

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра Энергетические машины и системы управления

(наименование)

13.03.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Альтернативные источники энергии транспортных средств

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Адаптация силового агрегата для применения в REEV

Студент

Д. В. Щеголев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Д.А. Павлов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Аннотация

Ключевым вопросом данной работы является адаптация силового агрегата для концепции Range Extender Electric Vehicle. Выпускная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включая зарубежные источники, и графической части на 8 листах формата А1.

Целью работы является разработка платформы Range Extender для электроприводных транспортных средств. В работе произведен обзор перспектив развития электротранспорта и гибридных автомобилей, на основе которого предложена концепция Range Extender. Проведены предварительные расчёты целевых параметров Range Extender. Конструкторская часть содержит необходимые расчеты, в том числе тепловой расчет двигателя, при выбранных условиях работы Range Extender. Разработаны компоновочные решения с использованием САПР.

Концепция Range Extender обеспечивает значительное увеличение пробега электроприводных транспортных средств за счет установки на электромобиль генераторной установки на базе ДВС. Таким образом решается ряд проблем электротранспорта, связанных с инфраструктурой и климатическими условиями, что особенно актуально на территории РФ.

Abstract

The key issue in this work is the adaptation of the Internal combustion engine to the Range Extender Electric Vehicle concept. The graduation work consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references, including foreign sources, and a graphic part on 8 sheets of A1 format.

The aim of the work is to develop a Range Extender platform for electric vehicles. The paper contains an overview of the prospects for the development of electric vehicles and hybrid vehicles. Based on the review, the concept of Range Extender is proposed. The target parameters of the Range Extender have been calculated. The design part contains the necessary calculations, including the thermal calculation of the internal combustion engine, for the selected operating conditions of the Range Extender. Layout solutions using CAD have been developed.

The Range Extender concept increases the mileage of electric vehicles by installing an electric generator based on an internal combustion engine. This solves the problems of electric transport related to infrastructure and climatic conditions, which is relevant on the territory of the Russian Federation.

Содержание

Введение.....	5
1 Состояние вопроса	6
1.1 Перспективы развития электротранспорта	6
1.2 Перспективы развития удлинителей пробега для электромобилей.....	9
2 Выбор концепции Range Extender	16
2.1 Концепция гибридного автомобиля.....	16
2.2 Анализ применения Range extender	21
3 Предварительные расчёты целевых параметров Range Extender.....	28
3.1 Тепловой расчет параметров силового агрегата.....	28
3.2 Расчет радиатора охлаждения двигателя.....	36
3.3 Расчет поликлиновой передачи	38
5 Компоновочные решения для Range Extender	43
5.1 Компоновка RE мощностью 7кВт.....	43
Заключение	53
Список используемых источников.....	54

Введение

Современные реалии и тенденции перспективного развития автомобильной промышленности направлены на замену привычного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), работающего на углеродном топливе, более экологичными силовыми агрегатами, работающими на электрической энергии.

Практически все крупные европейские автопроизводители анонсировали отказ в ближайшее время от применения ДВС и переход на электродвигатели с применением аккумуляторных батарей. Российские автопроизводители (ВАЗ, КАМАЗ, ГАЗ) уже имеют в своей линейке электрические версии своих продуктов. Кроме уже устоявшихся автоконцернов многие стартапы пытаются создать свои конкурентные продукты (ZETTA, CML и др.), направленные на поддержание устойчивой мобильности при введении жестких законодательных мер, направленных на снижение токсичности и выбросов CO₂.

Однако для полного перехода на электротягу существует ряд серьезных препятствий. Основными негативными факторами являются

- уровень развития инфраструктуры электрозарядных станций;
- климатические условия (период с низкими температурами);
- большие расстояния между населенными пунктами.

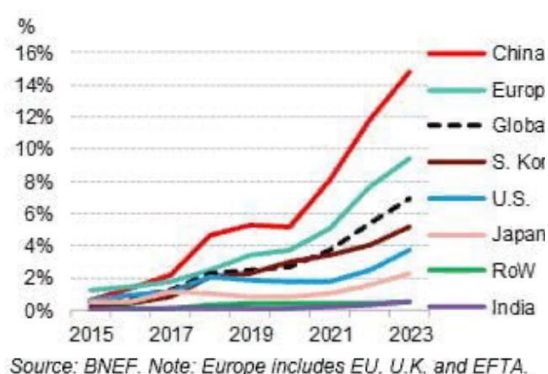
Одним из возможных решений указанных выше проблем может являться применение Range Extender (удлинителя пробега). Суть технического решения заключается в установке на борту автомобиля электроагрегата, на базе поршневого двигателя внутреннего сгорания, обеспечивающего подзарядку аккумуляторных батарей, при этом отпадает необходимость в их большом количестве, что снижает стоимость и вес электромобиля в целом.

Таким образом концепция Range Extender является актуальной и может стать толчком в развитии электротранспорта в РФ.

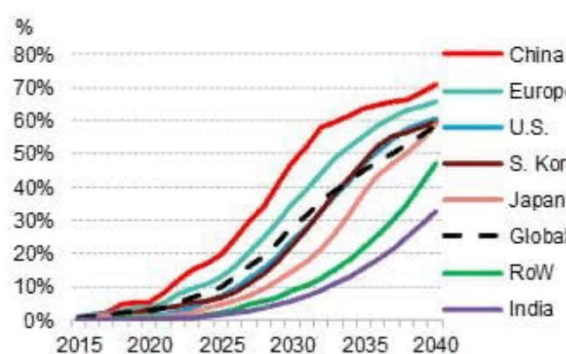
1 Состояние вопроса

1.1 Перспективы развития электротранспорта

Долгосрочные прогноз развития мирового рынка электротранспорта, даже с учетом последствий COVID-19, является положительным [1]. Это объясняется, прежде всего, тем что основные затраты на проектирование, разработку новых перспективных технологий, а также затраты на технологическое обеспечение и запуск производств предприятия уже понесли. Отложенные в краткосрочной перспективе запуск производств некоторых моделей электромобилей, скорее всего, не повлияют на развитие электротранспорта в длительной перспективе. По оценкам специалистов [1,2] к 2025 году продажи электромобилей могут достигнуть величины 10% от мировых продаж легковых автомобилей, к 2030 году – 28 % и к 2040 году – 58%. На рисунке 1 представлены краткосрочный до 2023 года и долгосрочный до 2040 года прогнозы по выпуску электромобилей. Из рисунка можно видеть, что начиная с 2017 года лидером по производству электромобилей является Китай. На втором и третьем месте соответственно находится Евросоюз и США.



а)



б)

Рисунок 1 – Краткосрочный а) и долгосрочный б) прогноз выпуска электромобилей в мире [1]

Стоимость новых электромобилей и автомобилей с классическим двигателям внутреннего сгорания (ДВС) по прогнозам сравниваются к середине 2020-х годов. Однако, из-за экономических и политических факторов, в различных странах эти сроки варьируются в довольно широком диапазоне, в частности в Японии эти сроки отодвигаются вплоть до 2030 года. Следует отметить, что наибольший прогресс по замещению автомобилей с ДВС наблюдается в сегменте грузовых и легких коммерческих автомобилей.

Рынок Китая и Европы в ближайшие 10 лет составят около 70% всех продаж электромобилей [1]. Интенсивное развитие этого направления в указанных странах обусловлено введением в Китае специальной кредитной программы на приобретаемые электромобили, а в Европе введением жестких мер и правил на ограничение выбросов CO₂ (углекислого газа). Кроме этого, в указанных странах действуют программы по ограничению использования традиционных автомобилей в городской черте. В частности, в Лондоне, Париже, Сеуле и других городах развивается политика Car-free. Программа предполагает различные варианты запрета автомобилей в городской среде. Различными запретами и поощрениями людей стимулируют пересаживаться с личного транспорта на общественный. Этому способствует развитая городская инфраструктура, в том числе выделенные полосы для велосипедов. В некоторых городах запрещен въезд в центр города на автомобиле с бензиновым и дизельным двигателем. Вводятся налоговые льготы для владельцев электротранспорта. Открываются перспективные таксопарки, полностью состоящие из электромобилей

Продажи легковых автомобилей с двигателями внутреннего сгорания достигли пика в 2017 году. Сейчас продажи таких автомобилей уменьшается, но общий парк продолжит расти примерно до 2030 года [1].

К 2040 году на дорогах мира будет более 30% электромобилей, причем в Китае и Европе электромобилей будет более 50%.

На рисунке 2 представлены прогноз изменения соотношения различных автомобилей в мире (автомобилей с ДВС, автомобилей на топливных элементах и электромобилей).

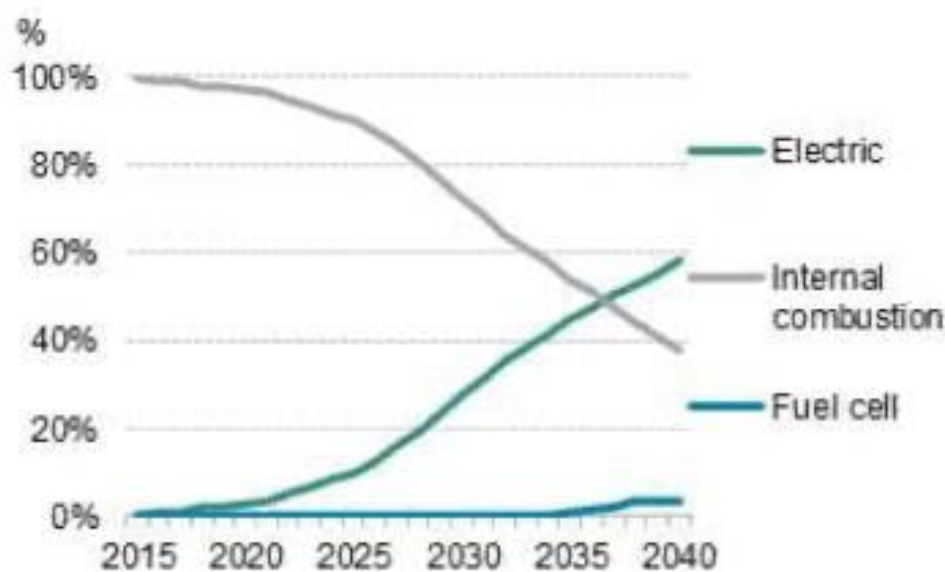


Рисунок 2 – Изменения соотношения в мире выпускаемых автомобилей с ДВС, автомобилей на топливных элементах и электромобилей [1].

Таким образом, можно сделать заключение о том, что мировой рынок электромобилей ежегодно увеличивается причем в ближайшие 10 лет объем рынка будет сопоставим с рынком традиционных автомобилей.

Российский рынок электромобилей слабо развит. Согласно данным аналитического агентства «АВТОСТАТ» (см. рисунок 3), объем российского рынка электромобилей по итогам 9 месяцев 2019 года в общей сложности составил 2646 единиц. Десятая часть от этого количества пришлась на новые электрокары (261 шт.). Соответственно оставшиеся 90% - это электромобили с пробегом (2 385 шт.).

Сдерживающим фактором продаж в России явилось прежде всего дороговизна электромобилей и ограничения производственных мощностей производителей, поставляющие основной объем в страны Японии, США и Евросоюза. Рынок электромобилей в РФ от общего транспорта на данный момент составляет 0,01%. Тем не менее, рынок растущий и связан также с

ограничениями наличия зарядной инфраструктуры (для его развития подписана дорожная карта с ПАО «Россети») и регуляторных факторов.



Рисунок 3 – Продажи электромобилей в РФ [4]

По прогнозам экспертов, также при снижении стоимости и увеличении хода электротранспорта на одной зарядке батареи ожидается рост продаж электротранспорта. При продаже электромобилей в ценовой категории менее 1 млн. руб. и пробегом более 500 км на одном заряде батареи эксперты предсказывают существенный рост продаж до 10% рынка, что соответствует текущей тенденции сегмента рынка электромобилей в ЕС. По данным экспертов при выполнении условий, описанных выше, рост сегмента возможен до 30 - 60 тыс. электромобилей в год.

1.2 Перспективы развития удлинителей пробега для электромобилей

Для массового развития производства электромобилей главным ограничением являются батареи, которые, в техническом плане, определяют

значительно меньший пробег транспортного средства на одной зарядке по сравнению с традиционным автомобилем, который дополнительно снижается, ввиду падения емкости на 30-40% в условиях низких температур, требуют продолжительное время для их зарядки; в экономическом плане, имеют высокую стоимость; с увеличением массы батарей происходит снижение общей эффективности транспортного средства.

Немаловажными ограничительными факторами также являются уровень развития инфраструктуры зарядных станций и ограниченность производства и доступности на планете драгоценных материалов, используемых при их производстве, в частности, кобальта и лития.

Стоимость батарей, по заявлениям автопроизводителей, может быть снижена в 1,5-2 раза к 2025 году с развитием объема их производства, а прогнозируемая себестоимость приблизится к 87 долл. США/кВтч [5].

Однако, повышение удельной емкости батарей остается пока нерешенным вопросом, требующего продолжительных временных рамок на проводимые исследования. На сегодняшний день будущее аккумуляторных батарей для гибридного и электротранспорта связывается в основном с литий-ионной технологией, которая бурно развивается в последние два десятилетия. Технология литий-ионного аккумулятора потенциально имеет возможность достижения удельной запасаемой энергии в 387-430 Вт·ч/кг [6,7]. Коммерчески производимые элементы достигают уровня в 200-250 Вт·ч/кг, перспективные к коммерциализации в 300-350 Вт·ч/кг.

Огромный интерес для производителей представляют исследования в области технологии литий-воздушных LiAir (Li_2O_2) и литий-серных Li-S аккумуляторов, практически возможный к настоящему времени уровень удельной запасаемой энергии, которых составляет 800 Вт·ч/кг (при теоретически возможной - 3463 Вт·ч/кг) и 600 Вт·ч/кг, соответственно.

Использование электролита в твердом состоянии, возможно, позволит в разработках преодолеть проблемы с перезарядкой менее дорогих материалов, таких как цинк, алюминий и сера. Это приведет к переходу на другую

технологии аккумуляторных батарей и снизит их конечную стоимость, например, для цинко-воздушных до 30-40 долл. США/кВтч. [5].

Среднее ежедневное расстояние вождения в европейских странах составляет от 25 миль (Великобритания) до 50 миль (Польша) [8]. Кроме того, только 19% автомобилей часто используются для поездок на дальние расстояния, но до 81% автомобилей используются для поездок на дальние расстояния. Это означает, что большинство автомобилей будут ездить на дальние расстояния, но нечасто [9]. Это подтверждается текущим трафиком, когда более 60% людей предпочитают путешествовать на автотранспорте на дальние расстояния (более 350 км). Социальный опрос также показывает, что только 35% семей имеют более одной машины, чтобы удовлетворить потребности всех диапазонов их поездок [10]. Противоречие между спросом на поездки и ежедневным использованием транспортного средства не может быть разрешено с помощью одного и того же современного электромобиля BEV, как минимум до 2030 года. Дополнительно следует отметить, что строительство зарядной инфраструктуры будет долгосрочным проектом, для реализации которого потребуются десятилетия, чтобы достичь нынешнего уровня бензиновой инфраструктуры.

