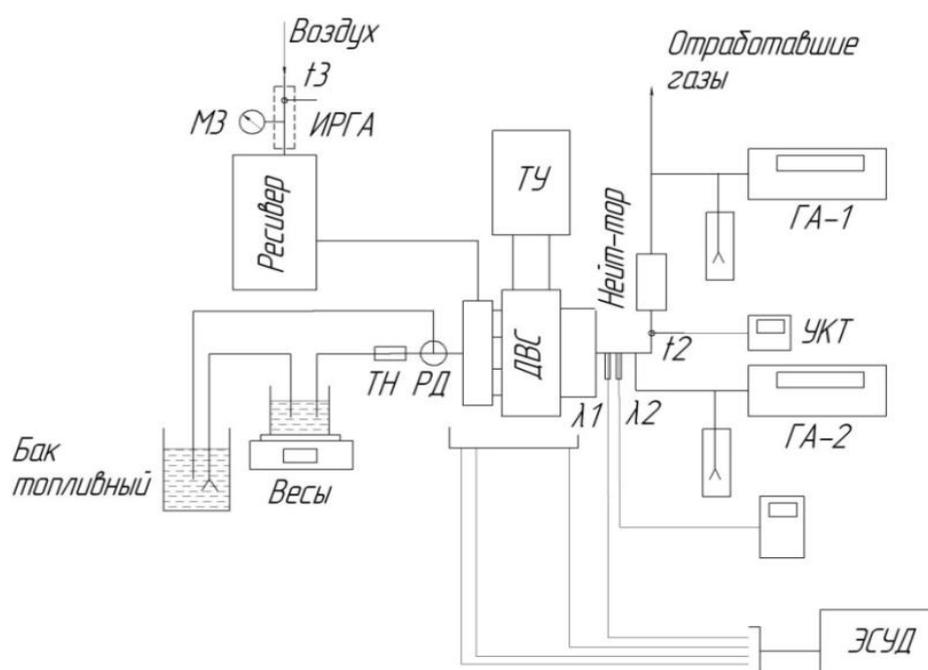


Рисунок 53 - Схема испытательного стенда для ДВС, работающего на жидком топливе

Параметр	Тип измерительного средства	Количество каналов измерения	Места установки первичных измерителей
Атмосферные температура и давление	По ГОСТ 14846-81	По ГОСТ 14846-81	По ГОСТ 14846-81
Крутящий момент	Тормозная установка	1	Моторный бокс
Частота вращения вала двигателя	По ГОСТ 14846-81	1	То же
Расход топлива	То же	1	“ ”
Угол опережения зажигания	“ ”	1	“ ”
Температуры воздуха на входе в двигатель.	“ ”	1	“ ”
Температуры охлаждающей жидкости	По ГОСТ 14846-81	По ТУ ДВС	“ ”
Состав отработавших газов ДВС.	Газоанализатор	CO, CH, NO _x , CO ₂	Выпускная труба ДВС
Расход воздуха	ЭСУД ДВС	1	Впускная труба ДВС
Температура отработавших газов	Термопара ЖК, измеритель температуры УКТ-38	1	Выпускная труба ДВС

Рисунок 54 – Контролируемые параметры во время испытаний

Для регистрации данных используются технические средства измерения:

- датчики давления;
- газоанализаторы;
- температурные датчики;
- оборудование для контроля параметров ДВС через ЭСУД.

Все измерения выполняются с учётом возможностей программного и аппаратного обеспечения системы управления двигателем.

Обработка полученных экспериментальных данных осуществляется по следующему алгоритму:

- анализ эксплуатационных параметров двигателя в соответствии с требованиями ГОСТ 14846-81:
- удельный расход топлива и среднее эффективное давление по требованиям ГОСТ 14846-81.
- определение концентрации токсичных веществ в отработавших газах выполняется на основе методик ГОСТ 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения».

