

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

Институт «Политехнический», факультет «Энергетический»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Рецензент, начальник отдела

«Электротранспорт» ООО НПП «Учтех-Профи»

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/ А.А. Шевченко/

\_\_\_\_\_/А.Н. Шишков/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД ЭЛЕКТРОБОЛИДА**

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ  
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

**ЮУрГУ-13.04.02.2019.165 ПЗ ВКР**

Руководитель проекта:

доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_/Е.В. Белоусов/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор проекта

студент группы П-286

\_\_\_\_\_/И.А. Чуйдук/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер

доцент, к.т.н

\_\_\_\_\_/А.Е. Бычков/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

Челябинск 2019 г.

## АННОТАЦИЯ

Чуйдук И. А. Электрический привод электроболида. – Челябинск: ЮУрГУ, Э; 2019, 53 с., 32 ил., 7 табл., библиографический список – 9 наим.

В данной выпускной квалификационной работе был разработан тяговый электропривод электроболида, предназначенного для участия в международных соревнованиях «Формула студент». Особый упор в данной работе был сделан на разработку компоновки тяговой аккумуляторной батареи на основе литий-ионных (*Li-io*) аккумуляторов типоразмера 18650.

В ходе данной работы мы разработали аккумуляторную батарею, полностью отвечающую требованиям, предъявляемым к тяговым батареям болидов класса «Формула студент». Была разработана принципиальная схема батареи, 3D модели основных узлов электроболида, а также самой батареи.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Чуйдук И. А.</i>			<i>Электрический привод электроболида</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Белоусов Е.В.</i>					4	53
<i>Реценз.</i>		<i>Шевченко А.А.</i>				<i>ЮУрГУ</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Бычков А.Е.</i>				<i>Кафедра «АЭП»</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Шишков А.Н.</i>						

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ .....	9
1.1 История развитий соревнований «Формула студент» .....	10
1.2 Анализ исходных данных.....	11
2 ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА.....	15
2.1 Обзор технических решений <i>Nisan Liaf</i> .....	15
2.2 Обзор технических решений <i>Tesla Model S</i> .....	17
2.3 Обзор технических решений гоночного электроболида <i>Grimsel</i> .....	19
3 ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ И ПЕРЕДАТОЧНОГО МЕХАНИЗМА .....	21
3.1 Выбор способа компоновки тягового электропривода .....	21
3.2 Расчет мощности электродвигателя .....	23
3.3 Выбор электродвигателя и аппаратуры управления .....	28
3.4 Выбор редуктора .....	30
3.5 Приведение статических моментов и моментов инерции к валу двигателя	31
4 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ АКБ.....	34
4.1 Сравнение различных типов АКБ .....	34
4.2 Расчет аккумуляторной батареи .....	36
4.3 Конфигурация АКБ .....	38
5 ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ.	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	45
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	48
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	49

									Лист
									5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ				

ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	50
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	51
ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	53

					<i>ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

## ВВЕДЕНИЕ

Экологические проблемы в современном мире всегда имели важное значение, особенно это стало заметно в контексте мировых промышленных революций и урбанизации общества. Состояние окружающей среды напрямую влияет на состояние здоровья населения, а здоровье – это важнейший аспект жизни любого человека.

По данным энергетического агентства США наибольшую долю загрязняющих веществ в атмосфере крупных городов составляют выхлопные газы, производимые автотранспортом (данные представлены в таблице 1).

Таблица В.1 – Соотношение загрязняющих веществ в атмосфере крупных городов

Наименование	%
Автотранспорт	60
Промышленность	19
Электростанции	12
Бытовые установки	6
Сжигание мусора	3

С целью решения проблемы загрязнения атмосферного воздуха правительства многих стран принимают законопроекты, направленные на ограничение и контроль за вредными выбросами.

Одним из наиболее эффективных методов улучшения экологической обстановки является переход на гибридный транспорт и электротранспорт. Международное энергетическое агентство прогнозирует, что мировой парк электромобилей к 2030 году достигнет отметки в 100 миллионов единиц. У электромобилей есть ряд преимуществ:

- а) экологичность;
- б) повышенная надежность при простоте конструкции;
- в) высокий КПД электродвигателя;
- г) низкая стоимость владения;
- д) повышенная безопасность;

					<i>ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		7

- е) улучшенная динамика;
- ж) комфорт.

Несмотря на достигнутые результаты, у электромобилей есть ряд серьезных недостатков, связанных, в первую очередь, с аккумуляторной батареей (АКБ):

- а) ограниченная дальность хода;
- б) долгий процесс зарядки;
- в) низкие массогабаритные показатели.

Целью данной работы является решение выше изложенных проблем путем разработки электропривода гоночного электроболида, способного удовлетворить требования по динамическим, скоростным и массогабаритным показателям, а также требованиям предъявляемым регламентом соревнований.

Данная работа реализуется в контексте разработки электроболида, предназначенного для участия в международных соревнованиях «Формула студент» класс Электрик.

Объект исследования: автономный электротранспорт.

Предмет исследования: привода автономного электротранспорта.