Рассматриваемую задачу по увеличению пробега транспортного средства для нечастых длинных или продолжительных поездок, можно решить только имея дополнительный источник энергии на борту электромобиля – расширитель пробега (Extender Range Electric Vehicle, EREV). Range Extender (дословно – «удлинитель пробега»), представляющий собой компактную генераторную установку, его установка на электромобиль превращает тем самым его в упрощенный вариант гибридного транспортного средства с энергоустановкой последовательной схемы.

В концепции использования Range Extender на электрифицированном транспорте можно выделить следующие основные направления исследовательской деятельности в настоящее время:

– применение бортовых электрогенерирующих установок на базе топливных элементов.

– применение бортовых электрогенерирующих установок на базе двигателей внутреннего сгорания;

– применение бортовых электрогенерирующих установок на базе двигателей с внешним подводом теплоты;

Топливные элементы отлично вписываются в концепцию гибридного автомобиля, они имеют высокий КПД и практически нулевой выброс вредных веществ - вода из выхлопной трубы пригодна для питья. Однако есть и минусы, один из которых – хранение водорода на борту автомобиля. Водород храниться под очень высоким давлением, более 100 атмосфер, следовательно нужны дорогостоящие баллоны и аппаратура. Сами топливные ячейки все еще достаточно дороги для повсеместного применения.

В 2018 году в мире насчитывалось 11,2 тыс. легковых автомобилей на топливных элементах, 55% и 26% из которых приходилось, соответственно, на США и Японию.

В 2019 году на совещании в Токио министрами по водородной энергетике была поставлена цель - 10 миллионов автомобилей на топливных элементах, 10 тысяч заправочных станций в течение 10 лет до 2030 года - цель «10-10-10». Данные объемы продаж FCEV будут соответствовать примерно 3% мировых продаж автомобилей в 2030 году, а также почти 36% в 2050 году.

Установлено, что для хранения энергии дешевле использовать технологию топливного элемента, чем аккумуляторную батарею, но для подачи электроэнергии дешевле использование уже аккумуляторной батареи. Совместное использование позволяет компенсировать некоторые недостатки, среди которых длительность заправки, запас хода (существующие решения позволили обеспечить запас хода – 400-600 км, компания Toyota нацелена на обеспечение пробега в 620 миль) и др.

Среди конкурирующих технологий получения электроэнергии с помощью топливных элементов технология с протонообменной мембраной имеет наилучшие характеристики для дорожных транспортных средств. Топливные элементы с протонообменной мембраной (PEMFC) обладают высокой общей эффективностью, быстрым запуском, работают при низких температурах, нулевым выбросом регламентированных веществ, длительным сроком службы, простой конструкцией, небольшим объемом, наименьшим весом и устойчивы к коррозии [11, 12]. Однако стоимость протонообменной мембраны и платинового катализатора непомерно высока. По оценкам Департамента энергетики США коммерческая стоимость топливных элементов выпускаемых автомобилей на топливных элементах в настоящее время составляет 165 долл. США/кВт. Увеличение производства топливных элементов до 500 тыс. единиц в год может снизить их стоимость до 45 долл. США/кВт. Удельный показатели по мощности существующих конструкций составляет – 2,0-3,0 кВт/кг и до 3,5 кВт/л.

Проблема технологии топливных элементов это в первую очередь проблема инфраструктуры. Организация сети заправок водородом это создание целого комплекса по производству, транспортировке с нуля. Водород в существующих конструкциях автомобилей на топливных элементах (FCEV) хранится на борту в сжатом виде в баллонах под давлением 35-70 МПа или в криогенном сжатом состоянии при 35 МПа (BMW Group). По оценкам того же Департамента энергетики США коммерческая стоимость системы бортового хранения водорода при давлении 70 МПа в настоящее время составляет 21 долл. США/кВт, 52% стоимости которой определяется карбоновой нитью. Увеличение производства систем хранения до 500 тыс. единиц в год может снизить их стоимость до 15 долл. США/кВт. Удельный показатели по запасаемой энергии существующих коммерческих конструкций баллонов III-IV поколений (35-70 МПа) составляет – 1200-1800 Вт*ч/кг и 500-770 Вт*ч/л, для систем хранения жидкого водорода - 2000 Вт*ч/кг и 1200 Вт*ч/л [13].

Сегодня автомобили на топливных элементах стоят примерно на 70% дороже, чем BEV в сегменте больших легковых автомобилей с тем же запасом хода. Таким образом, снижение стоимости самого автомобиля является ключом к обеспечению ценовой конкурентоспособности.

Более серьезной проблемой для автомобилей на топливных элементах, по сравнению с BEV, является отсутствие водородных заправочных станций и высокая стоимость заправки водородом, которая в настоящее время составляет в США от 13 до 16 долл./кг H₂. Создание водородных инфраструктур требует огромных капитальных вложений.

С учетом рассмотренного, общая стоимость владения автомобилем на топливных элементах в сегменте городских легковых транспортных средств (А/В) примерно на 200% дороже, чем BEV автомобилем с тем же запасом хода, и может сравниться не ранее 2040 года [14].

Развитие FCEV требует значительного увеличения водородной инфраструктуры (заправки, производство и т.п.) и снижения стоимости транспортных средств за счет массового развития водородных технологий и может рассматриваться к коммерческому применению не ранее 2040 года.

По сей день двигатель внутреннего сгорания (ДВС) остается основным источником энергии в автомобиле, преобразуя химическую энергию сгорания топлива в механическую работу, популярность которого объясняется высокими энергетическими, экологическими и экономическими характеристиками, высокими ресурсными показателями и отлаженной технологией изготовления. Кроме того, ДВС обладает высокой устойчивостью работы в переходных режимах и в режимах со снятием частичной мощности, однако при малых нагрузках эффективность его использования снижается. В составе гибридных силовых установок ДВС работает, как правило, на оптимальных режимах, обеспечивающих минимальный расход топлива.

В качестве EREV автомобильная промышленность в настоящее время в преобладающих случаях рассматривает поршневые двигатели внутреннего

сгорания (ПДВС). В то же самое время в 2022 году в качестве EREV компания Mazda планирует применить для серийного кроссовера роторно-поршневой двигатель внутреннего сгорания, который обладает лучшими удельными характеристиками по массе, чем ПДВС.

В большинстве случаев для энергоустановок EREV используются бензиновые двигатели по причине большого опыта в их производстве, высоких оборотов, высокой мощности, отработанной системы нейтрализации отработавших газов и малого веса. Дизельные двигатели существенно тяжелее, дороже в производстве благодаря высокой стоимости системы топливоподачи и нейтрализации, а также высокой металлоемкости. Самое главное, что установки данного типа предназначены для резервного энергоснабжения электромобилей, а не в качестве первичных источников энергии, поэтому экономия топлива и экология отходят на второй план, уступая массогабаритным показателям, т.е. компактности установки и ее массе, ведь установка постоянно находится на борту и на ее перевозку тратится электрическая энергия.

Технология производства бензиновых ПДВС является самой массовой в мире, тем самым обеспечивая низкую стоимость производства двигателей, поэтому использование поршневого ДВС в качестве EREV будет наиболее приемлемым решением, исходя из сегодняшнего уровня развития техники и технологий в России.

Учитывая результаты прогнозных исследований, изложенные выше, тематика Extender Range Electric Vehicle на базе ПДВС является весьма актуальной сегодня, т.к. подобные генерирующие системы могут выступать в качестве основы бортовых энергоустановок не только электромобилей, но и гибридных транспортных средств, в том числе использующих технологию внешней подзарядки со всеми ее возможностями интеграции в состав централизованных или локальных электрических сетей.

2 Выбор концепции Range Extender

2.1 Концепция гибридного автомобиля

Практически все крупные европейские автопроизводители анонсировали отказ в ближайшее время от применения ДВС и переход на электродвигатели с применением тяговых батарей [2]. Российские автопроизводители (ВАЗ, КАМАЗ, ГАЗ) уже имеют в своей линейке электрические версии своих продуктов. Кроме уже устоявшихся автоконцернов многие стартапы пытаются создать свои конкурентные продукты (ZETTA, CML и др.), направленные на поддержание устойчивой мобильности при введении жестких законодательных мер, направленных на снижение токсичности и выбросов CO₂.

Однако для полного перехода на электротягу существует ряд серьезных препятствий, особенно на территории РФ. Основными негативными факторами являются:

- уровень развития инфраструктуры электростанций;
- климатические условия (достаточно длительный период времени с постоянными низкими температурами);
- большие расстояния между населенными пунктами.

Решением данных проблем может стать применение совместно с электродвигателем традиционного ДВС. При этом автопроизводители уже используют два варианта использования:

- ДВС как полноценный силовой агрегат, работающий в паре с электродвигателем попеременно, в зависимости от выбранного режима;
- ДВС используется как зарядное устройство для подзарядки тяговых батарей.

Первый вариант – ДВС, работающий в паре с электродвигателем – уже достаточно давно присутствует на рынке: Toyota (модели Prius и RAV4),

Hyundai (модель Ioniq), Mitsubishi (модель Outlander PHEV), Lexus (модель RX450h) и некоторые другие, также о перспективных проектах в ближайшем будущем заявили компании Ford (модель Transit), Mercedes-Benz (модель eSprinter), УАЗ (Профи-гибрид).

Одна из концепций такого гибридного автомобиля представлена на рисунках 4 и 5.

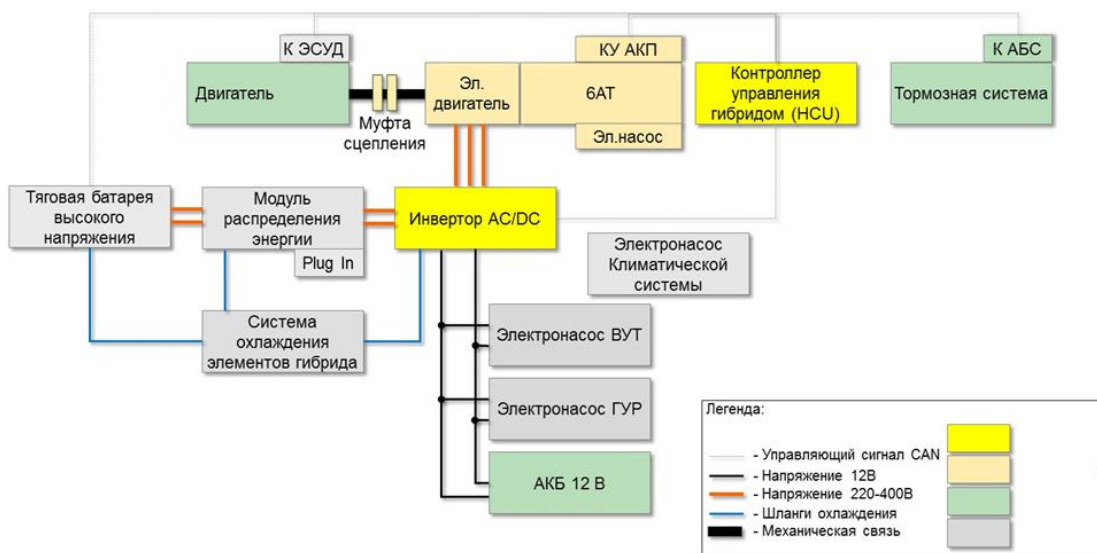


Рисунок 4 – Концепция гибридного автомобиля. Принципиальная схема основных компонентов ГСУ [16]

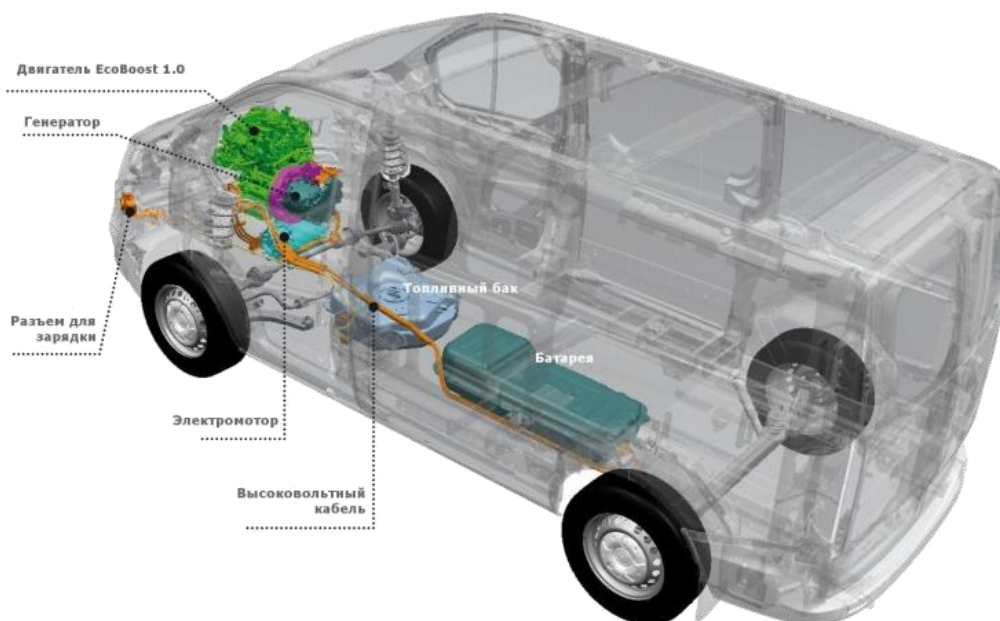


Рисунок 5 – Перспективная схема компоновки Ford Transit [15, 16]

Такая конструкция позволяет эксплуатировать транспортное средство в любых климатических и экологических зонах, снизить расход топлива и выбросы CO₂, увеличить пробег. Но имеет и серьезные недостатки:

- увеличение массы автомобиля;
- снижение грузоподъемности, что достаточно критично для коммерческого транспорта;
- увеличение стоимости эксплуатации;
- увеличение стоимости продукта.

Второй вариант – применение ДВС как зарядного устройства для батарей – позволит решить данные проблемы, либо значительно снизить негативный эффект, сохранив положительные факторы.