«Испытания проводились в соответствии со стандартом D2 ISO 8528-1 с последовательным фиксированием следующих контрольных параметров двигателя:

- расход топлива (B), измеряемый в килограммах в час;
- расход воздуха (V_{air} или G_{air}) – как объемный ($m^3/ч$), так и массовый ($кг/ч$);
- величина крутящего момента ($M_{кр}$) в Нм;
- частота вращения коленчатого вала (n) в оборотах в минуту;
- содержание угарного газа (C_{CO}) в процентах;
- концентрация оксидов азота (C_{NO}) в миллионных долях;
- концентрация углеводородов (C_{CH}) в миллионных долях;

- угол опережения зажигания (УОЗ) в градусах поворота коленчатого вала» [27].

Результаты испытаний в рамках одного цикла систематизированы на рисунке 55. Измерение параметров двигателя выполнялись в полном соответствии с программой испытаний в рамках каждого режима цикла. Минимальное время работы на каждом режиме 10 минут.

Номер режима (цикл D2)	1	2	3	4	5	-	-	-	-	-	-
Частота вращения	Объявленная частота вращения, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$					Промежуточная частота вращения					Минимальная частота вращения холостого хода
Крутящий момент, %	100	75	50	25	10	-	-	-	-	-	-
Крутящий момент, Нм	32,8	26,3	14,0	7,4	4,5	-	-	-	-	-	-
Мощность, кВт	10,3	8,3	4,4	2,3	1,4	-	-	-	-	-	-
Весовой коэффициент	0,05	0,25	0,3	0,3	0,1	-	-	-	-	-	-

Рисунок 55–Испытательный цикл

Внешний вид силовой установки, закрепленной на испытательном стенде представлен на рисунке 56.



Рисунок 56 - Силовая установка на испытательном стенде

Результаты испытаний силовой установки на механические потери систематизированы в таблице 7.

Таблица 7–Характеристика механических потерь

n, мин-1	Параметры									Параметры окружающей среды	
	THR, %	Pк, кПа	P, кгс	THR, %	Pк, кПа	P, кгс	THR, %	Pк, кПа	P, кгс	Температура воздуха, t _{возд}	20
1000	3,2	95	1,15	48,8	102,4	1,15	99,8	102,4	1,15	Барометрическое давление, мм Hg	775
1500	3,2	86	1,1	28,4	95	1,11	100	102,0	1,05		
2000	3,2	70	1,05	30,0	98	1,05	100	101,0	1,00		
2500	3,2	70	1,15	20,7	95	1,17	100	101,0	1,11	Влажность воздуха, %	51
3000	0,8	60	1,2	39,7	85	1,25	100	102,0	1,25		
3500	0,8	60	1,3	51,6	97	1,28	100	102,0	1,27		
4000	0,7	54	1,45	24,5	95	1,45	100	102,0	1,45		

Первичные результаты испытаний сведены в таблицах 8–10 (условия окружающей среды: t_{возд} = 20, Hg = 775 мм, влажность воздуха 51%)

Таблица 8 – Нагрузочная характеристика ДВС №1 (n = 3000 ± 50 мин⁻¹)

Мера гб, гр.	Замеренные параметры									Расчетные параметры		
	τб, с	THR, %	λ	УОЗ, гр. п.к.в.	CO, %	CH, ppm	NOx, ppm	CO ₂ , %	P, кгс	Ne, кВт	Gб, кг/ч	ge, г/кВт*ч
10	28,12	2,5	0,98	35,5	0,26	70	175	6	0,14	0,43	1,28	2968,66
10	27,31	2,5	0,98	35,8	0,33	53	186	5,92	0,14	0,43	1,32	3056,71
10	28,0	2,5	0,98	35,7	0,3	61	180	5,98	0,14	0,43	1,29	2981,38
10	24,63	5,4	1,0	30	0,11	58	404	7,07	0,46	1,42	1,46	1031,53
10	25,4	5,4	1,0	30	0,11	54	400	7,08	0,46	1,42	1,42	1000,26
30	76,2	5,4	1,0	30	0,11	52	398	7,12	0,46	1,42	1,42	1000,26
10	21,2	7,2	0,99	32,5	0,14	55	638	7,37	0,75	2,31	1,70	735,03
10	20,96	7,2	0,99	32,5	0,17	55	653	7,45	0,75	2,31	1,72	743,45
10	21,91	7,2	0,99	32,5	0,15	55	650	7,45	0,75	2,31	1,64	711,21

