Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Высшая школа теоретической механики

Работа допущена к защите

Директор в.ш.т.м, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

_____А.М. Кривцов

«___»_____2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

«ДИЗАЙН И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРО-ЛОНГБОРДА»

по направлению 01.04.03 Механика и цифровое математическое моделирование

профиль 01.04.03_03 Механика и цифровое производство

Выполнил
студент гр. 3640103/80301 А.С. Григорьев

Руководитель
доцент к.ф.-м.н О.С. Лобода

Санкт-Петербург
2020

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт прикладной математики и механики

Высшая школа теоретической механики

УТВЕРЖДАЮ
Директор ВШ ТМ
А.М. Кривцов
« » 2020 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы

студенту Григорьеву Александру Сергеевичу, гр. 3640103/80301

1. Тема работы: Моделирование и оптимизация электро-лонгборда.

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 08.06.2020

3. Исходные данные по работе: техническое описание имеющихся электро-лонгбордов, статьи по теме работы, технические справочники.

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): анализ и изучение динамических характеристик и дальности хода электро-лонгборда с подбором оптимальных используемых компонентов, создание модели трансмиссии для подключения и отключения соединения электромотора с колесом.

5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): рисунки и таблицы, представленные в тексте выпускной квалификационной работы

6. Консультанты по работе:

7. Дата выдачи задания: 22.01.2020

Руководитель ВКР О.С. Лобода

Задание принял к исполнению 22.01.2020

(дата)

Студент А.С. Григорьев

РЕФЕРАТ

На стр. 40, 24 рисунков, 8 таблиц, 3 приложений,0 литературных источника.

ПЕРСОНАЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ, ДИНАМИКА И КИНЕМАТИКА ЭЛЕКТРОЛОНГБОРДА, РЕМНЕВАЯ ПЕРЕДАЧА, ТРАНСМИССИЯ

Проектирование электро-лонгборда. Проведен анализ динамических характеристик и дальности хода с подбором оптимальных используемых компонентов. Дизайн модели трансмиссии для подключения и отключения соединения электромотора с колесом.

THE ABSTRACT

40 pages, 24 pictures, 8 tables, 3 application, 0 references.

PERSONAL TRANSPORT, DYNAMICS AND KINEMATICS OF ELECTROLONGBOARD, BELT DRIVE, TRANSMISSION

Designing an electric longboard. The analysis of dynamic characteristics and range with the selection of the optimal components used. The design of the transmission model for connecting and disconnecting the connection of the electric motor with the wheel.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

ГЛАВА 1. ОБЩИЙ ДИЗАЙН МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ......7

1.1. Техническая спецификация на электро-лонгборд. 7

1.2. Структура электро-лонгборда. 8

1.3. Дека. 10

1.3. Подвески.....11

1.4. Колеса.....12

1.5. Ременная передача. 13

1.6. Аккумуляторная батарея.....14

1.7. Электромотор.....16

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРО-ЛОНГБОРДА......21

2.1. Параметры модели. 22

2.1. Результаты моделирования. 26

ГЛАВА 3. ДИЗАЙН ТРАНСМИССИИ. 30

3.1. Устройство и принцип работы. 30

3.2. Расчет на прочность и долговечность.....33

ЗАКЛЮЧЕНИЕ......37

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ. 38

ПРИЛОЖЕНИЕ 1......40

ПРИЛОЖЕНИЕ 2......41

ПРИЛОЖЕНИЕ 3......42

ВВЕДЕНИЕ

Лонгборд - тип скейтборда, больше подходящего для поездок на дальние расстояния. Удлиненная доска более гибкая и упругая; Подвеска с удлиненной платформой обычно более свободна (т.е. требуют меньшего усилия для поворота). Лонгборд может иметь много преимуществ по сравнению с более традиционными видами транспорта: быстрее и требует меньше усилий, чем ходьба или бег, он обладает малыми габаритами, поэтому его легко переносить внутри общественного транспорта и помещений в любом здании, что устраняет необходимость парковки на дороге и замка. Основным недостатком лонгбордов является требования от пользователя высокой степени мобильности и больший период освоения.

В современных городских условиях популярность транспорта «последней мили» растет. «Последняя миля» относится к самой маленькой и часто пропускаемой части ежедневных городских поездок на работу; последний отрезок от автобуса или поезда до двери пункта назначения. Для этих целей более компактной альтернативой самокатам, велосипедам и машинам является электрический лонгборд.

На данный момент большинство райдеров имеют возраст от семнадцати до двадцати восьми [4], в отличие от скейтбординга, где средний возраст составляет около пятнадцати. Лонгборд больше ориентирован на взрослых, это уровень осознанности, возможность инвестиций в покупку и расходные материалы ради получения удовольствия и уникальных ощущений от катания.

Одним из основных недостатков у всех производителей электро-лонгбордов это невозможность использовать его как обычный лонгборд путем механических отталкиваний из-за постоянной связи колес с мотором, который создает дополнительный тормозящий момент, связанный с оказывающим сопротивлением ременной передачи и зубцовым моментом возникающем в электромоторе с постоянными магнитами [3]. В связи с чем необходимо

затрачивать больше усилий и времени для преодоления такого-же расстояния как на обычном лонгборде. Так же эта постоянная связь с мотором влечет за собой меньший свободны накат (свободное качение без ускорения) и как следствия при перемещении из пункта А в пункт Б райдеру необходимо чаще использовать мощность электромотора и тратить больше энергии батарей уменьшая запас хода.

В данной работе решается проблема первой стадии исследования и оптимизации динамики и дальности хода в сравнении с конкурентами, путем создания параметризованной кинематической 1D модели для моделирования разгона до максимальной скорости и расхода энергии при движении в городском цикле. Дизайн в системе КАД основных узлов электро-лонгборда и механизма соединения и разъединения мотора с колесом способным выдержать ежедневное использование, расчет на прочность и долговечность в системе конечно-элементного анализа.

ГЛАВА 1. ОБЩИЙ ДИЗАЙН МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ.

1.1. Техническая спецификация на электро-лонгборд.

Главная задача создать портативный быстрый лонгборд, чтобы справляться с обычными уклонами дорог по всему городу и иметь достаточную емкость аккумулятора, чтобы передвигаться в течение дня без подзарядки. Это означает, что электрический скейтборд должен иметь баланс между крутящим моментом и скоростью, а также баланс достаточной мощности, не жертвуя емкостью батареи для удовлетворения требований райдера. Чтобы удовлетворить эти потребности, были рассмотрены общеизвестные особенности электрического лонгборда и проведена разработка нового для этой индустрии механизма расцепления системы мотор - колесо. Цель состоит в том, чтобы объединить как можно больше потребностей клиентов в одном устройстве.

Чтобы разработать желаемый электрический скейтборд, были созданы следующие требования и спецификации опираясь на ведущие компании. Вес всей конструкции системы должен включать баланс между достаточным сроком службы батареи и производительностью, при этом оставаясь легким для мобильности. Соотношение между весом батареи и емкостью батареи ограничивает возможности. Технология свинцово-кислотных аккумуляторов обеспечивает дешевый вариант и надежный, но ограниченная плотность энергии требует их большего количества. Технология литиевых батарей, хоть и обеспечивает улучшенное легкое и энергоемкое решение для этого применения, но являются более дорогостоящим решением и требует повышенного внимания к режимам работы так как легче возгораются.

	Технические характеристики	**Обоснование**
1	Способен передвигаться на скорости выше 45 км/ч и разгоняться с 10 до 25 км/ч около 2 секунд (райдер 85 кг).	Электрические скейтборды на рынке сегодня развивают скорость около 45 км/ч

2	Способен преодолевать 15% -ым холмам с минимальной скоростью 8 км/ч	В городах типичные улицы имеют склоны менее 20%.
3	Возможность проехать 45 и более километров по ровной асфальтированной дороге в городском цикле.	Дальнейшее увеличение дальности не целесообразно в городских условиях
4	Вся система весит менее 10 кг	Большинство электро-лонгбордов на рынке данного класса веся 8 – 9 кг
5	Возможность отключать связь мотора и колеса	Возможность использовать без электротяги и увеличение свободного наката

Таблица 1.1 Требования к техническим характеристикам

1.2. Структура электро-лонгборда.

Блок-схема на Рис.1.1 характеризует основные элементы входящие в электро-лонгборд. Более подробная информация о функциях и взаимодействиях каждой подсистемы в блок-диаграмме представлена в таблицах 1.2 – 1.5.

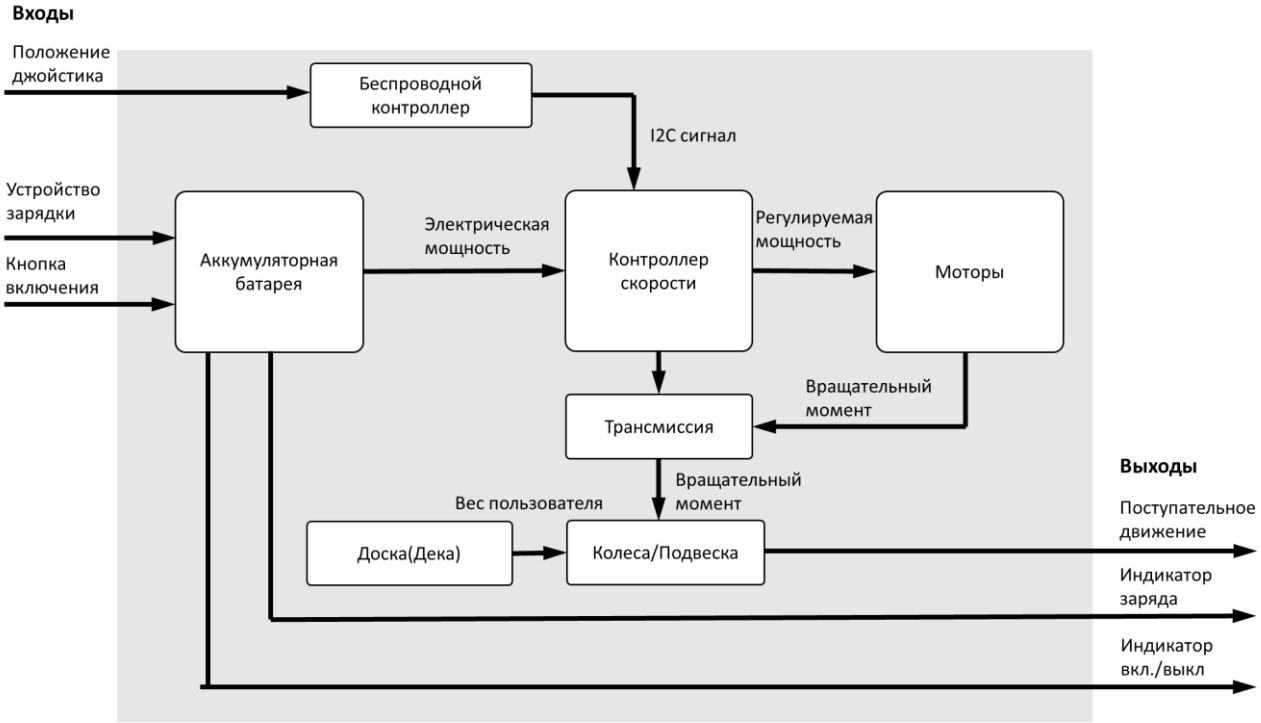


Рис. 1.1 Блок-схема электро-лонгборда.

Модуль	Беспроводной пульт
Входы	Джойстик с ручным управлением
Выходы	Сигнал управления I2C
Функциональность / особенности	Беспроводная передача положения джойстика на беспроводной приемник, который подает управляющий сигнал I2C на контроллер скорости для управления двигателем.