Удлинитель пробега Range Extender представляющий собой компактную генераторную установку. Установка Range Extender на электромобиль превращает его в упрощенный вариант гибридного транспортного средства с энергоустановкой последовательной схемы. Принципиальная схема представлена на рисунке 6

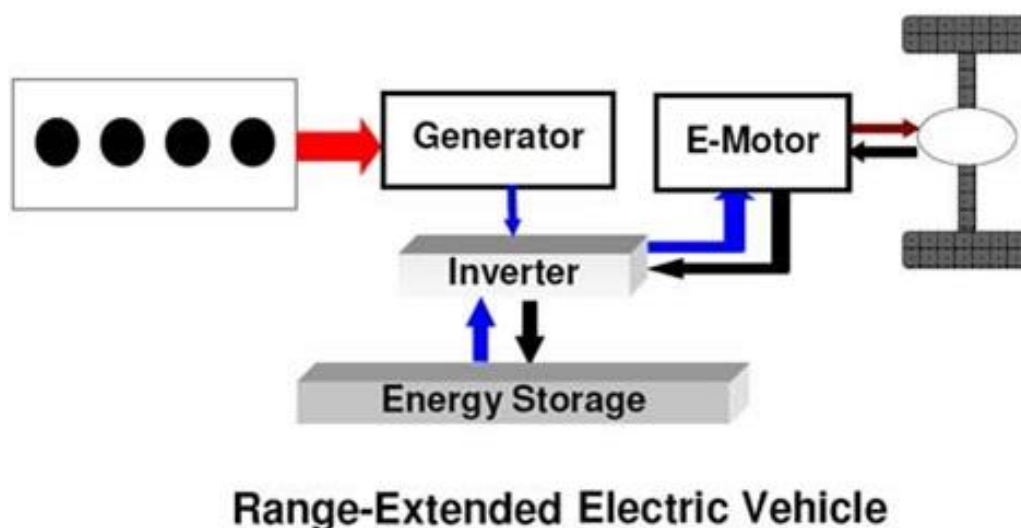


Рисунок 6 – Принципиальная схема Range Extender [2]

Сегодня существует несколько подходов при реализации концепции применения удлинителя пробега электромобиля Range Extender. Первый

подход: полученная энергия используется для подзарядки аккумуляторов транспортного средства. Другой подход - использование полученной энергии непосредственно для питания тягового электродвигателя транспортного средства. Указанные подходы имеют свои преимущества и недостатки. В частности, второй подход предполагает наличие на транспортном средстве ДВС значительной мощности.

В случае применения ДВС в качестве зарядного устройства от самого двигателя не требуются мощностные показатели. Возможно применение относительно маломощного и малообъемного двигателя, что положительно скажется на весовых показателях и возможностях компоновки в автомобиле. Режим работы двигателя в данном случае только один, без выхода на пиковые нагрузки. Это позволит применить оптимальные настройки и исключить из конструкции достаточно дорогостоящие элементы систем управления двигателем, гашения вибраций и детонаций, систем впуска и выпуска. Данная система может быть модульно установлена с небольшими доработками в практически любой электромобиль как дооборудование (опция).

Ряд автоконцернов – в основном Европейские – BMW, AUDI - уже разрабатывают комплектации автомобилей с удлинителем пробега (Range Extender) в заводской комплектации (рисунок 7, 8).

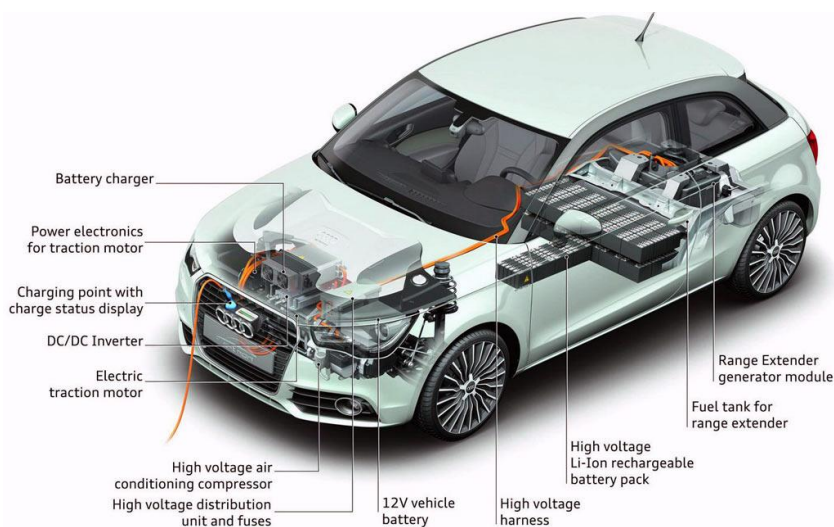


Рисунок 7 - Схема компоновки автомобиля AUDI A1 e-tron [17]



Рисунок 8 - Схема компоновки автомобиля BMW i3 [18]

Таблица 1 – Характеристики выпускаемых серийно автомобилей [17,18]

AUDI A1 e-tron	<p>Мощность электропривода: 85 кВт</p> <p>Емкость аккумуляторных батарей: 13,3 кВт ч</p> <p>Пробег автомобиля на аккумуляторных батареях: 50 км</p> <p>Мощность удлинителя пробега: 25 кВт</p> <p>Общий пробег автомобиля с использованием удлинителя пробега (Range Extender): 250 км</p>
BMW i3	<p>Мощность электропривода: 125 кВт</p> <p>Емкость аккумуляторных батарей: 22 кВт ч</p> <p>Пробег автомобиля на аккумуляторных батареях: 160 км</p> <p>Мощность удлинителя пробега: 25 кВт</p> <p>Общий пробег автомобиля с использованием удлинителя пробега (Range Extender): 300 км</p>

Особенностью рассмотренных выше электромобилей является относительно большая энерговооруженность, что определяет значительную стоимость таких автомобилей.

2.2 Анализ применения Range extender

Компания MAHLE начиная с 2010 года ведет разработки в направлении создания Range Extender и оптимизации его работы в составе электромобиля [19, 20, 21, 22]. Концепция применения Range Extender предложенная компанией представлена на рисунке 9.

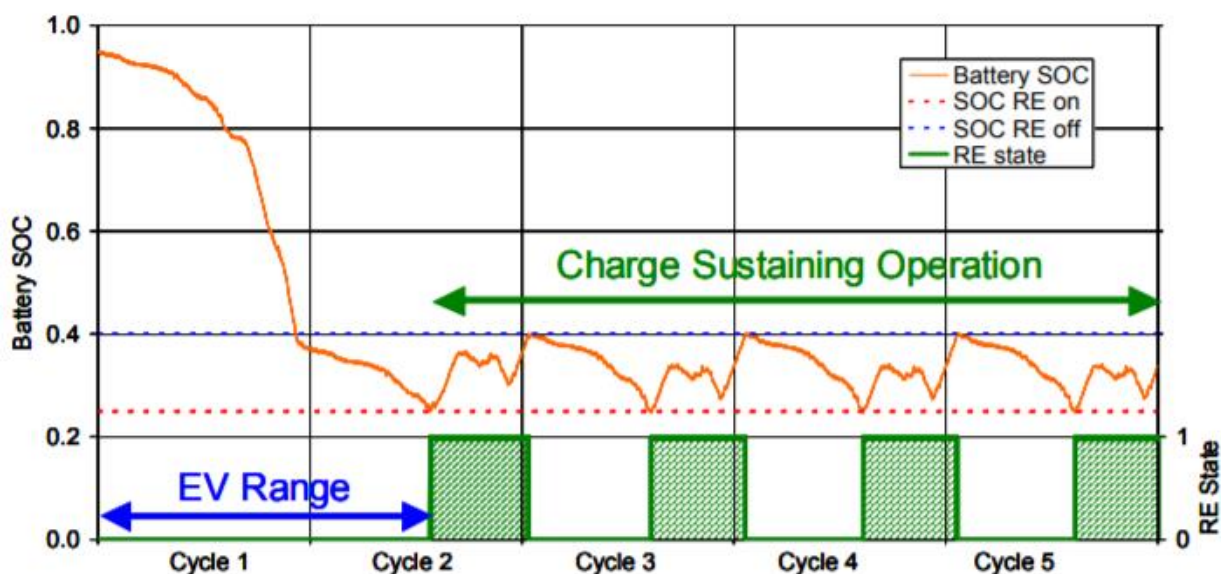


Рисунок 9 – Предложенная концепция компанией MAHLE [22]

При формировании концепции учитывались необходимая мощность для движения автомобиля с заданной скоростью (см рисунок 10). При этом принятыми параметрами было:

- масса транспортного средства - 1500 кг;
- максимальная скорость транспортного средства - 120 -160 км/ч
- пробег на аккумуляторных батареях - не менее 65 км;
- мощность электрического привода - не более 100 кВт
- емкость аккумуляторных батарей - 15,2 кВт ч.

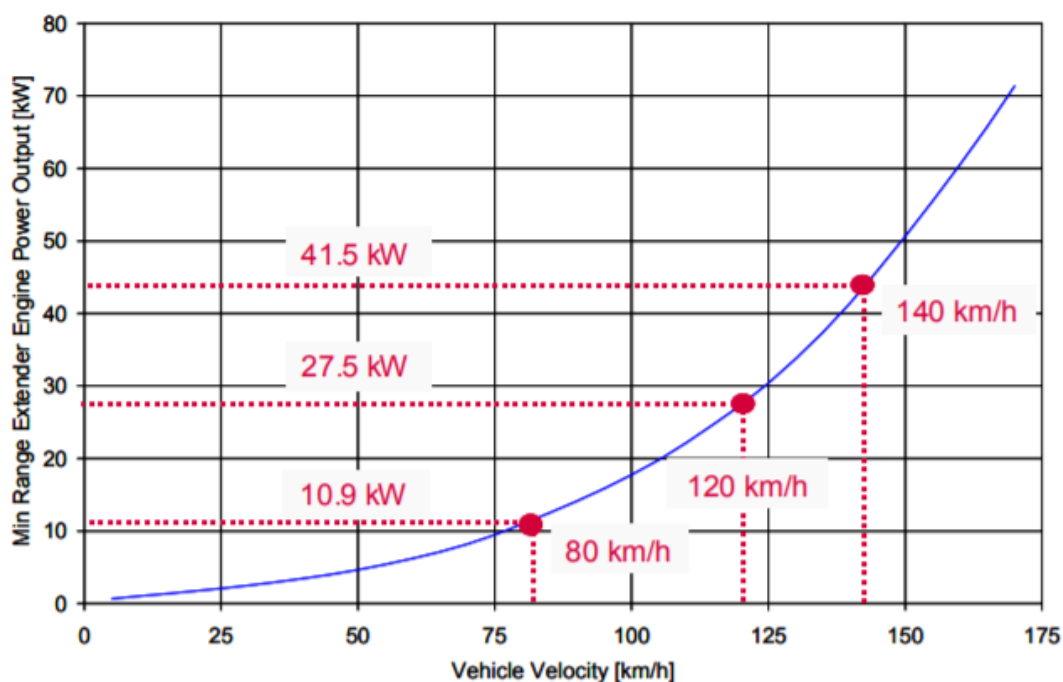


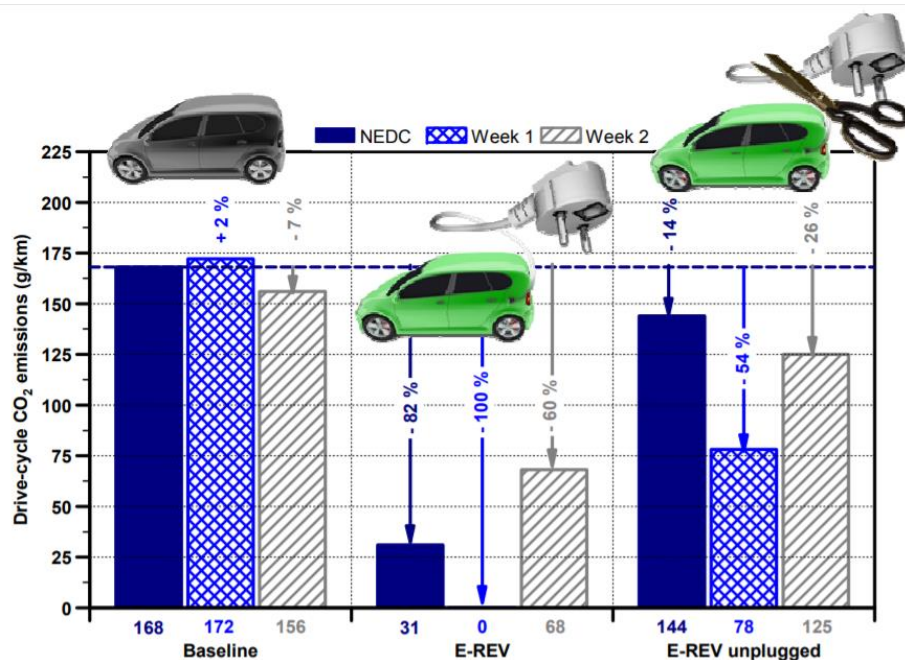
Рисунок 10 – Зависимость требуемой минимальной мощности Range Extender при движении с заданной скоростью [22]

По результатам проведенных исследований были получены следующие данные по снижению выбросов CO₂ (см. рисунок 11). На рисунке приняты следующие обозначения:

- NEDC (NEW EUROPEAN DRIVING CYCLE) – Цикл, созданный в Европе в 2000г. Применяется для городского и загородного движения, включает в себя цикл из 11 км и 12 остановок.

- Week1 – это типовой цикл имитирующий движение автомобиля в городе и пригороде, с двумя относительно короткими поездками в день (см. рисунок 12).

- Week2 – аналогичный цикл Week1, отличающейся большей длиной поездки и количеством поездок в день.



Baseline – автомобиль с бензиновым двигателем;
 E-REV – электромобиль с удлинителем пробега и возможностью зарядки аккумуляторных батарей от сети;
 E-REV unplugged - электромобиль с удлинителем пробега и без возможности зарядки аккумуляторных батарей от сети.

Рисунок 11 – Зависимость снижения выбросов CO₂ при различных условиях движения автомобиля [22]

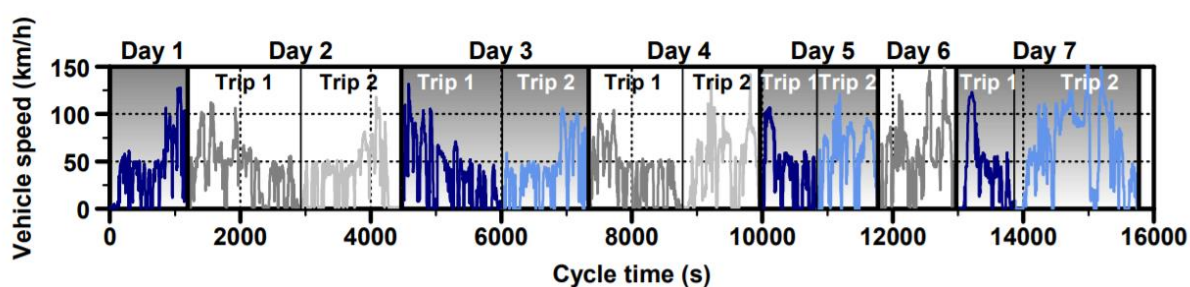
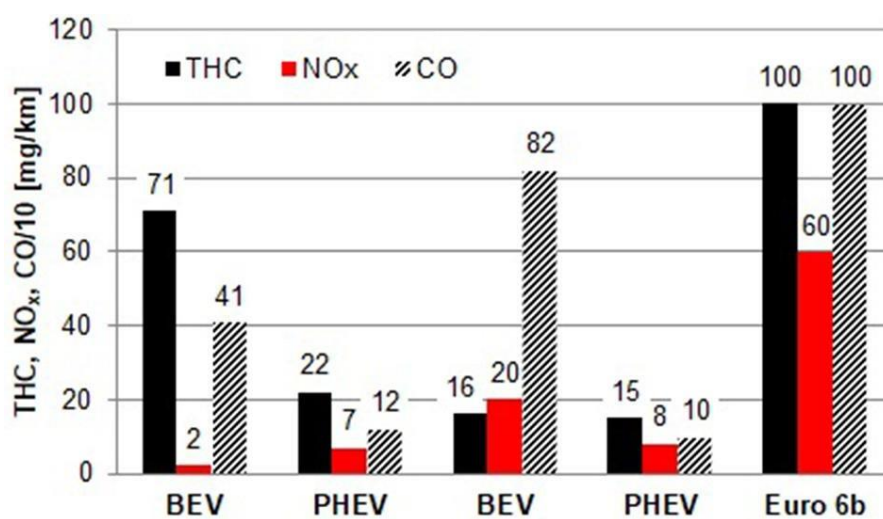


Рисунок 12 - Типовой цикл имитирующий движение автомобиля в городе и пригороде, с двумя относительно короткими поездками в день

Однако, проведенные дополнительно исследования по оценке токсичности электромобиля (BEV, Battery Electric Vehicle) с удлинителем пробега и гибридным автомобилем (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle)

группой ученых из Познаньского технологического университета (Poznan University of Technology, Poland) пришли к несколько иным выводам [23].