Таблица 9 – Нагрузочная характеристика ДВС №2 ($n = 3000 \pm 50 \text{ мин}^{-1}$)

Мера гб, гр.	Замеренные параметры									Расчетные параметры		
	τ_b , с	THR, %	λ	УОЗ, гр. п.к.в.	СО, %	СН, ppm	NOx, ppm	СО2, %	Р, кгс	Ne, кВт	Гб, кг/ч	ge, г/кВт*ч
10	20,1	16,5	0,97	31,7	0,47	92	1906	8,23	1,43	4,40	1,79	406,60
10	19,02	16,5	0,97	31,7	0,55	86	1940	8,04	1,43	4,40	1,89	429,69
10	20,0	16,5	0,97	31,8	0,37	84	2011	8,09	1,43	4,40	1,80	408,64
10	13,8	28,6	0,98	23,4	0,37	130	3766	8,5	2,68	8,26	2,61	316,00
10	14,2	28,6	0,98	23,4	0,36	122	3890	8,52	2,68	8,26	2,54	307,10
10	14,2	28,6	0,98	23,4	0,36	116	3864	8,53	2,68	8,26	2,54	307,10
20	22,4	30,2	0,98	22,0	0,39	118	3813	8,25	2,80	8,62	3,21	372,67
20	26,3	30,2	0,98	22,0	0,47	125	4015	9,25	2,80	8,62	2,74	317,41

Таблица 10 – Нагрузочная характеристика ДВС №3 ($n = 3000 \pm 50 \text{ мин}^{-1}$)

Мера гб, гр.	Замеренные параметры									Расчетные параметры		
	τ_b , с	THR, %	λ	УОЗ, гр. п.к.в.	СО, %	СН, ppm	NOx, ppm	СО2, %	Р, кгс	Ne, кВт	Гб, кг/ч	ge, г/кВт*ч
20	22,98	33,5	0,97	20	0,41	110	3498	8,24	3,34	10,29	3,13	304,54
20	25,28	33,5	0,97	20	0,4	113	3688	7,83	3,34	10,29	2,85	276,83
20	24,83	35	0,97	17	0,48	136	4374	9,89	3,35	10,32	2,90	281,00
20	23,47	35	0,97	17	0,53	122	4390	9,92	3,35	10,32	3,07	297,29

На рисунок 57 проиллюстрирована нагрузочная характеристика ДВС. На рисунке 58 представлена зависимость расхода топлива за час при тех же оборотах двигателя (3000 оборотов в минуту).

Анализ токсичности выбросов систематизирован на рисунке 59.