Таблица 1.2 Беспроводной пульт

Модуль	Аккумуляторная батарея
Входы	- Кабель для зарядки - Кнопка питания
Выходы	- Электрическая мощность - Вкл./Выкл. индикатор - Индикатор заряда аккумулятора
Функциональность / особенности	Аккумулятор обеспечивает всю систему питания для контроллеров скорости. В целях безопасности в комплект входит встроенная система управления батареями, порт зарядки и индикатор заряда батареи.
Модуль	Регулятор скорости
Входы	- Электрическая мощность - Сигнал управления I2C
Выходы	- Регулируемая мощность
Функциональность / особенности	Контроллер скорости обеспечивает необходимую регулируемую электрическую мощность для двигателей на основе пользовательского ввода от беспроводного контроллера и преобразует избыточную электрическую мощность от рекуперативного торможения в энергию постоянного тока для зарядки батареи.

Таблица 1.3 Аккумуляторная батарея и регулятор скорости

Модуль	Электродвигатели
Входы	- Регулируемая мощность
Выходы	- Момент
Функциональность / особенности	Электродвигатели преобразуют накопленную электрическую энергию во вращательное усилие, чтобы двигать лонгборд вперед. Они также служат генераторами для преобразования кинетической энергии пользователя в электрическую энергию, чтобы замедлить райдера и увеличить дальность хода.

Таблица 1.3 Электродвигатели

Модуль	Доска (дека)
Входы	- Вес пользователя
Выходы	- Нагрузка на колеса
Функциональность / особенности	Доска служит в качестве первичной структуры поддержки для райдера и передает усилие, направленное вниз от тяжести на колеса.

Таблица 1.4 Доска

Модуль	Колеса/Подвеска
Входы	- Вращающий момент - Вес пользователя
Выходы	- Поступательное движение
Функциональность / особенности	Колеса передают вращательную силу двигателей для движения вперед, сохраняя при этом поддержку райдера. Материал колеса также демпфирует передачу вибрации от земли к доске и обеспечивает тягу для передачи вращательного момента на землю.

Таблица 1.5 Колеса/Подвеска

1.3. Дека.

Для соответствия проектным характеристикам для максимальной скорости, выбирается гибкая длинная доска обеспечивающая стабильность на высоких скоростях и поглощающая часть вибраций от неровностей на дороге. Доска Loaded Vanguard Flex 3 обеспечивает желаемый изгиб и зазор, требуемый для батарейного блока.

Дизайн компонентов производился в программном обеспечении САПР SolidWorks. Для создания деки использовался метод реверсивного инжиниринга: по основным трем ортогональным проекциям была создана модель Рис.2 необходимая для правильной компоновки навесного оборудования и проверки на зазоры при всех возможных положениях при передвижении [4].

Рис. 1.2 Дека лонгборда. Разработано в SolidWorks.

1.3. Подвески.

Подвеска — это элемент, соединяющий колеса и доску. Они сделаны из двух основных частей с соединительными элементами между ними (Рис. 1.3). Главные части: подвес, который удерживает ось и опорная плита, которая крепится к доске. Вместе части преобразовывают наклон доски в скручивание оси и как в следствие в поворот.

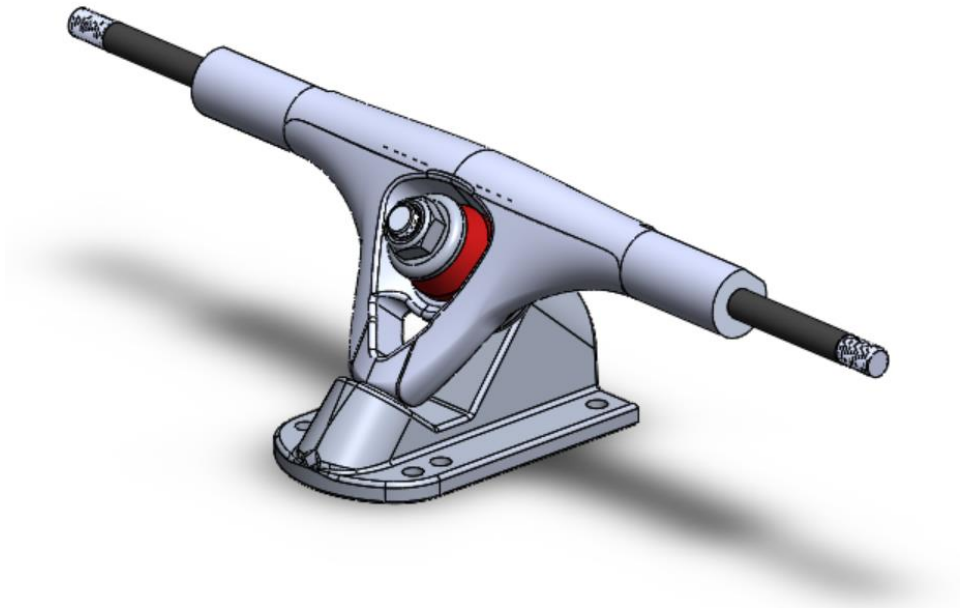


Рис. 1.3 Подвеска. Разработано в SolidWorks.

1.4. Колеса.

Лонгборд был укомплектован сочетанием 85-мм колес с твердостью 77A и шарикоподшипников из титана. Более мягкая твердость 77A поглощает больше вибраций на дороге без значительного износа, хоть и имеют большее сопротивление качению чем у колес с твердостью 80A, 83A. Титановые шарикоподшипники обеспечивают более прочное и устойчивое к ржавчине решение, которое имеет более низкое сопротивление качению и меньший нагрев по сравнению со стальными подшипниками, требующие технического обслуживания во влажных условиях [14].

Колеса являются связующим звеном между транспортным средством и дорогой. Шариковые подшипники под давлением устанавливается в ступицу колеса (Рис 1.4), а проставка может быть использована для понижения осевой нагрузки на подшипники, тем самым улучшая срок службы подшипников. Колеса большего диаметра по сравнению с обычными делают доску менее восприимчивой к неровной местностям. Данные колеса дают больше пространства для проектирования трансмиссии и поднимает высоту деки.

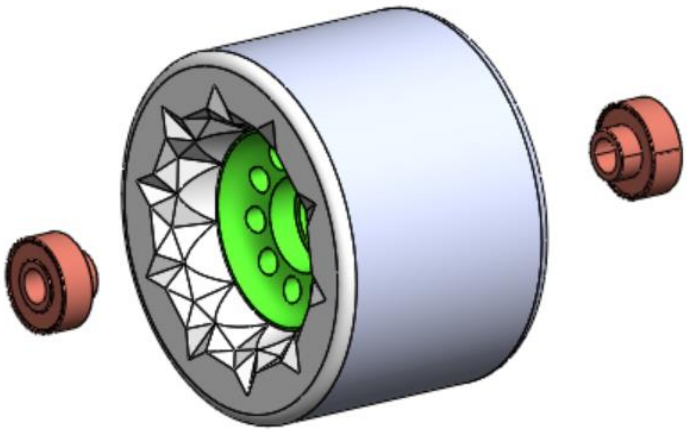


Рис. 1.4 Колесо с комплектом подшипников. Разработано в SolidWorks.

1.5. Ременная передача.

Существует два основных типа систем привода для электрических лонгбордов, колесные моторы (ступичные моторы) и внешние моторы со шкивным зацеплением. Мотор-редукторы, имеют двигатели, установленные параллельно колесам с меньшим зубчатым шкивом на двигателе и большим шкивом на колесе.

Ступичные двигатели построены с двигателем, встроенным в колесо. Это значительно упрощает механическую конструкцию. Конструкция втулочного мотора также менее чувствительна к грязи и воде, так как мотор находится внутри колес, но вся нагрузка от дороги приходится на мотор, и данная компоновка усложняет обслуживание мотора. Зубчатая передача редукторного привода может давать более высокий крутящий момент, чем ступичные двигатели, что обеспечивает лучшую производительность при торможении и ускорении. Имея более высокий крутящий момент, динамика ускорения увеличивается, но может привести к снижению максимальной скорости. Как и с компоновкой батареи важно соблюсти баланс.

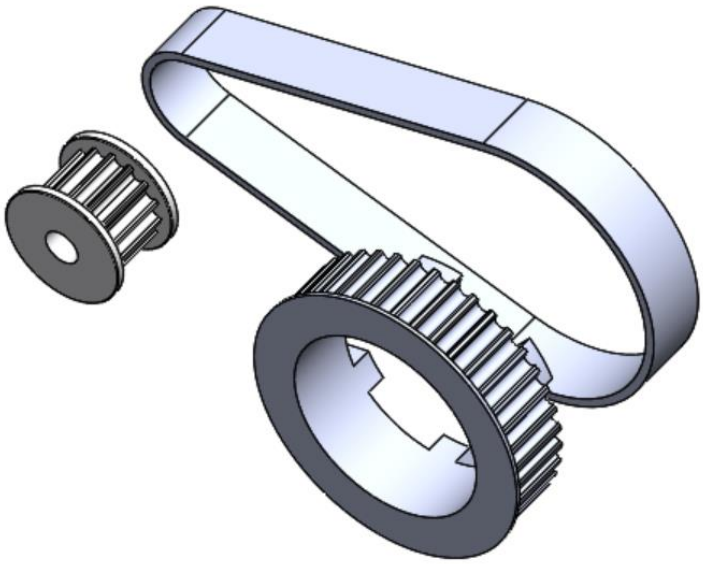


Рис. 1.5 Ременная передача. Разработано в SolidWorks.

1.6. Аккумуляторная батарея.

Батарея состоит из одного или нескольких элементов. Каждая ячейка имеет ЭДС, которая варьируется в зависимости от химического состава батареи, заряда и других факторов. Для обычных свинцово-кислотных батарей (Pb) номинальное напряжение составляет 2,1 В. Объединив шесть последовательно соединенных элементов, батарея будет иметь номинальное напряжение 12,6 В. Эта конфигурация является стандартной для аккумуляторных батарей для автомобилей. В то время как свинцово-кислотные батареи широко распространены, они не обладают оптимальными характеристиками при относительно низкой удельной энергии и плотности энергии. Более современные аккумуляторные технологии, такие как литий-ионный (Li-ion) и литий-ионный полимер (Li-Po), предлагают более высокую плотность энергии, более высокую удельную энергию, а также более высокую удельную мощность. С-рейтинг - это безопасная скорость разряда в зависимости от максимальной емкости батареи. Это описывается с помощью простой формулы:

$$I\ [A]\ =\ \text{Максимальная емкость}[\text{А}\cdot\text{ч}]\ \cdot\ C\ \text{рейтинг} \tag{1.1}$$

Технология	Номинальное напряжение, В	Удельная энергия, Вт*ч/кг	Плотность энергии, Вт*ч/л	Удельная мощность, Вт/кг
Pb	2.1	35-40	80-90	250
Li-ion	3.6	150-180	200-350	315-800
Li-Po	3.7	155	220	260

Таблица 1.7 Показатели энергоемкости для различных технологий

Для данного проекта были выбраны батареи, основанные на технологии Li-Ion которые отличаются одной из самых больших энергоемкостью и безопасностью использования. Поскольку батареи Li-Ion доступны только в некоторых распространенных конфигурациях, окончательный комплект батарей был основан на одной из них. Принимая во внимание, что самая распространённая ячейка 18650 литий-ионной батареи (названная так из-за ее диаметра 18 мм и высоты 65 мм) имеет номинал около 3000 мАч и для предотвращения чрезмерного уменьшения номинальной емкости со временем,

работают при токах не более 2С. И с учетом предполагаемых динамических характеристик электромотору потребуются большие токи разряда порядка 20А-30А, был выбран набирающий популярность формат ячейки 21700 с номинальной емкостью 3900 мАч и максимальном токе 35А. Тем самым продлевая срок жизни и перемещая рабочие режимы ближе к номинальным.