Испытания по определению выбросов токсичных компонентов на автомобилях PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) и BEV (Battery Electric Vehicle), в которых двигатель внутреннего сгорания использовался в качестве расширителя пробега показали, что при движении автомобиля по циклу RDE (Real Driving Emissions) автомобили выполнили требования правил ЕВРО 6b (см. рисунок 13). Автомобили PHEV в ходе испытаний показали себя, как более экологичный транспорт.



BEV (Battery Electric Vehicle) с расширителем пробега Range Extender

PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)

Рисунок 13 - Сравнение выбросов токсичных компонентов [23]

Определенный интерес представляет доклад, представленный на конференции «Electromobility+» по теме «Electric Vehicle with Range Extender as a Sustainable Technology» (Электрический транспорт с удлинителем пробега как жизнеспособная технология).

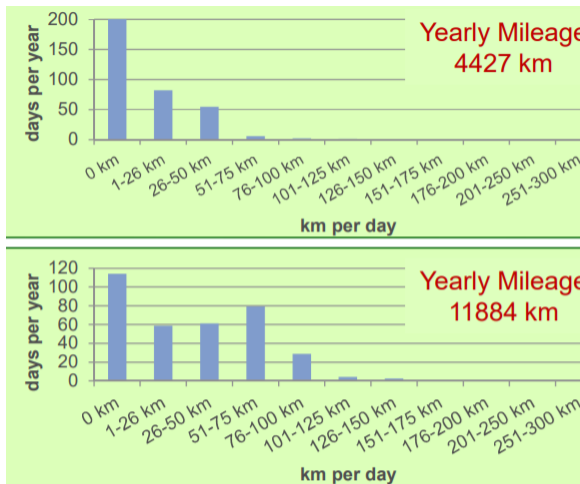


Рисунок 14 – Минимальный и максимальный годовой пробег автомобиля (Франция)



Рисунок 15 – Минимальный и максимальный годовой пробег автомобиля (Германия)

Основная цель доклада: оценка перспектив электромобилей с удлинителем пробега. В докладе рассматривались следующие вопросы:

- оптимизация соотношения размер/стоимость аккумуляторов;
- гарантированный пробег автомобиля.

На рисунках 14 – 16 представлены некоторые основные графики, представленные в докладе. В частности на рисунке 14 15 представлены статистические данные по годовому пробегу автомобилей в таких странах как Германия и Франция.

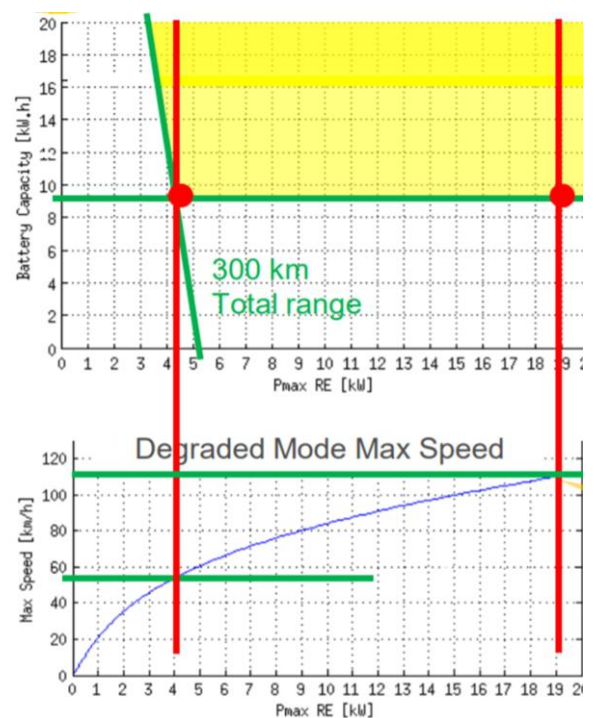
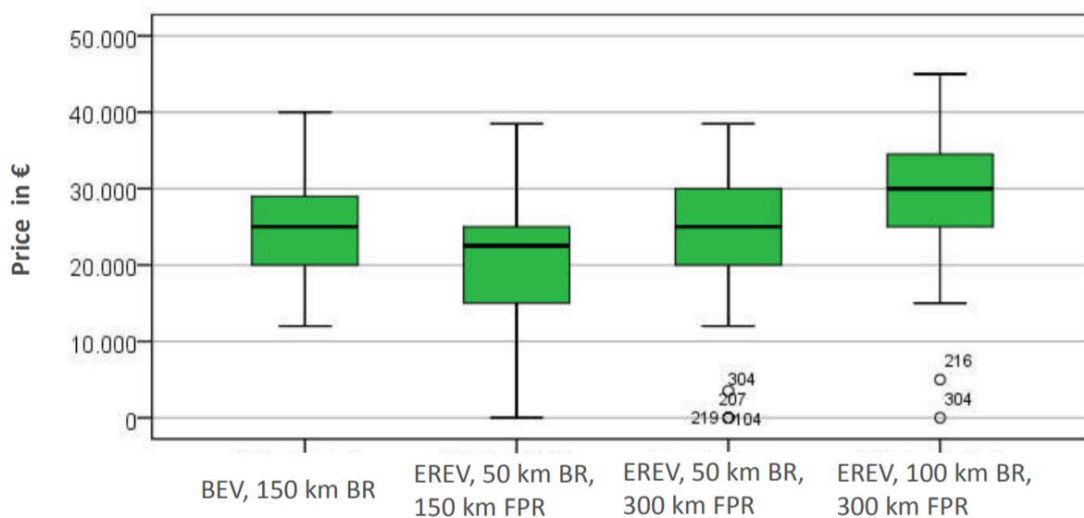


Рисунок 16 – Зависимость необходимой мощности RE от скорости движения и емкости аккумуляторных батарей (условие пробег электромобиля составляет 300 км) [24]

Из рисунков 14 и 15 можно видеть, что максимальный ежедневный пробег электромобиля не превышает 300 км.

На рисунке 17 представлено оценка стоимости электромобилей выполненных по различным схемам.



BEV – электромобиль без RE; EREV – электромобиль с RE;
FPR – общий пробег автомобиля; BR – пробег автомобиля на одном заряде аккумуляторов

Рисунок 17 - Оценка стоимости электромобилей [24]

Из представленного рисунка видно, что с точки зрения стоимости автомобиля с сохранением пробега 300 км является автомобиль:

- запас хода на аккумуляторных батареях – 50 км;
- RE обеспечивает дополнительный пробег электромобиля 100 км. (при мощности RE – 4-5 кВт) или 250 км. (при мощности RE – 19 – 20 кВт).

Основные параметры удлинителей пробега для некоторых типов электротранспорта представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры удлинителя пробега (RE)

	L7-024D/ L7-024D (RE)	L7-024/ L7-024 (RE)	L7-0241/ L7-0241 (RE)
Привод автомобиля	Передний	Передний	AWD 4x4
Мощность электрического привода, кВт	15	15	15
Емкость батарей, кВтч	10/5	10/5	20/10
Мощность RE, кВт	3-5	5-7	5-7
Сухой вес RE, кг	-/70	-/100	-/100
Пробег, км	250	350	450

На основании выше рассмотренных материалов были определены требуемые параметры удлинителя пробега. RE должен обеспечивать постоянную выходную мощность 7 кВт, при этом иметь массу 70-100 кг. Запаса топлива должно хватать на 100-150 км после расхода основного заряда батарей. При таких параметрах стоимость автомобиля с RE будет наименьшей, а выгода от использования электропривода в городских условиях максимальной.

3 Предварительные расчёты целевых параметров Range Extender

3.1 Тепловой расчет параметров силового агрегата

Состав топлива по АИ-92-К4(К5) по ГОСТ 32513 или марки АИ-95-К4(К5) по ГОСТ 32513 [25].

Элементарный средний состав и молекулярная масса топлива [26]:

$$C = 0,855; H = 0,145 \text{ и } m_T = 115 \text{ кг/кмоль.}$$

Низшая теплота сгорания топлива.

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

Параметры рабочего тела. Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива:

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

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

Примем коэффициент избытка воздуха из диапазона $\alpha = 1$.

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

Количество отдельных компонентов продуктов сгорания при $K=0,5$

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

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

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

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

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

Общее количество продуктов сгорания:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{CO} + M_{H_2O} + M_{H_2} + M_{N_2} \text{ кмоль пр. сг/кг топл.} \quad (8)$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Состав и общее количество продуктов сгорания.

M , кмоль/кг топл.	n , об/мин			
	1500	3000	4500	6000
M_1	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

Параметры окружающей среды и остаточные газы.

Давление окружающей среды: $P_0 = 0.1 \text{ МПа}$

Температура окружающей сред: $T_0 = 293 \text{ К}$

Принятые значения температуры и давления остаточных газов приведены в таблице 4

Таблица 4 – Значения температуры и давления остаточных газов

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

Расчет процесса впуска. Плотность заряда на впуске:

$$\rho_k = p_k \cdot 10^6 / (R_B T_k); \text{кг} / \text{м}^3, \quad (9)$$

где $R_B = 287 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{град}$ - удельная газовая постоянная для воздуха.

Потери давления на впуске. В соответствии со скоростными режимами работы двигателя и при условии качественной обработки внутренней поверхности впускной системы можно принять $\beta^2 + \xi_{вп} = 2,8$ и $\omega_{вп} = 70 \text{ м/с}$.

Тогда: $A_n = \omega_{вп} / n_N$

$$\Delta p_a = (\beta^2 + \xi_{\text{вп}}) A_n^2 n^2 \rho_0 \cdot 10^{-6} / 2 \text{ МПа.} \quad (10)$$

Давление в конце впуска: $p_a = p_0 - \Delta p_a$,

Коэффициент остаточных газов. При определении γ_r для двигателя принимается коэффициент очистки $\varphi_{\text{оч}} = 1$, и коэффициент дозарядки на номинальном скоростном режиме $\varphi_{\text{доз}} = 1,1$.

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \frac{\varphi_{\text{оч}} p_r}{\varepsilon \varphi_{\text{доз}} p_a - \varphi_{\text{оч}} p_r} \quad (11)$$

$$\text{Температура в конце впуска: } T_a = (T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r) / (1 + \gamma_r) \quad (12)$$

$$\text{Коэффициент наполнения: } \eta_V = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \frac{1}{\varepsilon - 1} \frac{1}{p_0} (\varphi_{\text{доз}} \varepsilon p_a - \varphi_{\text{оч}} p_r) \quad (13)$$

Результаты расчетов параметров свежего заряда на впуске приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры свежего заряда на впуске.

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
$\varphi_{\text{доз}}$	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

Процесс сжатия. Средний показатель адиабаты сжатия K_I при степени сжатия $\varepsilon = 9,7$ (степень сжатия определялась как среднестатистическая величина типовых двигателей внутреннего сгорания рабочим объемом от 250 см³ до 650 см³) и рассчитанных значениях T_a определяется по графику, а средний показатель политропы сжатия n_1 принимается несколько меньше K_I .

$$\text{Давление в конце сжатия: } p_c = p_a \varepsilon^{n_1} \quad (14)$$

$$\text{Температура в конце сжатия: } T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1} \quad (15)$$

Средняя мольная теплоемкость в конце сжатия:

а) свежей смеси

$$(m c_v)_{t_0}^{t_c} = 20,600 + 0,002638 t_c \quad (16)$$

где $t_c = T_c - 273 \text{ C}^0$;

б) остаточных газов

$(mc''_v)_{t_0}^{t_c}$ - определяется методом экстраполяции

в) рабочей смеси

$$(mc'_v)_{t_0}^{t_c} = \frac{1}{1 + \gamma_r} \left[(mc_v)_{t_0}^{t_c} + \gamma_r (mc''_v)_{t_0}^{t_c} \right] \quad (17)$$

Подсчитанные по приведенным формулам значения параметров, характеризующих состояние рабочей смеси в конце процесса сжатия приведены в таблице 6.

Таблица 6– Параметры конца сжатия

n , об/мин	1500	3000	4500	6000
n_1	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 , °С	496	497	514	555
$(mc_v)_{cc}$, кДж/кг	21,909	21,912	21,958	22,066
$(mc_v)_{oz}$, кДж/кг	24,235	24,232	24,196	24,108
$(mc_v)_{pc}$, кДж/кг	22,000	22,000	22,060	22,190

Процесс сгорания. Коэффициент молекулярного изменения горючей $\mu_0 = M_2 / M_1$ и рабочей смеси $\mu = (\mu_0 + \gamma_r) / (1 + \gamma_r)$.

Количество теплоты, потерянное вследствие химической неполноты сгорания топлива:

$$\Delta H_u = 119950(1 - \alpha) \cdot L_0 \quad (18)$$

Теплота сгорания рабочей смеси:

$$H_{раб.см} = (H_u - \Delta H_u) / [M_1(1 + \gamma_r)] \quad (19)$$

Средняя молярная теплоемкость продуктов сгорания:

$$\begin{aligned} (mc''_v)_{t_0}^{t_c} = & (1 / M_2) [M_{CO_2} (mc''_{vCO_2})_{t_0}^{t_c} + M_{CO} (mc''_{vCO})_{t_0}^{t_c} + M_{H_2O} (mc''_{vH_2O})_{t_0}^{t_c} + \\ & + M_{H_2} (mc''_{vH_2})_{t_0}^{t_c} + M_{N_2} (mc''_{vN_2})_{t_0}^{t_c}] \end{aligned} \quad (20)$$

Величина коэффициента использования теплоты ξ_z принимается в соответствии с рекомендациями в диапазоне от 0,70 до 0,95.

Температура в конце видимого процесса сгорания $\xi_z H_{\text{да.д.н.}} + (mc_v)_{t_0}^t t_c = \mu (mc_v)_{t_0}^t t_z$.