Цель исследования: разработка электропривода гоночного электроболида (с особым упором на аккумуляторную батарею) для соревнований «Формула студент» класс Электрик.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- 1) выявить требования, которым должен удовлетворять тяговый электропривод гоночного элетроболида;
- 2) изучить электропривода, применяемые в современном электротранспорте;
- 3) разработать механическую и электромеханическую части привода элетроболида;
- 4) исследовать различные типы АКБ;
- 5) разработать АКБ, а также аппаратуру, предназначенную для контроля и управления АКБ;
- 6) провести цифровое моделирование и сравнительный анализ разработанной нами АКБ.

## 1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Так как разрабатываемый нами электропривод предназначен для гоночного болида, который будет участвовать в соревнованиях «Формула студент» международного уровня, то нам необходимо соблюсти все требования регламента соревнований, а также обеспечить необходимые динамические, массоэнергетические и массогабаритные показатели.

Общие требования предъявляемые электроприводу:

1) по надежности: электропривод должен выполнять заданные функции в течение определенного промежутка времени и с заданной вероятностью безотказной работы;

2) по точности: отличие каких-либо показателей движения от заданных не должно превышать допустимых значений;

3) по быстродействию, то есть по способности электропривода быстро реагировать на управляющие и возмущающие воздействия;

4) по качеству переходных процессов;

5) по энергетической эффективности – стремиться к максимальному коэффициенту полезного действия (КПД) электропривода;

6) по совместимости с аппаратурой технического комплекса, в котором он используется с системой электроснабжения, информационной системой и с самим рабочим органом.

Таблица 1.1 – Требования предъявляемые к тяговому электроприводу электроболида класса «Формула студент» с учетом регламента соревнований

Параметр	Размерность	Значение
Запас ход	км	24
Время зарядки	ч	1-2
Напряжение	В	До 600
Тип и количество двигателей	Шт.	Не регламентируется
Максимальный объем энергии, передаваемый от аккумулятора к двигателю	кВт	85

Продолжение таблицы 1.1

Параметр	Размерность	Значение
Рекуперация энергии		Только при скорости более 5 км/ч
Рекуперация энергии при движении автомобиля задним ходом		Запрещена

### 1.1 История развитий соревнований «Формула студент»

Формула SAE, более известная в Европе как «Формула Студент» – это студенческие инженерные соревнования, изначально организованные Сообществом Автомобильных Инженеров (*Society of Automotive Engineers, SAE*) и входящие в Серию Студенческих Инженерных соревнований (*Collegiate Design Series*) SAE. По замыслу соревнований, команда студентов университета является инженерной компанией, которая должна разработать, построить, испытать прототип автомобиля формульного класса для рынка непрофессиональных гоночных автомобилей. Испытанием для команд является сама постройка болида, который сможет успешно пройти все дисциплины на соревнованиях. При этом команда должна предоставить всю конструкторскую документацию на проект и доказать, что применяемые технические решения являются оптимальными. Так же они должны помнить, что в итоге они должны «продать» свой автомобиль, поэтому необходимо учитывать и экономическую целесообразность применяемых решений, а в дополнение разработать и бизнес-план на мелкосерийное производство своих автомобилей [1].

Началось все в США в 1978-ом году, когда Марк Маршек, представляя Университет Хьюстона (Техас), связался с Департаментом Образования SAE и предложил организовать серию студенческих соревнований класс Мини-Баха. Идея пришла к нему после того, как коллективы из трех различных университетов Техаса просто для развлечения устроили соревнования на переделанных в багги газонокосилках. Предложение Маршека нашло много единомышленников, и в итоге на следующий год уже прошли первые официальные соревнования. Тогда

					ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10



соревнования называли Мини-Инди. Увидев большой потенциал соревнований, Майк Бест, Роберт Эдвардс и Джон Теллкамп студенты Техасского Университета в Остине, предложили доктору Рону Мэтьюсу организовать аналогичные соревнования, но с более свободным регламентом. Они хотели поднять автомобили в новой серии на более высокий инженерный уровень. Серия Мини-Баха позволяла работать студентам только над шасси автомобиля, поскольку по регламенту для уравнивания условий команды должны использовать стандартный двигатель, в то время как многим хотелось заняться как раз двигателем. В новом регламенте они свели требования к двигателю на минимум – по сути, необходима была только ограничительная шайба (рестриктор) диаметром 25,4 мм на впуске. При поддержке своих студентов доктор Мэтьюс направил предложение в Департамент Образования SAE и тем самым дал начало проекту Формула SAE. Первые соревнования прошли при поддержке SAE в 1981-ом году в Техасском Университете в Остине. На них зарегистрировалось 6 команд и приняли участие 40 студентов. С тех пор и по сей день SAE является главным организатором и ежегодно выпускает Основной Регламент соревнований [1].

Первооткрывателем «Формулы Студент» в России стал Московский Автомобильно-Дорожный Университет, команда которого была основана в 2005 году. Вслед за МАДИ в 2008 году представил свой первый болид Университет Машиностроения. В 2012 году к участию в международных соревнованиях подключились РУДН и МГТУ им.Баумана. Свои команды существуют в Нижнем Новгороде, Тюмени, Екатеринбурге, Новосибирске, Челябинске и в других городах России. И с каждым год их становится все больше.

