

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)

13.04.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Энергетические комплексы и системы управления

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Концепция электрической платформы внедорожного транспортного средства

Обучающийся

В.В. Хабибулин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель
Консультант

к. т. н, доцент Д.А. Павлов

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

к. ф. н, доцент С.М. Вопяшина

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

Тольятти 2023

Содержание

| | |
|---|--|
| Введение | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1 Состояние вопроса | 5 |
| 2 Обзор существующих электромобилей на рынке | 15 |
| 3 Обзор существующих технических решений в области АКБ..... | 21 |
| 3.1 Обзор аккумуляторов | 22 |
| 3.2 Степень локализации производства аккумуляторов..... | 34 |
| 4 Расчет основных параметров электрической платформы | 35 |
| 4.1 Тягово-динамический расчет..... | 36 |
| 4.2 Расчет радиатора охлаждения электродвигателя | 49 |
| 5 Анализ и подбор компонентов для электрической платформы..... | 55 |
| 5.1 Анализ трансмиссий | 55 |
| 5.2 Анализ аккумуляторов | 67 |
| 6 Расчет пробега электромобиля по ездовому циклу..... | 71 |
| 7 Концепция электрической платформы внедорожного транспортного средства | 73 |
| Заключение | 74 |
| Список используемой литературы и используемых источников | 75 |

Введение

Рост спроса на электромобили постепенно растет, потребители все больше интересуются экологичными альтернативами традиционному авто, в том числе электрическими внедорожниками. Во многих странах ужесточаются требования к выбросам автомобилей, стимулируя переход на электрический транспорт. Также для повышения конкурентоспособности автопроизводителей выводятся на рынок линейки продуктов электровнедорожников, чтобы привлечь больше потенциальных покупателей.

Производители аккумуляторов и электродвигателей разрабатывают все более эффективные и долговечные компоненты, снижаются стоимости аккумуляторов. Цена аккумуляторов для электромобилей снижается более чем на 5% в год. Все эти факторы делают электромобили доступнее, что повышает на них спрос.

Объектом исследования является электрическая платформа внедорожника

Предметом исследования являются компоненты электрической платформы внедорожника

Проблемой является высокое содержание вредных выбросов в выхлопных газах автомобилей. При сгорании топлива в ДВС выделяется около 20 килограммов CO₂ на каждые 100 километров пробега. Это способствует парниковому эффекту и изменению климата. При торможении, износе двигателя и выхлопных труб приводят к выбросам вредных частиц, способствуя образованию смога. Также проблемы высокого уровня шума при работе ДВС особенно актуальны в городах.

Цель исследования создание концепции электрической платформы внедорожника.

В ходе работы решались следующие задачи:

- Обзор готовых решений, предоставленных на рынке электромобилей,

- Обзор конструкций электрических автомобилей отечественного производства,
- Обзор видов аккумуляторных батарей,
- Анализ вариантов силовой установки электрической платформы,
- Определение параметров электрической платформы,
- Тягово-динамический расчет электрической платформы,
- Анализ вариантов тяговых батарей,
- Расчет системы охлаждения электродвигателя.

Диссертации состоит из введения, разделов, заключения и приложения включающего основные результаты и выводы, списка литературы. Работа изложена на 75 страницах основного текста, иллюстрированного 53 рисунками, 14 таблицами, 20 источниками и приложения.

В введении обоснована актуальность темы, ее научная новизна и дана общая характеристика работы, поставлены цель и задачи.

В первой главе приведен обзор и анализ рынка электромобилей, и перспективы его развития.

Во второй главе рассмотрены электромобили отечественного производства и проанализирована ниша электротранспорта.

В третьей главе рассмотрены основные виды аккумуляторов, их преимущества и недостатки.

В четвертой главе проведен тягово-динамический расчет и расчет радиатора охлаждения.

В пятой главе проведен анализ и подбор компонентов трансмиссии и силовой установки.

В шестой главе выполнен расчет по ездовому циклу Japanese 10-15 cycle

В седьмой главе представлена концепция электрической платформы внедорожного транспортного средства на основе проведенных расчетов.

В заключении подведены итоги выполнения задач исследования.

1 Состояние вопроса. Перспективы развития электротранспорта

В последнее время стал сильно заметен рост автомобилей на душу населения. Увеличение количества автомобилей связано с общей тенденцией к потребительству в современном обществе. Сегодня автомобиль – это не просто средство передвижения, это также статусный символ и способ удовлетворения потребностей, способ выделиться. Факторы, способствующие этому:

- Реклама и маркетинг. Автомобили агрессивно продаются как средство повышения социального статуса и стиля жизни. Практически, всегда в фильмах успешный человек сопровождается «крутой» машиной, «крутость» автомобиля тоже задает реклама;
- Индивидуализация. В обществе потребления у людей большая потребность в самовыражении через вещи. «Мы покупаем то, что нам не нужно». И личный автомобиль тому не исключение;
- Доступность. Благодаря современным программам кредитования многие могут удовлетворить свою потребность в индивидуализации и купить автомобиль сейчас, а платить потом.

Все это приводит к росту спроса и увеличению автомобилизации населения, что неминуемо ведет к таким проблемам, как расточительство ресурсов и загрязнению окружающей среды. Рассмотрим последнюю проблему подробнее.[1,9]

Проблема выбросов углекислого газа как никогда остро стоит в крупных городах и мегаполисах. Из-за большого количества автомобилей увеличивается вредные выбросы, что негативно влияет на качество и продолжительность жизни в черте города. В качестве решение этой сложной задачи в крупных городах были приняты следующие меры:

- В Лондоне ввели плату за проезд (Congestion Charge) в центральной зоне, ограничение доступа для старых и более загрязняющих автомобилей;

- В Париже с 2015 года начали вводить плату за проезд автомобилей в центре;
- Мадрид стал одним из первых городов, где начали вводить ограничения для автомобильного движения в центре города.
- В Милане с 2012 года запретили движение автомобилей в центральной зоне в выходные;
- В Стокгольме ввели плату за проезд в центре, приоритет общественного транспорта, ограничение доступа для старых автомобилей;
- В Гонконге постоянно повышают цены и налоги, связанные с владением автомобилями.

Также правительства разных стран активно вовлекают электромобили в свою повестку дня и активно поощряют производителей и потребителей электротранспорта по нескольким причинам:

- Борьба с выбросами парниковых газов. Выбросы от транспорта составляют значительную долю всех парниковых газов, поэтому переход на электромобили может существенно снизить эти выбросы;[4]
- Безопасность и качество воздуха. Выхлопные газы от двигателей внутреннего сгорания снижают качество воздуха и негативно влияют на здоровье. Электромобили не производят выхлопов;
- Энергетическая независимость. Зеленая энергетика и переход на электромобили снижают зависимость от импортируемого нефтяного сырья;
- Экономические возможности. Переход на электромобили и зеленую энергетiku создает новые рабочие места и экономические возможности;
- Технологическое лидерство. Страны, которые раньше других перейдут на электромобили и зеленую энергетiku, получат

технологическое преимущество и смогут экспортировать соответствующие технологии.

Помимо отсутствия вредных выбросов, электротяга имеет и ряд технологических преимуществ перед традиционными автомобилями:

- Высокий крутящий момент, набираемый с нуля оборотов, что позволяет использовать электротягу на грузовых автомобилях и технике коммунальных служб;
- Тихий и плавный ход, что позволит снизить уровень шума в городской среде, и повысить комфорт пассажиров при передвижении;
- Простота в обслуживании;
- Универсальность в использовании энергии. Электричество можно производить из солнечной и ветровой энергии, из гидро-, ядерной и ТЭЦ. Электромобили не зависят от конкретного источника электроэнергии.

Из недостатков можно отметить:

- Меньшая практическая дальность поездки. Авто на ДВС могут проехать на одной заправке в 2-3 раза больше, чем электрокары на одной зарядке;
- Недостаточно развитая инфраструктура. В России пока недостаточно станций быстрой зарядки, особенно за пределами крупных городов. Это ограничивает практическую дальность поездки на электромобиле;
- Выше стоимость. Автомобили на ДВС дешевле в приобретении и обслуживании, чем электрокары. Большая часть цены электрокара составляет аккумуляторная батарея, так же из-за потери емкости батареи в процессе эксплуатации, аккумулятор приходится менять раз в три года.

Негативно сказываются и суровые российские зимы, литий-ионный аккумулятор теряет емкость при минусовых температурах.

Перспективы развития рынка электротранспорта на долгосрочной перспективе неизменно остаются оптимистическими, хотя и с некоторым замедлением темпов роста в ближайшие годы. Большое количество новых моделей электромобилей различных классов, расширение рынка и увеличение инвестиций в эту отрасль продолжают подталкивать электромобили к постепенному вытеснению автомобилей, работающих на ископаемом топливе. С удешевлением аккумуляторов, масштабированием производства и уменьшением их стоимости, они становятся более доступными для потенциальных покупателей.[6]

Эксперты прогнозируют, что к 2025 году продажи электромобилей могут достичь 10% от мировых продаж легковых автомобилей, а к 2030 году уже до 28%, а к 2040 году эта цифра может вырасти до 58%.[2,5] На рисунке 1 представлены долгосрочный прогноз выпуска электромобилей до 2040 года и краткосрочный до 2023 года. Он показывает, что начиная с 2015 года лидером по производству электромобилей стала Китай, где доля продаж пассажирских электромобилей в мировых масштабах увеличилась с 25% в 2015 году до 60% в 2021 году, а в первой половине 2022 года выросла до 60%.

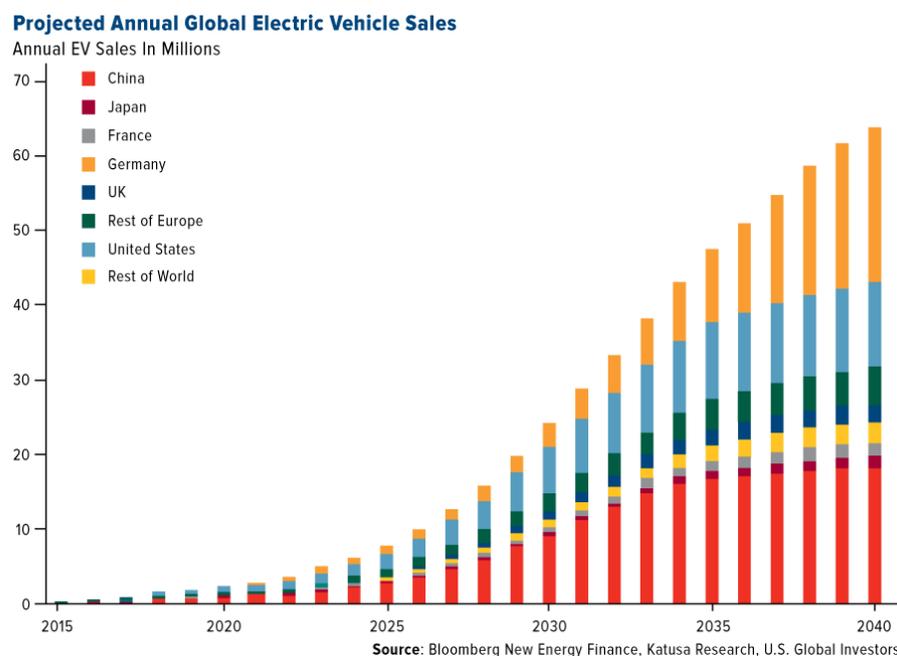


Рисунок 1 – Долгосрочный прогноз выпуска электромобилей в мире

Новые электромобили, по прогнозам экспертов, достигнут стоимости, сравнимой со стоимостью традиционных автомобилей с ДВС, к середине 30-х годов. «Однако из-за экономических и политических факторов данные сроки значительно варьируются в разных странах, в частности в Японии они могут сместиться до 2031 года. Стоит отметить, что наибольший прогресс в замене автомобилей с ДВС наблюдается в сегменте грузовых и легких коммерческих автомобилей.»[4]

Прогнозы развития рынка электромобилей в России на ближайшие годы в целом позитивные, однако темпы роста пока ниже, чем в глобальном масштабе. К 2025-2030 году доля электромобилей в общем автопарке РФ может достичь 5-10%. Это означает рост с нынешних 0,1-0,2% до 200-400 тыс. электрокаров. Продажи электромобилей в России будут расти, но пока медленными темпами. По оценкам, к 2030 году их может быть продано до 100 тыс. в год. Активно развивается производство электромобилей в России. Автогиганты планируют начать выпуск электрокаров на своих российских заводах уже в ближайшие годы. Инфраструктура зарядных станций расширяется, хотя и в более скромных масштабах. Появляется всё больше

общественных зарядок. Власти планируют ввести ряд льгот и преференций для поддержки развития рынка электромобилей. Предлагается всё больше моделей электрокаров, в том числе недорогих.[6]

Рынок Китая и Европы в ближайшие 13 лет составит около 78% мирового рынка электромобилей.[11] Интенсивное развитие этого направления в указанных выше странах обусловлено серьезными проблемами с загрязнением окружающей среды. Китай страдает от серьезного загрязнения воздуха и выбросов от автотранспорта. Электромобили воспринимаются как часть решения этой проблемы. В связи с этим оказывается Активная государственная поддержка этой отрасли. Китайское правительство вводит щедрые субсидии и налоговые льготы для покупателей электромобилей, а также стимулирует развитие инфраструктуры зарядок. Так же Китай создает обширную сеть общественных зарядных станций, в том числе быстрых. В Европе развитие электротранспорта обусловлено такими факторами, как: Жесткие экологические требования, что стимулирует переход на электромобили; Активная государственная поддержка. Многие страны Евросоюза вводят высокие налоги на автомобили с ДВС, и предлагают налоговые льготы и субсидии для производителей и покупателей электрокаров. Развитие инфраструктуры зарядных станций. И нестабильными ценами на нефть, связанными с внешней политикой. Пик продаж легковых автомобилей с двигателями внутреннего сгорания был достигнут в 2017 году. С тех пор продажи таких автомобилей сокращаются, однако общий парк таких автомобилей будет продолжать расти примерно до 2030 года.[12]

К 2040 году более 30% автомобилей на дорогах всего мира будут электрическими, причем в Китае и Европе этот процент превысит 70%. Это свидетельствует о росте глобального рынка электромобилей, который в ближайшие 10 лет станет сравнимым по объему с рынком традиционных автомобилей.

«Российский рынок электромобилей слабо развит. Согласно данным аналитического агентства «АВТОСТАТ» (см. рисунок 2), 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.).» [10,26]

Сдерживающим фактором продаж в России является, прежде всего, высокая стоимость электромобилей на конечном рынке, что, косвенно связано с отсутствием льгот на приобретение электротранспорта, и высокими налоговыми пошлинами, связанными, в свою очередь, с политикой протекционизма. Также существенное влияние на выбор между авто с традиционным силовым агрегатом и электромобилем влияет недостаточно развитая инфраструктура, и, маленький выбор моделей, зависящий от ограничения производственных мощностей производителей, поставляющих основной объем продукции в страны Японии, США и Европы



Рисунок 2 – Продажи электромобилей в РФ

Для достижения массового производства электромобилей главным ограничителем в настоящее время являются батареи. «Технические ограничения, связанные с меньшим пробегом на одной зарядке по сравнению с традиционными автомобилями, падением емкости на 30-40% в условиях

низких температур и продолжительным временем зарядки, а также экономические ограничения, связанные с высокой стоимостью батарей и снижением общей эффективности транспортного средства при увеличении массы батарей, остаются значительными.»[22]

Ограничениями для развития электромобильного рынка являются недостаточный уровень развития зарядной инфраструктуры и ограниченность производства и доступности драгоценных материалов, необходимых для производства батарей.[12]

Производители ожидают снижение стоимости батарей в 2 раза к 2026 году с развитием объема их производства, приближая себестоимость к 87 долларов США за кВт/ч. Однако, проблемы с увеличением удельной емкости батарей остаются нерешенными и требуют продолжительных исследований. Несмотря на интерес производителей к разработке литий-воздушных и литий-серных аккумуляторов с практически возможным уровнем удельной запасаемой энергии, составляющим 800 Вт•ч/кг и 600 Вт•ч/кг соответственно.

Социальный опрос показывает, что только 35% семей имеют более одной машины, для удовлетворения потребности поездок на различные расстояния. Поэтому, для реализации потребностей в поездках на дальние расстояния в течение ближайших лет необходимо сочетать несколько решений, таких как улучшение удельной емкости батарей и инфраструктуры зарядных станций, использование технологий на основе менее дорогих материалов, и развитие дополнительной инфраструктуры для электрических автомобилей.

Вопрос повышения удельной емкости батарей остается нерешенным в настоящее время и ожидает проведения длительных исследований. Однако, для гибридных и электромобилей ограничениями для развития электромобильного рынка являются необходимость дальнейшего улучшения технологии литий-ионных аккумуляторов, а также ограниченность производства и доступности драгоценных материалов, необходимых для их

создания. Однако литий-ионная технология активно развивается уже более 20 лет и имеет потенциал достижения высокой удельной запасаемой энергии в диапазоне от 387 до 430 Вт·ч/кг., но в настоящее время коммерчески произведенные элементы имеют только 200-250 Вт·ч/кг. Тем не менее, перспективные элементы, которые готовятся к коммерциализации, смогут достигнуть уровня в 300-350 Вт·ч/кг.[7]

Также стоит отметить и другие исследования в области технологии литий-воздушных LiAir (Li_2O_2), основной идеей которых является использование кислорода в воздухе в качестве реактива. Это позволяет достичь очень высокой энергетической плотности – до 1500 Вт·ч/кг, что в 5-10 раз превышает литий-ионные аккумуляторы. Но в настоящее время у этой технологии есть ряд серьезных проблем, связанных с долговечностью, производительностью и безопасностью.[14,17] И не менее интересной технологией является литий-серные Li-S аккумуляторы, Батареи на основе лития и серы также обладают очень высокой энергоемкостью - до 2600 Вт·ч/кг. Основная проблема — это разрушение электродов серы вовремя циклирования. Исследования ведутся в направлении использования специальных материалов для электродов и мембраны, увеличивающей срок службы.[13]

Возможно, использование твердого электролита поможет решить проблемы с перезарядкой дешевых материалов, таких как цинк, алюминий и сера, что может привести к разработке новой технологии аккумуляторных батарей и уменьшить их стоимость, например, для цинк-воздушных до 30-40 долларов США за кВтч.

В европейских странах среднее ежедневное расстояние вождения колеблется от 25 миль (Великобритания) до 50 миль (Польша). Несмотря на то, что только 19% автомобилей используются часто для дальних поездок, до 81% автомобилей все же приходится на это время от времени. Это подтверждается данными о движении, где более 60% людей предпочитают автомобиль для дальних поездок (более 350 км). Опросы показывают, что

только 35% семей имеют более одной машины, чтобы удовлетворить все свои поездки. Необходимо понимать, что решить противоречие между спросом на поездки и ежедневным использованием транспортных средств с помощью современных электромобилей BEV невозможно, по крайней мере, до 2030 года. Важно отметить, что создание зарядной инфраструктуры является долгосрочным проектом, реализация которого потребует многих десятилетий для достижения уровня инфраструктуры бензина.[3]

Таким образом, можно сделать вывод, что складываются некоторые тенденции по потреблению электромобилей в мире. Исходя из вышеописанных факторов, можно сделать вывод, что в обозримой перспективе ожидается быстрый рост рынка электромобилей. Развитие технологий и инфраструктуры продолжит стимулировать переход на электротранспорт, особенно в городском и коммерческом сегментах.