откуда $T_z = t_z + 237 = 2440,6 + 273 = 2713,6\text{K}$;

Максимальное давление сгорания теоретическое: $p_z = p_c \mu T_z / T_c$ (21)

Максимальное давление сгорания действительное: $p_{z\text{д}} = 0,9 \cdot p_z \text{ МПа}$ (22)

Степень повышения давления: $\lambda = p_z / p_c$ (23)

Результаты расчетов по приведенным выше формулам приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры процесса сгорания.

n , об/мин	1500	3000	4500	6000
μ_o	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_{pc} , кДж/кмоль раб.см	80360	80376	79809	78493
ξ	0,85	0,95	0,93	0,80
t_{z_2} , °С	2511	2726	2681	2402
T_{z_2} , К	2784	2999	2954	2675
P_z , МПа	8,47	8,56	7,33	5,21
$P_{z\text{д}}$, МПа	7,62	7,70	6,60	4,69
λ	3,80	4,09	3,94	3,39

Процессы расширения и выпуска. Средний показатель адиабаты расширения k_2 определения по номограмме 1,27 при заданной степени сжатия для соответствующих значений α и T_z :

Давление и температура в конце процесса расширения:

$$p_b = p_z / \varepsilon^{n_2} \text{ и } T_b = T_z / \varepsilon^{n_2-1} \quad (24)$$

Проверка ранее принятой температуры остаточных газов:

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{p_b / p_r}} \quad (25)$$

Значения давления и температуры в конце расширения, а так же уточненные значения температуры остаточных газов приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Температура и давление в конце процесса расширения, температура остаточных газов

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

Температура остаточных газов принятая в расчете не превышает 5% погрешности.

Параметры двигателя и рабочего цикла. Индикаторные параметры рабочего цикла.

Теоретическое среднее индикаторное давление

$$p_i' = \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \left[\frac{\lambda}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right] \text{ МПа}; \quad (26)$$

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

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

$$\text{Индикаторный коэффициент полезного действия: } \eta_i = \frac{p_i \cdot l_0 \cdot \alpha}{H_u \cdot \rho_0 \cdot \eta_v}; \quad (27)$$

$$\text{Индикаторный удельный расход топлива: } g_i = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_i} \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)} \quad (28)$$

Значения индикаторных параметров рабочего цикла в таблице 9.

Таблица 9 – Индикаторные параметры рабочего цикла

n , об/мин	1500	3000	4500	6000
p_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

Эффективные показатели двигателя. Для определения среднего

давления механических потерь необходимо оценить среднюю скорость поршня. В бензиновых двигателях средняя скорость поршня обычно составляет величину, не превышающую 20 м/с, при частотах вращения двигателя до 6000 об/мин [26, 27, 28] при этом, как правило выполняется условие $S/D \leq 1$, то есть двигатели являются короткоходными. Ход поршня одноцилиндровых двигателей с принудительным зажиганием редко превышает величину 90 мм. Среднее давление механических потерь для таких типов двигателей определяется как:

$$p_M = 0,034 + 0,0113 \cdot v_{п.ср}, \quad (29)$$

где v_n , средняя скорость поршня.

$$\text{Среднее эффективное давление: } p_e = p_i - p_M \text{ МПа;} \quad (30)$$

$$\text{Механический к.п.д.: } \eta_M = p_e / p_i \quad (31)$$

$$\text{Эффективный к. п. д.: } \eta_e = \eta_i \eta_M \quad (32)$$

$$\text{Эффективный удельный расход топлива: } g_e = \frac{3600}{H_u \eta_e} \text{ г/кВт}\cdot\text{ч.} \quad (33)$$

Рассчитанные по приведенным формулам значения эффективных показателей сведены в таблицу 10.

Ориентировочные значения литровой мощности двигателей с принудительным воспламенением и незначительным фосированием составляют величину порядка 25 – 30 кВт/л [27].

Таблица 10 – Эффективные показатели

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/кВтч	236	245	267	375

Отсюда получим ориентировочные значения рабочих объемов двигателей V_h при выбранных частотах вращения: $V_h = \frac{30\tau N_e}{p_e n}$, л. (34)

Эффективная мощность двигателя определим исходя из следующих

предположений:

- коэффициент полезного действия генератора составляет величину 0,75-0,85;
- мощность RE определённая из анализа необходимой потребляемой мощности составляет в зависимости от принятой концепции 3-5 кВт или 5-7 кВт.

$$\text{Крутящий момент: } M_e = \frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \frac{N_e}{n} \text{ Нм} \quad (35)$$

$$\text{Часовой расход топлива: } G_T = N_e g_e \cdot 10^{-3} : \text{ кг/ч} \quad (36)$$

Полученные результаты расчетов представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты теплового расчета

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

В таблице 12 представлены двигатели с заданными параметрами.

Таблица 12 - Двигатели с заданными параметрами

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

3.2 Расчет радиатора охлаждения двигателя

Работа двигателя, в частности материалов из которых он изготовлен зависит от того при какой температуре происходит эксплуатация. Система охлаждения двигателя обеспечивает отвод тепла от теплонагруженных деталей двигателя. Тепло отводится не только самой системой охлаждения, но и системой смазки и непосредственно окружающей средой. В данной работе произведен расчет двигателя с жидкостным охлаждением.

Расчет системы охлаждения производится на основе теплового расчета двигателя. Для расчета элементов охлаждения могут применяться результаты теплового расчета или же результаты экспериментальных работ по определению теплового баланса двигателя

Количество теплоты, которое необходимо отвести от двигателя в окружающую среду определяется по формуле:

$$f_{\text{охлж}} = F_{\text{охлж}} / V_h \quad (37)$$

где: $F_{\text{охлж}}$ - площадь охлаждаемой поверхности ДВС;

V_h - рабочий объем цилиндров ДВС.

Удельное количество теплоты $q_{\text{охлж}}$ отводимой в систему охлаждения, зависит от размеров цилиндров влияющих на относительные площади воспринимающих теплоту и охлаждаемых поверхностей.

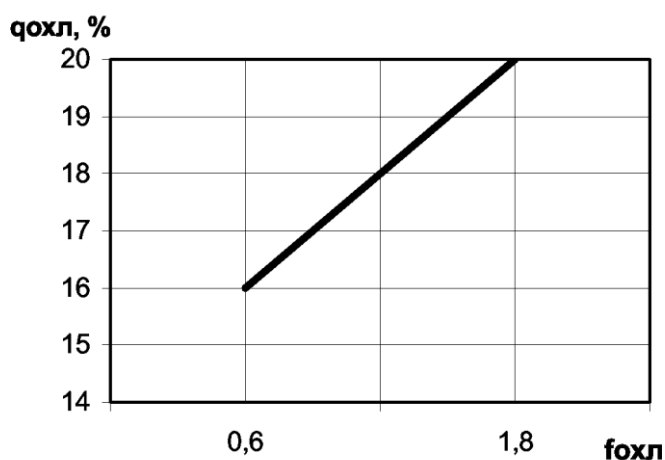


Рисунок 18 - Зависимость $q_{\text{охлж}}$ от относительной поверхности охлаждения [31]

Расчет системы охлаждения довольно сложен в виду сложности определения функциональных зависимостей таких факторов как, напор жидкости, теплоёмкость материалов двигателя, температура охлаждаемых стенок, вязкость жидкости, давление в системе, и прочее. Ввиду этого система охлаждения почти всегда требует доводочных работ. Правильно организованное охлаждение двигателя увеличивает мощность и уменьшает удельный расход топлива примерно на 5%.

«Температурный перепад при принудительной циркуляции: $\Delta T_{ж} = 10$

Циркуляционный расход охлаждающей жидкости в системе охлаждения: $G_{ж} = \frac{Q_{в}}{c_{ж} \rho_{ж} \Delta T_{ж}}$, м³/с (38)

где $G_{ж}$ - циркуляционный расход охлаждающей жидкости, м³/с;

$Q_{в}$ - количество тепла отводимого от двигателя охлаждающей жидкостью, МДж/с;

$\rho_{ж}$ - средняя плотность жидкость (для расчета принимается вода), 1000 кг/м³;

$c_{ж}$ - средняя теплоемкость воды, 4187 Дж/ кгК.

Расчетная производительность насоса: $G_{ж.р.} = \frac{G_{ж}}{\eta_{н}}$, кг/с. (39)

где коэффициент подачи составляет $\eta_{н} = 0,8$.

Количество воздуха, проходящего через радиатор:

$$G_{возд} = \frac{Q_{в}}{c_{жвозд} \Delta T_{возд}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (40)$$

где $Q_{в}$ - количество тепла отводимого от двигателя охлаждающей жидкостью, МДж/с;

$\rho_{возд}$ - средняя плотность воздуха, 1000 кг/м³;

$c_{ж}$ - средняя теплоемкость воды, 1000 Дж/кгК;

$\Delta T_{возд}$ - температурный перепад воздуха в решетке радиатора, 25 К.

Средняя температура охлаждающего воздуха, проходящего через радиатор: $T_{ср.возд} = \frac{T_{возд.вх} + (T_{возд.вх} + \Delta T_{возд})}{2}$, К (41)

где $T_{\text{возд.вх}}$ - температура воздуха перед радиатором, 313 К.»[59]

Средняя температура жидкости в радиаторе:

$$T_{\text{ср.ж}} = \frac{T_{\text{ж.вх}} + (T_{\text{ж.вх}} + \Delta T_{\text{ж}})}{2}, \text{ К} \quad (42)$$

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

Таблица 13 – Количество тепла, отводимого от двигателя

где $\Delta T_{\text{ж}}$ - температурный перепад жидкости в радиаторе, 10 К;

$T_{\text{ж.вх}}$ - температура жидкости перед радиатором, 360 К.

Поверхность охлаждения радиатора: $F = \frac{Q_v}{K (T_{\text{ср.ж}} - T_{\text{ср.возд}})}, \text{ м}^2$

где K - коэффициент теплопередачи, 150 Вт/м²К

Результаты расчета сведены в таблицу 14

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 $G_{\text{ж}}$, м ³ /с	0,128 10 ⁻³	0,195 10 ⁻³
Расчетная производительность насоса $G_{\text{ж.р.}}$, кг/с	0,16	0,24
Количество воздуха, проходящего через радиатор $G_{\text{возд}}$, м ³ /с	0,215	0,324
Средняя температура охлаждающего воздуха, проходящего через радиатор: $T_{\text{ср.возд}}$, К	325	325
Средняя температура жидкости в радиаторе $T_{\text{ср.ж}}$, К	365	365
Поверхность охлаждения радиатора F , м ²	0,9	1,35

Таблица 14 – Результаты расчета

3.3 Расчет поликлиновой передачи

Передаваемая мощность: $P_1 = 7$ кВт.

Частота вращения: $n_1 = 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$

Выбор сечения ремня [32]. Коэффициент, учитывающий динамичность нагружения передачи и режим её работы.

Принимаем тяжёлый режим работы при числе смен работы, равным двум, коэффициент равен 1,3.

$$P_{1p} = P_1 C_p = 7 \times 1,3 = 9,1 \text{ кВт} \quad (43)$$

На основании графика (см. рисунок 19) определим сечение ремня.

Диаметр ведущего шкива:

$$d_1 = (25 + 30) \sqrt[3]{T_1} = 27 \times \sqrt[3]{22,282} = 75,977 \text{ мм.} \quad (44)$$

$$T_1 = \frac{P_1 \times 30}{\pi \times n_1} = 22,282 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (45)$$

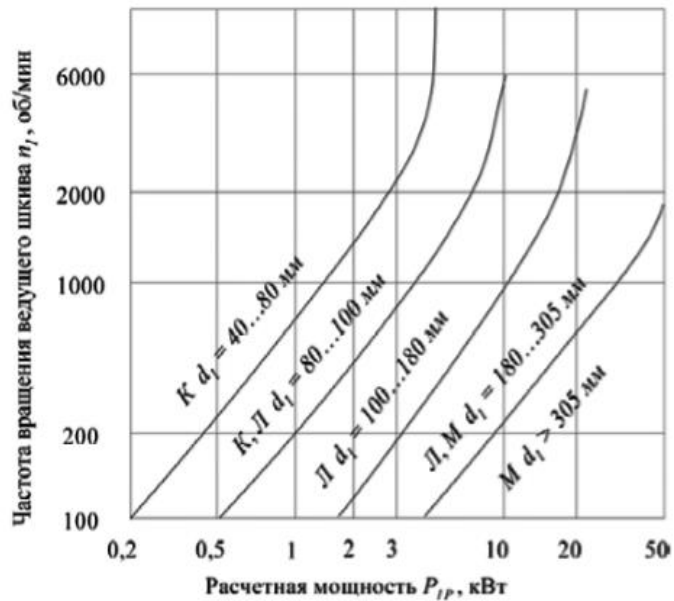


Рисунок 19 - Выбор сечения ремня [32]

Принимаем d_1 равным 128 мм.

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

Уточнённое значение передаточного отношения:

$$i = \frac{d_2}{d_1(1-\xi)} = \frac{126}{128 \cdot (1-0,015)^2} = \frac{126}{128 \cdot 0,485} = 1 \quad (46)$$

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

Определение ширины ремня:

$$V = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n_1}{60 \cdot 10^3} = \frac{3,1415 \cdot 128 \cdot 3000}{60 \cdot 10^3} = 20,106 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (47)$$

Межосевое расстояние:

$$a_{\min} = 0,55 \cdot (d_1 + d_2) + H = 0,55 \cdot (128 + 126) + 4,6 = 144,3 \text{ мм.} \quad (48)$$

где H – толщина ремня.

$$a_{max} = 2 \cdot (d_1 + d_2) + H = 2 \cdot (128 + 126) = 508 \text{ мм.} \quad (49)$$

Назначаем $a = 260$ мм.

Длина ремня:

$$L = 2a + \pi \frac{d_1 + d_2}{2} + \frac{\Delta^2}{a} = 2 \cdot 260 + 3,1415 \cdot \frac{128 + 126}{2} + \frac{1^2}{260} = 520 + 348,47 + 0,00384 = 918,97434 \text{ мм} \quad (50)$$

$$\Delta = \frac{d_2 - d_1}{2} = \frac{128 - 126}{2} = 1 \quad (51)$$

Округляем до стандартного ряда $L = 900$.

Уточнённое межосевое расстояние:

$$a = 0,25 \cdot \left[L - \pi \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} + \sqrt{\left(L - \pi \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2 - 8\Delta^2} \right] = 0,25 \left[900 - 3,1415 \cdot \frac{126 + 128}{2} + \sqrt{\left(900 - 3,1415 \cdot \frac{126 + 128}{2} \right)^2 - 8 \cdot 1^2} \right] = 0,25 \cdot \left[501,0295 + \sqrt{251022,55987} \right]^2 = 250,513 \text{ мм.} \quad (52)$$

Угол обхвата ремнём ведущего шкива α_1

$$\alpha_1 = 180 - \gamma = 180 - 2 \frac{\Delta}{a} \cdot 57,3^\circ = 180 - 2 \frac{1}{250,513} \cdot 57,3^\circ = 179,54^\circ \quad (53)$$

Поправка мощности, учитывающей влияние уменьшения изгиба ремня на большой шкив.

$$\Delta P_1 = 0,0001 \Delta T_1 U_1 = 0,0001 \cdot 0,1 \cdot 3000 = 0,03 \text{ кВт} \quad (54)$$

$$\Delta T_1 = 0,1 \text{ по таблице 15}$$

Допускаемая мощность (для 10 клиньев) для ремня.

$$[P_{10}] = ([P_{10}]_0 \cdot C_\alpha \cdot C_L + \Delta P_1) C_p \quad (55)$$

$$[P_{10}]_0 = 15 \text{ кВт} \quad [P_{10}]_{0(k)} = 7 \text{ кВт} \quad (56)$$

$C_\alpha = 1$ - коэффициент, учитывающий угол обхвата ремнём ведущего шкива.