## 1.2 Анализ исходных данных

Для исследования была выбрана трасса Сильверстоун в Великобритании, представленная на рисунке 1.1, так она включает в себя все характерные особенности трасс подобного класса.

					<i>ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

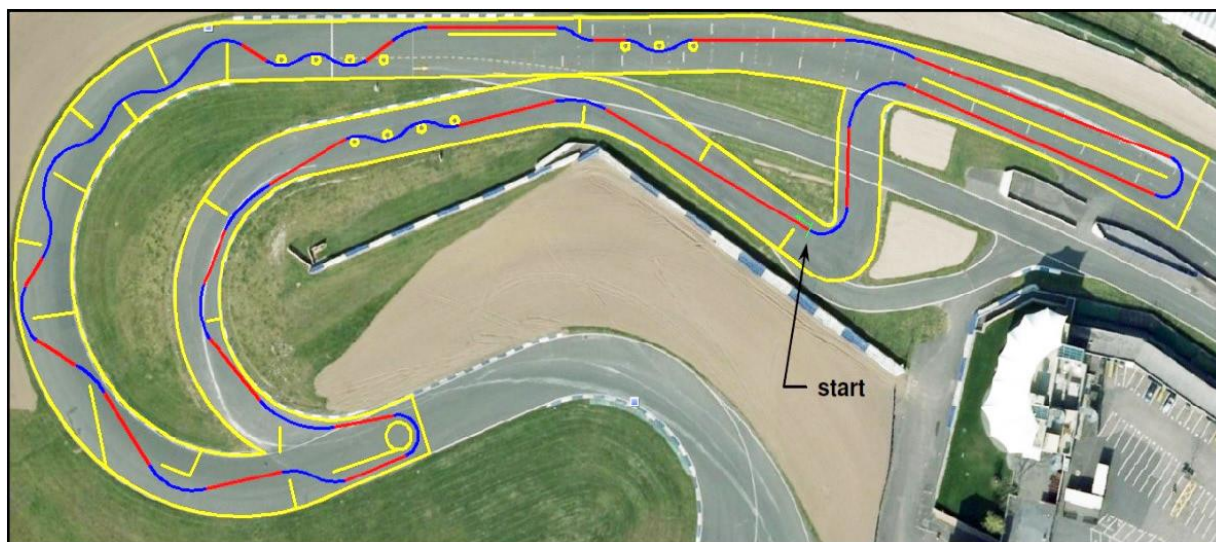


Рисунок 1.1– Карта трассы Сильверстоун

Была воссоздана и доработана цифровая модель данного трека, которая ранее разрабатывалась на кафедре «Автомобильный транспорт» ЮУрГУ [2]. В программной среде *MATLAB Simulink* была воссоздана и доработана цифровая модель электроботида. На основе проведенного моделирования были получены зависимости момента, скорости, ускорения и выходной мощности от времени. На основе полученных зависимостей были построены графики, представленные на рисунках 1.2-1.5.