2 Обзор существующих электромобилей на рынке

Рассмотрим основных производителей электрокаров в России. Ниже представлены электромобили отечественного производства, рассмотрим конструкцию, преимущества и недостатки автомобилей:



Рисунок 3 – Компоновка Lada Ellada

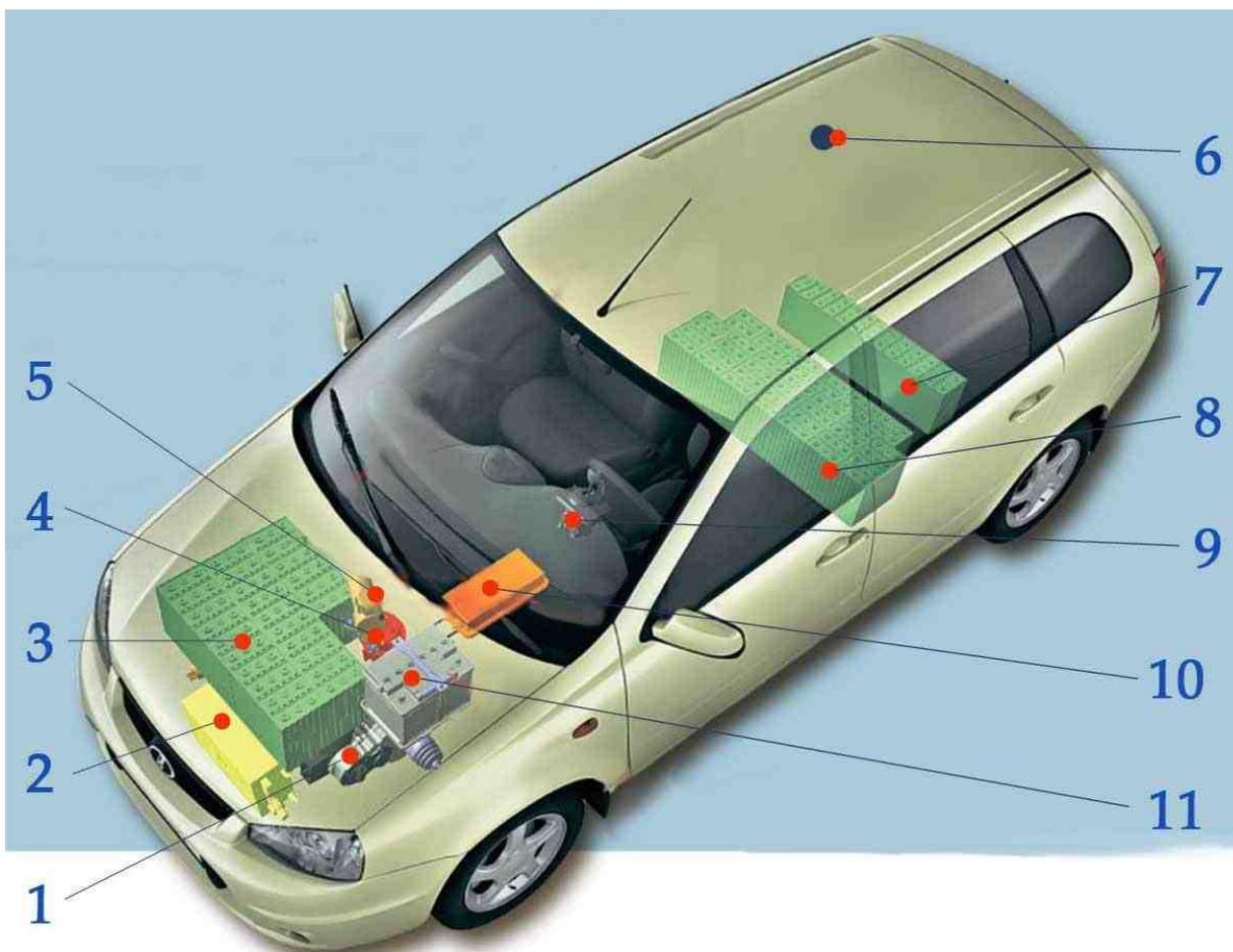


Рисунок 4 – Схема силовой установки Lada Ellada

На рисунках 3, 4 представлена компоновка отечественного электромобиля Lada Ellada производства компании ОАО «Автоваз», города Тольятти. Рабочее напряжение системы – 256 Вольт, мощность мотора 81 л.с (60кВт). Конструкция представляет собой традиционную, для легковых автомобилей, компоновку с расположенным в моторном отсеке электродвигателем, работающим вкуче с редуктором электромотор, и, расположенными аккумуляторами над мотором и под задним диваном. Расположение батарей помогает достичь хорошей развесовки автомобиля, что положительно сказывается на его эксплуатационных свойствах. Основным минусом данной конструкции является редуктор, в котором при торможении двигателем (рекуперации) выходит из строя шестерня и опорные подшипники редуктора.[8]

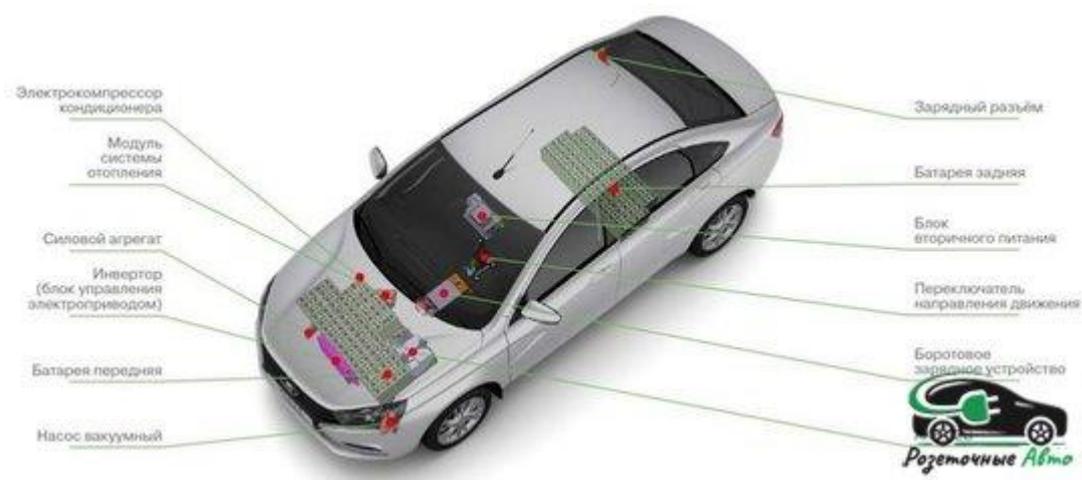


Рисунок 5 – Схема силовой установки Lada Vesta EV

На рисунке 5 видна компоновка электромобиля Lada Vesta EV. Вторым электромобилем производства волжского автогиганта. Рабочее напряжение сети – 250 Вольт, мощность мотора – 82 л.с.(60 кВт). Из этой схемы можно увидеть схожее с Ellada расположение электромотора и аккумуляторных батарей. Минусом данного автомобиля является цена, которая превышает цену аналогичной машины с традиционным мотором в 5 раз.

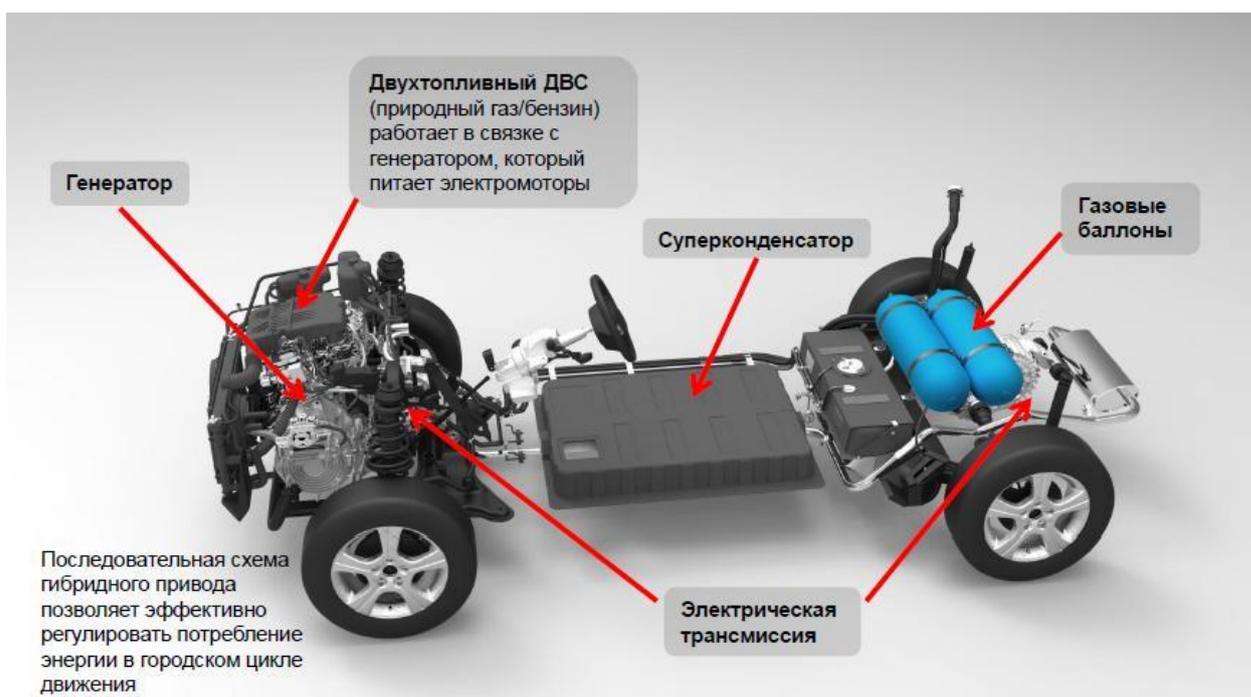


Рисунок 6 – Схема компоновки Ё-мобиль

На рисунке 6 можно увидеть компоновку гибрида Ё-мобиль, производство которого планировалось разместить в городе Санкт-Петербург. Рабочее напряжение системы – около 400 Вольт. Этот автомобиль по сути является последовательным гибридом, с установленным над передней осью генератором. Генератор, в свою очередь, состоит из роторно-лопастного ДВС на 60 л.с. и генератора. Электрическая трансмиссия на каждой оси своя. Такая концепция обеспечивает большой запас хода, высокие эксплуатационные характеристики. Но минусом является особенность роторно-лопастного двс и теплонапряженность ротора. Что отрицательно сказывается на ресурсом двигателя. Также сомнения вызывает и использование в качестве накопителей энергии суперконденсаторов, которые стоят на борту гибрида.[16]

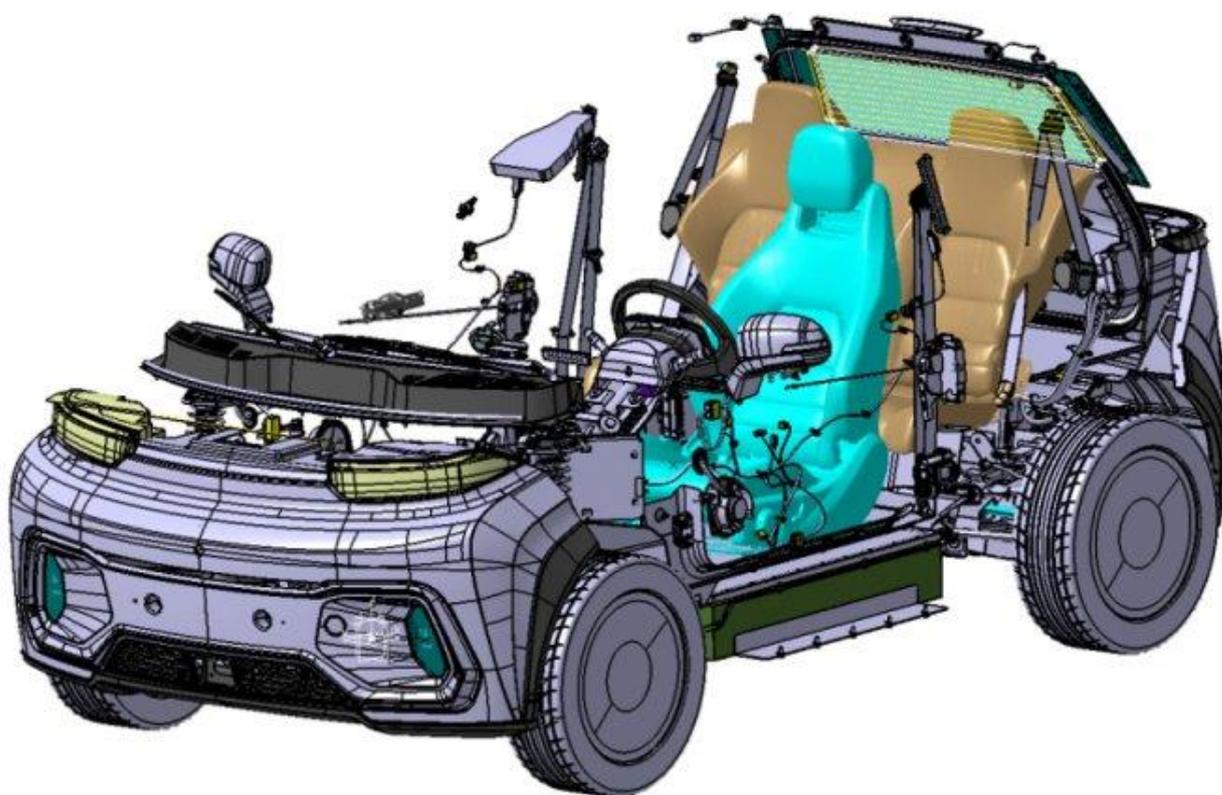


Рисунок 7 – Схема компоновки Кама-1



Рисунок 8 – Схема силовой установки Кама-1

На рисунках 7 и 8 представлена схема силовой установки и компоновка электромобиля Кама-1, разработанный при поддержке ПАО «КАМАЗ». Аккумулятор в этом электромобиле расположен посередине под передними сиденьями, что обеспечивает низкий центр тяжести. Привод задний, что положительно скажется на сроке службы приводов и пассивной безопасности при лобовом ударе, но также существенно снижает проходимость и эксплуатационные качества в холодное время года.[30]



Рисунок 9 – Универсальная платформа электромобиля Zetta

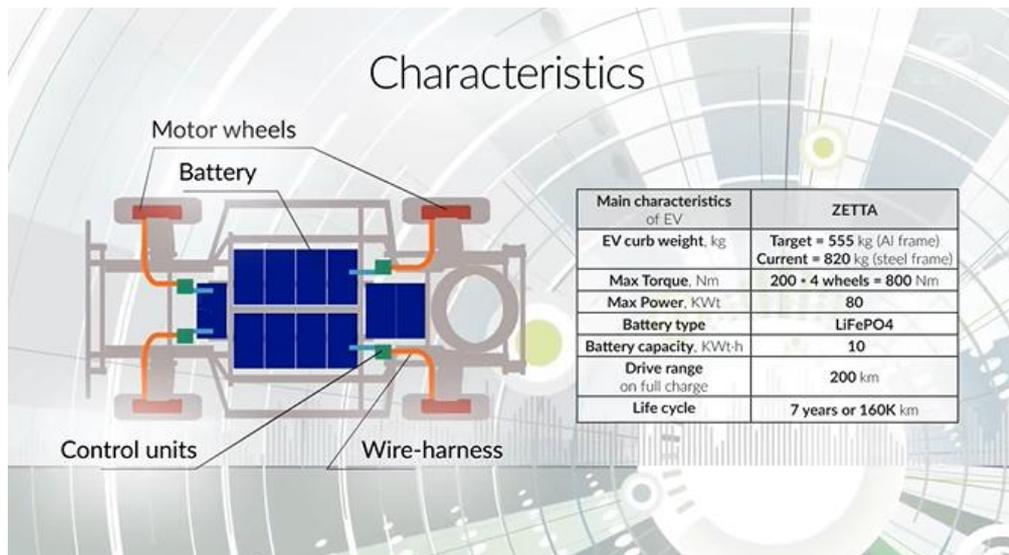


Рисунок 10 – Принципиальная схема силовой установки электромобиля Zetta

На рисунках 9,10 представлена компоновка силовой установки электромобиля Zetta. Платформа состоит из аккумуляторов и мотор-колес. Такая компоновка позволит уместить большее количество батарей, но также и существенно снизит ресурс электродвигателей, так как они расположены на колесе, и подвержены вибрациям, передающимся от дороги. Таким образом, ухудшаются эксплуатационные характеристики из-за высокой неподрессоренной массы.

Можно сделать вывод, что среди продукции отечественных производителей электромобилей на данный момент отсутствует внедорожники. Следовательно, ниша электрических внедорожников остается свободной, что подтверждает актуальность выбранной темы – электрическая платформа внедорожного транспортного средства.

3 Обзор существующих технических решений в области АКБ

3.1 Обзор аккумуляторов

В настоящее время на рынке представлены несколько основных видов аккумуляторов. Рассмотрим основные технические решения в области АКБ.



Рисунок 11 – Литий-ионные аккумуляторы

Литий-ионные аккумуляторы (рисунок 11) самые распространенные аккумуляторы в электрическом транспорте. Основные преимущества, которых:

- Высокая энергоемкость. Литий-ионные аккумуляторы имеют более высокую плотность энергии по сравнению со свинцово-кислотными и никель-металл-гидридными. Это позволяет обеспечить большой запас хода электромобиля;[16]

- Высокая мощность. Литий-ионные аккумуляторы могут обеспечивать большой пиковый ток, необходимый для быстрого разгона электрокара;
- Плоская форма. Плоская форма литий-ионных аккумуляторов позволяет формировать компактные и гибкие батарейные установки;
- Отсутствие памяти эффекта. В отличие от никель-кадмиевых аккумуляторов литий-ионные не «забывают» состояние заряда после частичной разрядки;
- Долговечность. Хотя и не так долго как никель-металл-гидридные, литий-ионные аккумуляторы всё-таки имеют достаточно высокий ресурс - до 2000 циклов полной зарядки-разрядки;
- Возможность рекуперации. Литий-ионные аккумуляторы легко восстанавливают заряд при торможении, повышая эффективность электротранспорта;
- Относительная безопасность. В случае правильной эксплуатации литий-ионные аккумуляторы могут считаться достаточно безопасными.

Основные недостатки литий-ионных аккумуляторов:

- Высокая стоимость. Литий-ионные аккумуляторы значительно дороже других видов, особенно свинцово-кислотных;
- Ограниченная долговечность. Хотя, литий-ионные аккумуляторы и могут служить до 2000 циклов полной зарядки-разрядки, ресурс их все равно ограничен, в отличие от никель-металлогидридных;
- Безопасность. Литий-ионные аккумуляторы могут возгораться при перегреве, перезарядке или механических повреждениях;
- Снижение ёмкости. Со временем ёмкость литий-ионных аккумуляторов снижается, что уменьшает запас хода электромобиля;

- Чувствительность к температуре. При температуре ниже 0°C ёмкость литий-ионных аккумуляторов снижается, а при перегреве выше 60°C - ухудшается их долговечность;
- Неперерабатываемость. После выработки ресурса литий-ионные аккумуляторы трудно перерабатываются и являются токсичными отходами;
- Низкая устойчивость к механическим повреждениям. Литий-ионные аккумуляторы чувствительны к ударам и проколам.