С точки зрения различных компоновок элементов максимизация напряжения системы минимизирует ток блока и сокращает потери в проводниках и элементах. Контроллер двигателя может принимать до 60 вольт максимум, но не рекомендуется работать намного выше номинальных 50 вольт, чтобы предотвратить возможное повреждение контроллера. Полностью заряженный элемент составляет 4,2 В, что означает, что в качестве конфигурации блока допустимо не более 12 последовательных элементов. Для определения максимальной выходной мощности номинальное напряжение ячейки 3,6 В.

Тип ячеек	**W, Вт*ч**	**U, В**	**I, мА*ч**	**M, кг**	**I ном= 2.5C, A**	**I пик=8C, A**
12s4p	674	43.2	15600	3.3	39	125
12s3p	505	43.2	11700	2.5	29	94
12s2p	337	43.2	7800	1.7	20	62
10s4p	562	36	15600	2.8	39	125
10s3p	421	36	11700	2.1	29	94
10s2p	281	36	7800	1.4	20	62

Таблица 1.6 Характеристики различной компоновки батареи, s – количество в последовательном соединении, p – в параллели.

Таблица 1.6 рассчитана из данных технической спецификации (приложение 1) батареи NR21700-40T. Пакет 12s4p обеспечивает максимальную мощность и общую емкость, но также требует значительного места.

При последовательном размещении батарей безопасная скорость разряда не изменится, но общее напряжение будет увеличено. При параллельном размещении батарей увеличится безопасная скорость разряда и общая мощность.

1.7. Электромотор.

Существует два основных вида бесщеточных синхронных двигателей с постоянными магнитами (PMSM): бесщеточные двигатели постоянного тока (двигатель BLDC) и бесщеточные двигатели переменного тока (BLAC).

В отличие от щеточных двигателей, для бесщеточных двигателей необходим электрический контроллер, обычно известный как «электрический регулятор скорости» (ESC), для генерации переменного тока, необходимого для каждой фазы [9].

Синхронный двигатель — это когда вращение магнитного поля совпадает с вращением ротора. Двигатель может работать с обратной связью или без нее. Без обратной связи ESC не может знать, вращается ли двигатель или как быстро он вращается. Это делает двигатели без обратной связи очень чувствительными к остановке во время смены нагрузки. Срыв происходит, когда вращение магнитного поля не синхронизирован с вращением ротора, что приводит к потере крутящего момента. С обратной связью ESC может непрерывно контролировать положение ротора и тем самым контролировать вращение магнитного поля соответственно. Некоторые методы обеспечения обратной связи: Датчик обратной ЭДС и эффекта Холла [10].

Обратная ЭДС измеряет напряжение, создаваемое относительным вращением между магнитным полем и обмотками двигателя. Для этого необходимо, чтобы двигатель работал в течение короткого времени как генератор, и такой способ не будет работать, когда двигатель неподвижен, так как нет относительного движения. Обратная-ЭДС требует более сложного ESC, чтобы иметь возможность контролировать напряжение каждой фазы, но может использоваться на любом двигателе [9, 11]. Этот способ можно назвать «без датчика», так как внешние датчики не нужны.

Метод датчика эффекта Холла использует датчики, расположенные по периферии двигателя, для точного определения положения ротора. Датчики

Холла измеряют магнитное поле от постоянных неодимовых магнитов. Данный метод требует по крайней мере один дополнительный датчик с собственным потреблением энергии, чтобы иметь возможность определить частоту вращения двигателя и, следовательно, скорость. Размещая несколько датчиков с разным расстоянием вокруг статора, можно определить относительно точное положение. Это решение обеспечивает высокую точность обратной связи, которая дает хороший крутящий момент при низкой скорости [12]

Основное различие между двигателями BLDC и BLAC заключается в обратной ЭДС, генерируемой, когда двигатель вращается под действием внешней силы. Обратная ЭДС, генерируемая BLDC, является трапециевидной, тогда как обратная ЭДС BLAC является синусоидальной. В то время как двигатель BLDC может приводиться в движение с помощью синусоидального ESC, двигатель BLAC будет иметь более высокие механические потери при работе с драйвером BLDC. Драйверы, необходимые для BLDC, как правило, проще и могут быть более эффективными, чем драйверы BLAC [13]. Хотя теоретически идеальные BLDC и BLAC могли бы иметь постоянный крутящий момент, у реальных двигателей есть некоторые вариации.

Традиционные двигатели BLDC построены с ротором, расположенным внутри статора. Также возможно поменять их так, чтобы ротор находился снаружи статора. Такие двигатели называются двигателями с внешним ротором. Взаимодействие магнитных полей между статором и магнитами, происходит на большем радиусе, чем у двигателя с внутренним ротором. Это механическое преимущество означает, что двигатель с внешним ротором способен производить больше крутящего момента на ампер, чем эквивалентный двигатель внутреннего типа. Однако есть также недостаток в скорости двигателя; двигатель с внешним ротором обычно имеет более низкую скорость.

Бесщеточные двигатели имеют характеристику производительности, называемую Kv. Это параметр, который приблизительно характеризует скорость

вращения ротора на вольт в незагруженном состоянии. Компромисс между двигателем с более высоким Kv и двигателем с более низким является скоростью в зависимости от крутящего момента. Для выбора подходящего значения теоретическая максимальное напряжение батареи определяет идеальное значение Kv.

Максимальная выходная мощность не может поддерживаться непрерывно, так как двигатель перегревается. Двигатели также не работают с максимальной эффективностью при максимальной выходной мощности. Поэтому на основе информации о том, что оба двигателя Boosted и Evolve работают с двумя двигателями мощностью до 1800 Вт, чтобы превзойти их по динамическим характеристикам для этого проекта выбрана конфигурация с двумя двигателями SK3 6374 192 Kv (Рис. 1.5) с выходной мощностью 2750 Вт. Большая мощность двигателя помогает использовать его в безопасных режимах близких к номинальным показателям, в результате уменьшая потери энергии на тепло. Кроме того, двигатель SK3 имеет 8-миллиметровый вал, который устанавливается непосредственно на зубчатый шкив. Оба двигателя рассчитаны на максимальное системное напряжение, и в конфигурации контроллера двигателя максимальный ток двигателя устанавливается на основе используемого двигателя.

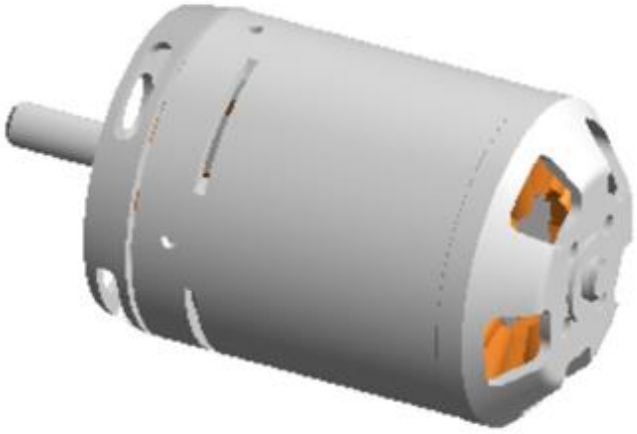


Рис. 1.5 Электромотор Turnigy SK3 6374 192Kv. Разработано в SolidWorks.

Из графических данных теста двигателя (Приложение 2) были получены численные графики основных характеристик мотора (Рис. 1.6 – 1.8). Красными границами обозначены пределы для максимальной эффективности рабочих режимов [5].

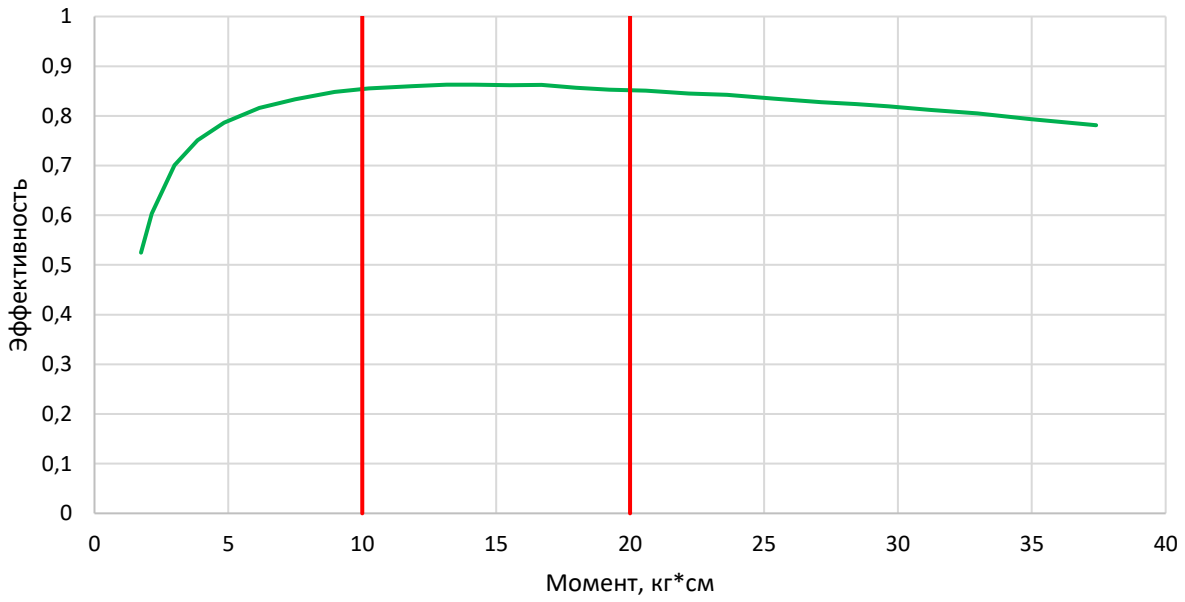


Рис. 1.6 График зависимости эффективности от момента.

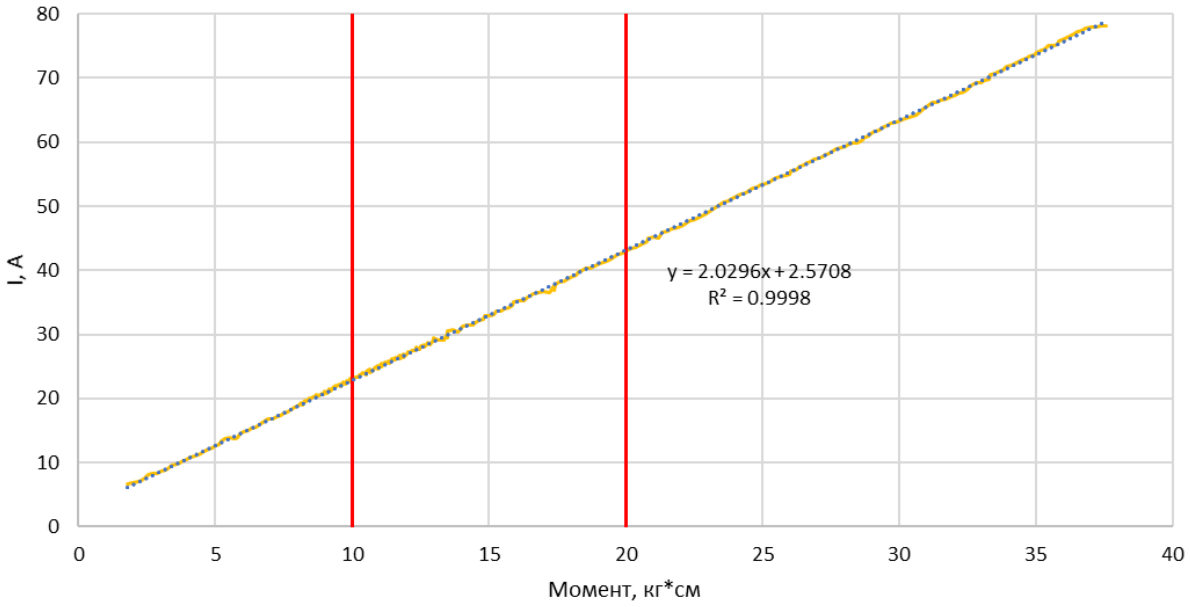


Рис. 1.6 График зависимости момента от оборотов.