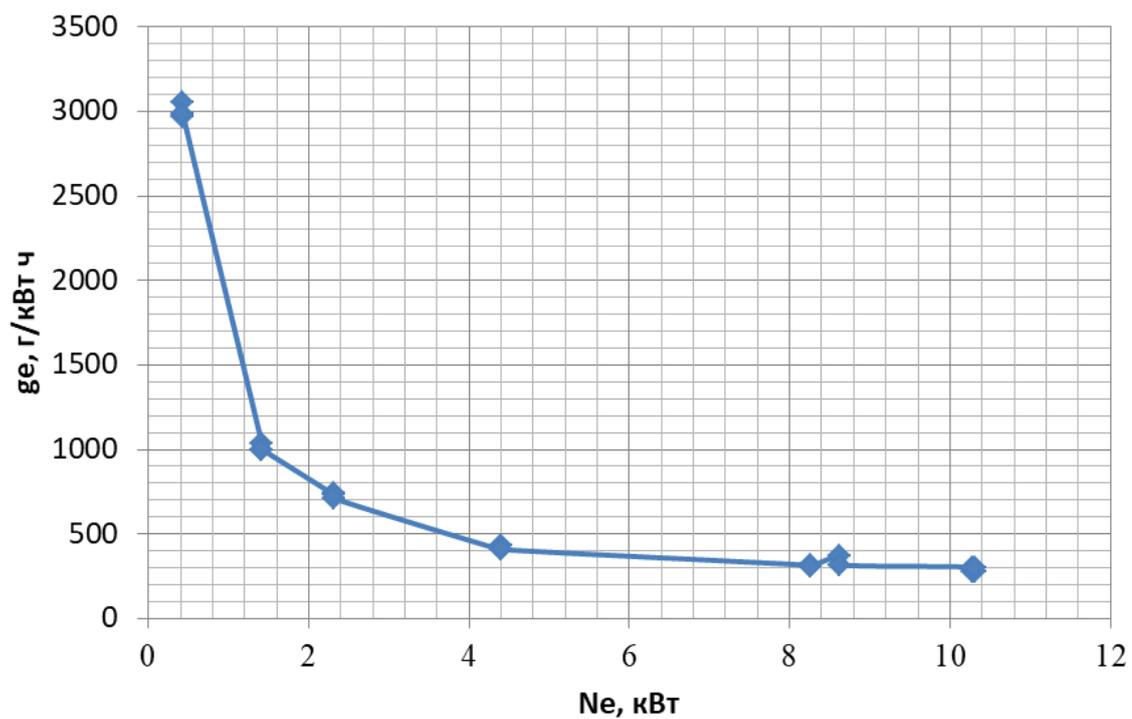


Рисунок 57 – Удельный эффективный расход топлива ($n = 3000 \text{ мин}^{-1}$)