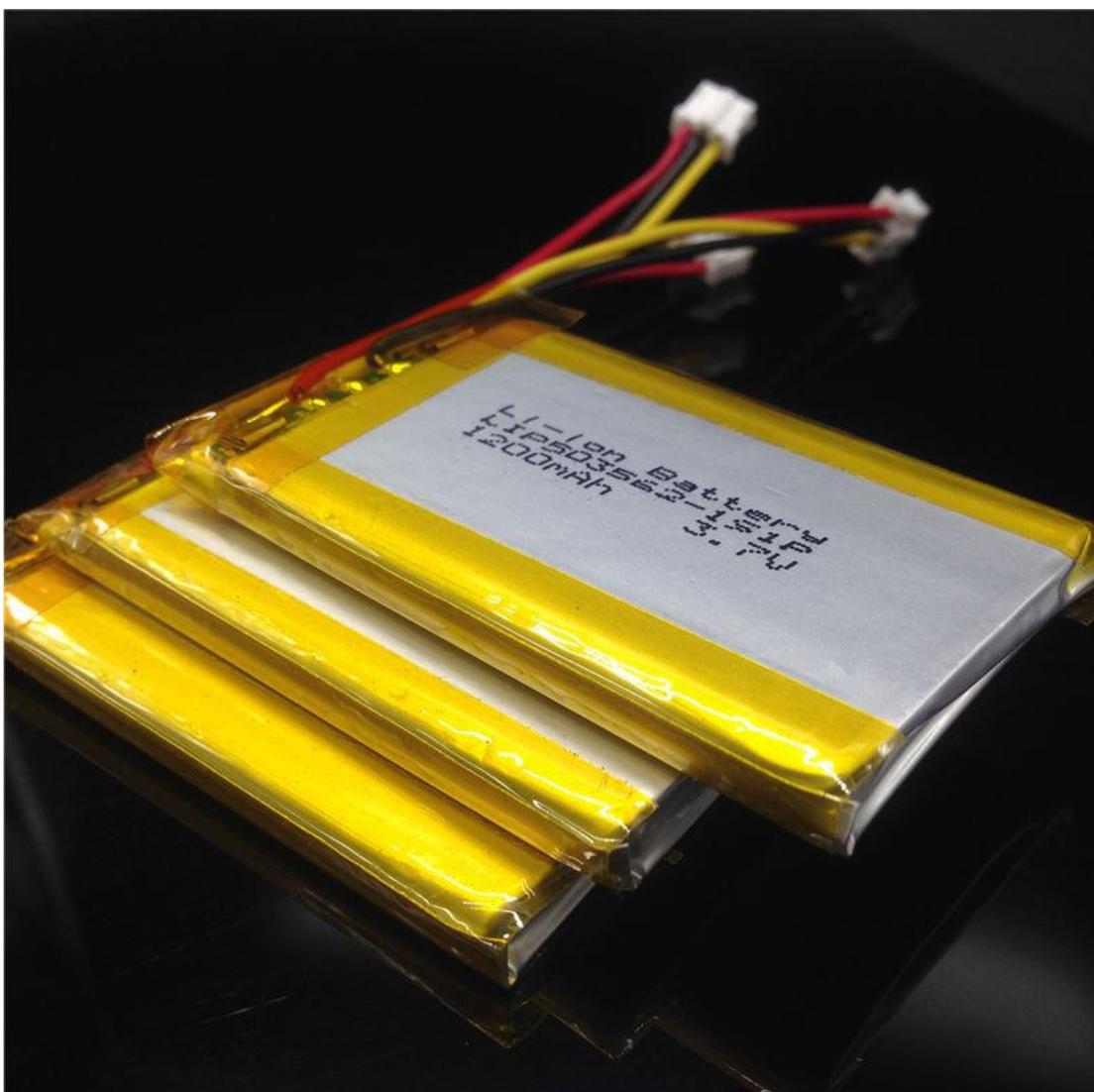


Рисунок 12 – Литий-полимерные аккумуляторы

На рисунке 12 изображен литий-полимерный аккумулятор, который обладает рядом преимуществ перед литий-ионными:

- Низкая масса. Li-poly аккумуляторы легче обычных Li-ion за счет отсутствия жидкого электролита;
- Компактность. Благодаря плоской форме и гибкости Li-poly батареи могут быть различной конфигурации;
- Высокая мощность. Полимерный электролит способствует более высоким величинам пикового тока;
- Пониженная стоимость производства. Отсутствие жидкого электролита делает производство Li-poly батарей дешевле;
- Повышенная безопасность. Li-poly аккумуляторы имеют меньшую вероятность возгорания при перегреве или пробое;
- Экологичность. В случае утилизации полимерные батареи представляют меньшую угрозу для окружающей среды;
- Работоспособность в любых положениях. Полимерный электролит позволяет батарее работать при любом расположении.
- Недостатками литий-полимерных аккумуляторов являются:
- Меньшая емкость. Литий-полимерные аккумуляторы имеют меньшую емкость по сравнению с литий-ионными, особенно на единицу массы;
- Сокращенный срок службы. Литий-полимерные батареи обычно имеют меньший ресурс циклов зарядки-разрядки по сравнению с литий-ионными;
- Пониженная термостойкость. Литий-полимерные аккумуляторы хуже переносят высокие и низкие температуры, что ограничивает их применение;
- Большая чувствительность к перезаряду. Перезаряд может быстрее вывести литий-полимерную батарею из строя;

- Значительная саморазрядка. Скорость саморазрядки литий-полимерных батарей обычно выше;
- Меньшая мощность. Даже при большем пиковом токе общая выходная мощность литий-полимерных батарей ниже;
- Более сложная технология. Технология производства литий-полимерных аккумуляторов требует большей точности.



Рисунок 13 – никель-металлогидридные аккумуляторы

Рассмотрим преимущества и недостатки никель-металлогидридных аккумуляторов (рисунок 13)

К преимуществам относятся:

- Высокая долговечность. Никель-металл-гидридные аккумуляторы могут прослужить до 10 000 циклов зарядки-разрядки, что в 10 раз больше, чем у литий-ионных;

- Безопасность. Никель-металл-гидридные аккумуляторы взрываются значительно реже, чем литиевые;
- Низкая саморазрядка. Скорость саморазрядки никель-металл-гидридных аккумуляторов ниже, чем у литиевых;
- Устойчивость к перезаряду. Никель-металл-гидридные аккумуляторы лучше переносят перезаряд;
- Работоспособность при низких температурах. Эти аккумуляторы не «мерзнут» при низких температурах, в отличие от литиевых;
- Перерабатываемость. После выработки ресурса никель-металл-гидридные аккумуляторы можно переработать, в отличие от литиевых;
- Низкая стоимость. Цена никель-металл-гидридных аккумуляторов заметно ниже, чем литиевых, особенно на единицу емкости;
- Основное преимущество - очень высокая долговечность и надежность, чего не хватает литиевым аккумуляторам. Однако по плотности энергии и мощности никель-металл-гидридные уступают литиевым.

К недостаткам же относятся:

- Низкая плотность энергии. По сравнению с литиевыми аккумуляторами никель-металл-гидридные имеют в 2-3 раза меньшую емкость на единицу массы;
- Низкая мощность. Эти аккумуляторы не могут обеспечивать такие же высокие пиковые токи, как литиевые;
- Память эффекта. После нескольких циклов частичной зарядки-разрядки ёмкость аккумулятора начинает снижаться;
- Низкая термостойкость. Никель-металл-гидридные аккумуляторы чувствительны к температуре и хуже работают в жарком климате;
- Сложность производства. Технологический процесс производства никель-металл-гидридных аккумуляторов довольно сложен;

- Высокая стоимость. На единицу емкости такие аккумуляторы заметно дороже свинцовых;
- Из-за низкой плотности энергии никель-металл-гидридные аккумуляторы невыгодно использовать в электромобилях. Они в основном применяются там, где требуется высокая надежность и длительный срок службы;
- Например, в гибридных автомобилях, где подзаряжаются от основного двигателя;
- Таким образом, при всех достоинствах никель-металл-гидридные аккумуляторы уступают литиевым по ключевым показателям, важным для электромобилей.



Рисунок 14 – Свинцово-кислотные аккумуляторы
 Основные преимущества свинцово-кислотных аккумуляторов, изображенных на рисунке 14:

- Низкая стоимость. Свинцово-кислотные аккумуляторы являются одними из самых дешевых по цене;

- Длительный срок службы. При правильной эксплуатации свинцовые батареи могут прослужить до 7-10 лет;
- Надежность. Свинцово-кислотные аккумуляторы являются одними из самых надежных при соответствующем уходе;
- Возможность частичных разрядов. Такие аккумуляторы не «требуют» полного цикла зарядки-разрядки;
- Безопасность. Свинцово-кислотные аккумуляторы считаются одними из самых безопасных;
- Низкая саморазрядка. Скорость саморазрядки у таких аккумуляторов одна из самых низких;
- Устойчивость к перезаряду. Такие аккумуляторы легко переносят перезаряд.

Главное достоинство свинцово-кислотных аккумуляторов - это их низкая стоимость при абсолютной надежности и безопасности. Однако они имеют и серьезные недостатки:

- Низкая энергоемкость. Энергоемкость свинцовых аккумуляторов в 10-30 раз ниже, чем у литиевых;
- Низкая мощность. Не могут обеспечивать пиковые токи, необходимые для электрокаров;
- Большие габариты. Объем свинцовых батарей в 3-5 раз больше, чем у литиевых;
- Значительный вес. Вес свинцовых аккумуляторов в 2-3 раза выше, чем у литиевых;
- Чувствительность к переворотам. При переворачивании свинцовые батареи могут выйти из строя;
- Требовательность к подзарядке. Необходимо соблюдать условия подзарядки и хранения;
- Сложная утилизация. Правильная утилизация свинцовых аккумуляторов требует специальных условий;

- Из-за очень низкой плотности энергии и мощности свинцовые аккумуляторы не подходят для электромобилей. Их используют главным образом в аварийном и резервном питании.

Главные недостатки - малая энергоемкость и значительные габариты и вес, несмотря на относительно высокую надежность.



Рисунок 15 – Натриево-серный аккумулятор

Основные преимущества натриево-серных аккумуляторов (рисунок 15):

- Высокая энергоемкость. В два раза выше, чем у литий-ионных аккумуляторов, и в пять раз - чем у свинцовых аккумуляторов,
- Длительный срок службы. Порядка 20-30 лет при правильной эксплуатации,
- Возможность работы в широком диапазоне температур. До 160°C,
- Низкая саморазрядка. Составляет всего 1-2% в месяц,
- Безопасность. Не взрываются и не возгораются,

- Устойчивость к перезаряду. Натрий-серные аккумуляторы легко переносят перезаряд.
- Низкая стоимость. Существенно дешевле литий-ионных аккумуляторов.

Главное достоинство натрий-серных аккумуляторов - высокая энергоемкость и длительный срок службы. Они идеально подходят для долгосрочного и стационарного хранения энергии. Недостатки натрий-серных аккумуляторов: медленная скорость заряда-разряда, большие габариты, вес и невысокая мощность.

Таким образом, они не подходят для применения в автомобилях, лучше их использовать как источники резервной энергии.

Рассмотрим следующее решение в области АКБ - литий-железо-фосфатный аккумулятор, изображенный на рисунке 16.

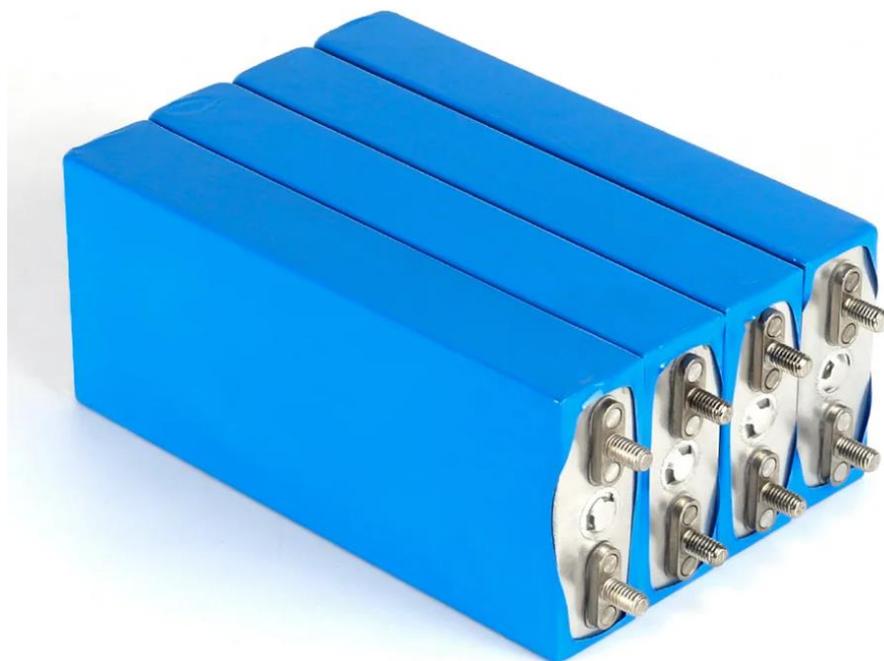


Рисунок 16 – Литий-железо-фосфатный аккумулятор

- Преимущества литий-железо-фосфатных аккумуляторов:
- Повышенная безопасность. Они относятся к наименее взрывоопасным литиевым аккумуляторам.
- Высокая долговечность. Срок службы до 8000 циклов зарядки-разрядки.
- Устойчивость к перезаряду. Легко переносят перезаряд без повреждений.
- Стабильность. Сохраняют ёмкость даже при частичных циклах зарядки.
- Возможность работы при низких температурах. Не «мерзнут» зимой.
- Низкая саморазрядка. Составляет менее 3% в месяц.
- Экологичность. Легче перерабатываются и не так ядовиты.
- Низкая стоимость. Дешевле обычных литий-ионных аккумуляторов.

Главное достоинство - повышенная безопасность, сопоставимая со свинцово-кислотными аккумуляторами. Также высокая долговечность и стабильность.

Недостатки - невысокая плотность энергии и мощность. К тому же во время эксплуатации ёмкость снижается быстрее, чем у литий-ионных. Литий-железо-фосфатные аккумуляторы подходят для электрокаров, где приоритетна безопасность, хотя и не обеспечивают значительный запас хода.

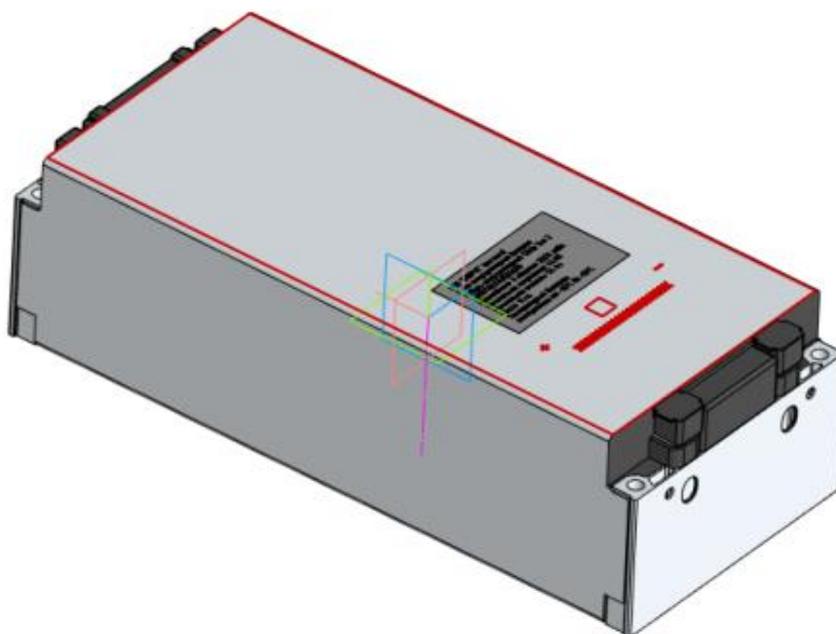


Рисунок 17 – Литий-никель-марганец-кобальт-оксидный аккумулятор

Преимущества Литий-никель-марганец-кобальт-оксидных (NMC) аккумуляторов (рисунок 17):

- Высокая энергоемкость. NMC аккумуляторы могут обеспечить значительный запас хода электромобиля, в некоторых случаях более 500 км.
- Высокая мощность. Способны выдавать большие значения тока, необходимые для разгона электромобилей.
- Длительный срок службы. NMC аккумуляторы могут прослужить более 2000 циклов зарядки/разрядки.
- Возможность рекуперации. Поддерживают значительный ток при торможении, благодаря чему эффективно восстанавливают заряд.

Недостатки:

- Высокая стоимость. NMC аккумуляторы - одни из самых дорогих на рынке.

- Ограниченный температурный диапазон. Требуют поддержания оптимальной температуры для обеспечения высокой эффективности.
- Высокая чувствительность к перезаряду. Перезаряд может привести к их быстрому выходу из строя.
- Низкая безопасность. Некоторые NMC аккумуляторы могут представлять пожаро- и взрывоопасность.

Таким образом, NMC аккумуляторы характеризуются высокими энергетическими характеристиками, но имеют и значительные недостатки, к которым нужно подходить комплексно, чтобы обеспечить надежность и безопасность электромобиля.[24]

3.2 Степень локализации производства аккумуляторов

В России локализовано производство преимущественно свинцово-кислотных аккумуляторов. В частности, крупнейшим производителем является компания «Энергия» (бывший ВАТБ).

Также в России развивается производство никель-кадмиевых аккумуляторов. В частности, предприятия «Элекон» (Екатеринбург) и «Искра» (Тольятти) выпускают аккумуляторы этого типа.[23]

В Новосибирской области, в декабре 2011 года запущен завод «Лиотех», по производству литий-железо фосфатных аккумуляторов.

По итогу рассмотренных видов аккумуляторов можно сделать следующий вывод, что для большинства видов современного электротранспорта, включая электромобили, самым подходящим вариантом являются литий-железо-фосфатные аккумуляторы. Это связано с их преимуществами:

- Высокая плотность энергии. Аккумуляторы могут обеспечить наибольший запас хода электрокара.

- Высокая мощность. Способны выдавать большие пиковые токи для разгона.
- Компактность. За счет плоской конструкции позволяют сэкономить место.
- Возможность рекуперации. Легко восстанавливают заряд при торможении.
- Относительная экономичность. Позволяют снизить расход энергии по сравнению с двигателем внутреннего сгорания.

Таким образом, наибольший потенциал для электротранспорта на данный момент представляют собой литий-ионные аккумуляторы благодаря их высоким характеристикам. Преимуществом этих аккумуляторов также является высокая степень локализации.

4 Расчет основных параметров электрической платформы

4.1 Тягово-динамический расчет

Исходные данные для проведения тягово-динамического расчета электроавтомобиля (таблица 1). Расчет производился в соответствии с методикой, описанной в источнике.[15]

Таблица 1 - Исходные данные для проведения тягово-динамического расчета.

| Параметр | Значение |
|--|-----------------|
| Колесная формула | 4x4 |
| Количество мест | 2 |
| Снаряженная масса m_0 , кг | 850 |
| Максимальная скорость V_{max} , км/ч (м/с) | 160(44,48) |
| Угловая скорость ω_e^{max} , рад/с (об/мин) | 119,6 (1142) |
| Максимальная мощность двигателя N_e^{max} , кВт | 70 |
| Максимальный крутящий момент двигателя M_e^{max} , Н·м | 1733 |
| Тип и размерность колеса | 265/75 R16 |
| Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x | 0,35 |
| Величина максимального преодолеваемого уклона i , % | 0,29 |
| КПД трансмиссии $\eta_{тр}$ | 0,8 |
| Габаритная ширина автомобиля B , мм | 1996 |
| Габаритная высота автомобиля H , мм | 1753 |
| Коэффициент сопротивления качению f_0 | 0,011 |
| Передаточные числа: | |
| Общее передаточное число | 10,5 |
| Передаточное число 1 | 2,762 |
| Передаточное число 2 | 3,789 |

Подготовка исходных данных для тягового расчета

Полная масса автомобиля:

$$m_a = m_0 + m_{\text{ч}} \cdot n + m_{\text{б}} \cdot n \quad (1)$$

где: m_0 – снаряженная масса автомобиля, кг;

$m_{\text{ч}} = 90$ кг – масса одного человека;

n – число пассажиров;

$m_{\text{б}}$ – вес багажа.

$$m_a = 850 + 90 \cdot 2 = 1030$$

Полный вес автомобиля:

$$G_a = m_a \cdot g \quad (2)$$

где: g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

$$G_a = 1030 \cdot 9,81 = 10104,3$$

Согласно выбранной ширине 265/75 R16, статистический радиус данной шины рассчитывается по формуле:

$$r_{\text{ст}} = 0,5d + \lambda_z \times H, \quad (3)$$

Где:

$d = 0,41$ – посадочный диаметр, м;

$\lambda_z = 0,85$ – коэффициент вертикальной деформации, зависящий от типа шин;

$H = 0,2$ – высота профиля шины, м.

$$r_{\text{ст}} = 0,5 \times 0,41 + 0,85 \times 0,2 = 0,37 \text{ м.}$$

Параметры обтекаемости автомобиля

Коэффициент обтекаемости

$$k = \frac{C_x \cdot \rho}{2}, \quad (4)$$

где: $\rho = 1,293$ – плотность воздуха в нормальных условиях, кг/м^3 .

$$k = \frac{0,35 \cdot 1,293}{2} = 0,226$$

Лобовая площадь автомобиля

$$F = 0,8 \cdot B \cdot H , \quad (5)$$

где:

B – габаритная ширина автомобиля, м;

H – габаритная высота автомобиля, м.

$$F = 0,8 \cdot 1,75 \cdot 1,998 = 2,79 \text{ м}^2$$

«Внешняя скоростная характеристика (ВСХ) электромотора

Рассчитывается ВСХ двигателя по формуле:

$$N_e = N_{\max} \left[\frac{\omega_e}{\omega_N} + \left(\frac{\omega_e}{\omega_N} \right)^2 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_N} \right)^3 \right] , \quad (6)$$

где: ω_e – текущее значение угловой скорости вала, рад/с;

ω_N – угловая скорость вала при максимальной мощности, рад/с.

N_e – текущее значение эффективной мощности мотора, Вт.