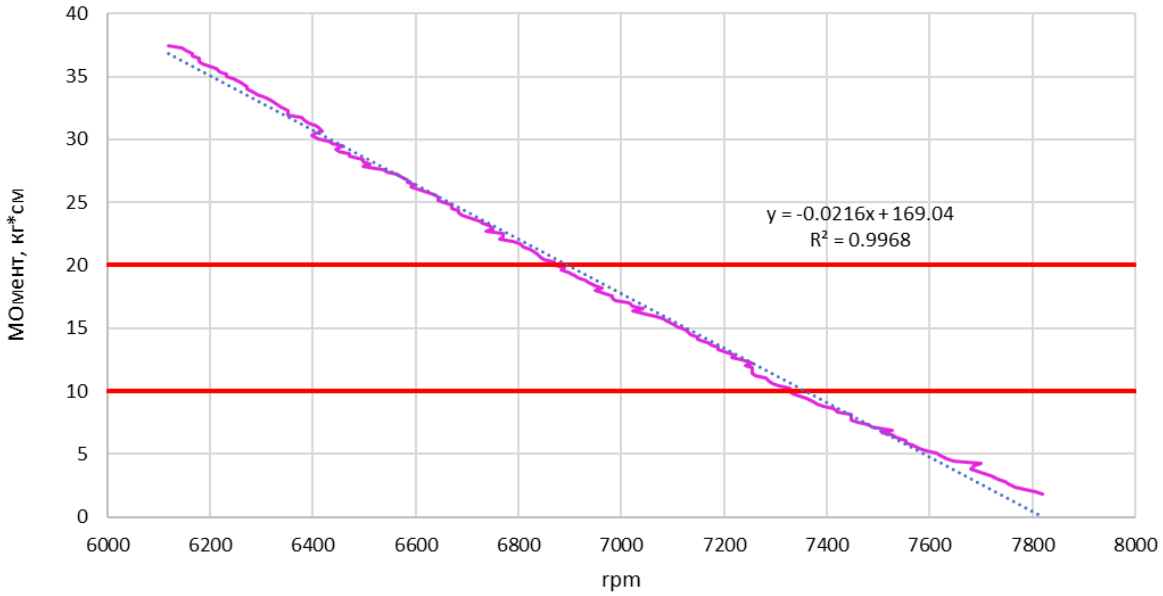


Рис. 1.7 График зависимости подаваемой силы тока от момента.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРО-ЛОНГБОРДА.

Моделирование было выполнено в среде 1-D моделирования GT-SUIT. Блок электропривода делает запрос на входную мощность, которая распространяется через различные компоненты силовой передачи и реализует движение лонгборда.

Имитаторы системного уровня были смоделированы с использованием эмпирических данных, которые основаны на измерениях, предоставленных производителями компонентов. Они моделируются как справочные таблицы. Передвижение моделируются с использованием математических уравнений динамики, в качестве входной информации используется сценарий скорости от времени или положения регулятора мощности, подаваемой на мотор.

Моделируемая система вместе с пользователем весит около 100 [кг], включая батарею. Лобовую площадь 1.8 [м2] с коэффициентом лобового сопротивления 0,8 [-], а сопротивление качению - 0,01 [-]. Присвоенные значения основаны на приблизительной оценке пользователя размера выше среднего. Выбранный электродвигатель представляет собой синхронную машину с постоянными магнитами (BLDC) с пиковой мощностью 4032 [Вт]. Аккумуляторная батарея состоит из 46 модулей литий-ионной батареи. Она имеет номинальное напряжение 43 В, энергоемкость 0,67 кВт · ч и весит около 3.3 кг. Модель разработана для запуска теста на прямолинейное ускорение и нового европейского расходного цикла (WLTP) отмасштабированного под скорости для портативного транспорта (Рис 2.1).

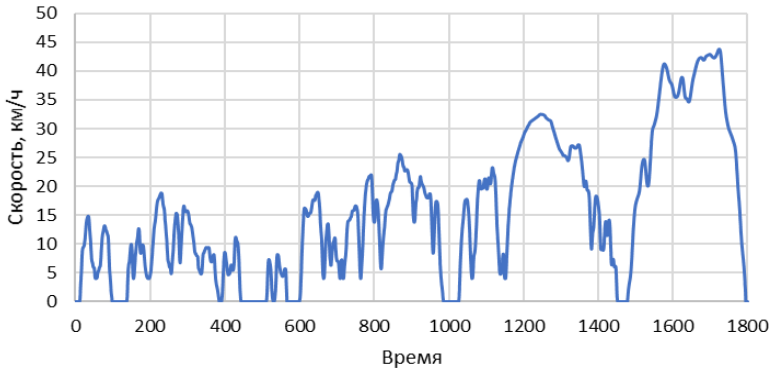


Рис. 2.1 WLTP европейский цикл

2.1. Параметры модели.

Блок привода подает требуемый крутящий момент и желаемый тормозной момент при активации акселератора и педали тормоза соответственно. Если водитель желает ускорить транспортное средство, он нажимает на педаль газа. В зависимости от степени нажатия педали акселератора соответствующий запрос крутящего момента водителя отправляется на транспортное средство через различные системы трансмиссии, такие как аккумулятор и модель двигателя. Регенерация начинается только тогда, когда педаль тормоза нажата. После нажатия на педаль тормоза и все тормозное усилие создается за счет рекуперативного торможения [6].

Для проверки транспортного средства на различных циклах движения этот блок водителя заменяется другим, который рассчитывает необходимый крутящий момент привода / тормоза в зависимости от профиля скорости. Исходя из скорости профиля цикла вождения и следующих уравнений, мы определяем мощность, необходимую для преодоления различных потерь энергии [1] транспортного средства и, следовательно, для движения транспортного средства на желаемой скорости.

Количество механической энергии, потребляемой транспортным средством при движении по заранее заданной схеме движения, в основном зависит от трех эффектов:

• аэродинамические потери на трение

• потери при качении

• энергия рассеивается в тормозах.

Классическое уравнение, описывающее продольную динамику дорожного транспортного средства, имеет следующий вид

$$m_v \frac{dv(t)}{dt} = F_t(t) - \left(F_a(t) + F_r(t) + F_g(t)\right) \qquad (2.1)$$

где m_v - масса автомобиля [кг],

v - скорость автомобиля [м / с^2],

F_a - аэродинамическое трение [Н],

F_r - трение качения [Н],

F_g - сила, вызванная силой тяжести при движении по не горизонтальным дорогам [N]

Сила тяги F_t - это сила, создаваемая первичным двигателем, минус сила, которая используется для ускорения вращающихся частей внутри транспортного средства и минус все потери на трение в трансмиссии.

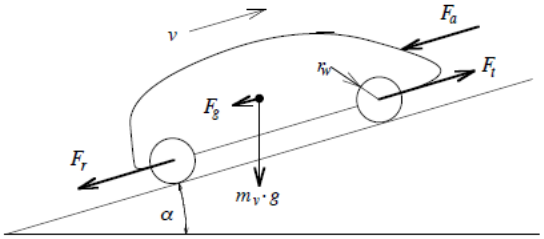


Рис. 2.2 Схема распределения сил на транспортное средство

Сила аэродинамического сопротивления

Обычно сила Fa аэродинамического сопротивления аппроксимируется, упрощая транспортное средство как призматическое тело с фронтальной областью Af. Сила, вызванная давлением застоя, умножается на коэффициент аэродинамического сопротивления cd, который моделирует фактические условия потока

$$F_a(v) = \frac{1}{2}\rho_a A_f C_d v^2 \qquad (2.2)$$

Здесь v - скорость транспортного средства [м / с2] и _a плотность окружающего воздуха [кг / м3]. Параметр Cd - это коэффициент лобового

сопротивления, оцененный с использованием программ вычислительной гидродинамики (CFD) или экспериментов в аэродинамических трубах. Для оценки механической энергии, необходимой для запуска типичного испытательного цикла, этот параметр можно считать постоянным.

Трение качения моделируется как:

$$F_r = C_r m_v g \cos\alpha \tag{2.3}$$

где m_v - масса автомобиля [кг],

g - ускорение силы тяжести [м / с2],

C_r- коэффициент трения качения [-],

α - угол наклона [град]

Коэффициент трения качения C_r зависит от многих переменных. Наиболее важными влияющими величинами являются скорость транспортного средства v, давление в шинах p и состояние дорожного покрытия. Для многих применений, особенно когда скорость остается умеренной, коэффициент трения качение C_r можно считать постоянным.

Сила сопротивления в гору , создаваемая силой тяжести при движении по дороге с уклоном, является консервативной и значительно влияет на поведение автомобиля. Задается отношением:

$$F_g = m_v g \sin\alpha \tag{2.4}$$

Физические параметры задаваемые модели указаны в Таблице 2.1

Параметр	Значение
Полная масса, m_v, кг	90
Коэффициент обтекаемости, c_d	0.8
Радиус колес, мм	85
КПД трансмиссии, $\eta_{тр.в}$	0.8
Коэффициент сопротивления качению колес первого порядка (для асфальтобетонной дороги), f_0	0.01
Плотность воздуха, $\rho_в$, кг/м^3	1.225
Ускорение свободного падения, g, м/с^2	9.81

Таблица 2.1 Числовые параметры модели

Электромотор задается картой момента и эффективности в зависимости от оборотов, полученной из данных, предоставленных производителем (Приложение 2). У мотора есть два режима: номинальный, работа в котором может осуществляться продолжительный промежуток времени, и пиковый, на кратковременном интервале времени. На рисунке 2.3 показаны полученные графики.