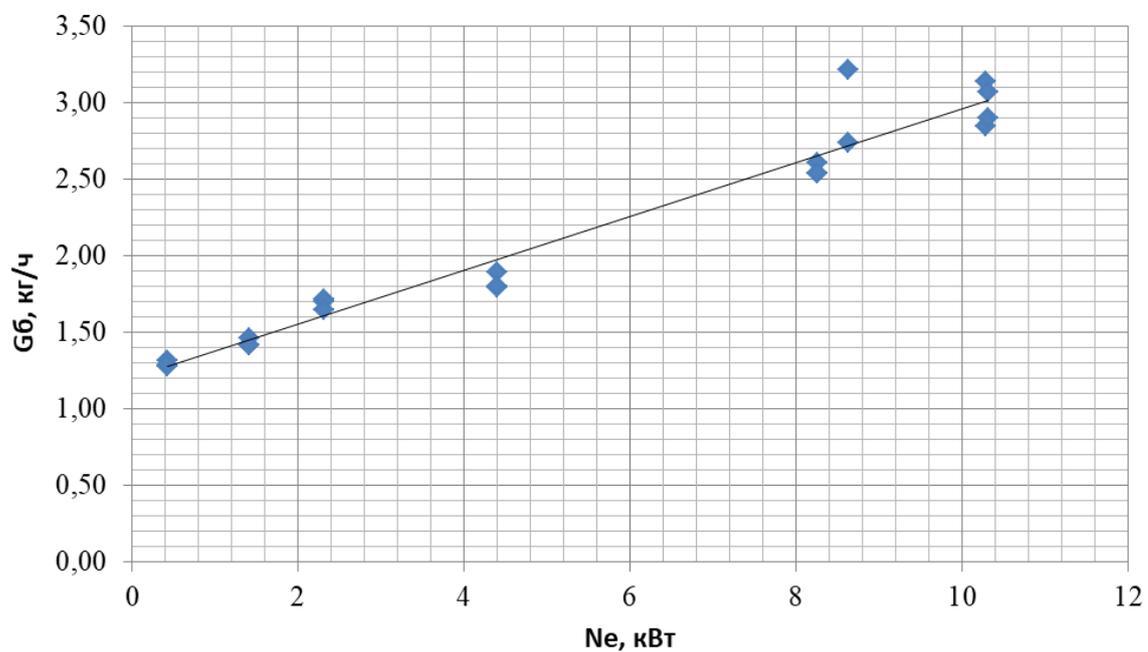


Рисунок 58 – Зависимость часового расхода топлива ($n = 3000 \text{ мин}^{-1}$)

Параметр	Результаты испытаний	Норма удельных средневзвешенных выбросов при постановке на производство	
		до 2016 г.	после 2016 г.
Удельный средневзвешенный выброс оксидов азота (NO_x), eNO г/(кВт*ч)	1,26	10	6
Удельный средневзвешенный выброс оксида углерода (CO), eCO , г/(кВт*ч)	1,25	3,5	1,5
Удельный средневзвешенный выброс углеводородов (CH), eCH , г/(кВт*ч)	0,127	1	0,4

Рисунок 59 – Удельные средневзвешенные выбросы токсичных веществ

Таким образом проведенные исследования доказывают, что двигатель GK194MS может соответствовать нормам, установленным в стандартах ГОСТ 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения» и ГОСТ ISO 8178-4-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах».

Заключение

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

- аналитический обзор литературных источников показал перспективность применения гибридных силовых установок в том числе с применением технологии Range Extender, прежде всего на территории России. Эксперты прогнозируют в течение ближайших 15 лет увеличение доли электротранспортных средств и гибридных автомобилей вплоть до половины от всех вновь выпускаемых транспортных средств;
- на сегодняшний день технология Range Extender всё ещё находится на стадии становления. Однако отдельные производители, такие как BMW и AUDI, уже наладили серийный выпуск автомобилей с этой системой. В России данные решения пока представлены только через серийные модели зарубежных компаний;
- проведенные исследования позволили выявить наиболее подходящие двигатели для применения в составе гибридной силовой установки Range Extender: ДВС с системой принудительного воспламенения и жидкостным охлаждением, с рабочим объемом от 300 до 600 см³. При этом в настоящий момент в России отсутствует серийное производство подобных двигателей.

К основным результатам работы следует отнести:

- разработанную методику проведения испытаний силового агрегата;
- выполненный полный цикл экспериментальных испытаний;
- полученные результаты экспериментальных исследований, подтвердившие возможность использования испытанного ДВС в составе силового агрегата Range Extender как удовлетворяющего современным экологическим требованиям по токсичности, принятым на уровне стандарта Stage.

Список используемой литературы и используемых источников

1 «АвтоДела». Электрокооперация. Electric Motors and Vehicles Company (EMAV) URL: <https://www.autodela.ru/main/top/news/Electric-Motors-and-Vehicles-Company>. (дата обращения: 05.10.2024) - Текст : электронный

2 ГОСТ 32513-2013 Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия (Переиздание) – Москва – Изд. Стандартиформ, 2014 – 12с. - Текст: непосредственный

3 Двигатели внутреннего сгорания: Учебник для вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов и др.; Подред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова – М.: Машиностроение, 1984. - Текст : непосредственный

4 Дьяченко Н.С. Анализ перспектив развития электрических транспортных средств в России // «Вестник науки» 8 июня 2025 года № 6 (87) Том 2. С. 2306-2312 URL <https://www.вестник-науки.рф/article/24162> (дата обращения: 01.07.2025 г.) - Текст : электронный

5 Какие города отказываются от машин и зачем это нужно [Электронный ресурс] // Евгений Делюкин, 26.09. 2018 // URL: <https://vc.ru/future/46544-kakie-goroda-otkazyvayutsya-ot-mashin-i-zachem-eto-nuzhno> (дата обращения: 15.10.2024) - Текст : электронный