Для построения кривой эффективного момента M_e (Н · м) применяем формулу:

$$M_e = \frac{N_e}{\omega_e} , \quad (7)$$

Рассчитываемы зависимости $N_e(\omega_e)$ и $M_e(\omega_e)$. Результаты расчетов сводим в таблицу (см. таблицу 2) и представляем в виде графика (рисунок 18, 19). Для данного двигателя, данные полученный при испытаниях со стенда, которые вы можете увидеть в таблице ниже.» [29]

Таблица 2 - Результаты испытания двигателя.

| $M_e, \text{Н} \cdot \text{м}$ | $n_e, \text{об/мин}$ | $N_e, \text{кВт}$ |
|--------------------------------|----------------------|-------------------|
| 1733 | 50 | 9,07 |
| 1680 | 150 | 26,39 |
| 1651 | 250 | 43,22 |
| 1647 | 350 | 60,37 |
| 1481 | 450 | 69,79 |
| 1288 | 550 | 74,19 |
| 1100 | 650 | 74,88 |
| 920 | 750 | 72,26 |
| 807 | 850 | 71,83 |
| 735 | 950 | 73,12 |
| 670 | 1050 | 73,67 |
| 580 | 1150 | 69,85 |

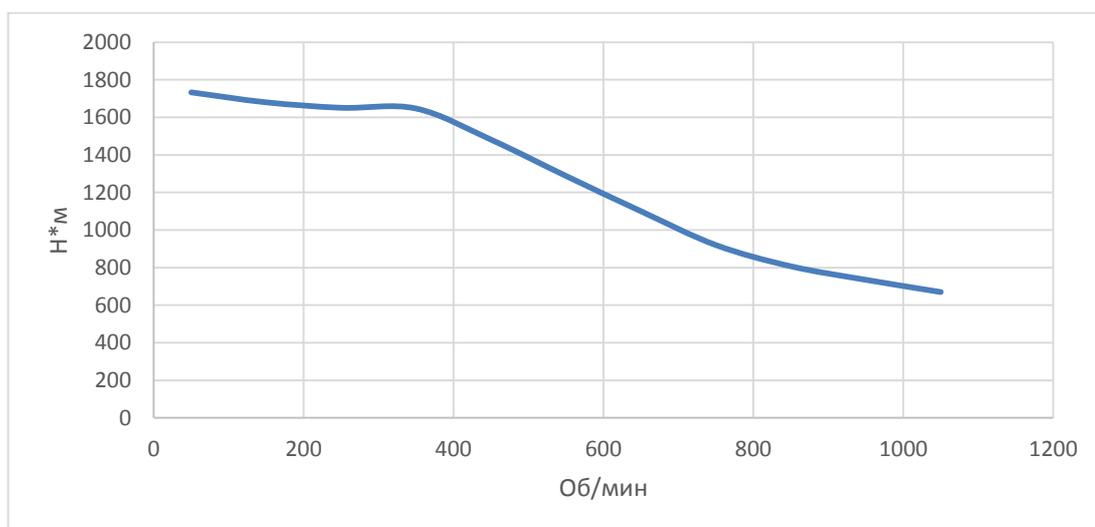


Рисунок 18 - График зависимость крутящего момента от частоты вращения вала мотора

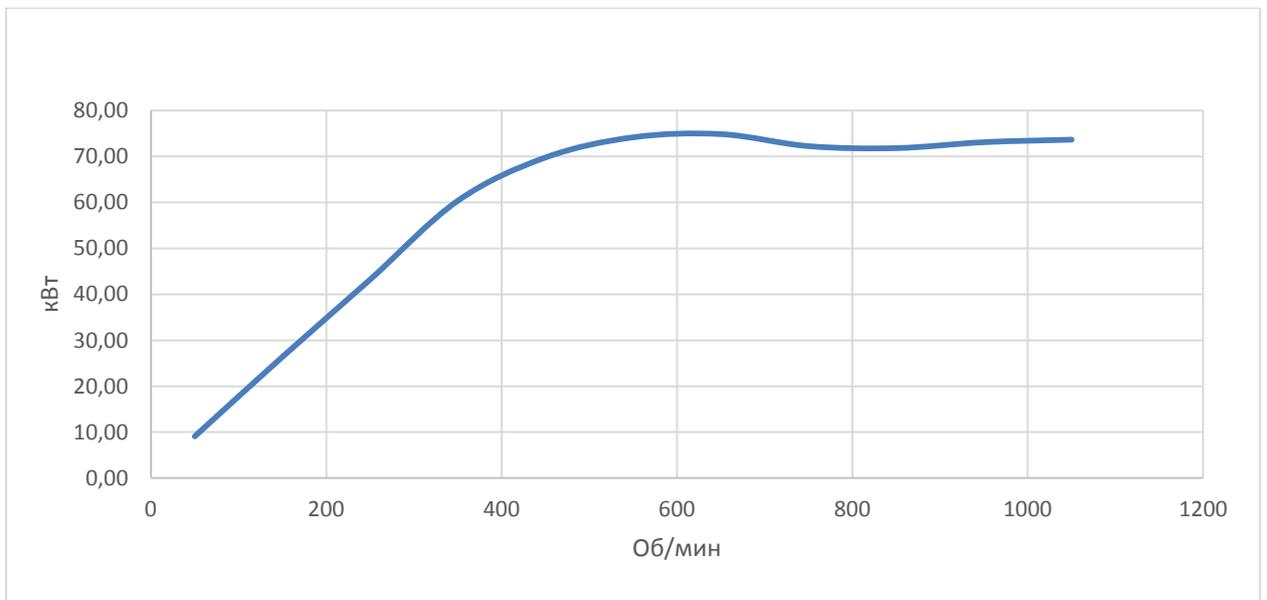


Рисунок 19 - Зависимость мощности от частоты вращения вала мотора

«Определение передаточного числа

Передаточное число U_0 определяется, исходя из заданного значения максимальной скорости автомобиля V_{max} и передачи, на которой мы хотим достигнуть эту скорость. Однако, электромотор достигает максимального крутящего момента с низких оборотов, поэтому необходимость в коробке передач, как в случае с ДВС, отпадает.

Расчет производится по данной формуле:

$$U_0 = \frac{r_k \times \omega_{max}}{U_k \times V_{max}}, \quad (8)$$

Где: ω_{max} – максимальная угловая скорость коленчатого вала;

U_k - передаточное число высшей передачи, так как электродвигатель напрямую передает крутящий момент к редукторам, то примем U_k равной 1;

$$U_0 = \frac{0,37 \times 119,6}{1 \times 44,48} = 1$$

Для проведения следующих расчетов, берем значение главной передачи за $U_0=1$,

«Силовой баланс автомобиля

Уравнение силового баланса:

$$F_T = F_d + F_B + F_{и} , \quad (9)$$

где: F_T – сила тяги ведущих колес, Н;

F_d – сила дорожного сопротивления, Н;

F_B – сила сопротивления воздуха, Н;

$F_{и}$ – сила сопротивления разгону автомобиля, Н (не учитываем).

Силу тяги рассчитывают по формуле:

$$F_{Ti} = \frac{U_{ki} \cdot U_0 \cdot M_e \cdot \eta_{тр}}{r_k} , \quad (10)$$

Сила аэродинамического сопротивления воздуха:

$$F_B = k \cdot F \cdot V_a^2 , \quad (11)$$

Сила дорожного сопротивления автомобиля (без учета сопротивления подъему):

$$F_d = G_a \cdot f , \quad (12)$$

где: $f = f_0 \cdot \left(1 + \frac{V_a^2}{2000}\right)$ – зависимость коэффициента трения качения от скорости движения болида.» [29]

Пользуемся выбранными при расчете ВСХ значениями ω_e , приводя в соответствие с ними скорости внедорожника.

Результаты расчетов занесем в таблицу 3 и представляем в виде графика (рисунок 20).

Таблица 3 – Тяговый баланс автомобиля

| | | | | | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ω_e | 5,2 | 15,7 | 26,2 | 36,7 | 47,1 | 57,6 | 68,1 | 78,5 | 89,0 | 99,5 |
| Me | 1733 | 1680 | 1651 | 1647 | 1481 | 1288 | 1100 | 920 | 807 | 735 |
| V | 1,9 | 5,8 | 9,7 | 13,6 | 17,5 | 21,4 | 25,3 | 29,2 | 33,1 | 37,0 |
| F_T | 3725,5 | 3611,6 | 3549,2 | 3540,6 | 3183,8 | 2768,9 | 2364,7 | 1977,8 | 1734,8 | 1580,1 |
| f | 0,011 | 0,011 | 0,012 | 0,012 | 0,013 | 0,014 | 0,015 | 0,016 | 0,017 | 0,019 |
| F_B | 1,9 | 17,0 | 47,3 | 92,8 | 153,4 | 229,1 | 320,0 | 426,1 | 547,2 | 683,6 |
| F_d | 111,4 | 113,0 | 116,4 | 121,5 | 128,2 | 136,7 | 146,8 | 158,6 | 172,1 | 187,3 |

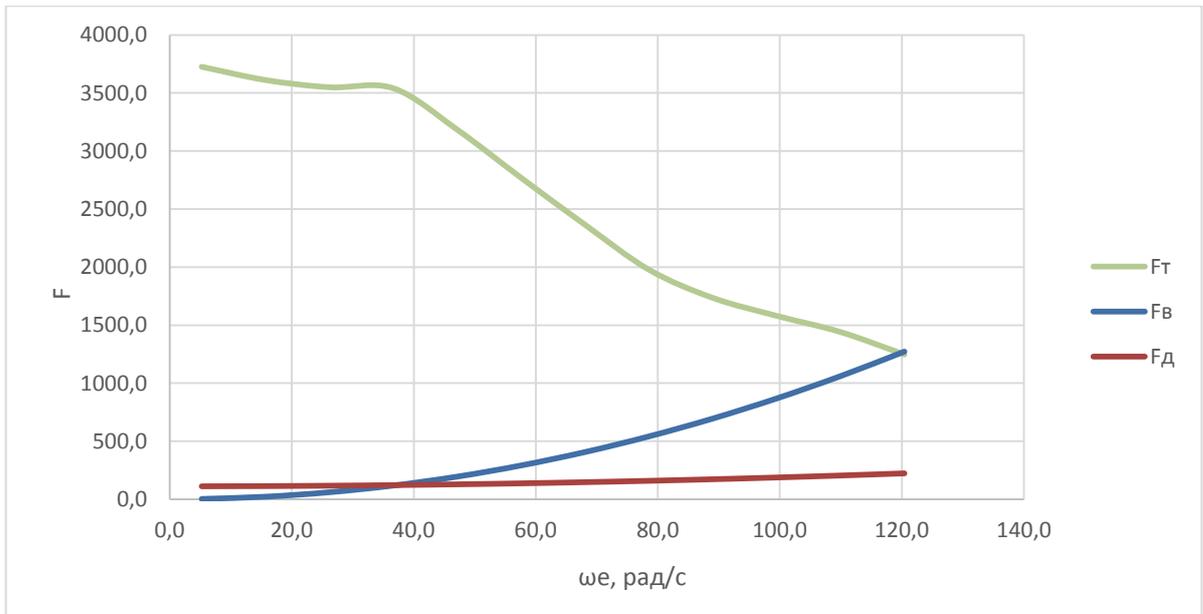


Рисунок 20 – Тяговый баланс автомобиля

«Динамическая характеристика автомобиля

$$D = \frac{F_T - F_B}{G_a}, \quad (13)$$

По этой формуле и данным силового баланса рассчитываем и строим динамическую характеристику электромобиля, которая является графическим изображением зависимости динамического фактора D от скорости движения при полной загрузке машины.

Данные расчета заносим в таблицу 4 и представляем графически (рисунок 21).

Чтобы учесть влияние буксования ведущих колес, определяем динамический фактор по сцеплению:

$$D_{сц} \approx \frac{G_{сц} \cdot \varphi}{G_a} = \frac{2030,4 \cdot 2,1}{3384,45} = 1,25.$$

$$G_{сц} = m_2 \cdot G_2 = 1,08 \cdot 2030,4 = 2192,83H$$

Таблица 4 - Данные расчета динамической характеристики

| Динамический фактор, D | | | | | | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,3685 | 0,3553 | 0,3453 | 0,3387 | 0,2958 | 0,2452 | 0,1938 | 0,1422 | 0,1029 | 0,0705 |

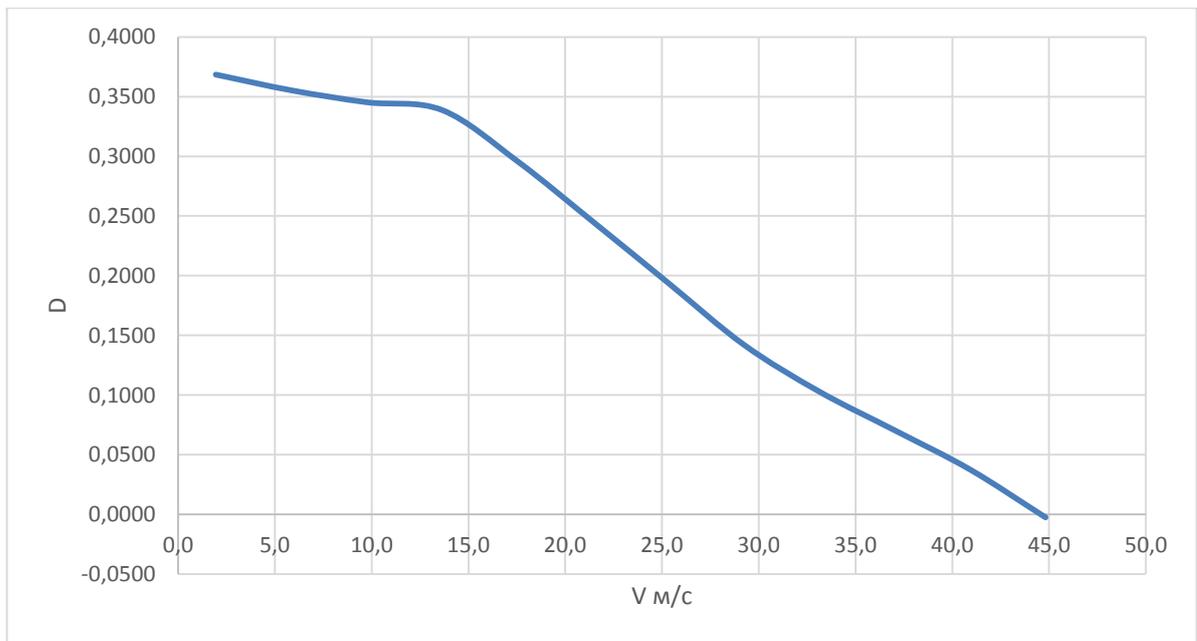


Рисунок 21 – Динамическая характеристика электромобиля

Разгон электромобиля

Ускорение во время разгона определяется, для случая движения электромобиля, по горизонтальной дороге с твердым покрытием хорошего качества при максимальном использовании мощности двигателя и отсутствии буксования ведущих колес. Как и упоминалось ранее, для графического представления, берем только в расчет одну главную передачу, по которому находим ускорение из выражения.

$$j = \frac{(D-f) \cdot g}{\delta_{вр}}, \quad (14)$$

где: $\delta_{вр} = 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_k^2)$ – коэффициент учета вращающихся масс двигателя, который определяем для каждой передачи в отдельности (для автомобилей с двигателем внутреннего сгорания) и как в нашем случае только для одной по формуле:

$$\delta_{вр} = 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_k^2) = 1 + (0,05 + 0,03 \cdot 3^2) = 1,32$$

Определяем ускорение разгона (рисунок 7), вносим результаты в таблицу 5 и строим график зависимости $j = f(V)$ (рисунок 22).

Таблица 5 – Значения ускорение разгона

| Ускорение | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 3,25 | 3,13 | 3,03 | 2,97 | 2,57 | 2,10 | 1,63 | 1,15 | 0,78 | 0,47 |

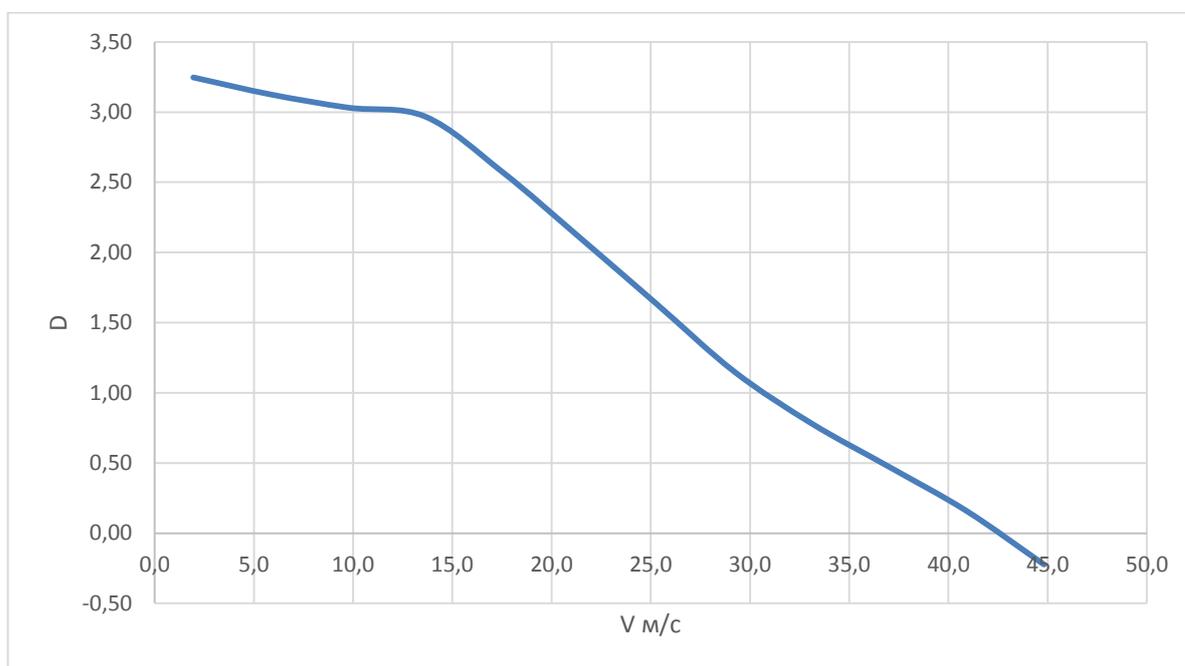


Рисунок 22 – Ускорение автомобиля

Затем, определяем значения обратных ускорений ($1/j$) (рисунок 23) и заносим их в таблицу 6. Поскольку при скоростях V , близких к максимальной, ускорение стремится к нулю, то для расчета обратных ускорений ограничиваются скоростью $V = (0,8 \dots 0,9) V_{\max.}$ »[29]

Таблица 6 – Значения обратных ускорений.

| Обратные ускорения, $1/j_{cp}$ | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,31 | 0,32 | 0,33 | 0,34 | 0,39 | 0,48 | 0,61 | 0,87 | 1,28 | 2,12 |

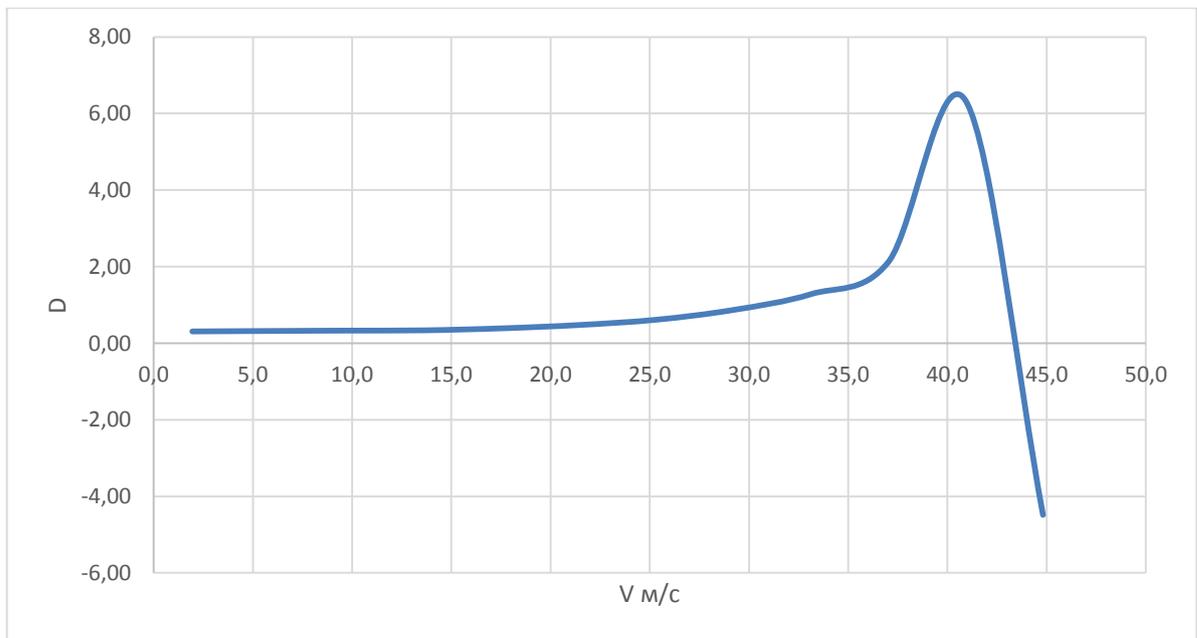


Рисунок 23 – Обратные ускорения автомобиля

Время и путь разгона автомобиля определяем графоаналитическим способом. Смысл этого способа в замене интегрирования суммой конечных величин:

$$\Delta t = \int_{V_i}^{V_{i+1}} \frac{1}{j} dV \approx \left(\frac{1}{j_{CP}} \right)_{i+1} \cdot (V_{i+1} - V_i) \quad (15)$$