Рисунок 1.2– График зависимости скорости от времени

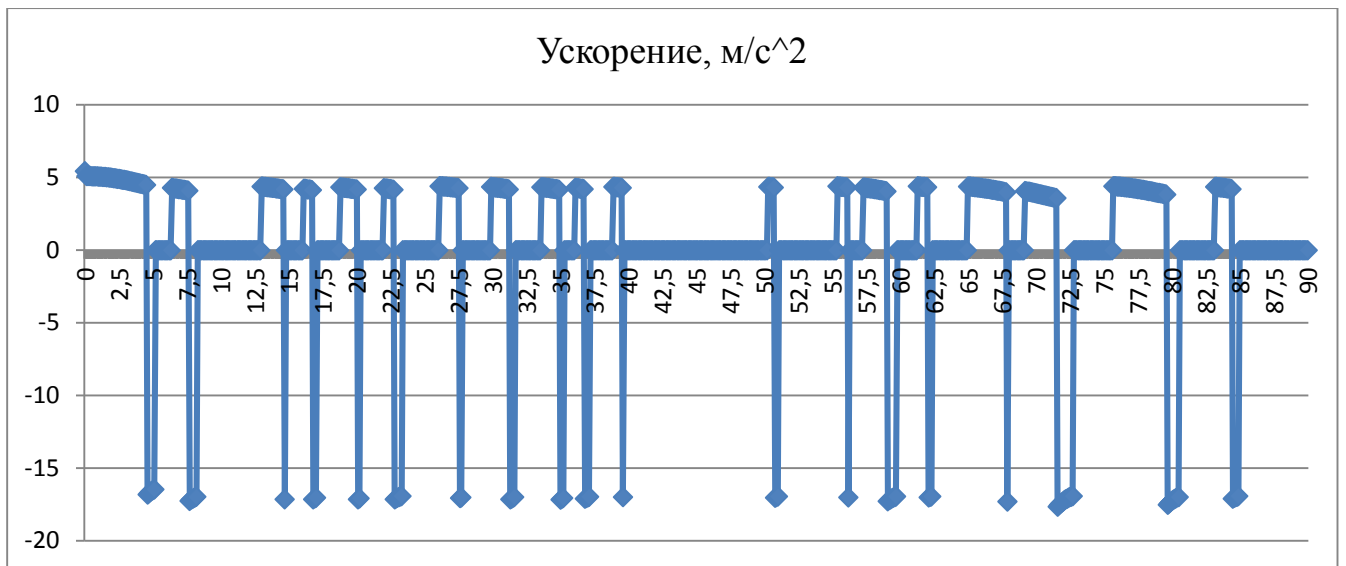


Рисунок 1.3– График зависимости ускорения от времени

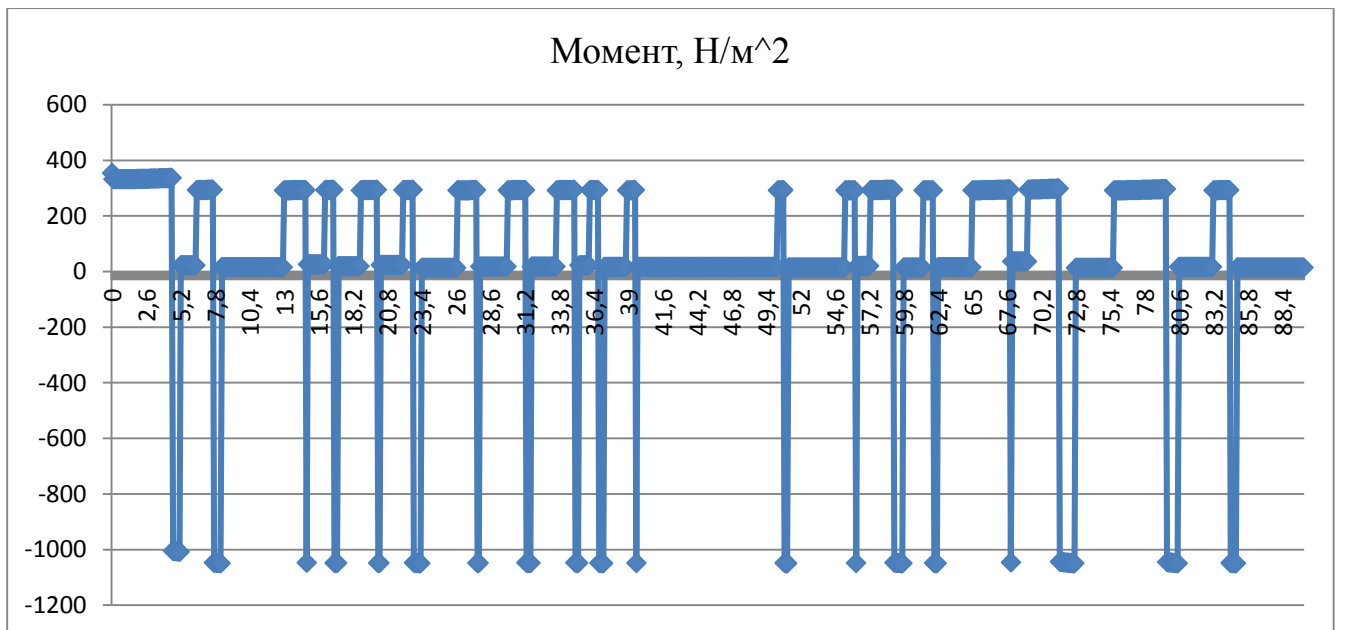


Рисунок 1.4– График зависимости момента от времени

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ

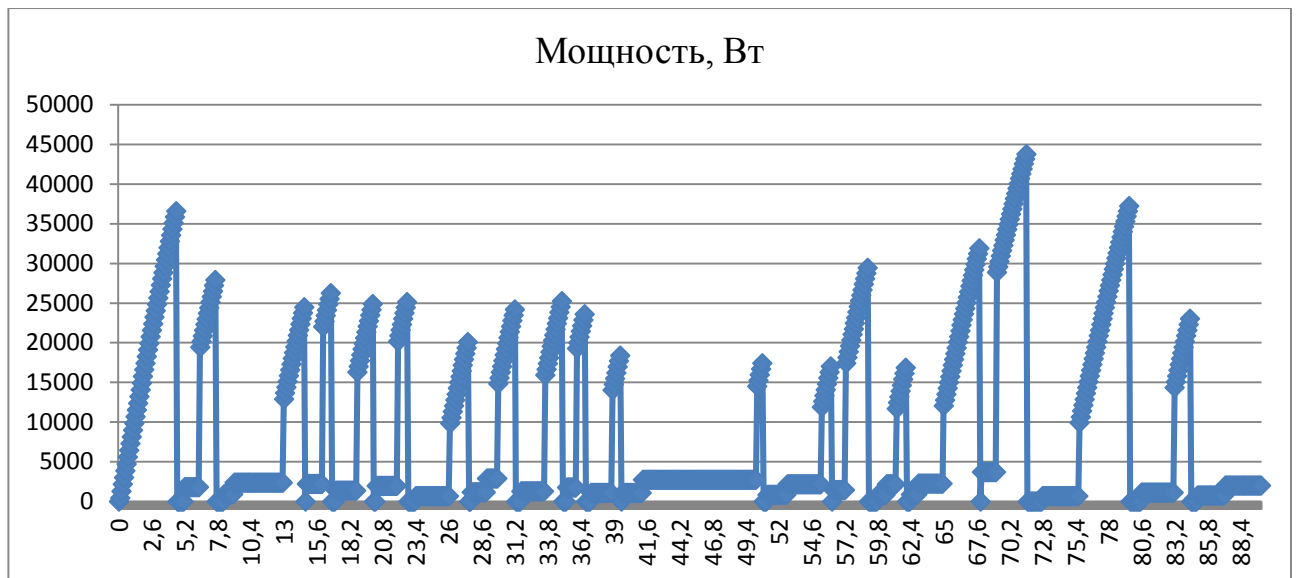


Рисунок 1.5– График зависимости скорости от времени

На основе полученных данных был проведен выбор электродвигателя и расчет АКБ.

## 2 ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Современный рынок электротранспорта представлен несколькими наиболее интересными образцами. Рассмотрим три наиболее интересные модели: *Nisan Liaf*, *Tesla Model S* и швейцарский гоночный электроболид *Grimsel*.

### 2.1 Обзор технических решений *Nisan Liaf*

*Nissan LEAF* – электромобиль японского концерна *Nissan*, серийно выпускаемый с весны 2010 года, представлен на рисунке 2.1. Мировая премьера состоялась на международном Токийском автосалоне в 2009 году. Данный автомобиль является одним из самых популярных серийно выпускаемых электромобилей. При своих достаточно высоких технических характеристиках он является вполне доступным для большинства жителей как России, так и других стран.

*Nissan Leaf* построен на новой платформе *Nissan V*, которую электромобиль делит с кроссовером *Juke* и малолитражной *Micra* 2011 модельного года. Под капотом расположен электродвигатель мощностью 80 кВт (около 108 л. с.), чей крутящий момент достигает 280 Н·м (представлен на рисунке 2.2). Привод электромобиля – передний. Нижнее расположение самого тяжёлого элемента автомобиля – аккумуляторной батареи – обеспечивает лучшую устойчивость по сравнению с одноклассниками. Кроме этого, батарея также обеспечивает более высокую жёсткость конструкции для пятидверных хэтчбеков подобной конструкции.