6 Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учебное пособие для вузов \ А.И. Колчин., В.П. Демидов– 2-е изд., перераб.и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – Текст : непосредственный

7 Мелисаров В.М. Тепловой расчёт и тепловой баланс карбюраторного двигателя и двигателя с впрыском топлива: учебное пособие / В.М. Мелисаров, П.П. Беспалько, М.А. Каменская. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 128 с. – 100 экз. ISBN 978-5-8265-0875-6. - Текст: непосредственный

8 Методические указания по оформлению выпускных квалификационных работ по программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры ТГУ. URL:

<https://www.tltsu.ru/sveden/document> (дата обращения: 13.07.2025) - Текст : электронный

9 Немцы представили новое поколение гибрида Audi A1 e-tron. Леонид Попов (дата обновления: 13.06.2013) [Электронный ресурс] // URL: <https://www.drive.ru/news/audi/51b9bf8e94a656ca1d000039.html?amp=1> (дата обращения: 05.10.2024) - Текст : электронный

10 Передача поликлиновым ремнем: Методические указания к лабораторно - практич. занятиям для студентов, изучающих дисциплины: «Механика», «Техническая механика», «Детали машин и основы конструирования» / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ).- Новочеркасск: ЮРГТУ, 2003 – 10 с. URL: <https://www.npi-tu.ru/education/ntb/resources> (дата обращения: 13.04.2025) - Текст : электронный

11 Распоряжение Правительства РФ от 28 апреля 2018 г. № 831-р URL: <http://static.government.ru/media/files/EVXNIplqvhAfF2Ik5t6l6kWrEIH8fc9v.pdf> (дата обращения: 16.01.2025) - Текст : электронный

12 Рынок электромобилей в России за 9 месяцев 2019 года [Электронный ресурс]//Автостат,11.11.2019// URL: <https://www.autostat.ru/infographics/41715/> (дата обращения: 15.10.2024) - Текст : электронный

13 Система охлаждения. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине СД.Ф.02.01 – Типаж подвижного состава и устройство автомобиля для студентов специальности 150200 – Автомобили и автомобильное хозяйство/ Быков А.В. – Улан-Удэ, 2002. – 28 с. URL: <https://esstu.bookonlime.ru/reader/book/2013090607314977834700005879> (дата обращения: 5.02.2025) - Текст : электронный

14 Толстоногов А.П. Системы охлаждения поршневых двигателей внутреннего сгорания. Учеб. пособие/Сам. гос. аэрокос. ун-т. Самара, 2002. 208с. URL: <https://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Sistemy-ohlazhdeniya-porshnevyyh-dvigateli-vnutrennego-sgoraniya-Elektronnyi-resurs-ucheb-posobie-54998> (дата обращения: 27.01.2025) - Текст : электронный

15. Ховаха М.С. Автомобильные двигатели – М., Машиностроение, 1977. URL: https://imwerden.de/pdf/khovakh_automobilnye_dvigateli_1977__ocr.pdf (дата обращения: 11.03.2025) - Текст : электронный

16 Электро-компакт BMW i3 // URL: https://auto.ironhorse.ru/bmw-i3_3360.html (дата обращения: 05.10.2024). - Текст : электронный

17 Bassett, M., Fraser, N., Brooks, T., Taylor, G. et al., “A Study of Fuel Converter Requirements for an Extended-Range Electric Vehicle,” SAE Int. J. Engines 3(1):631-654, 2010, doi: 10.4271/2010-01-0832.

18 Bassett, M., Hall, J. et al., The Development of a Range Extender Electric Vehicle Demonstrator, SAE Technical Paper 2013-01-1469, 2013, <https://doi.org/10.4271/2013-01-1469>

19 Bassett, M., Hall, J., OudeNijeweme, D., Darkes, D. et al., “The Development of a Dedicated Range Extender Engine,” SAE Technical Paper 2012-01-1002, 2012, doi: 10.4271/2012-01-1002.