Для этого кривую обратных ускорений разбивают на интервалы и считают, что в каждом интервале автомобиль разгоняется с постоянным ускорением $j = \text{const}$, которому соответствуют значения $(1/j) = \text{const}$. Эти величины можно определить следующим образом:

$$\left(\frac{1}{j_{CP}} \right)_k = \frac{(1/j)_{k-1} + (1/j)_k}{2} \quad (16)$$

где: k – порядковый номер интервала.» [6]

Заменяя точное значение площади под кривой $(1/j)$ в интервале ΔV_k на значение площади прямоугольника со сторонами ΔV_k и $\left(\frac{1}{j_{CP}} \right)_k$, переходим к приближенному интегрированию:

$$\Delta t = \left(\frac{1}{j_{CPk}} \right) \cdot (V_k - V_{k-1}), \quad (17)$$

$$t_1 = \Delta t_1, \quad t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_2, \quad t_n = \sum_{k=1}^n \Delta t_k.$$

где: t_1 – время разгона от скорости V_0 до скорости V_1 ;

t_2 – время разгона до скорости V_2 .» [6]

Результаты расчета сводим в таблицу 7 и в виде графика на рисунке 24.[18]

Таблица 7 – Значения скорости, времени и пройденного пути.

| v_a , м/с | S, м | t, с |
|-------------|--------|--------|
| 1,9 | 2,338 | 0,6 |
| 5,8 | 21,75 | 1,845 |
| 9,7 | 61,67 | 3,125 |
| 13,6 | 122,61 | 4,429 |
| 17,5 | 215,75 | 5,923 |
| 21,4 | 356,35 | 7,727 |
| 25,3 | 569,9 | 10,01 |
| 29,2 | 909,5 | 13,123 |
| 33,1 | 1441,9 | 17,39 |
| 37 | 2299,5 | 23,5 |
| 40,9 | 3984,4 | 34,31 |

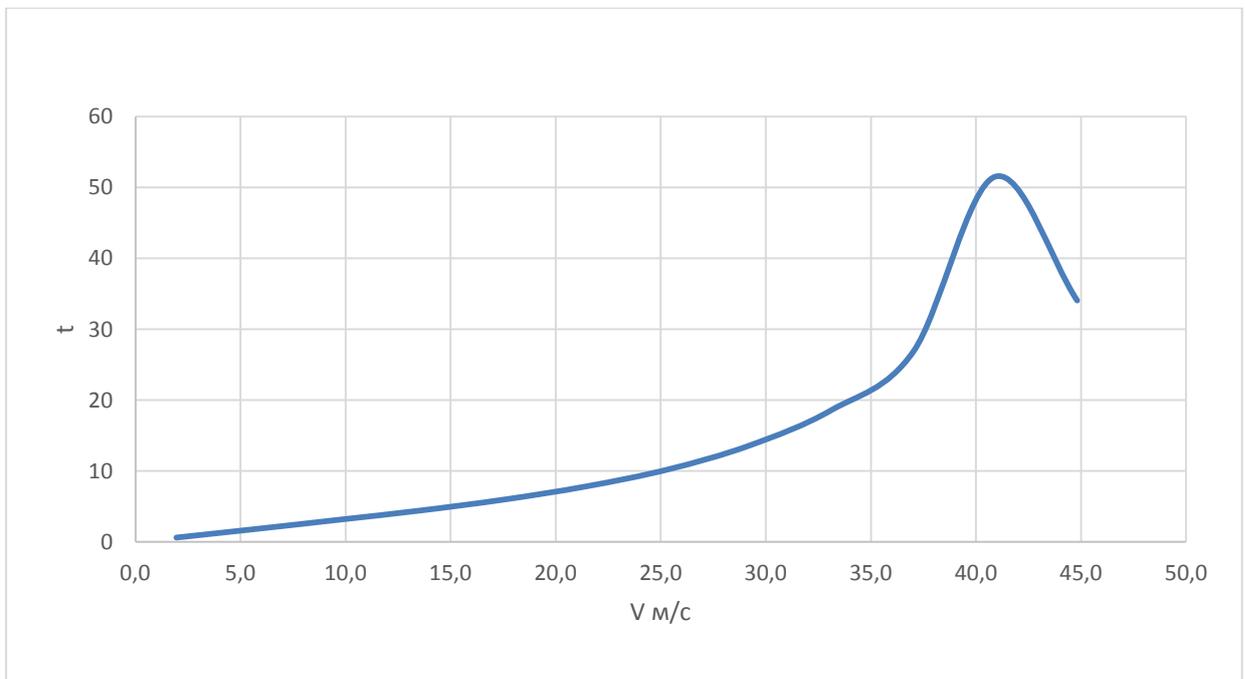


Рисунок 24 – Время разгона автомобиля

Аналогичным образом проводится графическое интегрирование (рисунок 10) зависимости $t=f(V)$ для получения зависимости пути разгона S от скорости электроавтомобиля.

В данном случае кривая $t=f(V)$ разбивается на интервалы по времени, для каждого из которых находятся соответствующие значения $V_{\text{срк}}$.

Площадь элементарного прямоугольника в интервале Δt_k есть путь, который проходит автомобиль от отметки t_{k-1} до отметки t_k , двигаясь с постоянной скоростью $V_{\text{срк}}$.

Величина площади элементарного прямоугольника определяется следующим образом:

$$\Delta S = V_{\text{срк}} \cdot (t_k - t_{k-1}) = V_{\text{срк}} \cdot \Delta t_k \quad (18)$$

где: $k=1\dots m$ – порядковый номер интервала, m выбирается произвольно ($m=n$).

Путь разгона от скорости V_0 до скорости V_1 : $S_1=\Delta S_1$, до скорости V_2 : $S_2=\Delta S_1+\Delta S_2$, до скорости V_n : $S_n = \sum_{k=1}^m \Delta S_k$.

Все результаты расчета заносим в таблицу 7 и представляем в виде графика на рисунке 25.

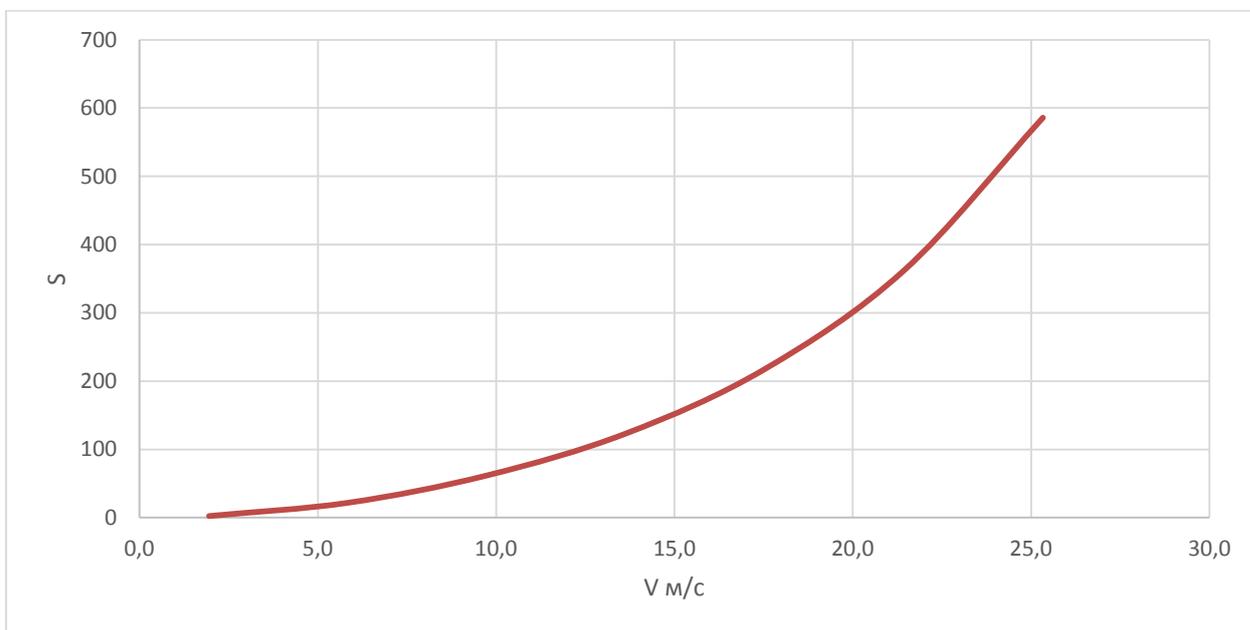


Рисунок 25 – Путь разгона автомобиля

Мощностной баланс электроавтомобиля

Уравнение мощностного баланса:

$$N_T = N_e - N_{тр} = N_f + N_n + N_B + N_d \quad (19)$$

где: N_T – тяговая мощность, подводимая к ведущим колесам, Вт;

$$N_T = N_e \cdot \eta_{тр} = N_e \cdot 0,93 ,$$

$N_{тр}$ – мощность, теряемая в агрегатах трансмиссии, Вт;

$N_f = F_T \cdot V$ – мощность, затраченная на преодоление сил сопротивления подъему, Вт;

$N_B = F_B \cdot V$ – мощность, затраченная на преодоление сил сопротивления воздуха, Вт;

$N_d = F_d \cdot V$ – мощность, затраченная на преодоление силы инерции электроболида Вт.

Для выбранных ранее интервалов по угловой скорости коленвала двигателя и скорости автомобиля рассчитываем значения мощностного

баланса, заполняем таблицу и строим графики (рисунок 26). Вверх от кривой N_T откладываем значения мощности сопротивления воздуха N_B .

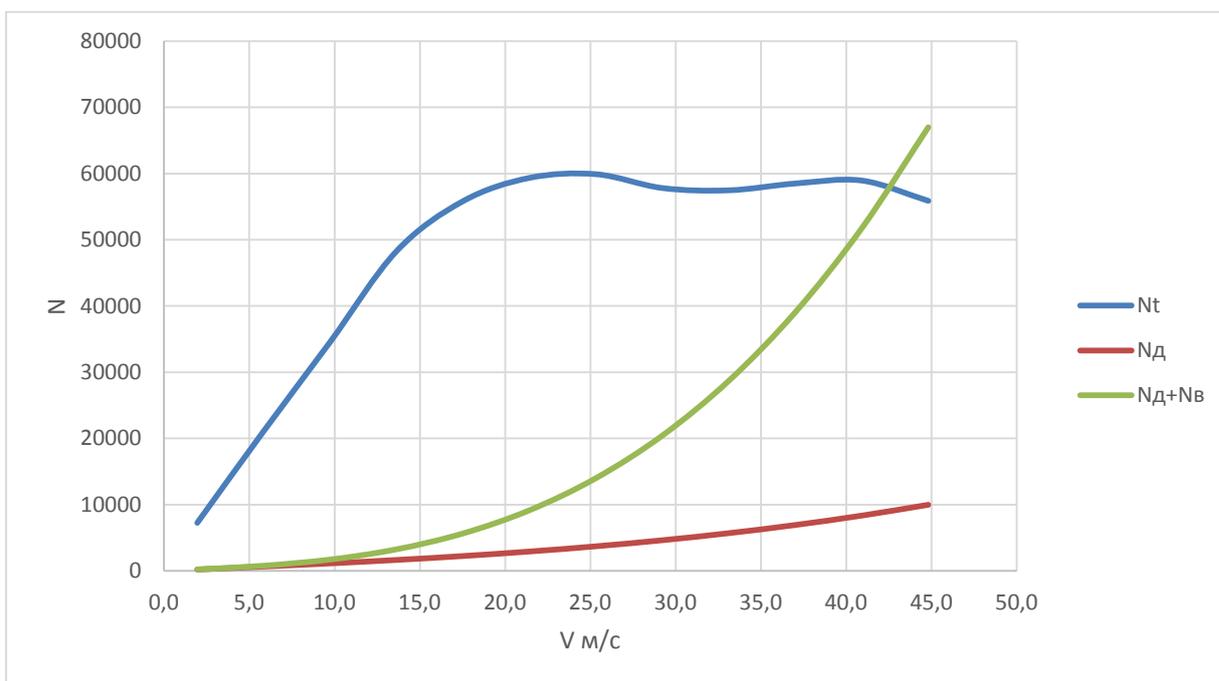


Рисунок 26 – Мощностной баланс автомобиля

4.2 Расчет радиатора охлаждения электродвигателя

КПД электродвигателя показывает, какая доля подаваемой на него энергии превращается в полезную механическую работу на валу двигателя. При высоком КПД большая доля подаваемой энергии используется полезно, а значит, меньше энергии рассеивается в виде тепла. Это приводит к меньшему нагреву двигателя. И, при низком КПД большая часть энергии теряется из-за потерь на нагрев различных элементов двигателя. Это приводит к более значительному нагреву. В основном потери на нагрев происходят по нескольким причинам. Из-за потерь на нагрев обмоток. Основная часть электрической энергии, подаваемой на двигатель, превращается в механическую работу. Но часть энергии теряется в виде тепла на обмотках статора и ротора из-за электрического сопротивления проводников и потерь на гистерезис и вихревые токи. Эти потери вызывают

нагрев обмоток. Также немаловажным фактором являются потери на трение. В роторе двигателя имеются подшипники, которые нагреваются при вращении из-за трения. Часть этого тепла передается на другие части двигателя. Также истирание внутренних элементов мотора таких как кольцо скольжения, щетки и коммутатор снижают его КПД. Вихревые токи, возникающие в двигателе, также вносят вклад в его нагревание. Чем больше вихревых токов, тем больше потери на нагрев.[27,28]

Тепло, выделяемое при работе электромотора необходимо отводить, иначе при отсутствии охлаждения двигатель работает в высокотемпературных режимах, что негативно влияет на характеристики системы и имеет такие последствия, как перегрев, который может привести к повреждению изоляции и в некоторых случаях к возгоранию. Ухудшение эффективности, при нагреве мотора - неодимовые магниты, зачастую используемые в современных двигателях, теряют свои магнитные свойства при температурах свыше 80°C. Также повышенные температуры ускоряют процесс старения изоляции и других компонентов двигателя. Все это мешает нормальной работе электромотора. Так что эффективное охлаждение позволяет уйти от проблем нагрева мотора.[19]

Для охлаждения электродвигателя используется 3 вида охлаждения:

- Воздушное охлаждение – используется в большинстве маломощных электромоторов, при котором воздух циркулирует вокруг обмоток и корпуса двигателя, снижая их температуру.
- Жидкостное охлаждение – более эффективный способ охлаждения, который используется в более мощных электродвигателях. При этом через специальные каналы в корпусе двигателя циркулирует охлаждающая жидкость (дистиллированная вода, антифриз или тосол), которая забирает тепло от обмоток и корпуса.
- Комбинированное охлаждение – сочетание воздушного и жидкостного охлаждения, используется в больших и мощных электродвигателях, где требуется высокая эффективность

охлаждения. При этом воздушное охлаждение используется для снижения температуры корпуса, а жидкостное – для охлаждения обмоток.

В выбранном электродвигателе штатно используется жидкостное охлаждение. Параметры электромотора представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры охлаждающей системы электромотора.

| Параметры | Единицы измерения | Диапазон |
|--------------------------------------|--------------------|------------------------|
| Расход охлаждающей жидкости | л/мин | 8 |
| Давление системы | МПа | $\leq 0,3$ |
| Тип охлаждающей жидкости | | Автомобильный антифриз |
| Температура на входе в электропривод | $^{\circ}\text{C}$ | < 65 |

Рассмотрим графики эффективности заданного электродвигателя (рисунок 27 – рисунок 30), на графиках отображен КПД электродвигателя на различных режимах работы, из этого сделаем выводы, что на максимальных режимах работы электромотора при 1150 об/мин и 69,85 кВт КПД мотора составляет 86%.