Литий-ионная батарея для электромобиля собрана из 192 ячеек. Масса батареи около 270 кг, и расположена она под передними сиденьями. Ёмкости батареи 24 кВт·ч и возможностей рекуперативного торможения хватает (по оценкам представителей *Nissan*) на 160 км пробега. Жизненного цикла батарей, по предварительным оценкам, должно быть достаточно минимум на 5 лет. С началом производства электромобиля на английском заводе *Nissan* в Сандерленде

										Лист
										15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ					

(параллельно с кроссовером *Qashqai*), а также строительства здесь же завода по производству аккумуляторов модель 2013 года получила более 100 усовершенствований, в числе важнейших – мощный и эффективный аккумулятор, который позволил довести пробег до 123 миль (199 км) против 109 миль (175 км) у модели 2012 года. Кроме того, вдвое (до 4 ч) сокращено время подзарядки от общественного 6,6-киловаттного подзарядного устройства. В перспективе на *Leaf* появятся парковочная камера *Around View* кругового обзора, кожаная отделка салона и прочее. Тесты показывают энергопотребление *Leaf*: 765 кДж/км (21 кВт·ч/100 км), что эквивалентно расходу около 99 *MPG* (2,4 л / 100 км) [3].



Рисунок 2.1– *Nissan Leaf*

						Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	





энергии может резко вырасти, вплоть до двукратного размера относительно указанного, с соответствующими последствиями в виде заметного снижения запаса хода [4].