C_L - коэффициент, учитывающий длину ремня.

$$L_0 = 1600 \text{ мм}$$

$$\frac{L_p}{L_0} = \frac{900}{1600} = 0,56 \quad (57)$$

$$C_L = 0,86$$

$$\text{Для ремня } K = \frac{L_p}{L_{0(k)}} = \frac{900}{700} = 1,27 \quad (58)$$

$$[P_{10}]_л = (15 \cdot 1 \cdot 0,97 + 0,03) \cdot 1,3 = 18,954 \text{ кВт} \quad (59)$$

$$[P_{10}]_к = (7 \cdot 1 \cdot 0,86 + 0,03) \cdot 1,3 = 7,87 \quad (60)$$

Таблица 15 – Поправка ΔT_I к моменту на быстроходном валу, Н м [32]

Сечение ремня	ΔT_I при передаточном отношении i передач							
	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

Число клиньев ремня.

$$Z = 10 \frac{P_1}{[P_{10}]} = 10 \frac{7}{18,954} = 3,69 \quad (4) \quad (61)$$

$$Z_k = 10 \frac{7}{7,87} = 8,9 \quad (9) \quad (62)$$

Сила предварительного натяжения.

$$F_{0(k)} = 780 \cdot \frac{9,1 \cdot 0,86}{20,1 \cdot 1} + \frac{0,09 \cdot 9 \cdot 20,1^2}{10} = 303,42 + 32,72 = 336,14 \text{ Н.} \quad (63)$$

$$F_{0(л)} = 780 \cdot \frac{9,1 \cdot 0,47}{20,1 \cdot 1} + \frac{0,45 \cdot 4 \cdot 20,1^2}{10} = 165,36 + 72,72 = 238,08 \text{ Н.} \quad (64)$$

По результатам предварительных расчетов был выбран одноцилиндровый двигатель объемом 600 см³ марки GK194MS, характеристики которого соответствуют RE мощностью 7кВт. Были определены параметры системы охлаждения двигателя, такие как поверхность охлаждения радиатора, количество воздуха, проходящего через радиатор. По итогам расчета поликлиновой передачи был выбран профиль

ремня и диаметр шкивов. На основе данных расчётов и выбранных параметров были разработаны компоновочные решения.

5 Компонувочные решения для Range Extender

5.1 Компонувка RE мощностью 7кВт

На первом этапе была проведена работа по компоновке элементов конструкции Range Extender мощностью 7 кВт. Основой модуля являются ДВС, генератор и рама. Исходя из теплового расчета был выбран одноцилиндровый двигатель объемом 600 см³ марки GK194MS. Общий вид двигателя представлен на рисунке 20, а характеристики в таблице 16.



Рисунок 20 – Общий вид ДВС марки GK194MS

Таблица 16 – Характеристики ДВС GK194MS-3

Характеристики ДВС GK194MS-3	
Тип двигателя	Бензиновый, одноцилиндровый, 4-тактный, водяного охлаждения
Рабочий объем, л	0,589
Степень сжатия	9.7:1
Мощность, л.с.	30 при 6000 об/мин
Крутящий момент, н.м.	52 при 4000 об/мин
Удельный расход топлива, г/кВт*ч	280
Рабочий ход, мм	85
Диаметр цилиндра, мм	94
Габаритные размеры, мм	384×366×485
Сухой вес, кг	37

Опираясь на требуемую мощность и характеристики двигателя был выбран генератор марки МессАlteТ16F, обеспечивающий 7.5кВт при 3000 об/мин. Общий вид генератора представлен на рисунке 21, а характеристики в таблице 17.



Рисунок 21 – Общий вид генератора МессАlteТ16F

Таблица 17 – Характеристики генератора МессАlteТ16F

Характеристики генератора МессАlteТ16F									
Модель	Мощность 230/400 В при 3000об/мин - 50 Гц		КПД при нагрузке			Масс а, кг	Расход воздуха, м ³ /мин	Шум на расстоян ии, дБ	
	кВ А	кВт, cos(φ)=0.8	2/4	3/4	4/4			1 м	7 м
T16F-160	7.5	6	78	82.5	82	34.5	3.4		

Рама служит для соединения всех элементов модуля. Она должна обеспечивать жесткость. Было предложено несколько вариантов конструкций рам:

- Рама из круглой трубы ГОСТ 10704 $\phi 32 \times 1,5$ (рисунок 22),
- Рама из профильной трубы 30x30x1,5 ГОСТ 8639-82 (рисунок 23).

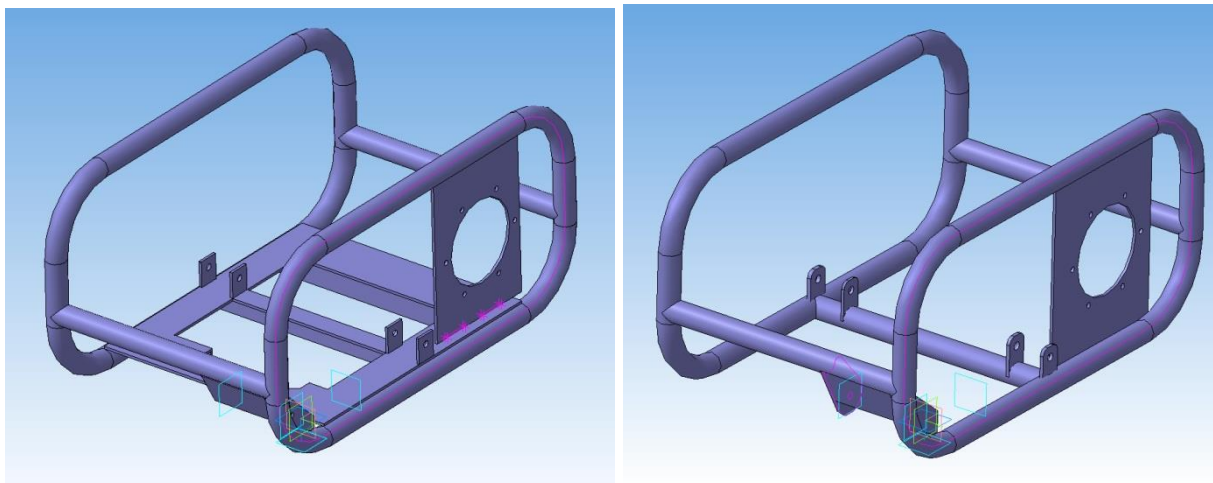


Рисунок 22 - Рама из круглой трубы 30мм (2 варианта)

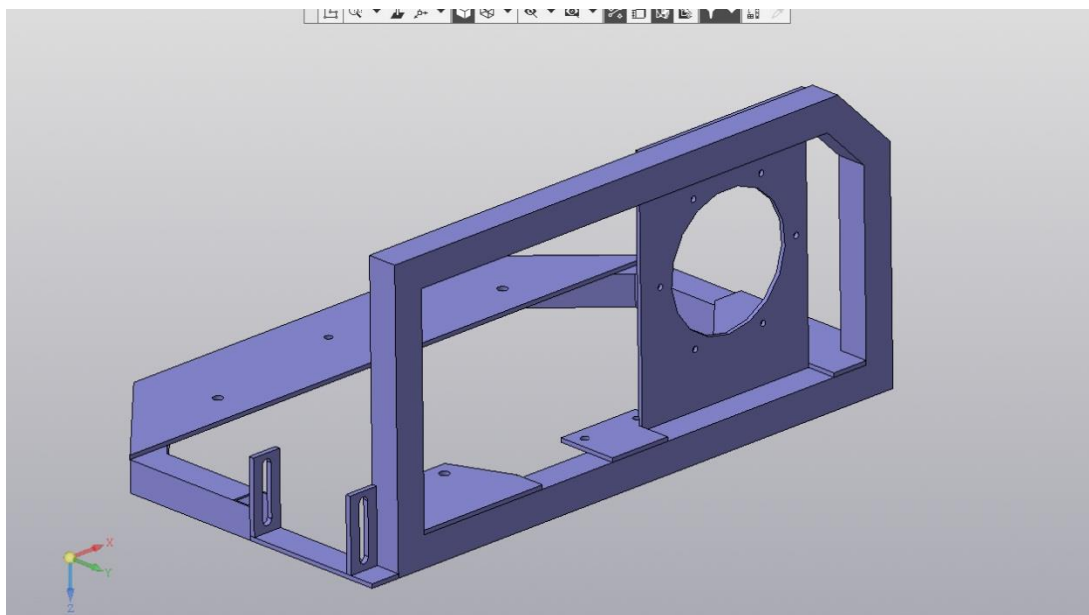


Рисунок 23 - Рама из профильной трубы

Конструкция рамы из квадратного профиля оказалась несколько легче при той же жесткости при разности в весе 2 кг. В конструкции меньше деталей, появилась возможность убрать не несущие нагрузку части. Квадратный профиль технологичнее при сборке и сварке, а так же дальнейшей модернизации конструкции.

Основными элементами рамы являются:

- рамка передняя и нижняя (рисунок 24)
- пластина крепления генератора и пластины опор (рисунок 25).

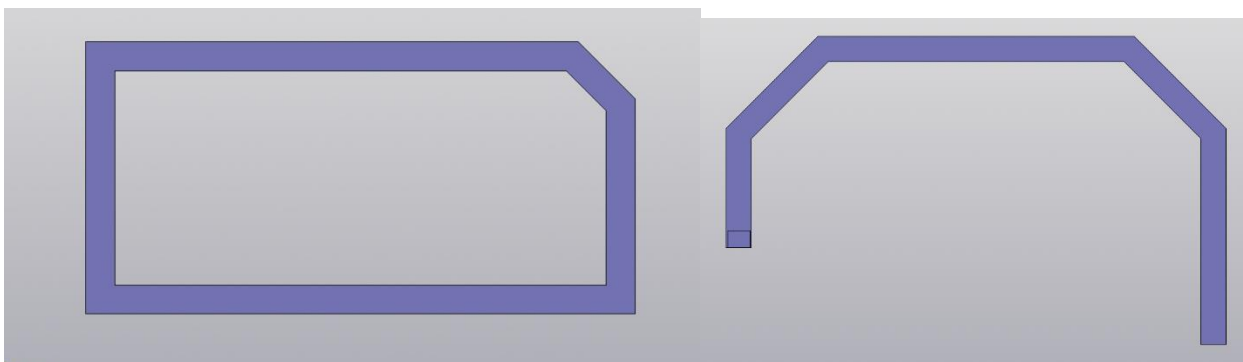


Рисунок 24 – Передняя и нижняя рамки

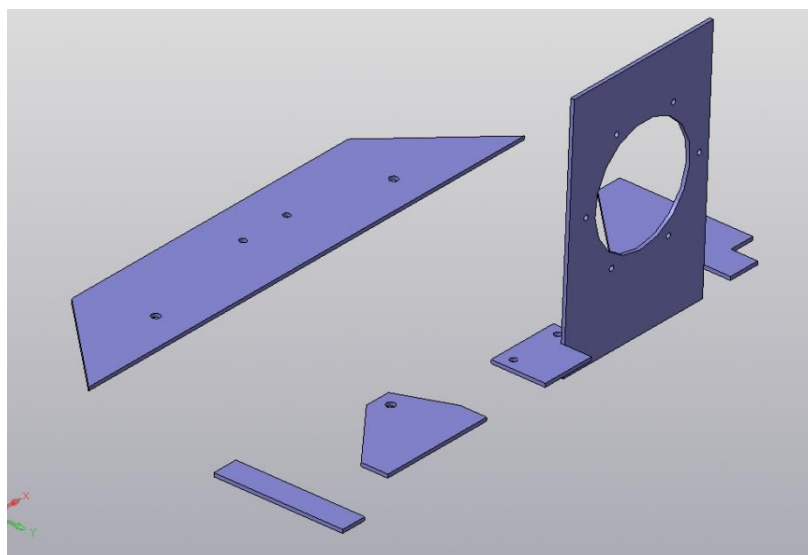


Рисунок 25 – Пластины крепления генератора и опор рамы

Опора двигателя крепит силовой агрегат на раме, обеспечивая устойчивость мотора и гашение вибраций. Жестокое закрепление на раме приводит к повышенным шумам и вибрациям. В качестве демпфирующего элемента была выбрана «втулка стабилизатора LADA Vesta» (Артикул 8450031946). Для её крепления к раме используется «Скоба втулки стабилизатора Vesta» (Артикул 8450006749). ДВС соединен с втулками через переходную пластину, на которой закреплены оси, выполненные из труб. Общий вид крепления представлен на рисунке 5.5.

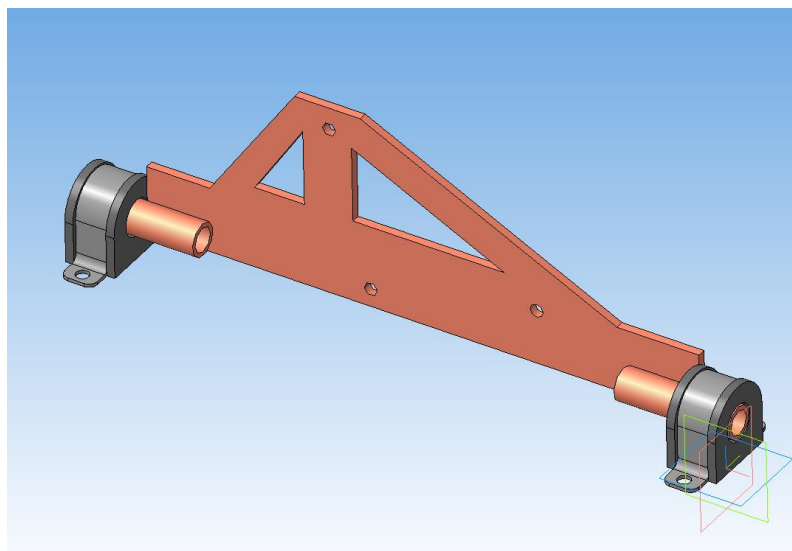


Рисунок 26 – Опора двигателя в сборе

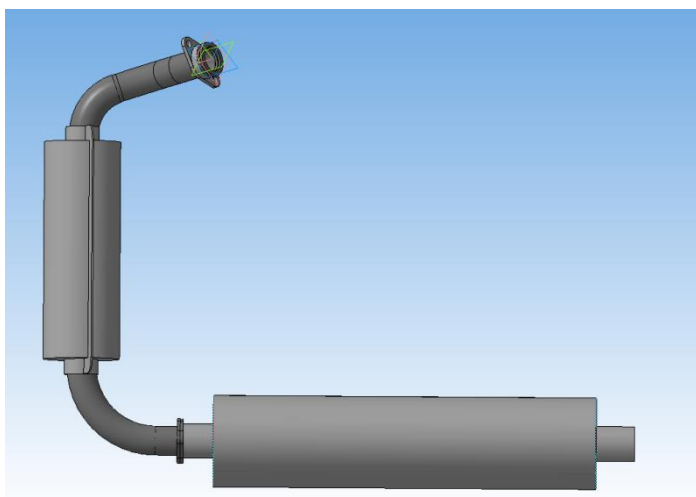


Рисунок 27 – Система выпуска

Выпускная система отводит отработанные газы, снижая уровень шума. Состоит из приемной трубы, фланца с уплотнительным кольцом, резонатора ВАЗ-21074 (артикул 210741202020), фланца глушителя F38K и глушителя ВАЗ-2101 (артикул 2106120100500). Общий вид системы представлен на рисунке 5.6.