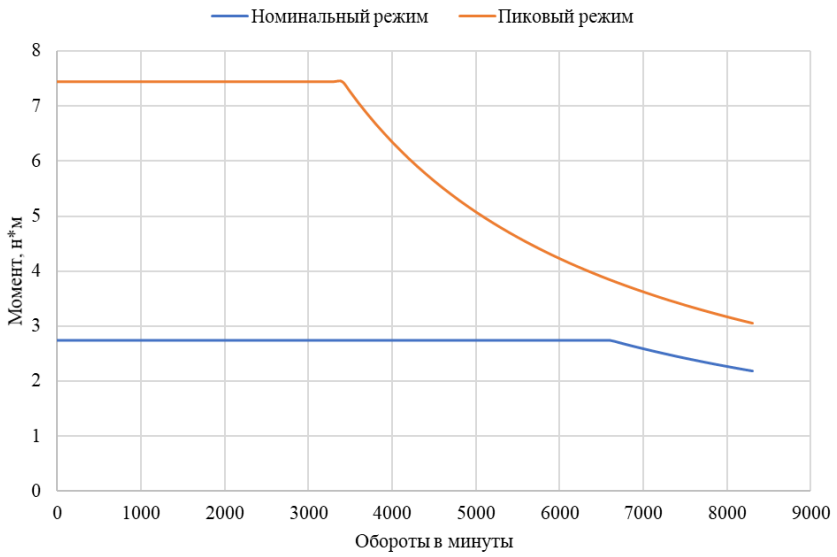


Рис. 2.3 Карта момента на двигателе в пиковом и номинальном режимах

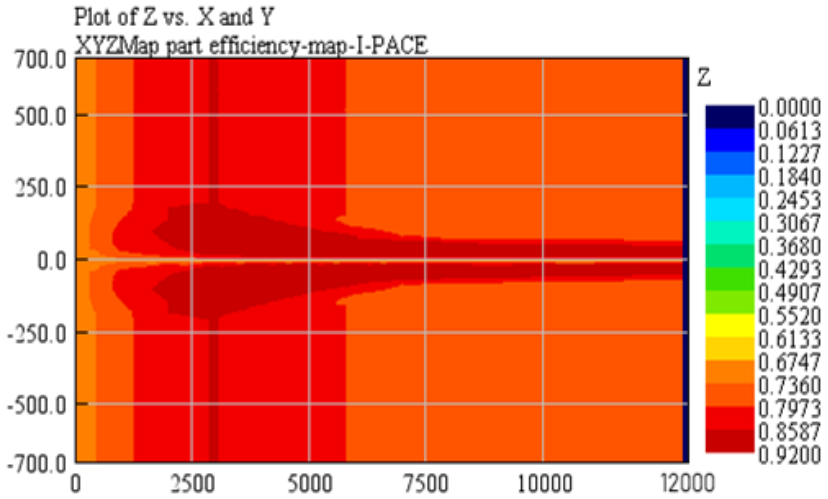


Рис. 2.4 Карта эффективности в зависимости от оборотов и момента.

Данный мотор обладает показателем отношения напряжения к оборотам Kv = 192. Что дает при подключении к батарее 12s4p максимальные обороты двигателя равные 8200 оборотам в минуту [8]. Максимальное значение передаточного числа определялось исходя из максимальных оборотов двигателя и требуемой максимальной скорости (в зависимости от двигателя)

Максимальное значение передаточного числа определялось по формуле, исходя из максимальных оборотов двигателя и требуемой максимальной скорости

$$v_{max} = \frac{rpm_{max} \cdot 2\pi \cdot 60 \cdot R_{\text{кол}}}{Z_{max} \cdot 10^6} > 45 \ {}^{\text{км}}/_{\text{ч}} \tag{2.5}$$

Минимальное значение передаточного числа определялось исходя из обеспечения требуемого момента на ведущих колесах.

С учетом ограничений в размере из-за колес (85мм) Было выбрано передаточное число из линейки возможных для ременной передачи в отношении 15 к 40 зубьев на шкивах электромотора и колеса соответственно при котором будет обеспечена максимальная скорость в 50 км/ч с батареей 12s4p и 45 км/ч для 10s4p.

2.1. Результаты моделирования.

В программном комплексе GT-SUIT была создана параметрическая модель транспортного средства на электрической тяге (Рис. 2.5), соответствующая параметрам электро-лонгборда.

В первом сценарии моделирования на мотор подавалась максимальная электрическая мощность, эмитирующая нажатый до упора джойстик ускорения и с учетом режима работы мотора (пиковый и номинальный) в результате расчетов уравнений динамики были получены кривые скорости от времени (Рис. 2.6) и основные показатели зафиксированы в таблице 2.2.

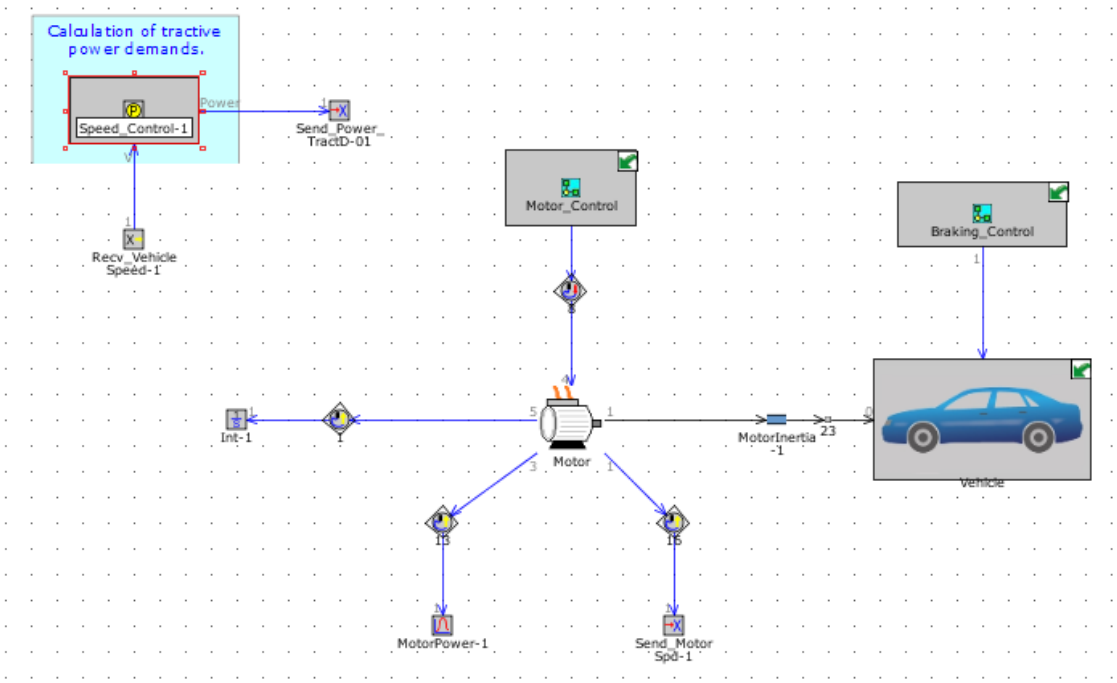


Рис. 2.5 Динамическая модель электро-лонгборда в GT-SUIT

V, км/ч	Нопинал, с	Пик, с	Boosted Stelth	Raptor 2.1 60A
10 - 25	2.28	1.16	2.15	1.49
V max	50	50	37	46.7

Таблица 2.2 Сравнение динамических показателей с конкурентами

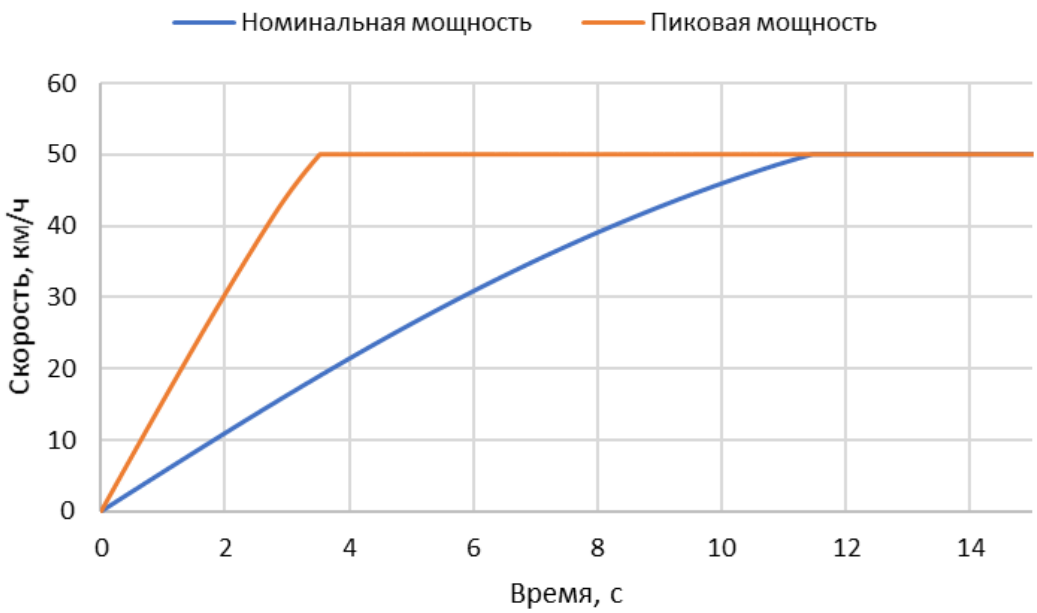


Рис. 2.6 График скорости при ускорении для номинального и пикового режима.

На рисунке 2.6 отчетливо заметна разница в режимах работы электродвигателе. В номинальном режиме разгон до максимальной скорости 50 км/ч занял 11.2 сек, а в пиковом 3.8 с. Для повседневного использования на ограниченном пространстве основным показателем динамики можно условно считать ускорения в пределах 10-25 км/ч. Для данного скоростного интервала была достигнута поставленная цель 2 с и разгон составил 2.28 с для номинального и 1.16 с для пикового режима работы двигателя.

Для второго сценария использовалась та же модель что и для первого только в этот раз мощность подаваемая на электромотор рассчитывалась с учетом обратной связи, измеряющей разность показателей с сенсора скорости и скорости поставленной в задаче придерживаться WLTP циклу (Рис. 2.1). В итоге интегрируя подаваемую мощность в каждый момент времени был получен график затраченной энергии (Рис. 2.7). Из которого видно, что на момент окончания (t = 1800 с) прохождения полного цикла было затрачено 335 кДж. При этом электро-лонгборд проехал 7.7 км, в результате был получен средний расход: 12 кВт*ч/10 км.

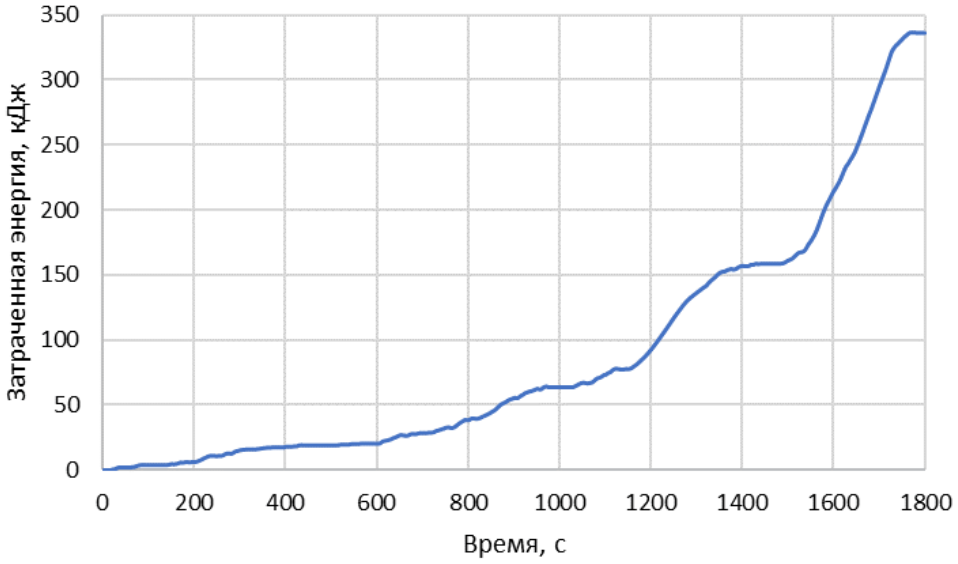


Рис. 2.7 Интегральный график затраченной энергии от времени

Было вычислено, что при таком расходе батарея компоновки 12s4p дает возможность передвигаться на расстояние 56 км без подзарядки, 10s4p хватит на 46 км езды в таком режиме. Данные показатели сравнимы с одной из самых больших дальностей хода среди электро-лонгбордов данного класса на рынке - 50 км у Evolve GTX Street.