Рисунок 2.3– *Tesla Model S*

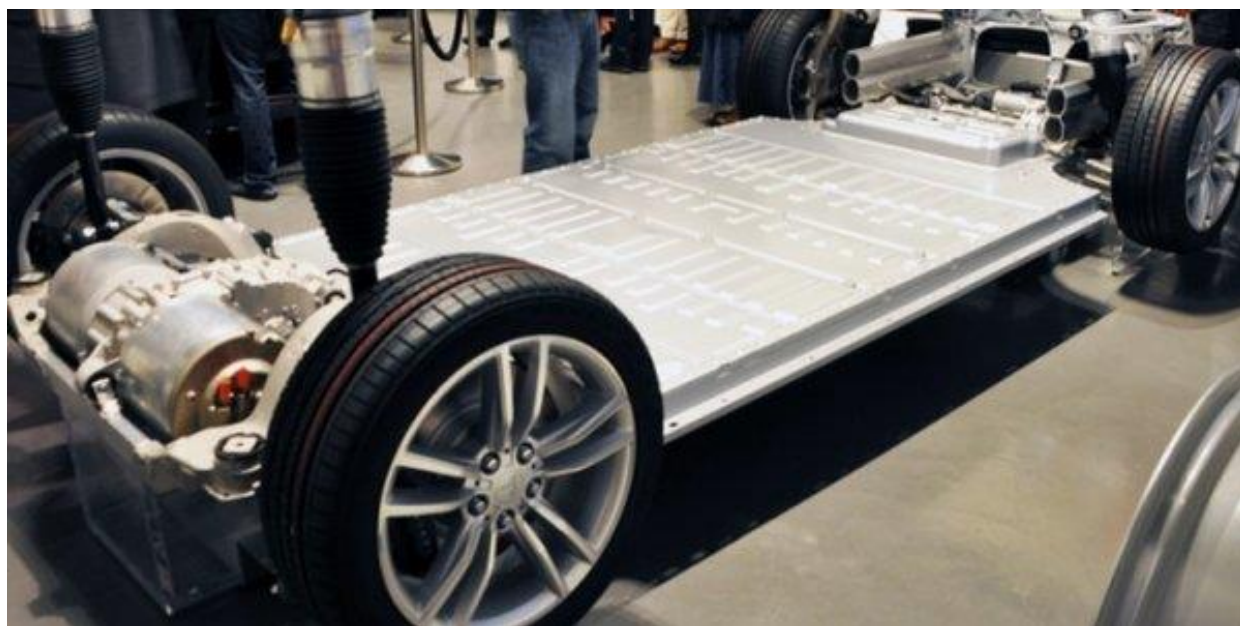


Рисунок 2.4– Базовая платформа *Tesla Model S*



### 2.3 Обзор технических решений гоночного электроботида *Grimsel*

Гоночный электромобиль *Grimsel* (представлен на рисунке 2.5), разработанный студентами Швейцарской высшей технической школы Цюриха и Университета прикладных наук Люцерна, установил мировой рекорд по ускорению. Согласно сообщению технической школы, машина смогла разогнаться с нуля до ста километров в час за 1,513 секунды. За это время она покрыла расстояние чуть менее 30 метров.

Машина установила рекорд на взлетно-посадочной полосе авиабазы Дюбендорф неподалеку от Цюриха. Над созданием гоночной машины трудились 30 человек. Электромобиль выполнен из углепластика и его масса составляет всего 168 килограммов. Машина оснащена четырьмя мотор-колесами (представленными на рисунке 2.6), способными развивать мощность в 200 лошадиных сил и крутящий момент в 1700 ньютон-метров [5].



Рисунок 2.5 – Электроботид *Grimsel*



Рисунок 2.6 – Мотор-колесо электроболида *Grimse*

### 3 ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ И ПЕРЕДАТОЧНОГО МЕХАНИЗМА

На уровне качественного анализа попытаемся выбрать тип электрической машины для тягового электропривода электроболида. Использование классической коллекторной машины постоянного тока невозможно по причине малого ресурса работы щеточного узла. Даже применение специальных материалов для щеток не позволяет обеспечить ресурс более 1000 часов.

Использование асинхронных генераторов невозможно, так как нет приемлемого способа регулировки выходного напряжения.

Применение синхронных электродвигателей классической конструкции не приемлемо по причине малого пускового момента.

Использование вентильных машин постоянного тока (ВМПТ) в качестве тягового электродвигателя электроболида является наиболее приемлемым вариантом. ВМПТ позволяют решить основные технические проблемы и по массоэнергетическим показателям, и по ресурсу. В последнее время снизилась цена на электронную коммутационную аппаратуру, что делает двигатели данного типа более доступными [6].

#### 3.1 Выбор способа компоновки тягового электропривода

Есть несколько основных способов компоновки тягового электропривода электромобиля (представлены на рисунке 3.1).

- 1) Вал электродвигателя подключается непосредственно к коробке переключения передач (далее КПП).
- 2) Электродвигатель подключается к осевому дифференциалу.
- 3) Электродвигатель подключается сразу к ведущим колесам.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21