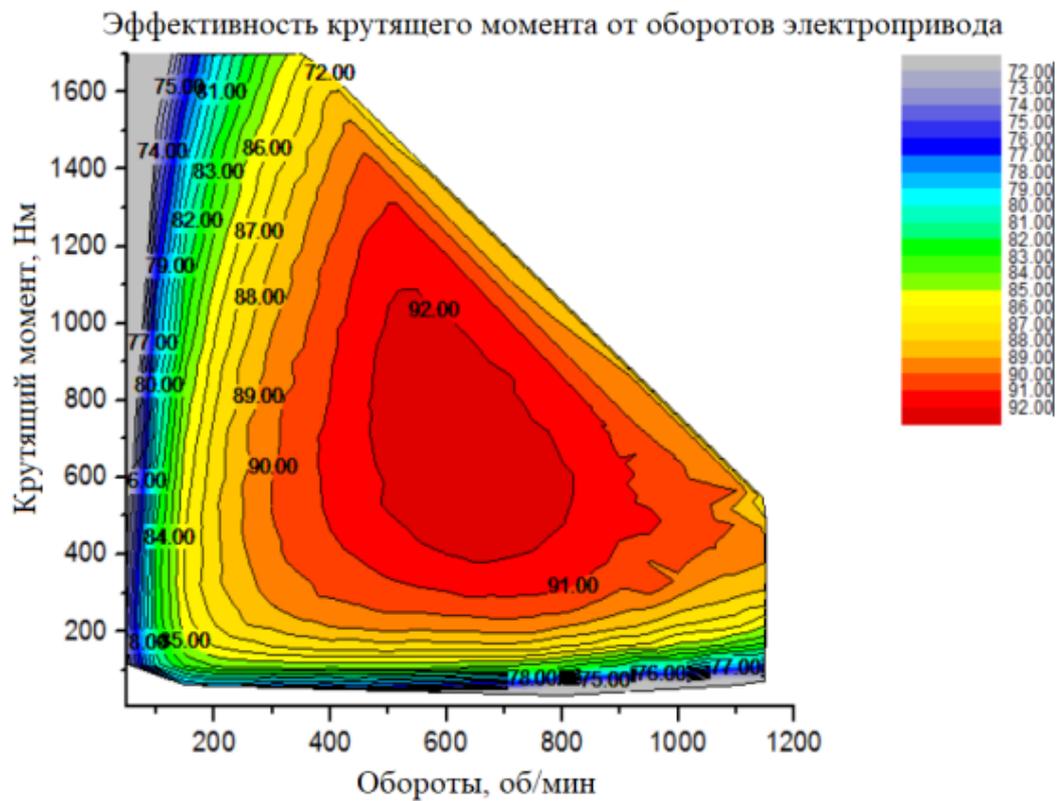


Рисунок 27 - График эффективности крутящего момента от оборотов электропривода

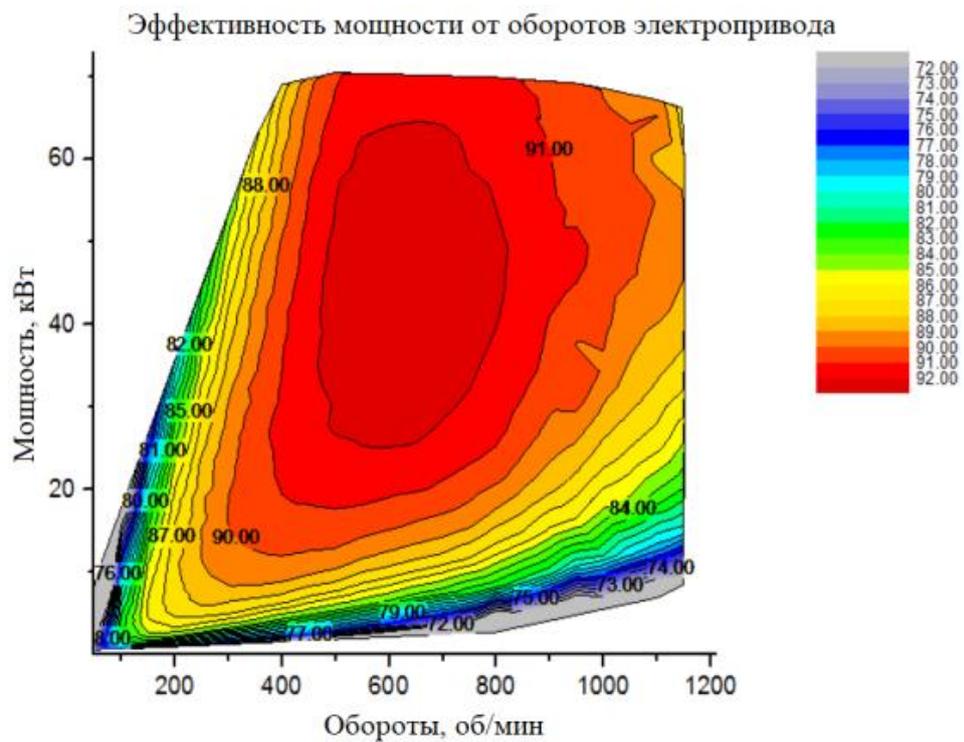


Рисунок 28 - График эффективности мощности от оборотов электропривода

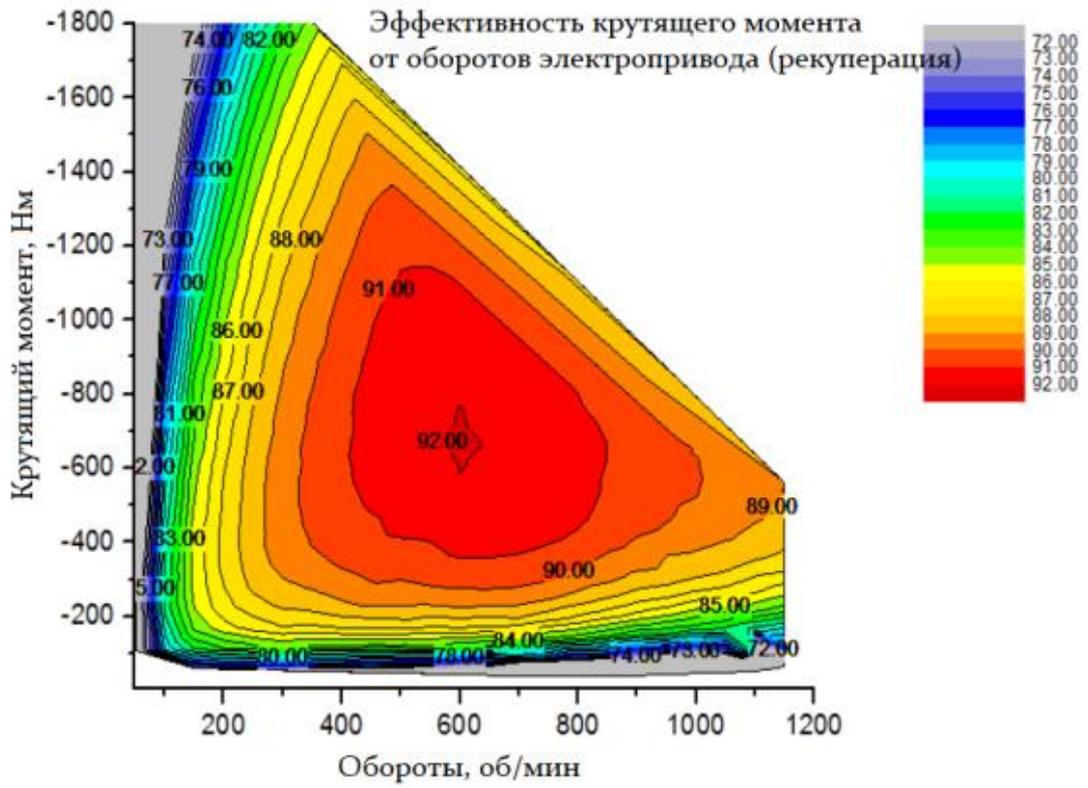


Рисунок 29 - График эффективности крутящего момента от оборотов электропривода при рекуперации

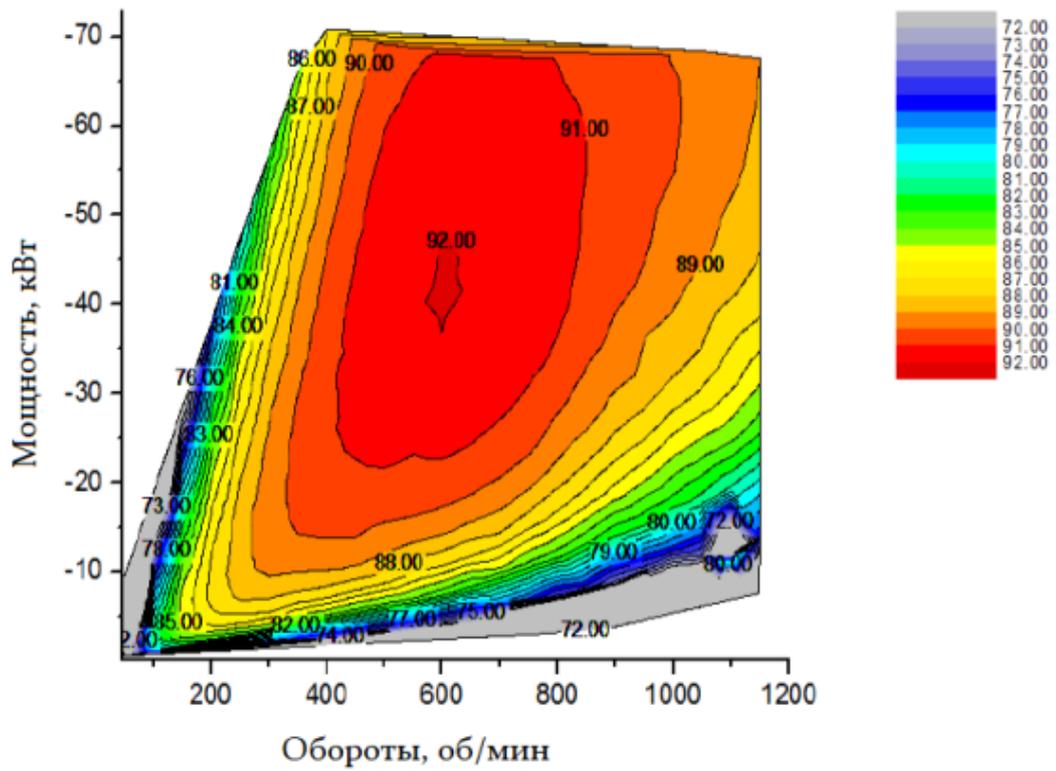


Рисунок 30 - График эффективности мощности от оборотов электропривода при рекуперации

Рассчитаем мощность Q , которую необходимо отводить

$$Q = P \times (1 - \eta_m) \quad (20)$$

Где Q – тепловая мощность, которую необходимо отводить, кВт

P – мощность двигателя, кВт

η_m - КПД двигателя

$$Q = 69,85 \times (1 - 0,86) = 9,8 \text{ кВт}$$

Рассчитаем количество отводимого тепла в ед. времени, ккал/ч

$$Q_B = 60 \times Q \quad (21)$$

Где Q – тепловая мощность, которую необходимо отводить, кВт

$$Q_B = 60 \times 9,8 = 586,74 \text{ ккал/ч}$$

Перепад температур при принудительной циркуляции: $\Delta T_{ж} = 15$

Циркуляционный расход охлаждающей жидкости в системе охлаждения:

$$G_{ж} = \frac{Q_B}{c_{ж}\rho_{ж}\Delta T_{ж}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (22)$$

Где $G_{ж}$ – циркуляционный расход охлаждающей жидкости, л/с ;

Q_B - количество тепла, отводимого от мотора, кДж/с;

$\rho_{ж}$ – средняя плотность жидкости (для расчета за жидкость принимается вода), 1 т/м³

$c_{ж}$ – средняя теплоемкость воды, 4,187 Дж/кг*°С

Расчетная производительность расчета $G_{ж.р.} = \frac{G_{ж}}{\eta_e}$, где коэффициент $\eta_e=0,8$

Количество воздуха, проходящего через радиатор:

$$G_{возд} = \frac{Q_e}{c_{жвозд} \Delta T_{возд}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (23)$$

где Q_e - количество тепла отводимого от двигателя охлаждающей жидкостью, МДж/с;

$\rho_{возд}$ - средняя плотность воздуха, 1 т/м³;

$c_{жс}$ - средняя теплоемкость воздуха, 1000 кДж/кг*°С;

$\Delta T_{\text{возд}}$ - температурный перепад воздуха в решетке радиатора, 30°C.

Средняя температура охлаждающего воздуха, проходящего через радиатор: $T_{\text{ср.возд}} = T_{\text{возд.вх}} + \frac{\Delta T_{\text{возд}}}{2}$, К (24)

где $T_{\text{возд.вх}}$ - температура воздуха перед радиатором, 40°C.

Средняя температура жидкости в радиаторе:

$$T_{\text{ср.ж}} = \frac{T_{\text{ж.вх}} + (T_{\text{ж.вх}} + \Delta T_{\text{ж}})}{2}, \text{ К} \quad (25)$$

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

$T_{\text{ж.вх}}$ - температура жидкости перед радиатором, 40°C.

Поверхность охлаждения радиатора: $F = \frac{Q_{\text{в}}}{K (T_{\text{ср.ж}} - T_{\text{ср.возд}})}$, м² (26)

Результаты расчетов сведены в таблицу 9

Таблица 9 – Результаты расчета

| | |
|--|--------|
| Количество тепла, отводимого от мотора охл.ж., дж/с | 555,06 |
| Количество тепла, отводимого от мотора, дж/с | 504,6 |
| Циркуляционный расход охлаждающей жидкости, л/с | 8,84 |
| Расчетная производительность насоса, кг/с | 11,05 |
| Количество воздуха, проходящего через радиатор | 0,0185 |
| Средняя температура охлаждающего воздуха, проходящего через радиатор, °С | 45 |
| Средняя температура жидкости в радиаторе, °С | 57,5 |
| Поверхность охлаждения радиатора | 0,296 |

Исходя из проведенных расчетов, можно сделать вывод, что для достижения оптимальных ездовых характеристик необходимо использовать электромотор с мощностью не ниже 70 кВт.[20,21]

5 Анализ и подбор компонентов для электрической платформы

5.1 Анализ трансмиссий

На основании проведенного тягово-динамического расчета определили, что для заданных параметров необходим электродвигатель мощностью не меньше 70 кВт. Было выбрано 3 варианта трансмиссий. У каждого есть свои преимущества и недостатки.

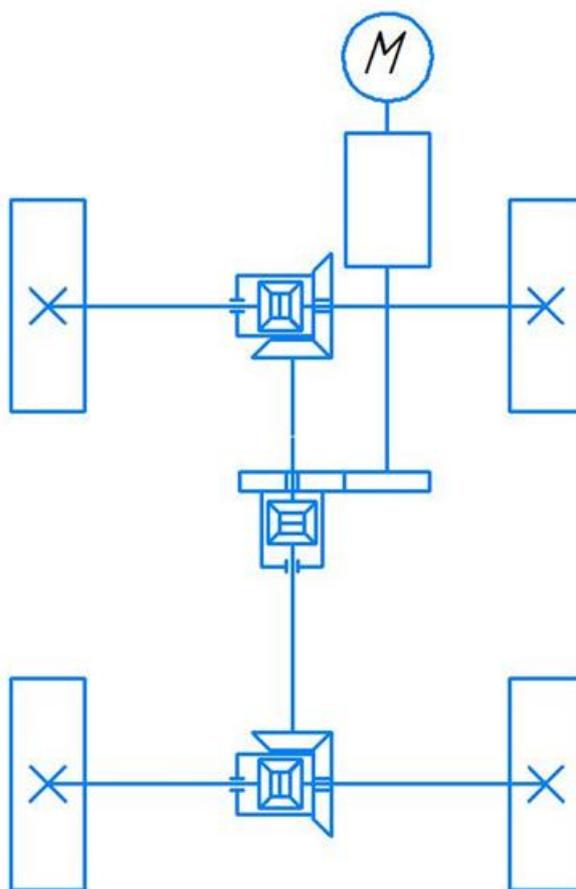


Рисунок 31 – Схема компоновки силового агрегата (вариант 1)

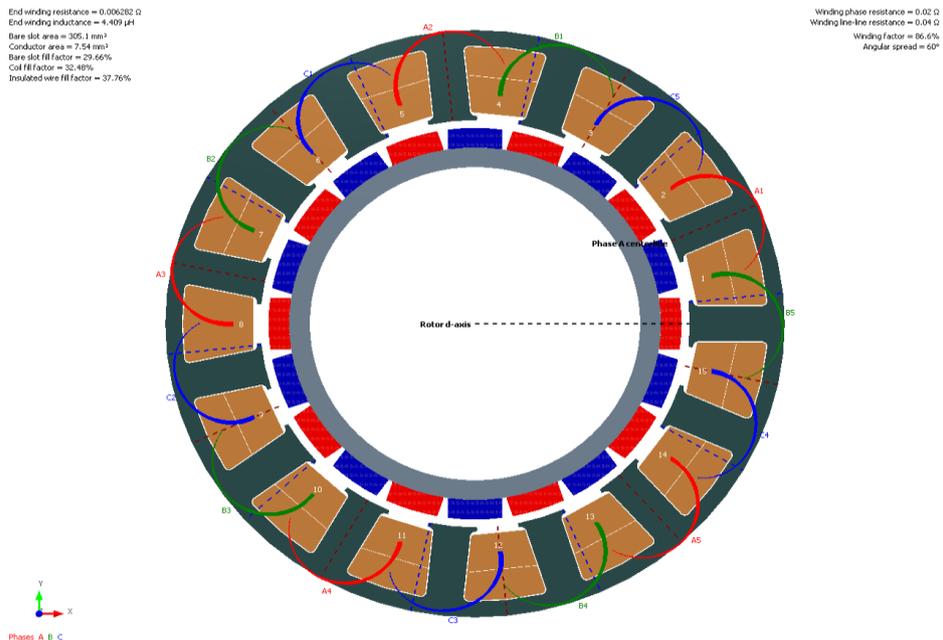


Рисунок 32 – Принципиальная схема электромотора (вариант 1)

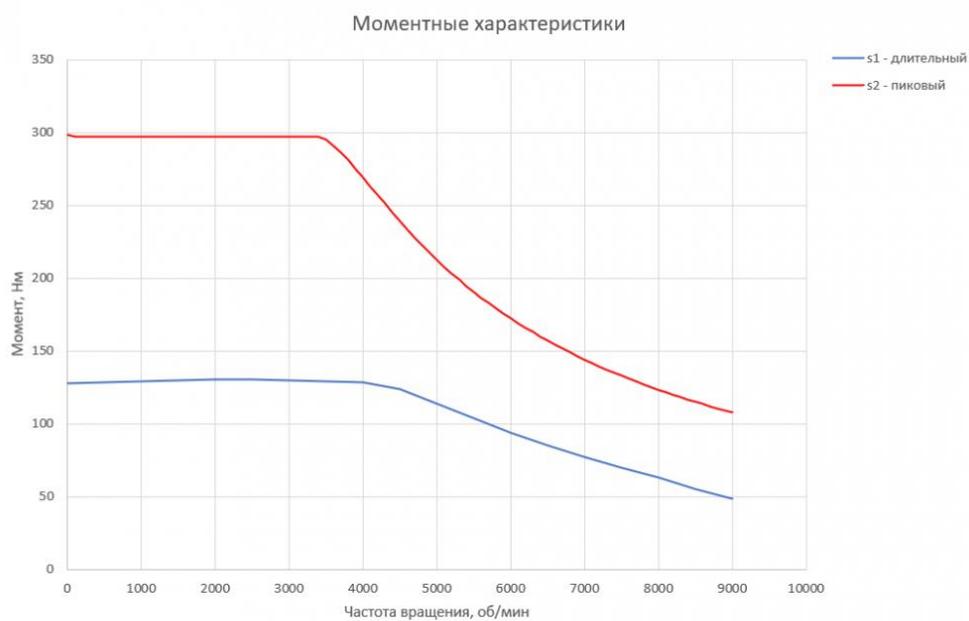


Рисунок 33 – Моментные характеристики электромотора (вариант 1)

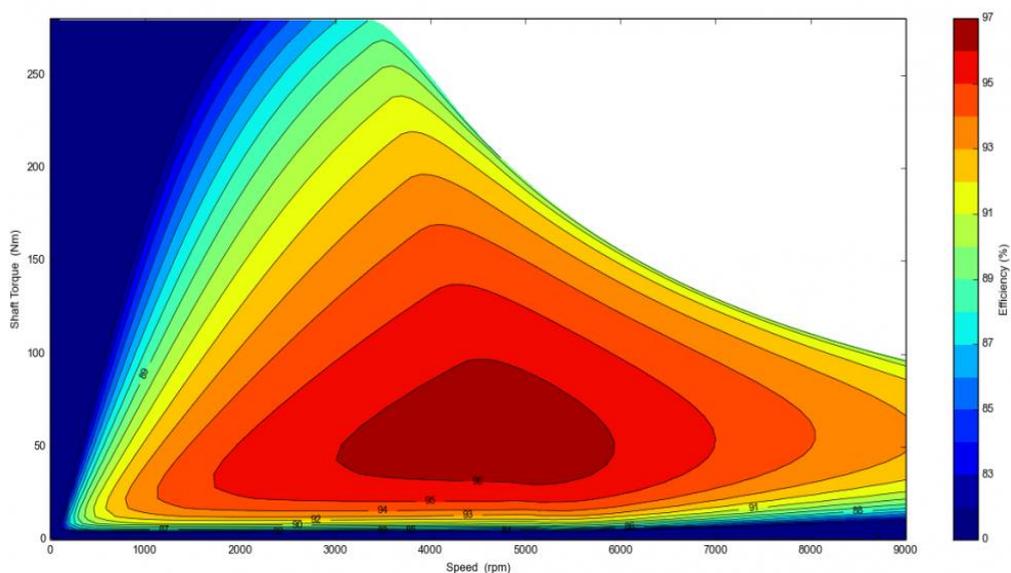


Рисунок 34 – График эффективности электромотора (вариант 1)

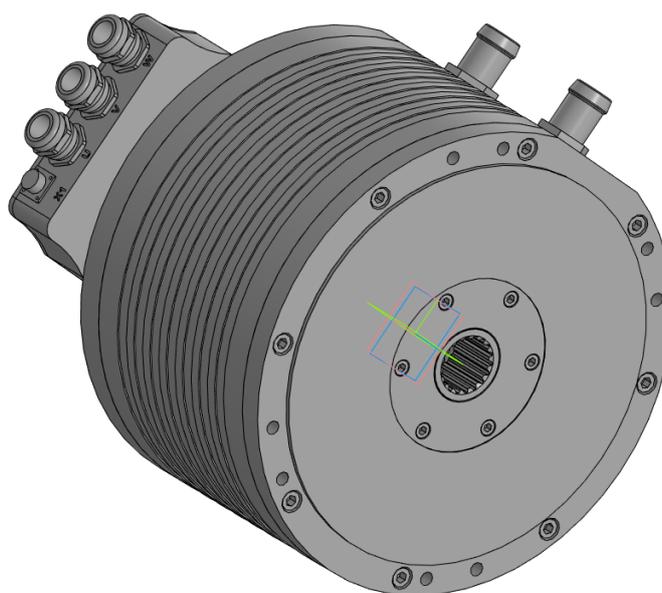


Рисунок 35 – CAD-модель электромотора (вариант 1)

Первый вариант компоновки (рисунок 30) представляет из себя расположенный в моторном отсеке электродвигатель, изображенный на рисунках 32-35, соединенный через карданный вал с раздаточной коробкой, которая, в свою очередь, передает крутящий момент от электромотора к переднему и заднему мостам.

Преимуществами такой схемы являются:

- максимальная унификация узлов и деталей;
- простота компоновки;
- не требуется переделка несущей рамы.

Недостатки:

- низкий КПД;
- большая масса.