Впускной коллектор обеспечивает силовой агрегат требуемым количеством и составом топливовоздушной смеси. Основная его часть – впускной патрубок, подводящий смесь в двигатель и соединяющий остальные части. Дроссельная заслонка электронная BOSCH (артикул 0280750151). Применен комбинированный датчик абсолютного давления и

температуры воздуха BOSCH Pressure Sensor Combined PST 4 (артикул 0261.230.423). Топливо подается форсункой BOSCH Injection Valve EV 14 (артикул 0280.158.237), она устанавливается в специально изготовленную топливную рампу. Общий вид казанных выше элементов представлены на рисунках 28 – 30.

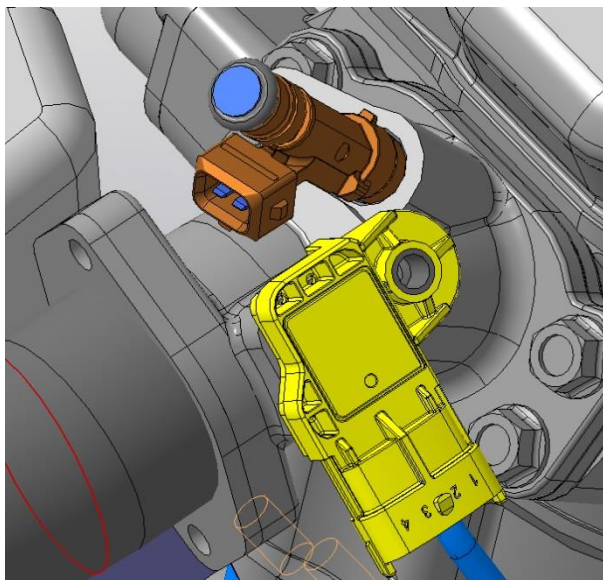


Рисунок 28 – Общий вид впускного патрубка

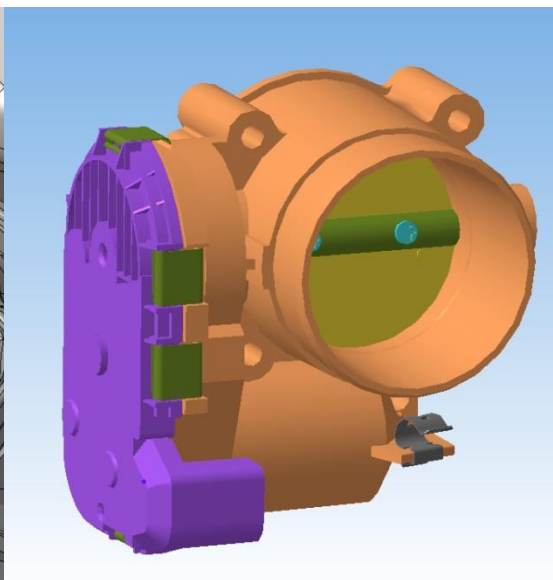


Рисунок 29 – Электронный дроссельный патрубок

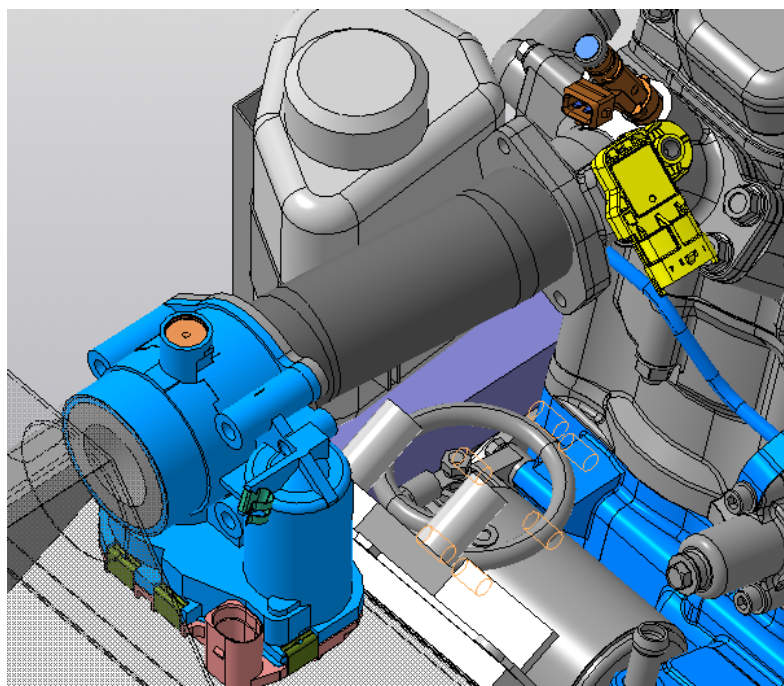


Рисунок 30 – Впускной патрубок в сборе

Система охлаждения поддерживает рабочую температуру силового агрегата. Она состоит из помпы и термостата, находящихся непосредственно в двигателе внутреннего сгорания и радиатора с воздушным коробом. В качестве радиатора применен радиатор отопителя ВАЗ-2170 Kraft (артикул КТ 104061). Он помещен в специально изготовленный воздушный короб, расположенный над генератором. Генератор имеет крыльчатку охлаждения, воздух проходящий через нее попадает на радиатор охлаждения двигателя, а далее в систему впуска. Лишний воздух выходит через отвод короба вниз, наружу автомобиля (рисунок 31).

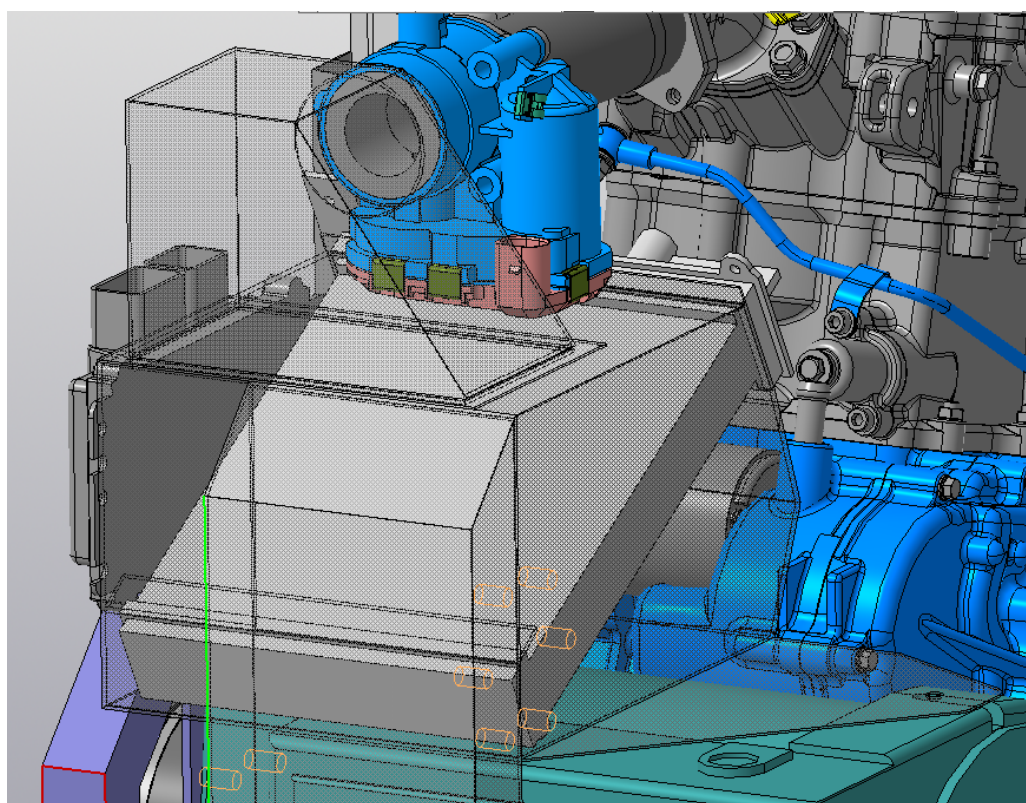


Рисунок 31 – Радиатор в коробе с отводящим патрубком (показаны прозрачными)

Общий вид компоновки двигателя и генератора представлен на рисунках 32 - 37.

Предполагается, что установка в автомобиль RE будет происходить снизу, в специальный отсек в дне. Обслуживание агрегатов целесообразно производить при полностью снятом с автомобиля модуле. Однако при общей плотности компоновки, имеется доступ к всем основным частям, как приводной ремень, впускная система, ЭБУ.

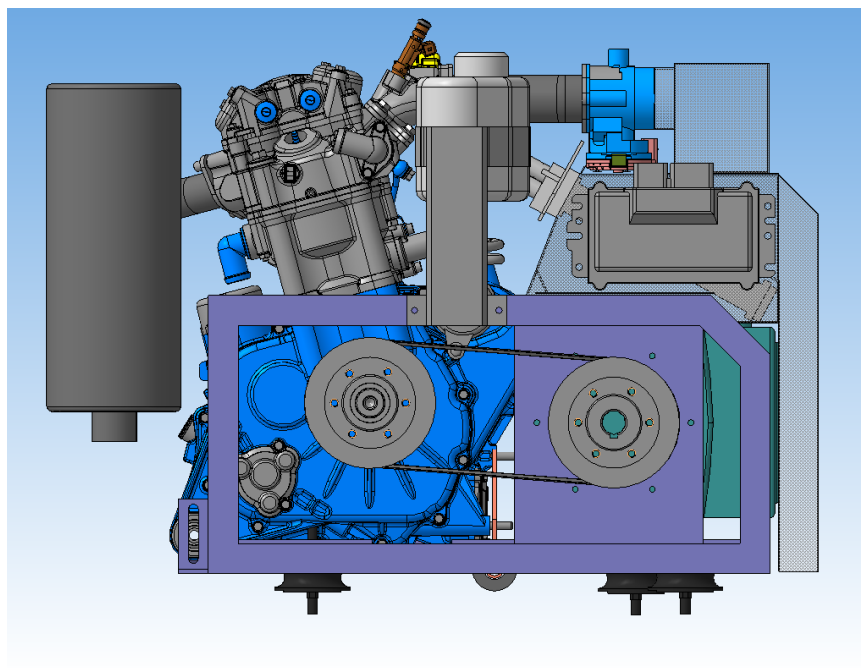


Рисунок 32 – Вид спереди

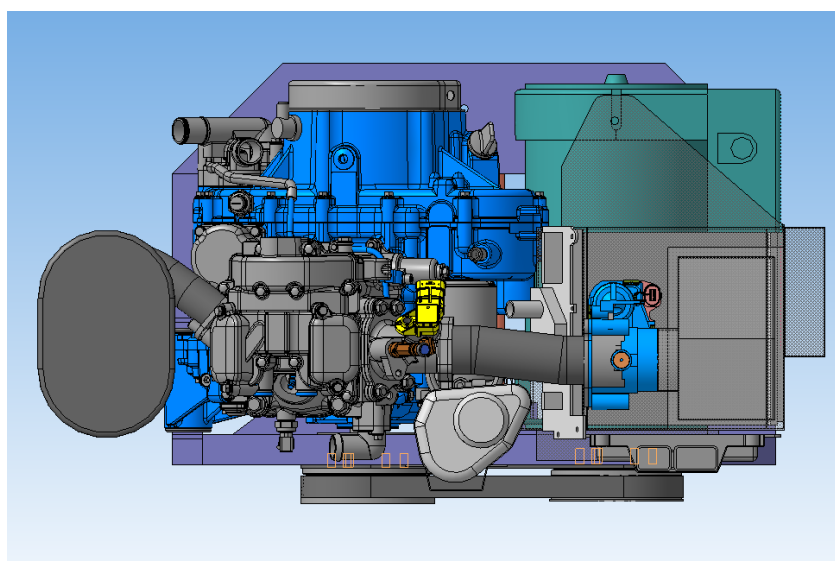


Рисунок 33 – Вид сверху

На рисунке 34 виды демпфирующие опоры двигателя и самого RE, имеется доступ к пробке масляного поддона двигателя.

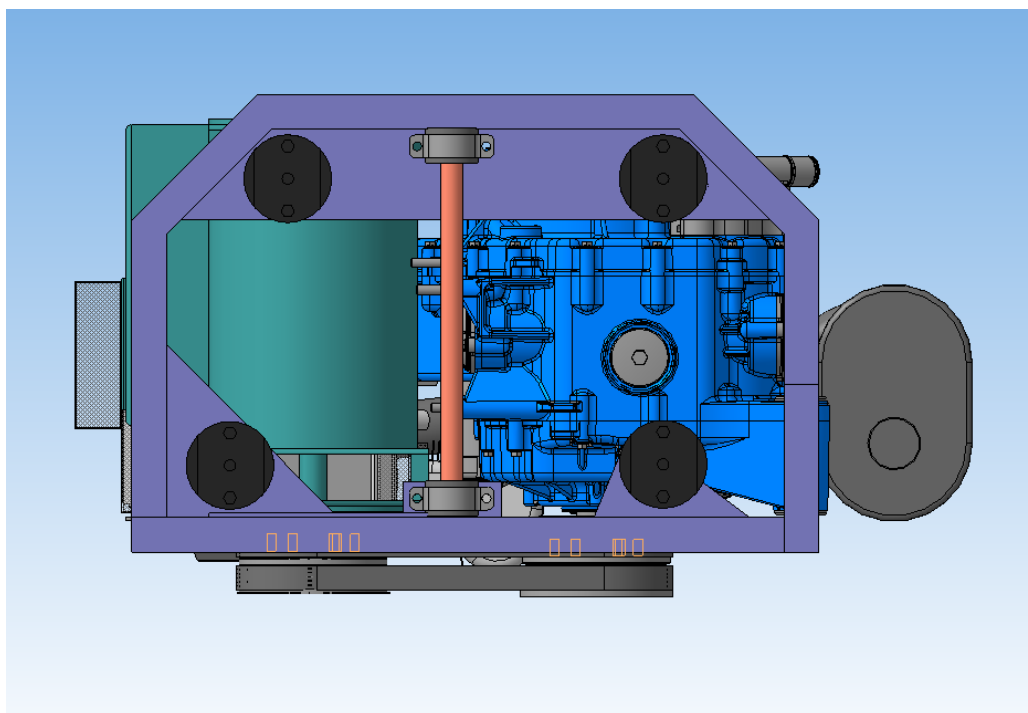


Рисунок 34 – Вид снизу

На рисунке 35 видны расположение радиатора в коробе, крышка термостата, правая крышка двигателя.