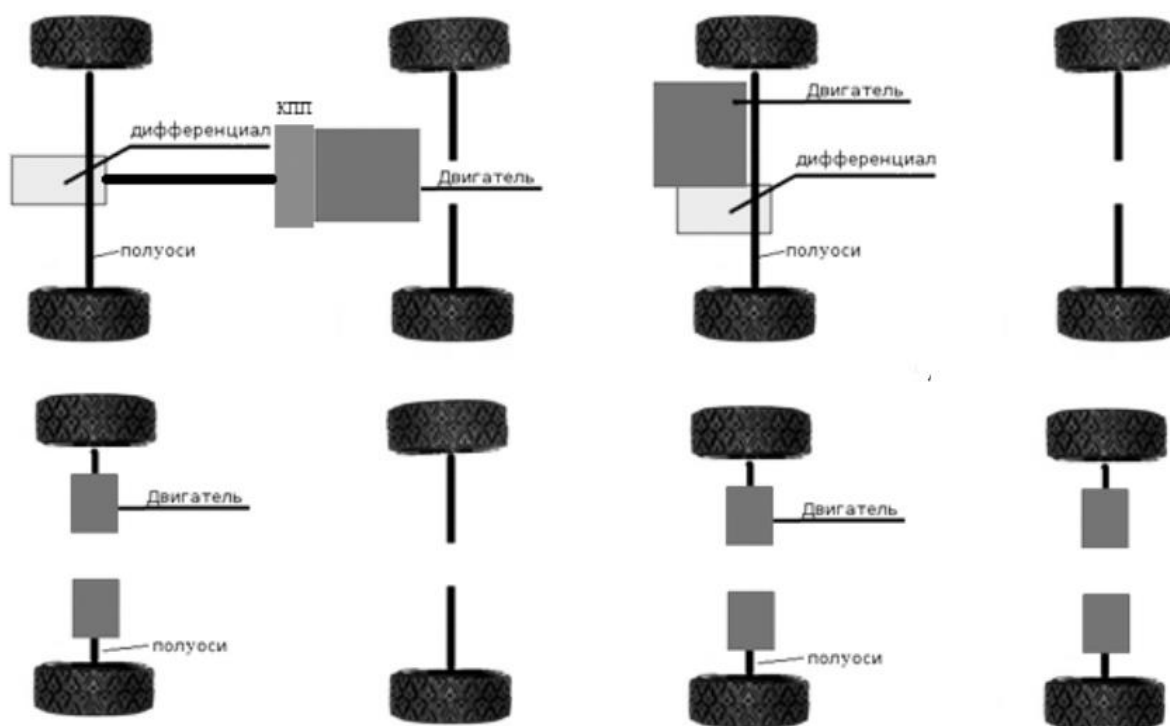


Рисунок 3.1 – Способы компоновки тягового электропривода

Рассмотри каждый из этих вариантов. У первого варианта присутствует КПП, это ведет к значительному увеличению массы автомобиля, а также снижается КПД привода. Достоинствами данной компоновки являются легкость реализации и широкий выбор приводного электродвигателя.

Второй вариант по сравнению с первым, имеет ряд преимуществ: облегчение массы конструкции и повышенный КПД, так как из передающих механизмов присутствует только осевой дифференциал [7].

Третий вариант с «непосредственным» подключением электродвигателя к ведущим колесам является наиболее перспективным. К достоинствам данного варианта можно отнести высокий КПД и сниженную массу по сравнению с другими вариантами компоновки, а также улучшенные динамические характеристики и простоту реализации любых алгоритмов активной безопасности. Применения этого метода затрудняется сложность согласования работы нескольких электродвигателей. Данный вариант компоновки может применяться как для двух ведущих колес (на каждое колесо отдельный двигатель), так и для четырех ведущих колес. Также возможен вариант соединения одного

электродвигателя с осью ведущих с помощью цепной передачи или любым другим способом. Встречаются различные комбинации вариантов исполнения данного типа компоновки (представлены на рисунке 3.2).



Рисунок 3.2 – Разновидности непосредственного привода ведущих колес

В данном дипломном проекте был выбран привод с одним электродвигателем, соединенным напрямую с осью ведущих колес с помощью цепной передачи. Данный выбор обусловлен тем, что это наиболее простая и дешёвая компоновка электропривода, что очень важно в условиях реального проекта с ограниченными бюджетом и сроками. Также опыт других команд показывает, что это наиболее оптимальный вариант компоновки электропривода.

### 3.2 Расчет мощности электродвигателя

Зададимся исходными данными для расчета мощности электродвигателя (представлены в таблице 3.1). На основе исходных данных, полученных опытным путем, уже были построены нагрузочные диаграммы скорости и моментов для всех участков трассы (представлены на рисунках 1.2-1.5) [8].

Таблица 3.1 – Исходные данные

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Масса болида	$m$	кг	400
Ускорение свободного падения	$g$	м/с <sup>2</sup>	9,81
Максимальная скорость болида	$V_{max}$	м/с	28
Аэродинамический коэффициент лобового сопротивления	$c_x$		0,5

Продолжение таблицы 3.1

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Плотность воздуха	$\rho_{\text{возд}}$	кг/м <sup>3</sup>	1,202
Площадь лобового сопротивления	$A$	м <sup>2</sup>	1,6
КПД трансмиссии	$n_{tr}$		0,9
Коэффициент сопротивления качению	$f_0$		0,015
Коэффициент зависимости сопротивления качению шины от скорости	$A_f$		$5,1 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент зависимости сопротивления качению от скорости	$f_k$		0,21
Диаметр колеса	$D$	м	0,33
Угол наклона трассы	$\alpha$	град	0
Время разгона до максимальной скорости	$t_p$	с	5
Передаточное число главной передачи	$i_1$		1
Количество кругов	$z$		24
Время круга	$t_{\text{круг}}$	с	90
Протяженность 1 круга	$S_{\text{круг}}$	м	980

Рассчитаем моменты, действующие на электропривод.

Момент сил сопротивления качению:

$$M_{\text{спр.кач}} = \frac{f_k \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot D}{2} = \frac{0,021 \cdot 400 \cdot 9,81 \cdot 1 \cdot 0,33}{2} = 13,66 \text{ (Н} \cdot \text{м)}, \quad (3.1)$$

где  $D = r \cdot 2 = 0,33$ , м диаметр колеса болида.