Ниже представлена таблица 10 с основными параметрами электромотора

Таблица 10 – Основные параметры электромотора

| | |
|---------------------------------|------------|
| Мощность пиковая s2 30 сек, кВт | 113 |
| Мощность номинальная s1, кВт | 60 |
| Напряжение номинальное, В | 360 |
| Скорость максимальная, об/мин | 9000 |
| Момент пиковый s2 30 сек, Н·м | 296 |
| Момент номинальный s1, Н·м | 130 |
| КПД, % | 96 |
| Ток максимальный, А | 350 |
| Габаритные размеры (DxL), мм | 300x220 |
| Масса, кг | 50 |
| Тип системы охлаждения | жидкостная |

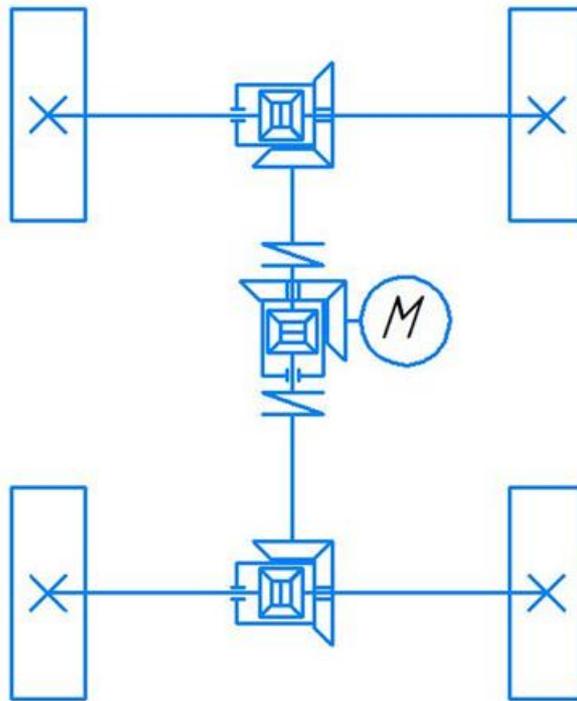


Рисунок 36 – Схема компоновки силового агрегата (вариант 2)

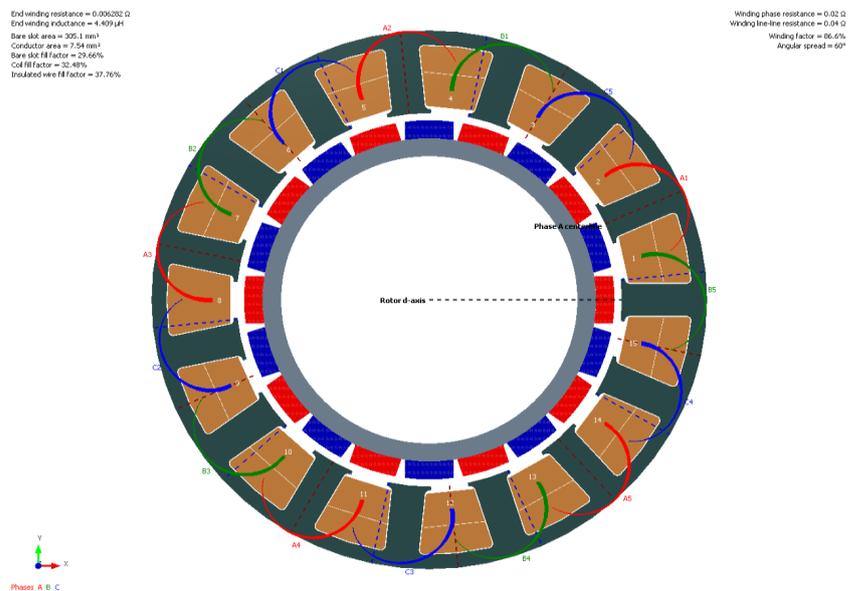


Рисунок 37 – Принципиальная схема электромотора (вариант 2)

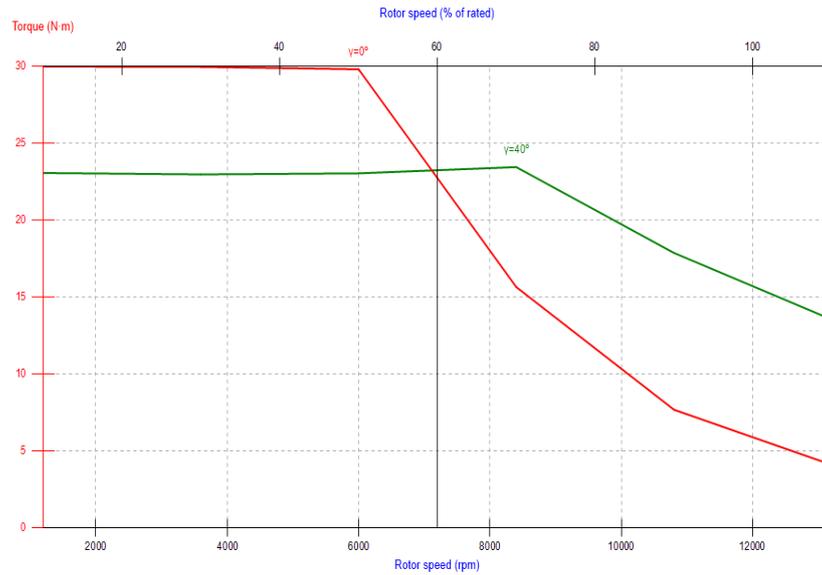


Рисунок 38 – Моментные характеристики электродвигателя (вариант 2)

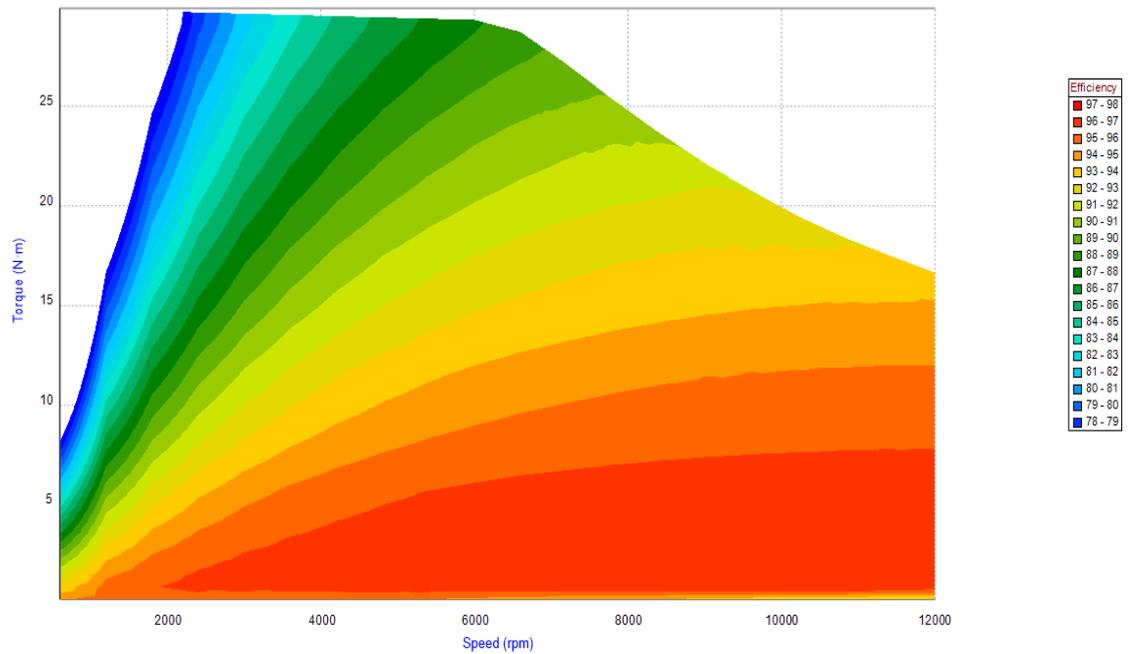


Рисунок 39 – График эффективности электродвигателя (вариант 2)

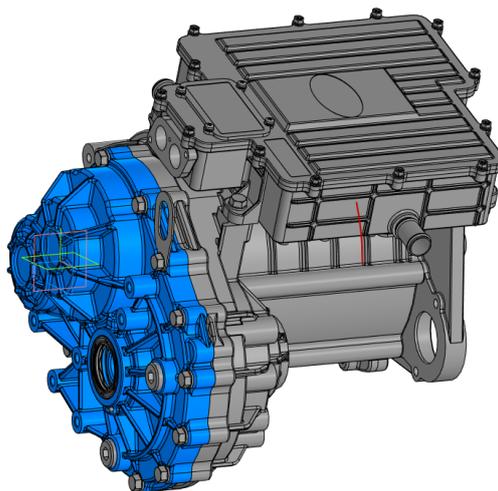


Рисунок 40 – CAD-модель электромотора (вариант 2)

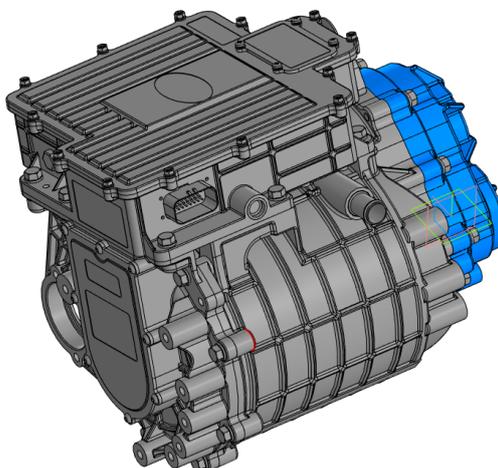


Рисунок 41 – CAD-модель электромотора (вариант 2)

Второй вариант компоновки (рисунок 36) представляет собой размещенный посередине автомобиля, вместо раздаточной коробки электродвигатель с редуктором и дифференциалом (рисунки 37, 40, 41), который передает крутящий момент (рисунки 38-39) от редуктора к переднему и заднему мостам.[15]

Преимуществами такой схемы являются:

- средняя унификация узлов и деталей;
- простота компоновки.

Недостатки:

- особые требования к редуктору;
- необходима доработка несущей рамы.

Ниже представлена таблица 11 с основными параметрами электромотора

Таблица 11 – Основные параметры электромотора

| | |
|------------------------------------|-------|
| Мощность пиковая s_2 30 сек, кВт | 70 |
| Мощность номинальная s_1 , кВт | 30 |
| Напряжение номинальное, В | 336 |
| Скорость максимальная, об/мин | 12000 |

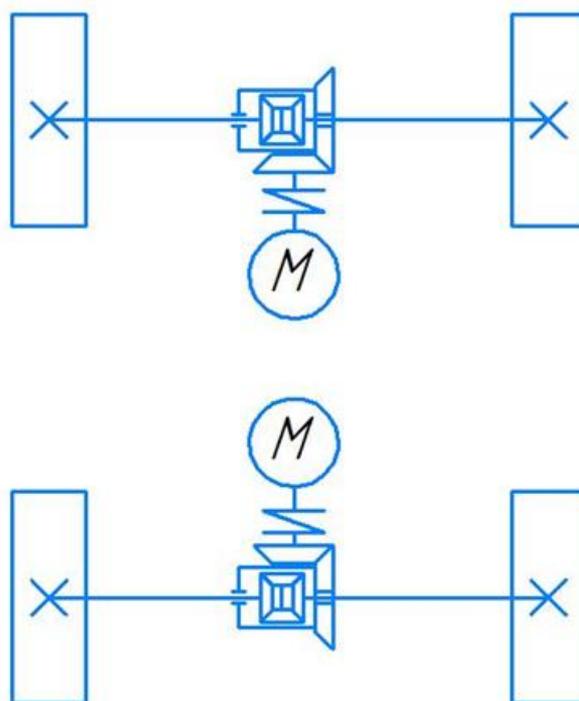


Рисунок 42 – Схема компоновки силового агрегата (вариант 3)

End winding resistance = 0.01242 Ω
 End winding inductance = 19.2 μH
 Bare slot area = 442.9 mm²
 Conductor area = 13.05 mm²
 Bare slot fill factor = 20.15%
 Calf fill factor = 20.62%
 Insulated wire fill factor = 36.76%

Winding phase resistance = 0.02174 Ω
 Winding line resistance = 0.04747 Ω
 Winding factor = 94.5%
 Angular spread = 60°

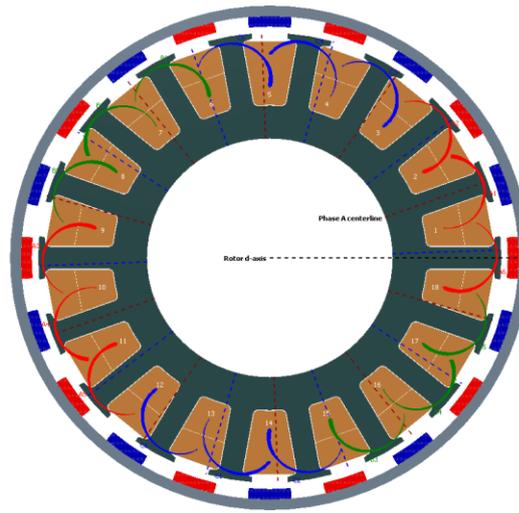


Рисунок 43 – Принципиальная схема электромотора (вариант 3)

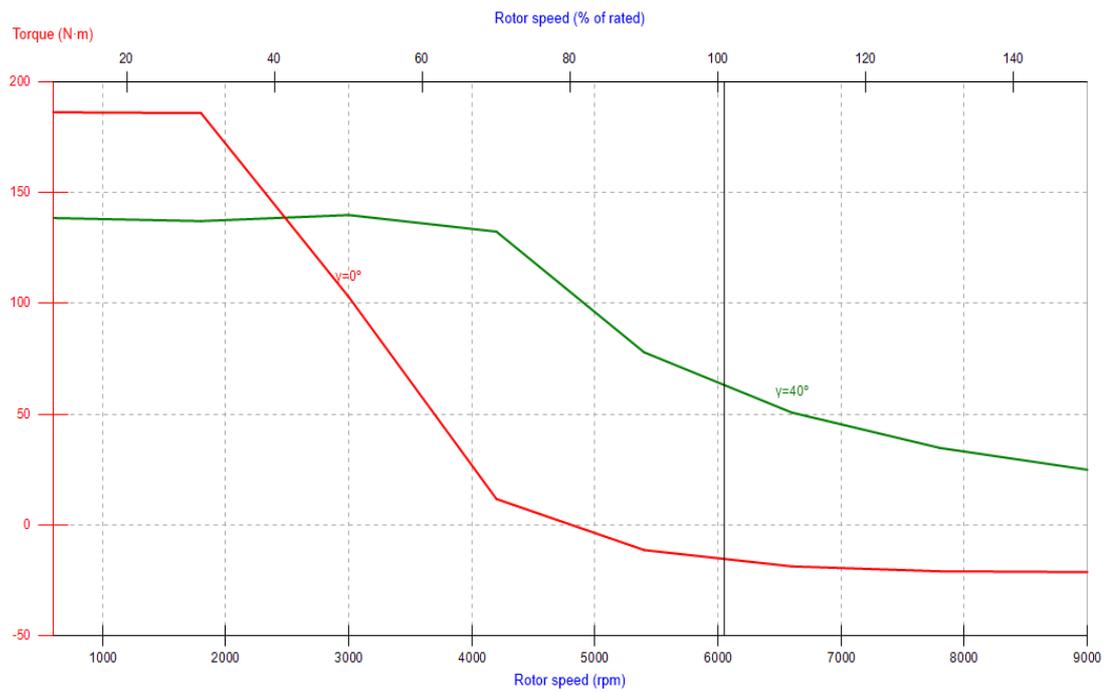


Рисунок 44 – Моментные характеристики электромотора (вариант 3)

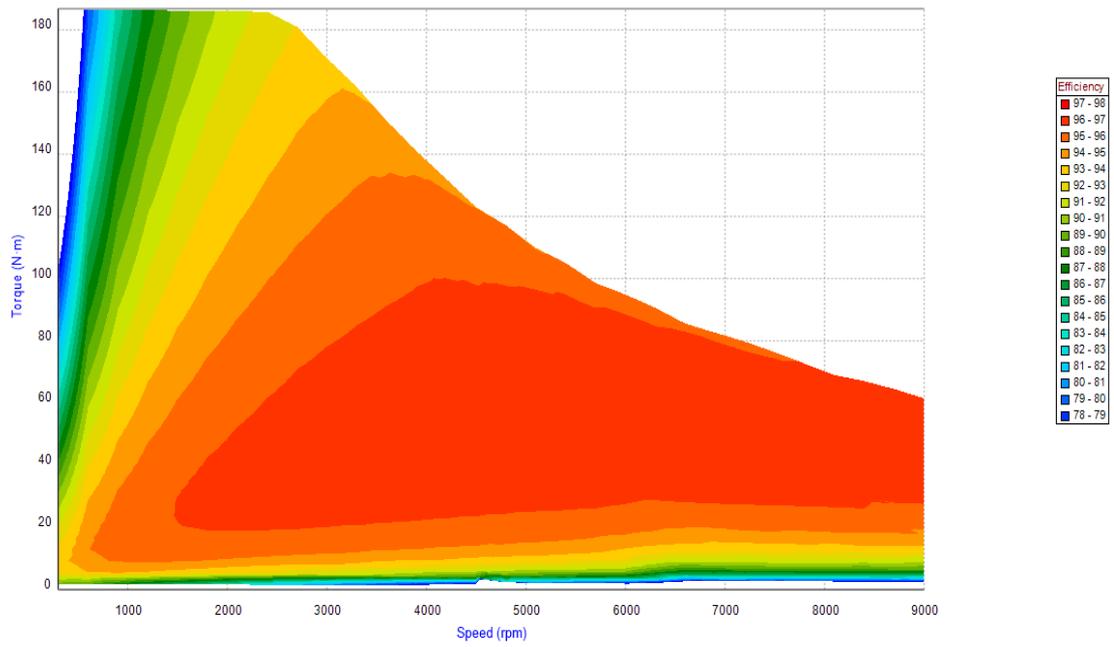


Рисунок 45 – График эффективности электродвигателя (вариант 3)

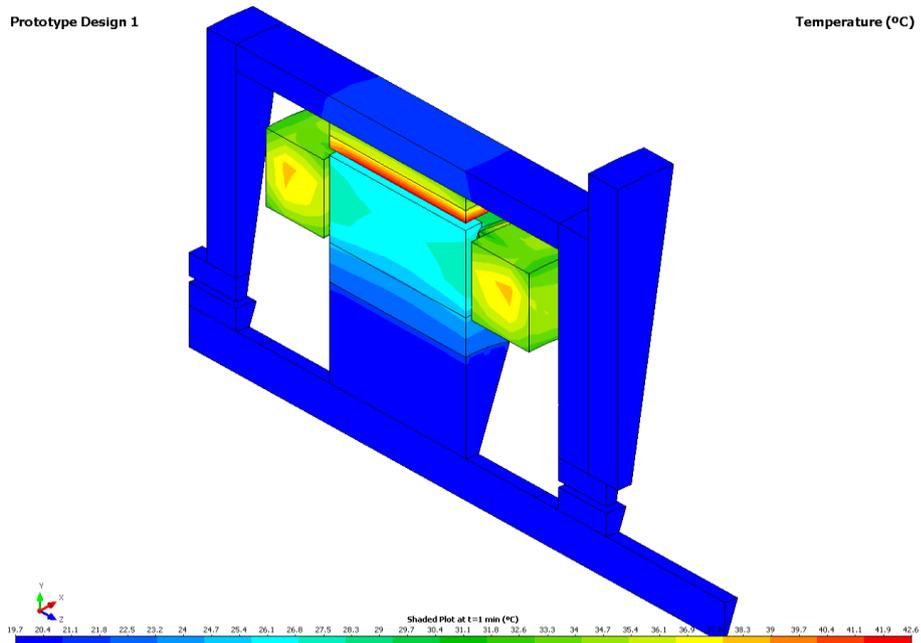


Рисунок 46 – САD-модель электродвигателя (вариант 3)

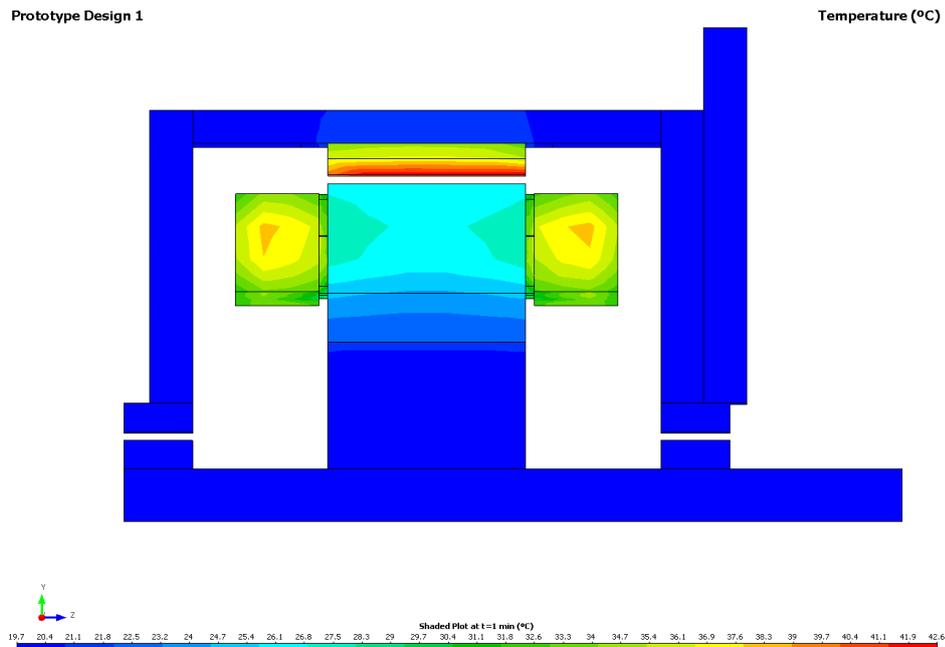


Рисунок 47 – CAD-модель электромотора (вариант 3)

Третий вариант компоновки (рисунок 42) представляет из себя два размещенных посередине электромотора (рисунки 43,46,47), для каждой оси свой и, передающие крутящий момент (рисунки 44,45) с вала электромотора к мостам.