20 Bassett, M., Thatcher, I., Bisordi, A., Hall, J. et al., “Design of a Dedicated Range Extender Engine,” SAE Technical Paper 2011-01-0862, 2011, doi: 10.4271/2011-01-0862.

21 Dr. S. Satyapal, U.S. Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program. DOE Hydrogen and Fuel Cell Perspectives and Overview of the International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE), July 1, 2020 URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f77/hfto-satyapal-gabi-workshop-jul20.pdf>

22 Electric Vehicle with Range Extender as a Sustainable Technology, «Electromobility+», 6-7 Февраля 2014 г., Копенгаген.

23 European Commission. “The European Green Deal. Striving to be the first climate neutral continent” URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en - (дата обращения: 05.10.2024)

24 Ford Transit Custom Plug-In Hybrid Breaks Cover InThe UK // URL: <https://fordauthority.com/2017/09/ford-transit-custom-plug-in-hybrid-breaks-cover-in-the-uk/> (accessed on 5 October 2024)

25 Fuel economy guide model year 2020 URL: <https://www.fueleconomy.gov/feg/pdfs/guides/FEG2020.pdf> - (дата обращения: 05.10.2024)

26 Innovation in batteries and electricity storage: A global analysis based on patent data [Electronic resource]. – IEA, 2020. – . – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>. - (дата обращения: 05.03.2025)

27 ISO 8528-1:2018 Генераторные установки переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 1. Применение, номинальные и рабочие характеристики (ISO 8528-1:2018, IDT) URL: https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=80866 (дата обращения 09.02.2025)

28 Li Jun. Energy-saving and New Energy Vehicle Technology Roadmap 2.0 URL: <https://en.sae-china.org/a3967.html> - (дата обращения: 09.02.2025)

29 Minnrich, J.P., Mobile Range Extender Coupled with Combined Heat and Power Generation [Electronic resource] / J. P. Minnrich [et al.] // ATZ. – 2016. – Vol. 118(5). – P. 74 - 79. – ResearchGate, 2020 – Режим доступа: свободный. URL: https://www.researchgate.net/publication/310466150_Mobile_Range_Extender_Coupled_with_Combined_Heat_and_Power_Generation.

30 Novate. Ebuggye-MobilityConcept — электромобиль, который может проехать на любое расстояние. URL: <https://novate.ru/blogs/200912/21539/>. - (дата обращения: 09.02.2025)

31 Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective, 2020 URL: <https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>(accessed on 5 October 2024)

32 Rochdi Trigui. EVREST: Electric Vehicle with Range Extender as a Sustainable Technology EEVC 2015, EU project day on eMobility, Dec 2015, BRUXELLE, Belgium. 25 p

33 The Electric Vehicle Outlook is Bloomberg NEF // 2020 Bloomberg Finance L.P. URL: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook> (accessed on 15 October 2024)

34 Tyson, Madeline, Charlie Bloch. Breakthrough Batteries: Powering the Era of Clean Electrification. Rocky Mountain Institute, 2019. URL: <http://www.rmi.org/breakthrough-batteries>. - (дата обращения: 09.02.2025)

35 Wolschendorf, J., Rzemien, K., and Gian, D., "Development of Electric and Range-Extended Electric Vehicles Through Collaboration Partnerships," SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst. 3(2):215-219, 2010, <https://doi.org/10.4271/2010-01-2344> - (дата обращения: 09.02.2025)

36 Wu, D., Intelligent Hydrogen Fuel Cell Range Extender for Battery Electric Vehicles [Electronic resource] / Dongxiao Wu [et al.] // World Electric Vehicle Journal. – 2019. – Vol. 10 (29). – . – MDPI, 2020 –. – Режим доступа: свободный. URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/10/2/29/htm>. – (дата обращения: 09.02.2025)