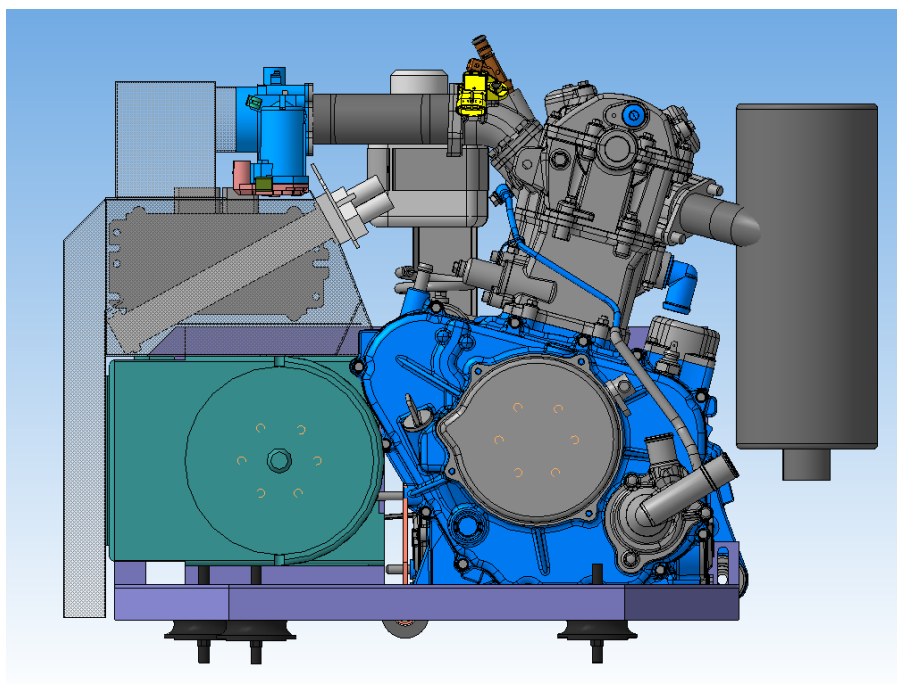


Рисунок 35 – Вид сзади

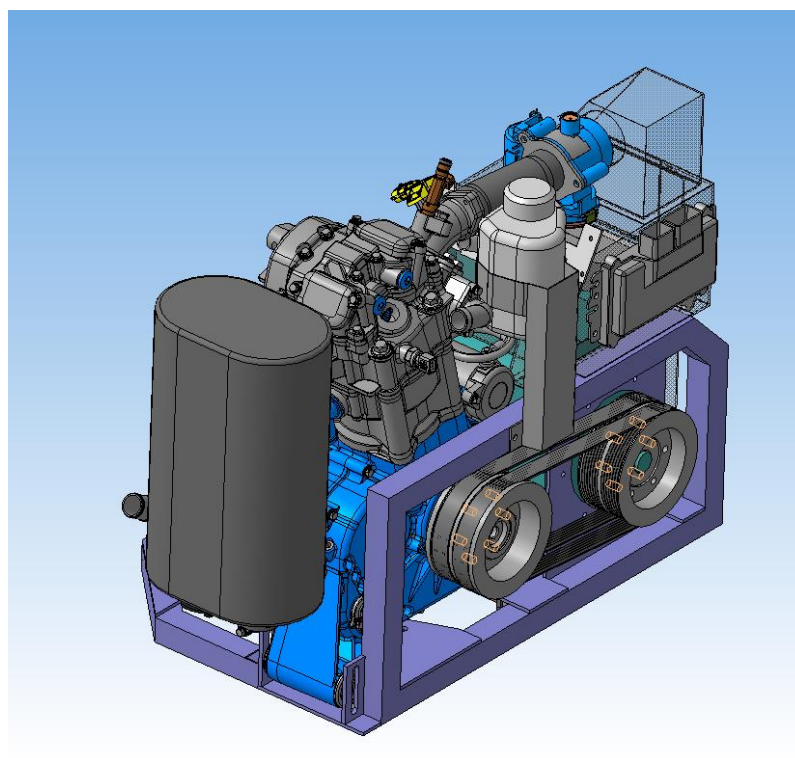


Рисунок 37 – Общий вид

Двигатель и генератор расположены максимально близко, что позволяет уменьшить габаритные размеры и снизить вес рамы. Генератор жестко закреплен на раме через пластину. Двигатель внутреннего сгорания закреплен в 3 точках, что обеспечивает его устойчивость. Крепление к раме осуществляется через демпфирующие элементы, один из которых находится в кронштейне двигателя, а два других – на задней опоре.

Передача крутящего момента от ДВС к генератору происходит через систему поликлиновых шкивов и ремня. Основой глушитель системы отработанных газов предполагается размещать под рамой, что позволяет изолировать внутреннее пространство от увеличения температуры и шумов. Радиатор системы охлаждения и воздушный короб расположены над генератором, таким образом, воздух, подаваемый крыльчаткой генератора, поступает в короб по кратчайшему пути.

Данное компоновочное решение обеспечивает малый вес, простоту обслуживания, состоит из распространенных компонентов, а том числе и российского производства, что делает данное решение целесообразным с точки зрения производства и эксплуатации.

Заключение

На основании результатов выполненных работ можно сделать следующие выводы:

– Проведенный аналитический обзор показывает перспективность рынка электротранспорта и Range Extender, в частности, как в мире, так в РФ. В ближайшие 10-15 лет прогнозируется значительное увеличение объема продаж, которые могут достигнуть 50 % от продаж всех новых легковых автомобилей. В некоторых странах, таких как Китай, страны Европейского Союза и др. эта величина достигнет значений более 70%;

– Рынок Range Extender является относительно новым, однако ряд автомобильных концернов, таких как BMW, AUDI и ряд других уже освоили серийное производство Range Extender. Следует отметить, что рынок Range Extender в РФ представлен только серийными изделиями, установленными на автомобили указанных выше концернов;

– Предварительные расчёты целевых параметров Range Extender показал, что наиболее перспективным с позиции применения двигателя внутреннего сгорания, являются двигатели с принудительным воспламенением, с водяным охлаждением, рабочим объемом 300 – 600 см³. Следует отметить, что отечественные серийно выпускаемые двигатели такой размерности отсутствуют;

– Разработаны технические требования элементов Range Extender, разработаны компоновочные решения RE с использованием выбранных в ходе расчетов 3D-моделей двигателя и генератора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Akmandor, i.S., Ersöz, N.: Novel Thermodynamic Cycle, PTC / WO / 2004 / 022919 AI. (March 18th 2004)
- 2 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.
- 3 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>
- 4 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.
- 5 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.
- 6 Bonnevie-Svendsen, A., Boulouchos, K., Lämmle, Ch., Vlakos, I.: Double-Vibe-Model for heat release in lean burn gas engines with prechamber ignition. in: 6. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau-Roßlau. 2009
- 7 Department for Transport GOV UK National Travel Survey: England 2017. Available online: URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/729521/national-travel-survey-2017.pdf (accessed on 5 October 2020)
- 8 Dyna-Cam Engine Corporation: "Two-cycle swash plate internal combustion engine", USA Patent No:7137366, November 21st 2006
- 9 European Commission EUROPA. Driving and Parking Patterns of European Car Drivers—A Mobility Survey. Available online: URL: <https://setis.ec.europa.eu/related-jrc-activities/jrc-setis-reports/driving->

- andparking-patterns-of-european-car-drivers (accessed on 10 October 2020).
- 10 Ford Transit Custom Plug-In Hybrid Breaks Cover In The UK // URL: <https://fordauthority.com/2017/09/ford-transit-custom-plug-in-hybrid-breaks-cover-in-the-uk/> (accessed on 5 October 2020)
- 11 Ford запускает испытания первого в мире серийного гибридного фургона Transit Custom PHEV в Валенсии (дата обновления 14.05.2018) [Электронный ресурс] // URL: <https://vanlife.ru/news/world/Ford/ford-zapuskaet-ispytaniya-pervogo-v-mire-serijnogo-gibridnogo-furgona-transit-custom-phev-v-valensii/> (дата обращения: 05.10.2020)
- 12 Handbook of Hydrogen Storage. Edited by Michael Hirscher Copyright 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-32273-2
- 13 Haywood, R. W.: "A Critical Review of Theorems of Thermodynamics Availability" J. Mech. Eng. Sci. vol.16 MIT Press, 1970.
- 14 Lijewski, P et al., Exhaust emissions generated under actual operating conditions from a hybrid vehicle and an electric one fitted with a range extender, Transportation Research Part D 78 (2020) 102183, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.012>
- 15 M. Barghamadi, A. Kapoor, C. Wen. (2013). A Review on Li-SBatteries as a High Efficiency Rechargeable Lithium Battery. Journal of The Electrochemical Society, т. 160, № 8, pp. A1256-A1263.
- 16 M. Cheng, M. Tong. (2017). Development Status and Trend of Electric Vehicles in China. Chinese Journal of Electrical Engineering, T. 3, № 2.
- 17 MOST, «Application Guidelines of New Energy Vehicle Pilot Project in 2017» 9 10 2016. URL: <http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/fgzc/gfxwj/gfxwj2016/201610/W020161014555125786252.pdf> (accessed on 5 October 2020)

- 18 P. Bruce, S. Freunberger, L. Hardwick, J.-M. Tarascon. (2012) Li-O₂ and Li-S batteries with high energy storage. *Nature Materials*, т. 11, № 1, pp. 19-29.
- 19 Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective, 2020 URL: <https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/> (accessed on 5 October 2020)
- 20 Renegar, David, C.: "The Quasiturbine", USA Patent No:6629065 September 12th 2003
- 21 Rochdi Trigui. EVREST: Electric Vehicle with Range Extender as a Sustainable Technology EECV 2015, EU project day on eMobility, Dec 2015, BRUXELLE, Belgium. 25 p
- 22 Stephen R. Turns: "An Introduction to Combustion" McGraw-Hill Series in Mech. Eng. 1996.
- 23 The Electric Vehicle Outlook is Bloomberg NEF // 2020 Bloomberg Finance L.P. URL: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook> (accessed on 15 October 2020)
- 24 TNS SOFRES EP TENDER. Available online: <https://tbb.innoenergy.com/wp-content/uploads/2015/11/EPTender.pdf> (accessed on 10 October 2020)
- 25 Tyson, Madeline, Charlie Bloch. Breakthrough Batteries: Powering the Era of Clean Electrification. Rocky Mountain Institute, 2019. URL: <http://www.rmi.org/breakthrough-batteries>.
- 26 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>
- 27 Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев; В 3-х т. Т. 2. – М., Машиностроение, 1978.
- 28 Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев; В 3-х т. Т. 1. – М., Машиностроение, 1978.

- 29 Асмус, Т. У. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями [Текст] / Т. У. Асмус и др.; Под ред. Кострова; - Машиностроение, 1988.
- 30 Вихерт М.М., Грудский Ю.Г. Конструирование впускных систем быстроходных дизелей. М.: Машиностроение, 1982.
- 31 Воинов, А.Н. Процессы сгорания в быстроходных поршневых двигателях [Текст]/ А.Н. Воинов; М.: - Машиностроение, 1965
- 32 Вырубов, Д.Н. Двигатели внутреннего сгорания: Учебник для вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] / Д.Н. Вырубов и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова; – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с. ил.
- 33 ГОСТ 32513-2013 Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия (Переиздание) – Москва – Изд. Стандартиформ, 2014 – 12с.
- 34 ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Общие требования и правила составления [Текст]. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 47 с.
- 35 Двигатели внутреннего сгорания: Учебник для вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова – М.: Машиностроение, 1984.
- 36 Дзюбан А.М. Учебно-методическое пособие к выполнению выпускной квалификационной работы бакалавров / А.М. Дзюбан, Д.А. Павлов, В.В. Смоленский - ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» 2018 – 51 с.
- 37 Железко, Б. Е. Расчет и конструирование автомобильных и тракторных двигателей (дипломное проектирование) [Текст]: Учебное пособие для вузов / Б. Е. Железко и др. – Мн.: Высш. шк. 1987.

- 38 Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 720 с.: ил.
- 39 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: 15.10.2020)
- 40 Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980.
- 41 Колчин, А.И., Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст] / А.И. Колчин, В.П. Демидов; Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – 400 с. ил.
- 42 Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания [Текст] / Луканин В.Н. // Кн. 1. Теория рабочих процессов. – М.: Высшая школа, 1995. – с.452.
- 43 Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания [Текст] / Луканин В.Н. // Кн. 2. Динамика и конструирование. – М.: Высшая школа, 1995. – с. 428.
- 44 М. С. Ховаха. Автомобильные двигатели – М., Машиностроение, 1977.
- 45 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
- 46 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: 05.10.2020)

- 47 Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» /С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова // . – 3-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1985. - с.456.
- 48 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.
- 49 Попык, К. Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей [Текст] / К.Г. Попык; 2-е изд., перераб и доп. – М.: Высш. школа, 1970.
- 50 Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», 1999 – 2011.
- 51 Рынок электромобилей в России за 9 месяцев 2019 года [Электронный ресурс] // Автостат, 11.11.2019 // URL: <https://www.autostat.ru/infographics/41715/> (дата обращения: 15.10.2020)
- 52 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.
- 53 Смоленский, В.В. Автомобильные двигатели: курс лекций [Текст]/В.В. Смоленский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 183 с.

- 54 Толстоногов А.П. Системы охлаждения поршневых двигателей внутреннего сгорания. Учеб. пособие./ Сам. гос. аэрокос. ун-т. Самара, 2002. 208с.
- 55 Учебник для бакалавриата и магистратуры: Детали машин. Курсовое проектирование. Часть I. / В.В. Гурин, В.М. Замятин, А.М. Попов; Издательство ЮРАЙТ, 2016. – 366 с.
- 56 Учебник: Теория и расчет турбокомпрессоров/ К.П. Селезнев, Ю.Б.Галеркин, С.А.Анисимов и др.; Издательство Машиностроение, 1986. – 392 с.
- 57 Учебное пособие: Турбокомпрессоры / Ю.Б.Галеркин, Л.И.Козаченко; Издательство Издательство Политехнического университета, 2008. - 374
- 58 Учебное пособие: Турбокомпрессоры/ С.Б.Асташенко; Издательство Автостиль, 2002. – 80 с.
- 59 Хейвуд Дж. Гидродинамика рабочих цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Фримановская лекция 1986 г. // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов. М.: 1987. С. 171–229.
- 60 Ховах, М. С. Автомобильные двигатели [Текст] / М.С. Ховах; – М., Машиностроение, 1977.
- 61 Чайнов Н.Д. Конструирование двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Чайнов Н.Д., Иващенко Н. А., Краснокутский А. Н., Мягков Л. Л. // Учебник - М.: Машиностроение, 2008. 496 с.
- 62 Электро-компакт BMW i3 // URL: https://auto.ironhorse.ru/bmw-i3_3360.html (дата обращения: 05.10.2020).