ГЛАВА 3. ДИЗАЙН ТРАНСМИССИИ.

Основная функция трансмиссии - передача крутящего момента от электродвигателя на колесо. К этой функции добавляется возможность расцепления связи между колесом и электромотором. Которая позволяет избавиться от тормозящих сил, возникающих в ременной передаче и электромоторе при свободном качении. В процессе передачи увеличивается вращающий момент и уменьшается угловая скорость. Сами электродвигатели относительно высокоскоростные и с малым крутящим моментом.

3.1. Устройство и принцип работы.

Полная сборка должна уместиться под декой за колесом 85 мм и не касаться земли и других частей при поворотах.

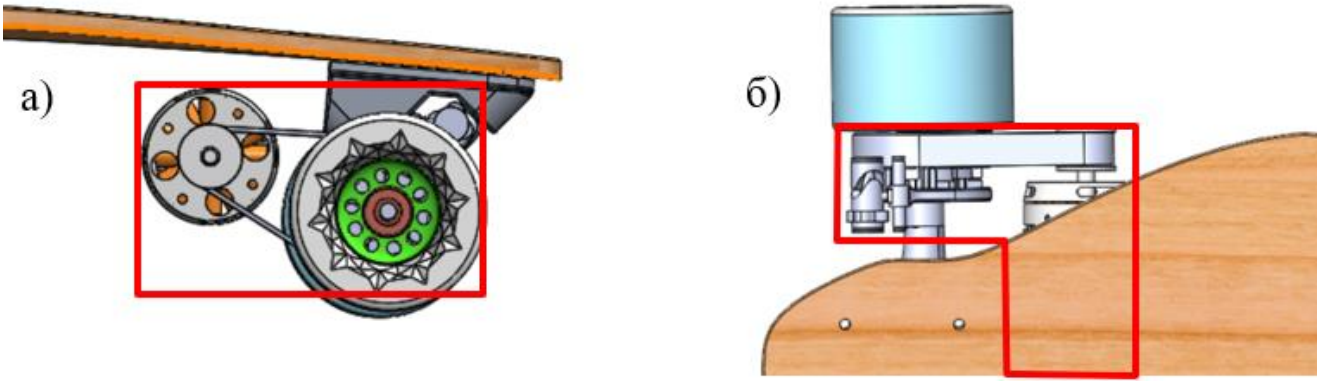


Рис. 3.1: Расчетное пространство двигателя и трансмиссии (красное): а – вид сбоку, б -вид сверху

На рисунке 3.1 показано пространство для дизайна. Электромотор находится максимально высоко для безопасности и утоплен внутрь лонгборда, что сдвигает центр тяжести системы ближе к центру.

Единственный способ торможения на электро-лонгборде это использовать мотор в качестве генератора, поэтому необходима двойная связь между мотором и колесом. Следовательно варианты с обгонными муфтами здесь не подходят, как и подпружиненное сцепление, для которого необходимо

создавать постоянное усилие [7]. Поэтому было принято решение использовать кулачковую муфты адаптированную под подвеску лонгборда (Рис. 3.2).

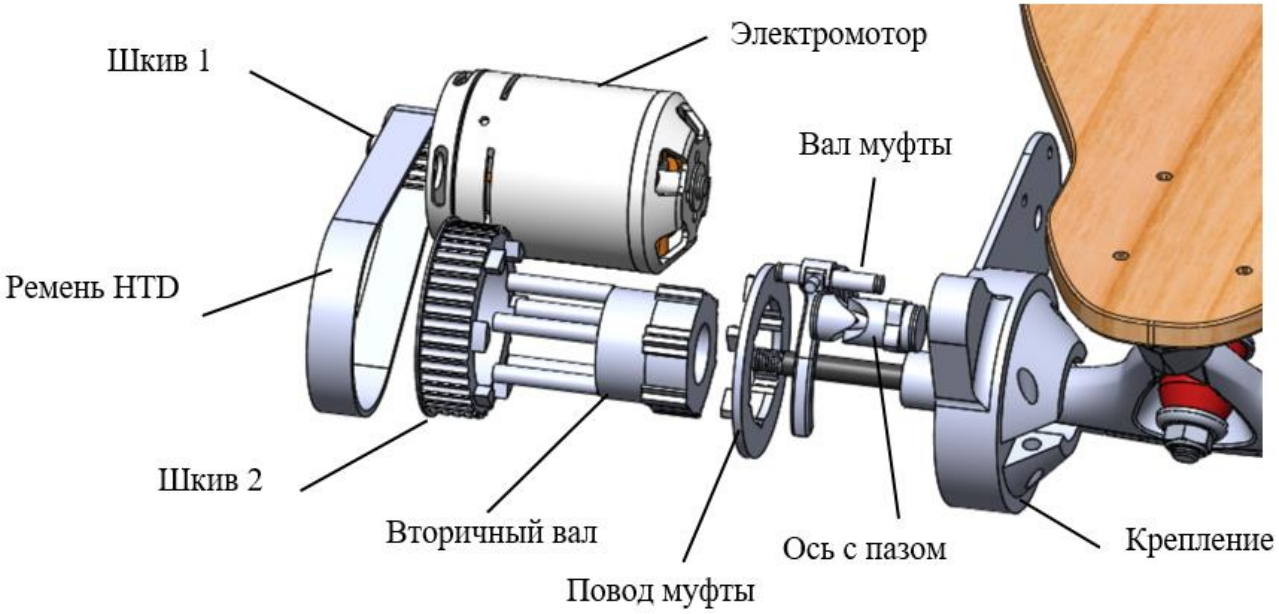


Рис. 3.2: Разнесенный вид сборки трансмиссии

Ось с пазом (рис 3.3) связана с сервоприводом TS-D99X, на который с контроллера скорости поступает команды для вращения на 90°. С учетом скорости вращения сервопривода такое переключение будет занимать 12 . Канавки на оси вырезаны таким образом чтобы при вращении на 90° шип, входящий в данный паз, перемещался на необходимое расстояние.

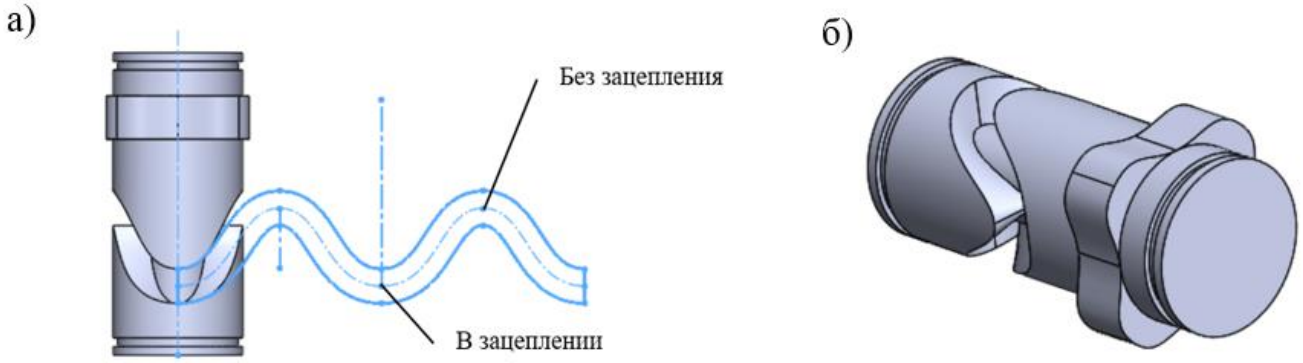


Рис. 3.3: Ось с пазами: а – канавка б – 3д вид

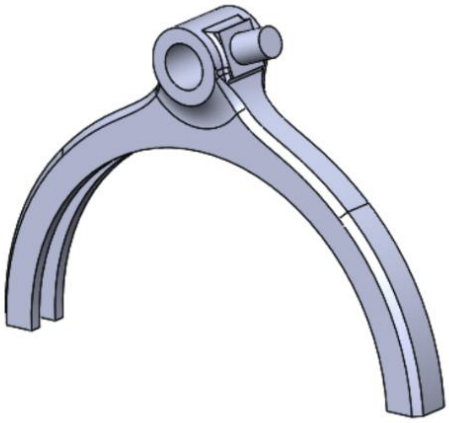


Рис. 3.4: Повод муфты

Повод муфты (Рис 3.4) на котором находится шип перемещается по вспомогательному валу двигая находящуюся с ним в зацеплении муфту (Рис 3.5)

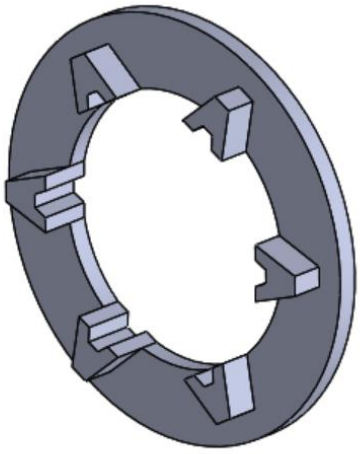


Рис. 3.5: Муфта с кулачками и шлицами

Муфта находится в постоянном зацеплении через шлицы с вторичным валом (Рис. 3.6). Вал постоянно вращается так как находится в зацеплении с колесом, запрессованным в шпильки.

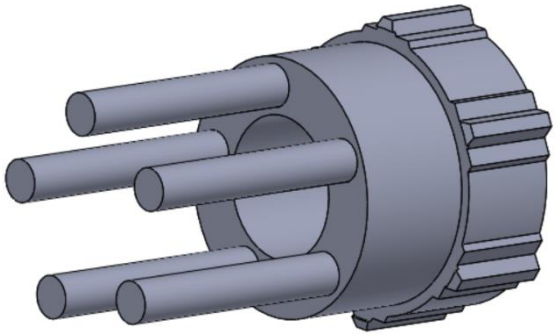


Рис. 3.6: Вторичный вал со шпильками

На цилиндрической поверхности вала закреплен шкив с кулачками через пальчиковый подшипник. Таким образом прямой связи между ними нет. Для их зацепления необходимо сдвинуть муфту по направляющим на валу.