Преимуществами такой схемы являются:

- средняя унификация узлов и деталей;
- простота компоновки;
- маленькая масса;
- не требуется переделка элементов несущей рамы.

Недостатки:

- особые требования к электромотору;
- проектирование дополнительных элементов.

Ниже представлена таблица 12 с основными параметрами электромотора

Таблица 12 – Основные параметры электромотора

| | |
|------------------------------------|------|
| Мощность пиковая s_2 30 сек, кВт | 40 |
| Мощность номинальная s_1 , кВт | 20 |
| Напряжение номинальное, В | 100 |
| Скорость максимальная, об/мин | 3500 |

Оптимальной силовым агрегатом в данном случае является мотор, расположенный вместо раздаточной коробки, и передающий через редуктор и дифференциал крутящий момент к переднему и заднему мостам (рисунок 35). Существенными преимуществами перед традиционной компоновкой (рисунок 12), и компоновкой с отдельными электромоторами для каждой оси (рисунок 23) являются – центральное расположение, положительно влияет на развесовку, и как следствие эксплуатационные качества внедорожника; относительную простоту расположения, и меньшее количество компонентов в системе, что также положительно влияет на надежность.[25]

5.2 Анализ аккумуляторов

Для питания выбранного электромотора было определено два вида тяговых аккумуляторов – Литий-железо-фосфатный и Литий-ионный NMC аккумулятор. Рассмотрим параметры каждого вида, представленные в таблицах 13 и 14, и изображены на рисунках 48,49.



Рисунок 48 – Литий-железо-фосфатный аккумулятор

Таблица 13 – основные параметры литий-железо-фосфатного аккумулятора

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Характеристики аккумуляторного модуля | |
| Тип ячеек | LiFePO4 |
| Количество ячеек в модуле, шт | 105 |
| Номинальное напряжение*, В | 336 (можем набирать любое) |
| Номинальная емкость*, Ач | 72 или 100 |
| Степень защиты по ГОСТ 14254* | IP67 |
| Масса, кг | От 250 кг примерно |
| Габариты АБ (ДхШхВ), мм | Нужно уточнять какой формы делать |

Продолжение таблицы 13

| Характеристики зарядного устройства | |
|--|--|
| Тип зарядного устройства | AC/DC |
| Мощность зарядного устройства*, кВт | 20 |
| Входное напряжение AC, В | 380 Vac |
| Выходное напряжение DC, В | 200-500 |
| Выходной ток*, А | 40 |
| Эффективность преобразования, % | 95 |
| Время полного заряда поставляемой батареи*, час | 2 |
| Размер, мм | 450x400x410 |
| Масса, кг | 45 |
| Характеристики блока коммутации | |
| Протокол обмена данными с вышестоящим устройством* | CAN Open или другой |
| Диапазон коммутируемых напряжений DC*, В | 24 – 1000 |
| Диапазон коммутируемого тока DC*, А | Не более 300% от емкости |
| Количество выводов* | Согласовывается с заказчиком на этапе ТЗ |
| Напряжение питания*, В | - |
| Система размыкания цепи | Электрохимический контактор |
| Система управления аккумуляторной батареей | Встроенная ¹ |
| Размер*, мм | - |
| Масса, кг | - |

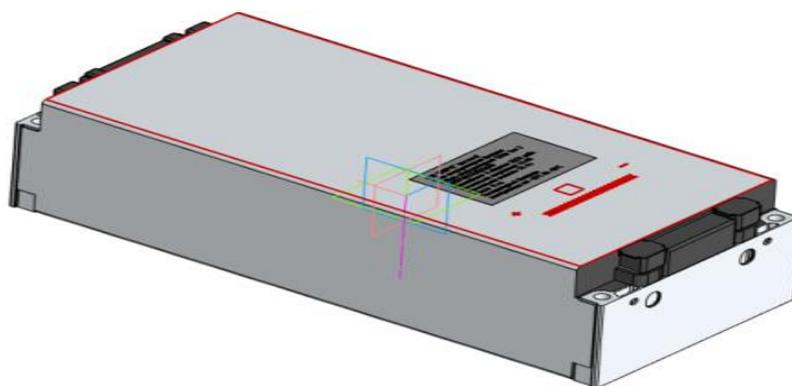


Рисунок 49 – Литий-ионный NMC аккумулятор

Таблица 14 – основные параметры литий-ионного NMC аккумулятора

| Наименование параметра | Значение |
|---|--|
| Характеристики аккумуляторного модуля | |
| Тип ячеек | Li-ion, катодный материал NCM622, анодный материал C-Si композит |
| Количество ячеек в модуле, шт | 12 |
| Номинальное напряжение*, В | 44,4 |
| Номинальная емкость*, Ач | 53 |
| Степень защиты по ГОСТ 14254* | IP67 |
| Масса, кг | 11 |
| Габариты АБ (ДхШхВ), мм | 360x115x160 |
| Характеристики зарядного устройства | |
| Тип зарядного устройства | AC/DC |
| Мощность зарядного устройства*, кВт | 6,6 |
| Входное напряжение AC, В | 90-265 |
| Выходное напряжение DC, В | 250-450 |
| Выходной ток*, А | 20 |
| Эффективность преобразования, % | 93 |
| Время полного заряда поставляемой батареи*, час | 4 |
| Размер, мм | 400x250x150 |
| Масса, кг | 15 |

Продолжение таблицы 14

| Характеристики блока коммутации | |
|--|--|
| Протокол обмена данными с вышестоящим устройством* | CAN |
| Диапазон коммутируемых напряжений DC*, В | 12 – 450 |
| Диапазон коммутируемого тока DC*, А | 0-150 |
| Количество выводов* | Согласовывается с заказчиком на этапе ТЗ |
| Напряжение питания*, В | дек.24 |
| Система размыкания цепи | Электромеханический контактор |
| Система управления аккумуляторной батареей | Встроенная ¹ |
| Размер*, мм | 400x250x150 |
| Масса, кг | 15 |

Оптимальным тяговым аккумулятором под заданный электродвигатель является литий-железо-фосфатный аккумулятор.

Проведя анализ компонентов электрической платформы, можно сделать вывод, что оптимальным силовым агрегатом будет электромотор, мощностью не менее 70 кВт, с редуктором, передающим крутящий момент на дифференциал, с которого, в свою очередь, он передается на переднюю и заднюю ось. И оптимальным аккумулятором является литий-железо-фосфатный аккумулятор.

6 Расчет пробега электромобиля по ездовому циклу

Рассчитаем пробег автомобиля на заданных аккумуляторе и электромоторе. Расчет будет производиться по ездовому циклу Japanese 10-15 cycle

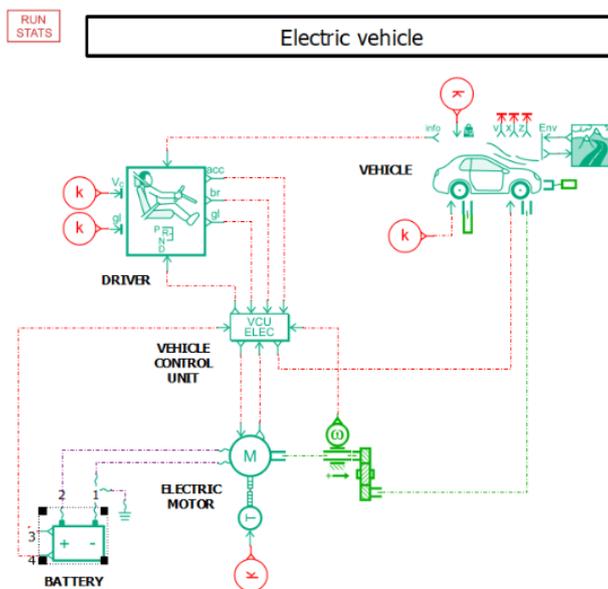


Рисунок 50 – Принципиальная схема параметров расчета ездового цикла

При расчете ездового цикла учитывались тягово-динамические характеристики электрической платформы (рисунок 50).

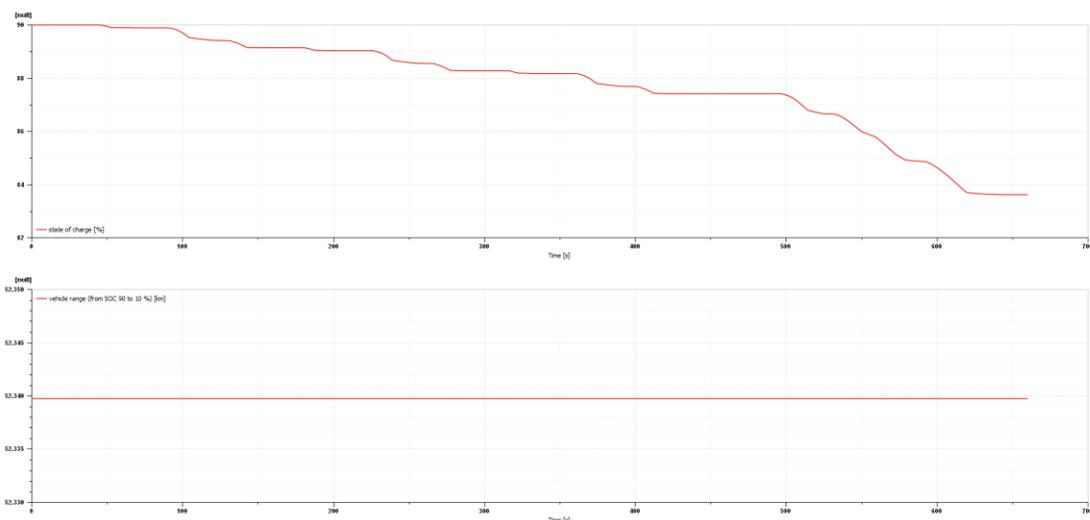


Рисунок 51 – График разряда аккумулятора

На рисунке 51 изображен график разряда аккумулятора на единицу времени и пройденное расстояние – 52 км. На графике разряд начинается с 90%, это обусловлено эксплуатационными параметрами – недозаряд, износ батареи и т.п.. При использовании рекуперации (торможение двигателем), можно достичь более высоких результатов, так как при таком режиме торможения электромотор переходит в режим генератор и преобразует кинетическую энергию автомобиля в электрическую.

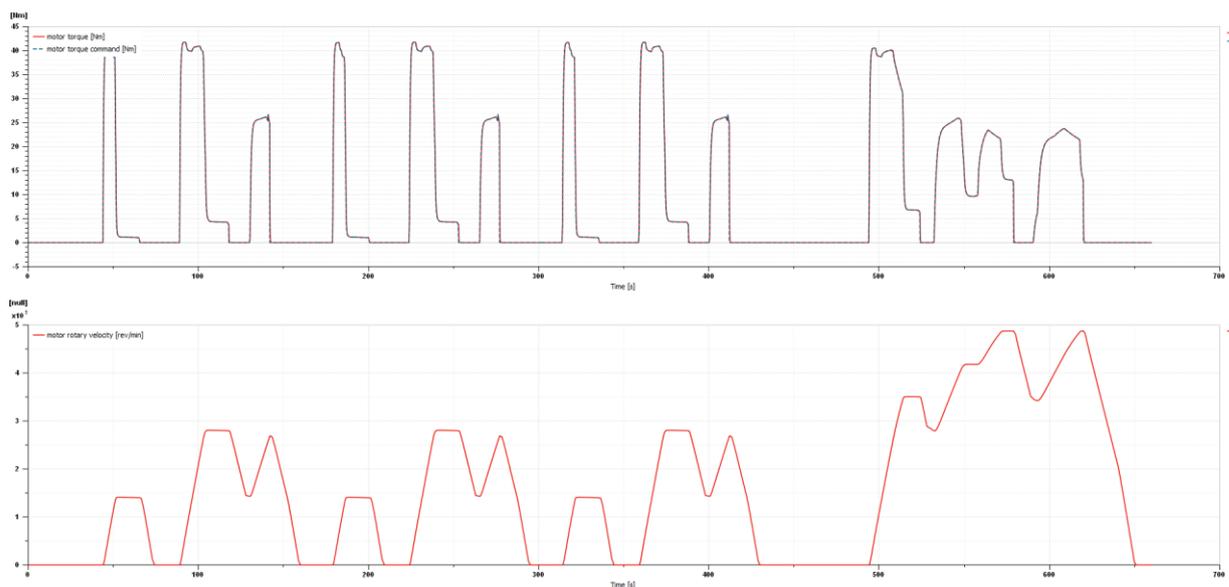


Рисунок 52 – График крутящего момента

На рисунке 52 изображен график крутящего момента и график требуемых ускорений, зависящих от нажатия на педаль, согласно ездовому циклу Japanese 10-15 cycle. Из данных графиком мы можем увидеть, что подобранная силовая установка соответствует заданной ездовым характеристикам.

Также стоит сделать вывод, что верно подобранная редукция обеспечивает работу мотора в режимах максимальной эффективности.

7 Концепция электрической платформы внедорожного транспортного средства

На основе проведенных расчетов предлагается следующая концепция электрической платформы внедорожника:

Для электрической платформы внедорожника были выбраны литий-ионные аккумуляторы благодаря их преимуществам по плотности мощности и энергии, возможности рекуперации, компактности и относительной экономичности. Литий-железо-фосфатные аккумуляторы также могут рассматриваться благодаря безопасности и локализованности производства.

В качестве силового каркаса алюминиевая рама (рисунок 53), с размещением силового агрегата мощностью, не менее 70 кВт (рисунок 40,41), посередине и передачей крутящего момента от электромотора через редуктор, дифференциал передней и задней осей внедорожника (рисунок 36).

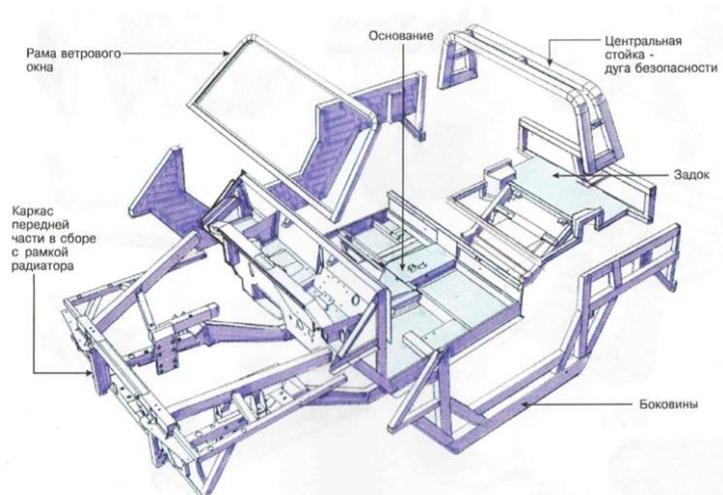


Рисунок 53 – Алюминиевая рама электрического внедорожника

Можно сделать вывод, что была предложена оптимальная концепция электрической платформы внедорожного транспортного средства.

Заключение

В ходе работы были выполнены следующие задачи:

- Проанализировано состояние рынка электромобилей;
- Проведен обзор существующих электромобилей, производимых в России;
- Проведен обзор существующих аккумуляторов;
- Выполнен тягово-динамический расчет электрической платформы внедорожника;
- Под рассчитанные параметры была выбрана оптимальная силовая установка с тяговым аккумулятором;
- Была предложена концепция электрической платформы внедорожного транспортного средства;

По результатам исследования можно сделать основные выводы:

- На российском рынке отсутствуют электрические внедорожники, следовательно, предлагаемая концепция электрической платформы может заполнить эту нишу и стать новинкой;
- Разработанная концепция электрической платформы внедорожника, основанная на результатах проведенных расчетов и анализа, позволит создать конкурентоспособный продукт на российском рынке с высокими технико-экономическими характеристиками.

По результатам выполненных работ была предложена концепция электрической платформы внедорожника с алюминиевой рамой и размещением силового агрегата по центру. Крутящий момент от электродвигателя через редуктор передается на дифференциал, и он, в свою очередь передает момент к передней и задней осям. С использованием литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей с энергоемкостью не менее и мощностью силовой установки не менее 70 кВт для обеспечения динамических характеристик и дальности хода внедорожника.

Список используемой литературы и используемых источников

1. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. КАКИЕ БАТАРЕИ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ? (дата обновления: 11.04.2022) [Электронный ресурс] // URL: <https://mag.auto3n.ru/kakie-batarei-ispolzuyutsya-v-elektromobilyah/> (дата обращения: 05.06.2023)
3. 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: 05.06.2023)
4. Косилова, А.Г. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах Т2 (Под ред. А.Г. Косиловой 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985, 496 с., ил.).
5. Лебедев, В. А. Технология машиностроения : Проектирование технологий изготовления изделий : учеб.пособие для вузов / В. А. Лебедев, М. А. Тамаркин, Д. П. Гепта. - Гриф УМО. – Р.-на-Д. : Феникс, 2008. – 361с.
6. Маневич, Ш.С. Простейшие статистические методы анализа результатов наблюдений и планирования экспериментов: Учеб.-метод. пособие [Текст] / Ш.С. Маневич. – Казань: КСИ им. М. Горького, 1970. – 108 с.: ил.
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
8. 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: 05.06.2023)

9. Новое предприятие по производству Li-ion аккумуляторов для складской, клининговой и другой техники (дата обновления: 26.08.2021) [Электронный ресурс] // URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/142947/> (дата обращения: 05.06.2023)

10. Почему же всё больше компаний выбирают именно литий-ионные аккумуляторы отечественного производства? Давайте разбираться вместе (дата обновления: 08.08.2018) [Электронный ресурс] // URL: <https://habr.com/ru/companies/toshibarus/articles/462185/> (дата обращения: 05.06.2023)

11. Расторгуев, Д. А. Разработка плана изготовления деталей машин : учеб.-метод. пособие / Д. А. Расторгуев ; ТГУ ; Ин-т машиностроения ; каф. «Оборудование и технологии машиностроит. пр-ва». - ТГУ. – Т. : ТГУ, 2013. - 51 с

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: 01.06.2023)

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.

14. Толстоногов А.П. Системы охлаждения поршневых двигателей внутреннего сгорания. Учеб. пособие./ Сам. гос. аэрокос. ун-т. Самара, 2002. 208с.

15. Черепанов Л.А. Расчет тяговой динамики и топливной экономичности автомобиля. Электронное учебно-методическое пособие/ Тольяттинский государственный университет, Тольятти, 2016. 60с.

16. Электромобиль Кама-1: все что известно о российской “трехдверке” на батарейках. Юрий Головач (дата обновления: 23.12.2020)

[Электронный ресурс] // URL: <https://drive2.ru/4775-istoriya-rossijskogo-elektromobilya-kaма-1.html> (дата обращения: 15.05.2023)

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., 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.

19. 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.

20. 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 05.06.2023)

21. 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 05.06.2023).

22. 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 05.06.2023)

23. Handbook of Hydrogen Storage. Edited by Michael Hirscher Copyright 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-32273-2

24. LADA Ellada LR (Long Range) (дата обновления: 08.08.2022) [Электронный ресурс] // <https://www.drive2.ru/r/lada/ellada/541397602445296484/> (дата обращения: 01.05.2023)

25. 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>

26. M. Barghamadi, A. Kapoor, C. Wen. (2013). A Review on Li-S Batteries as a High Efficiency Rechargeable Lithium Battery. *Journal of The Electrochemical Society*, т. 160, № 8, pp. A1256-A1263.

27. M. Cheng, M. Tong. (2017). Development Status and Trend of Electric Vehicles in China. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, T. 3, № 2

28. 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 05.06.2023)

29. The Electric Vehicle Outlook is Bloomberg NEF // 2020 Bloomberg Finance L.P. URL: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook> (accessed on 05.06.2023)

30. TNS SOFRES EP TENDER. Available online: <https://tbb.innoenergy.com/wp-content/uploads/2015/11/EPTender.pdf> (accessed on 05.06.2023)