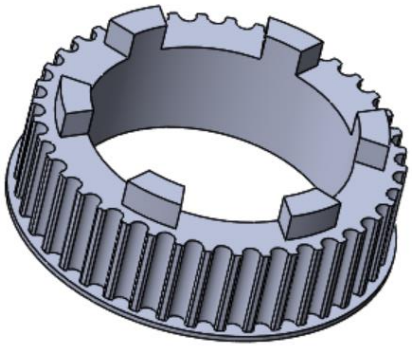


Рис. 3.7: Шкив с кулачками

Крепление мотора и дополнительных валов трансмиссии к подвеске совмещено в одну деталь (Рис 3.8)

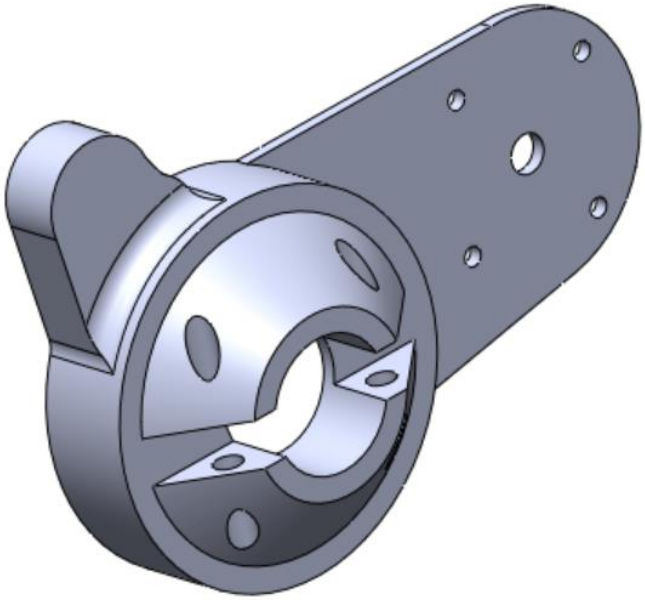


Рис. 3.8: Крепление мотора и дополнительных осей к подвеске

3.2. Расчет на прочность и долговечность

Крепление коробки передач является важным компонентом трансмиссии. Прочность корпуса является важным параметром, учитывающийся при проектировании [2]. Он является неотъемлемой частью коробки передач, он обеспечивает поддержку валов и электромотора. Основными требованиями к

корпусу редуктора являются жесткость и эффективные виброгасящие свойства [14]. Материал, выбранный для корпуса, — это алюминий, так как он имеет малый вес, хорошую обрабатываемость и более высокое отношение прочности к весу. Он крепится двумя болтами к подвеске. Размер корпуса равен размеру трансмиссии и имеет достаточно места внутри корпуса для плавного смазывания механизма. Для уплотнения смазочного масла используется силиконовая сменная фланцевая прокладка и герметик с шестью отверстиями, однако в верхней части предусмотрено небольшое отверстие для выпуска газов, выделяемых горячим смазочным маслом.

Модели CAD используются для моделирования условий эксплуатации и прочности конструкции. Было проведено статическое структурное моделирование. Модели САПР сделаны с использованием SOLIDWORKS.

Расчеты выполнялись классическим методом конечных элементов, модели разбивались тороидальной сеткой. Моделировалась ситуация с максимальным нагружением: электромотор подает максимальный момент 7.5 Н*м на заблокированное колесо. В первом (Рис. 3.9) случае для элементов сцепления был выбран материал алюминий 6063 в результате был получен коэффициент запаса 1.4.

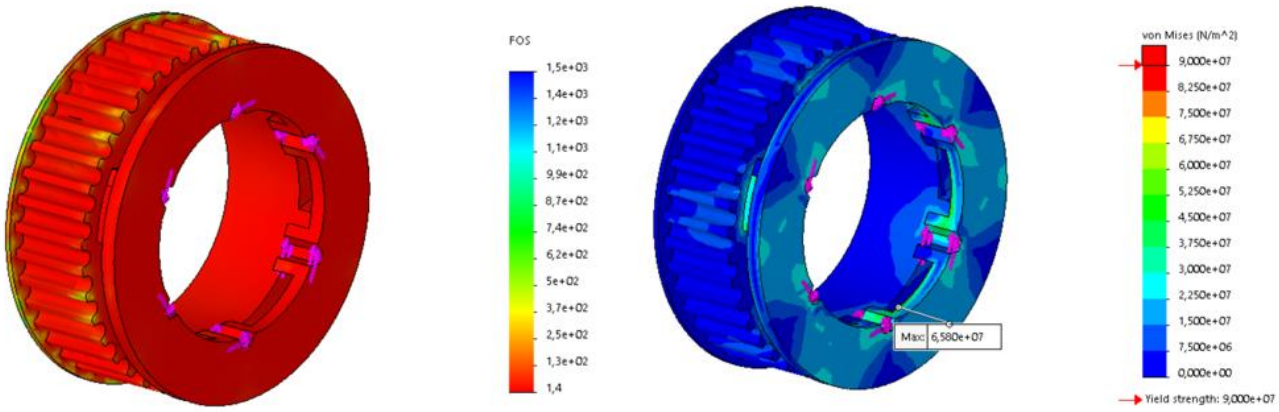


Рис. 3.9: Напряжение и коэффициент запаса для соединения кулачков, материал алюминий 6361

После замены материала на углеродистую сталь (Рис. 3.10) удалось добиться увеличения коэффициента запаса до 3.8.

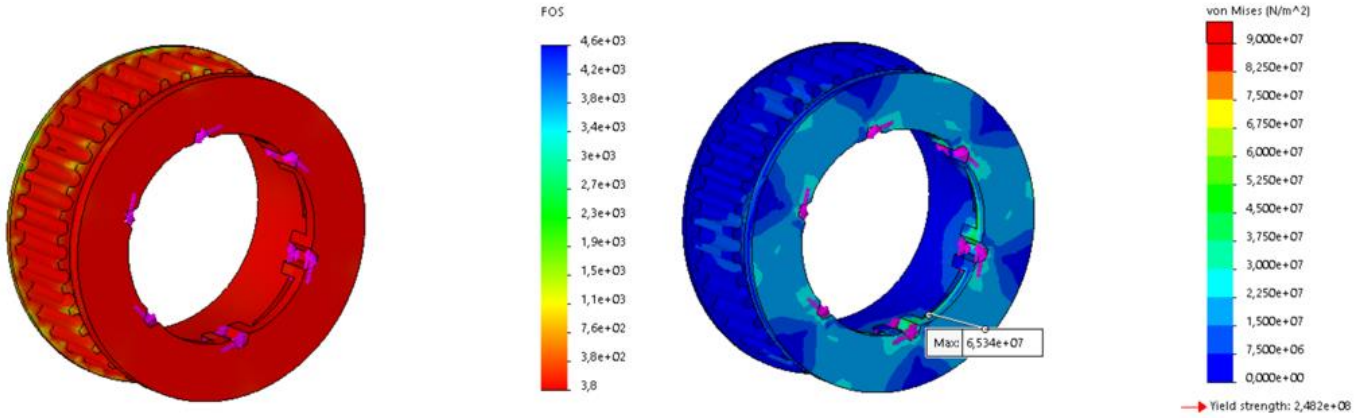


Рис. 3.10: Напряжение и коэффициент запаса для соединения кулачков, материал углеродистая сталь

Шлицевое зацепление (Рис. 3.11) из той же стали дало коэффициент запаса 18. Поэтому было принято решение сделать вторичный вал из алюминия, а шпильки оставить из стали для более надежного крепления колеса.

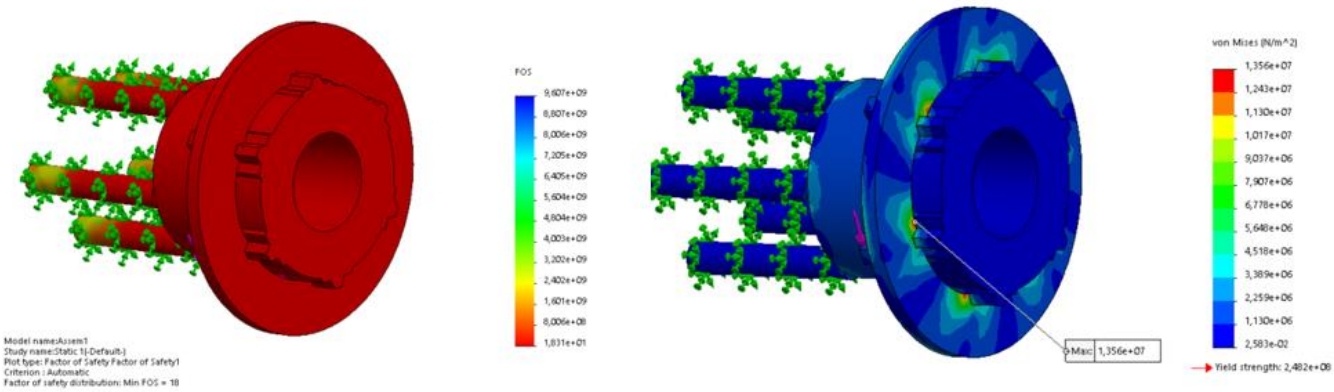


Рис. 3.11: Напряжение и коэффициент запаса для соединения муфты и вторичного вала

Условия нагружения для крепления помимо крутящего момента от мотора включали в себя нагрузку силы тяжести мотора (10N) и силы натяжения ременной передачи (50N).

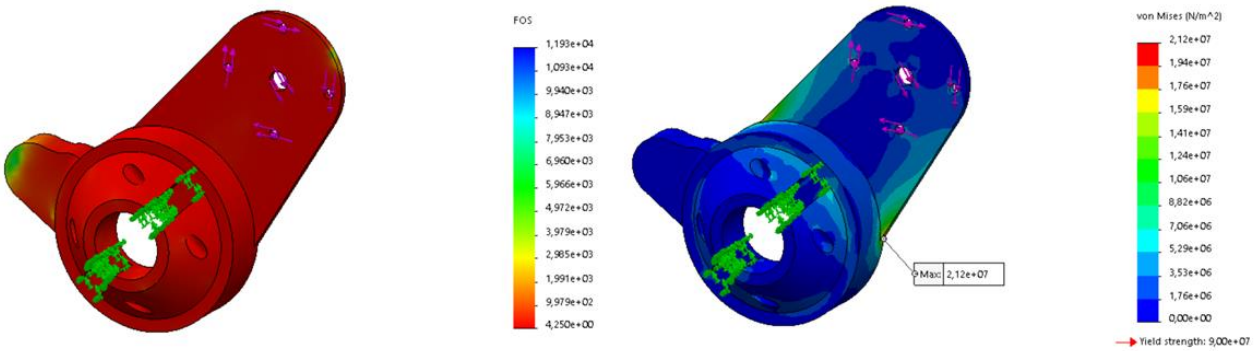


Рис. 3.11: Напряжение и коэффициент запаса для крепления мотора

Зацепления кулачков постоянно испытывают колеблющуюся нагрузку, поэтому был проведен расчет на долговечность для циклической нагрузки из статического анализа [15]. В результате минимальный срок службы на кулачках муфты 400 000 циклов (Рис. 3.11). С учетом того, что сцепление расцепление будет происходить в среднем 30 раз на 1 км, получаем год ежедневной эксплуатации по 36 км. В реальной жизни это 2-3 года так как нет возможности проезжать такие расстояния каждый день.

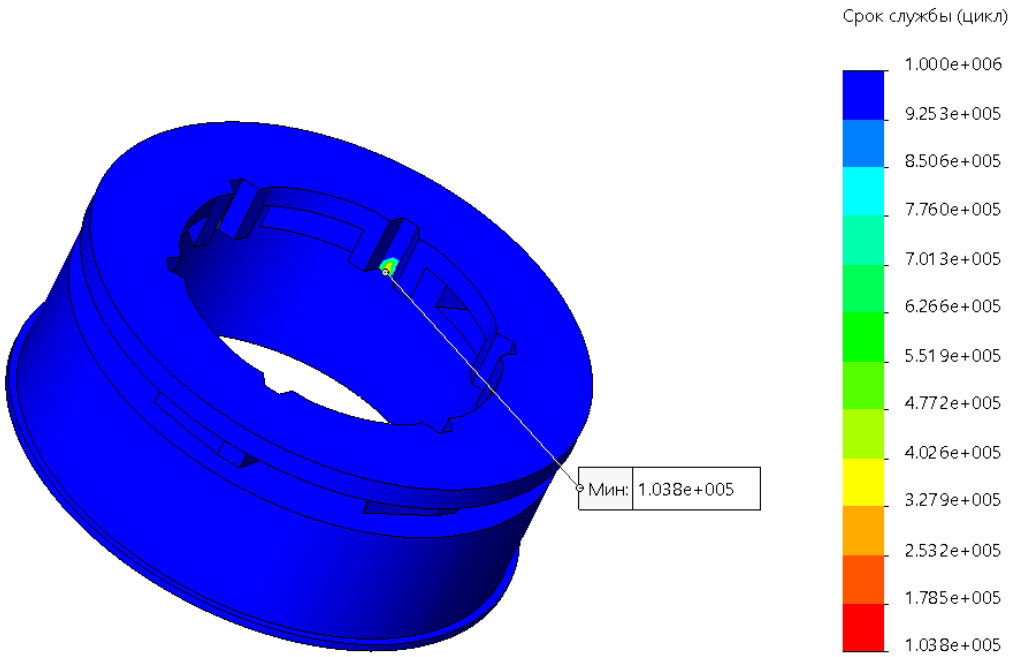


Рис. 3.11: Срок службы для циклического нагружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В программном комплексе GT-SUIT создана параметрическая модель транспортного средства на электрической тяге, соответствующая параметрам электро-лонгборда. Проведено два сценария моделирования. В первом на мотор подавалась максимальная электрическая мощность, в результате расчетов уравнений динамики получены динамические характеристики в зависимости от режима работы двигателя. Для второго сценария использовалась та же модель, что и для первого только мощность, подаваемая на электромотор, рассчитывалась с учетом обратной связи, измеряющей разность показателей с сенсора скорости и скорости поставленной в задаче придерживаться WLTP циклу. В результате получена затраченная энергия, из которой посчитан средний расход и дальность хода с учетом различной компоновки батареи. Цели, поставленные для динамических показателей и дальности хода, были достигнуты.

Создан дизайн CAD модели основных элементов электро-лонгборда, учитывая их совместную компоновку. Разработан механизм трансмиссии для соединения и разъединения мотора с колесом. CAD модели также использовались для моделирования условий эксплуатации и расчета прочности конструкции. Расчеты выполнялись классическим методом конечных элементов. Моделировалась ситуация с максимальным возможным нагружением трансмиссии. Для каждого элемента подобран материал для получения коэффициента запаса больше 2. Корпус изготовлен из сплава алюминия 6061 для уменьшения общего веса коробки передач. Для зацепления был проведен дополнительный расчет на долговечность для циклической нагрузки из статического анализа. В результате минимальный срок службы на кулачках муфты 400 000 циклов. С учетом того, что сцепление расцепление будет происходить в среднем 30 раз на 1 км, получаем год ежедневной эксплуатации по 36 км. В реальной жизни это соответствует 2-3 годам, после чего следуют заменить кулачки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.

1. Бусыгин Б.П. «Электромобили. Методы расчета», с 20-23
2. Гольд Б.В., Оболенский Е.П. и др. «Прочность и долговечность автомобиля», с 61-65
3. Топорков Д.М., Зубцовые пульсации момента в машинах с дробными обмотками и возбуждением от постоянных магнитов 2016
4. Andrada, P., Blanqué, B., Perat, J. I., & Torrent, M. (2006). Power Losses in Outside-Spin Brushless D.C. Motors. Retrieved July 17, 2015, from International Conference on Renewable Energies and Power Quality:
5. Cammino Roberto «Design of a Gearbox for an electric FSAE vehicle» 2016 CWID: A20364491
6. Daled Hannah, Schoenaers Raf Design And Realization Of a Lightweight Mechanical Drivetrain For an electric Formula Student Race Car .
7. Duane C H., Brushless permanent magnet motor design, 2nd ed. Orono, ME: Magna Physics Publishing, 2006.
8. Garfield L., “Cities are going car-free around the world – Business Insider,” 2017
9. Goga Ana «Longboard Design», Architecture & Design at Aalborg University
10. Lindahl P.-E., Meyer R., Johansson H., Grimheden H., Sandqvist W., and Paulson M., «Electric Longboard A dual-purpose personal vehicle», Stockholm: Institutionen formaskinkonstruktion, Tekniska h¨ogsk., 2013.
11. May G. J., Davidson A., and Monahov B., “Lead batteries for utility energy storage: A review,” feb 2018
12. Miyamasu M. and Akatsu K., “Efficiency comparison between Brushless dcmotor and Brushless AC motor considering driving method and machine design,” in IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). IEEE, nov 2011.
13. Varocky B. J. Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car Report No. D&C 2011.002 January 2011

14. West Liam, Shepherd Barry, Karabon Nathaniel, Howell Josh, Pyrtko Mike Department of Mechanical Engineering University of Wisconsin-Madison Design Report of the High Voltage Battery Pack 2016
15. Yedamale P., “Brushless DC motor Fundamentals,” Chandler, AZ, Tech. Rep., 2003.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

-SAMSUNG SDI Confidential Proprietary –

Spec. No.	INR21700-40T	Version No.	0.0

1.0. Scope

This product specification has been prepared to specify the rechargeable lithium-ion cell ('cell') to be supplied to Customer by Samsung SDI Co., Ltd.

2.0. Description and model

2.1 Description lithium-ion rechargeable cell

2.2 Model name INR21700-40T

2.3 Site Manufactured in Korea

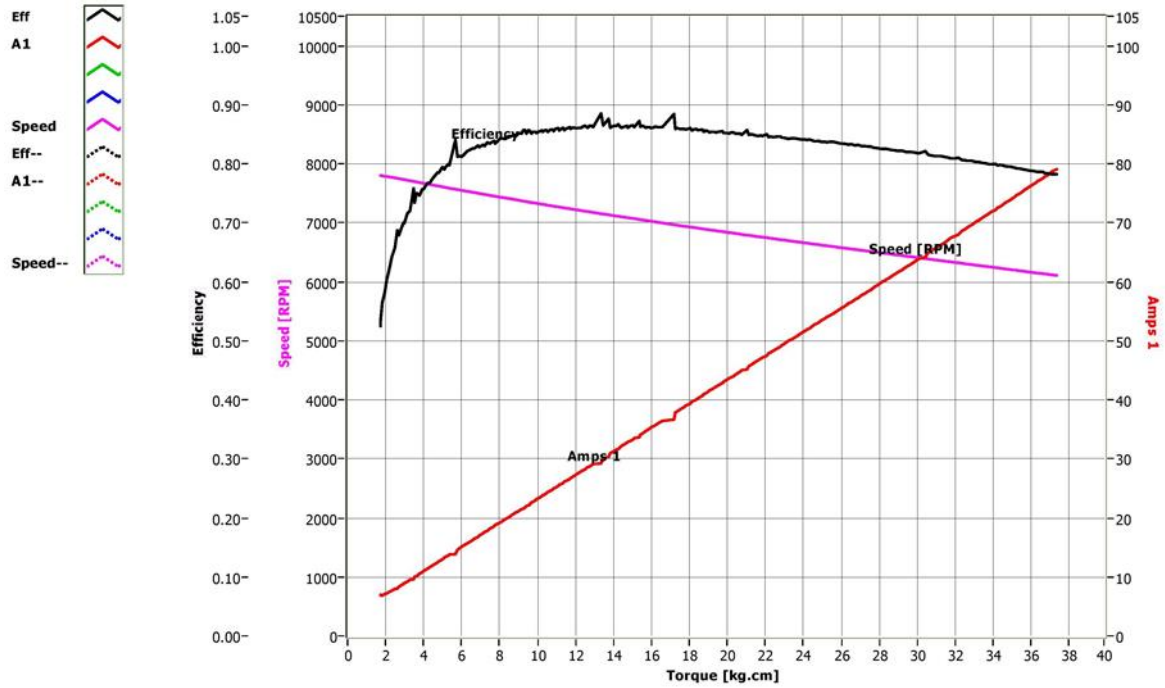
3.0. Nominal specifications (*1)

Item	Specification
3.1 Standard discharge capacity	Min. 4,000mAh - Charge: 0.5C(2A), 4.20V, 0.05C(200mA) cut-off @ RT - Discharge: 0.2C(800mA), 2.5V cut-off @ RT
3.2 Rated discharge capacity	Min. 3,900 mAh - Charge:1.5C(6A), 4.20V, 0.025C(100mA)cut-off @RT - Discharge: 10A, 2.5V cut-off @ RT
3.3 Nominal voltage	3.6V
3.4 Standard charge	CCCV, 2A, 4.20 V, 200mA cut-off
3.5 Rated charge	CCCV, 6A, 4.20 V, 100mA cut-off
3.6 Charging time	Standard charge : 180min / 200mA cut-off(@ RT) Rated charge: 70min / 100mA cut-off(@ RT)
3.7 Max. continuous discharge (Surface temperature)	35A(Without temperature cut) 45A(With 80℃ temperature cut)
3.8 Discharge cut-off voltage	2.5V (End of discharge)
3.9 Cycle life	Capacity ≥ 2,400mAh @ after 250cycles (60% of the standard capacity @ RT) - Charge : 6A, 4.20V, CCCV 100mA cut-off @ RT - Discharge: 35A , 2.5V cut-off @ RT
3.10 Retention characteristics	Capacity recovery(after the storage) ≥ 3,510 mAh (90% of the rated capacity @ RT) - Charge : 6A, 4.20V, CCCV 100mA cut-off @ RT - Storage : 30 days (@ 60℃) - Discharge : 10A , 2.5V cut-off @ RT
3.11 Cell weight	70.0g max
3.12 Cell dimension	Height : Max 70.30mm Diameter : Max 21.22mm

Tentative

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

Motor	Turnigy SK3 6374 192kV
Turns	14T
Voltage	10 ~ 12S
RPM / V	192
Resistance, Ohm	0.016
I max	80A
Max Voltage (V)	44
Max Power (W)	4032
Power (W)	2750
Weight, kg	0.858



Comments

Moh DT5045-14pole-192kv-38V-CW

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

Table 9 Belt Tensioning Force

Belt	Belt Width	*m*	*Y*	Minimum T_{st} (lbf) Per Span
2 mm GT2	4 mm	0.026	1.37	1.3
	6 mm	0.039	2.05	2.0
	9 mm	0.058	3.08	3.0
	12 mm	0.077	4.10	4.0
3 mm GT2	6 mm	0.077	3.22	2.2
	9 mm	0.120	4.83	3.3
	12 mm	0.150	6.45	4.4
	15 mm	0.190	8.06	5.5
5 mm GT2	9 mm	0.170	14.9	8.4
	15 mm	0.280	24.9	14.1
	20 mm	0.380	33.2	18.7
	25 mm	0.470	41.5	23.4
3 mm HTD	6 mm	0.068	3.81	2.5
	9 mm	0.102	5.71	4.3
	15 mm	0.170	9.52	7.8
5 mm HTD	9 mm	0.163	14.9	6.3
	15 mm	0.272	24.9	12.0
	25 mm	0.453	41.5	21.3
MXL	1/8"	0.003	1.40	1.0
	3/16"	0.004	2.11	1.7
	1/4"	0.005	2.81	2.3
XL	1/4"	0.010	3.30	3.2
	3/8"	0.015	4.94	5.1
L	1/2"	0.19	10.00	13.0
	3/4"	0.29	18.00	19.0
	1"	0.38	25.00	25.0
T2.5	4 mm	*	0.3	0.2
	6 mm		0.55	0.45
	10 mm		1.05	0.92
T5	6 mm	*	7	2.25
	10 mm		17	5.62
	16 mm		27	8.99
T10	16 mm	*	73	24.73
	25 mm		133	44.96