Момент сил сопротивления подъему:

$$M_{\text{сопр.подъему}} = \frac{m \cdot \sin(\alpha) \cdot g \cdot D}{2} = \frac{400 \cdot 0 \cdot 9,81 \cdot 0,33}{2} = 0 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (3.2)$$

Момент сил сопротивления воздуху:

$$M_{\text{сопр.воз}} = 0,5 \cdot c_x \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot A \cdot V_{\text{max}}^2 \cdot r = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 1,202 \cdot 28,23^2 \cdot 0,165 = 63,2 (\text{Н} \cdot \text{м}). \quad (3.3)$$

Статический момент определяется суммой всех составляющих:

$$M_{\text{РОСТ}} = M_{\text{сопр.подъему}} + M_{\text{сопр.подъему}} + M_{\text{сопр.воз}} = 13,66 + 0 + 63,2 = 85,438 (\text{Н} \cdot \text{м}). \quad (3.4)$$

Для определения динамических моментов рабочей машины рассчитываются моменты инерции привода, равные сумме моментов инерции всех вращающихся частей привода, указанных в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Моменты инерции привода

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Момент инерции вала двигателя с фланцем и шестеренкой	$J_1 = J_{\text{д}}$	кг·м <sup>2</sup>	0,026
Большая шестерня	$J_2$	кг·м <sup>2</sup>	0,084
Приводной вал	$J_3$	кг·м <sup>2</sup>	0,004
ШРУСы подвески	$J_4$	кг·м <sup>2</sup>	0,316
Проставка ступицы	$J_5$	кг·м <sup>2</sup>	0,27
Ступица	$J_6$	кг·м <sup>2</sup>	0,132
Диск колеса	$J_7$	кг·м <sup>2</sup>	0,074
Шина	$J_8$	кг·м <sup>2</sup>	0,253
Суммарный момент инерции	$J$	кг·м <sup>2</sup>	2.209

$$J_{\text{РО}} = J + m \cdot \frac{D^2}{4} = 2,209 + 400 \cdot \frac{0,33^2}{4} = 13,099 (\text{кг} \cdot \text{м}^2), \quad (3.5)$$

где  $D$  – диаметр колеса, м;  $J$  – суммарный момент инерции механизма, кг·м<sup>2</sup>.

Определим максимальный динамический момент:

$$M_{\text{РОДИН}} = J_{\text{РО}} \frac{2 \frac{V_{\text{max}}}{t_p}}{D} = 13,099 \cdot \frac{2 \cdot \frac{28,23}{5}}{0,33} = 224,137 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (3.6)$$

Полный максимальный момент машины:

$$M_{\text{РО}} = M_{\text{РОСТ}} + M_{\text{РОДИН}} = 85,438 + 224,137 = 309,574 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (3.7)$$

На основании построенной нагрузочной диаграммы момента рабочей машины (см. рисунок 1.4) можно рассчитать среднеквадратичное значение момента, в котором учтены не только статические нагрузки, но и динамические.

$$M_{\text{сркв}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m M_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^m t_k}}, \quad (3.8)$$

где  $M_k$  – момент на  $k$ -м участке,  $t_k$  – длительность  $k$ -го участка;  
 $k=(1, \dots, m)$ , где под участком понимается промежуток времени, в течение которого происходит разгон, или торможение, или работа с постоянной скоростью.

Из модели, описанной в главе «Исходный данные», мы можем автоматически получить среднеквадратичный момент:

$$M_{\text{сркв}} = 335,517 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (3.9)$$

						Лист
					ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ	26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Продолжительность включения  $PВ_{ФАКТ}$  по времени работы  $t_k$  на всех  $m$  участках движения времени:

$$PВ_{факт} = \frac{\sum_{k=1}^m t_k}{t_u} = \frac{90 \cdot 24}{2160} = 1, \quad (3.10)$$

где  $t_u = 2160$  (с) – время одного заезда (24 круга).

Расчетная мощность двигателя может быть определена по соотношению:

$$P_{\partial в} = k_1 \cdot M_{ср кв} \cdot \frac{2 \cdot v_0}{D} \cdot \sqrt{\frac{PВ_{факт}}{PВ_{кат}}}, \quad (3.11)$$

где  $v_0$  – основная скорость движения РО (при работе двигателя на естественной механической характеристике), м/с;

$D$  – диаметр шины колеса в метрах;

$PВ_{КАТ}$  – ближайшее к  $PВ_{ФАКТ}$  каталожное значение. Продолжительность включения для электродвигателей выбранной серии, примем  $PВ_{КАТ}=100\%$ ;

$k_1$  – коэффициент, учитывающий динамические нагрузки, обусловленные вращающимися элементами электропривода (двигатель, редуктор), а также потери мощности в редукторе, примем  $k_1=1,4$ .

$$P_{\partial в} = 1,4 \cdot 335,517 \cdot \frac{2 \cdot 11,3}{0,33} \cdot \sqrt{\frac{1}{1}} = 34070 \text{ (Вт)}. \quad (3.12)$$

						Лист
					<i>ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 3.3 Выбор электродвигателя и аппаратуры управления

На основе качественного анализа, проведенного выше был выбран тип электрической машины: вентильный электродвигатель.

На основании полученной предварительной мощности двигателя  $P_{дв} = 34070$  (Вт) при скважности  $PВ_{кат} = 100\%$  и учета возможных перегрузок был выбран электродвигатель *EMRAX 208 (HV)* (представлен на рисунок 3.3) с воздушным охлаждением. Каталожные данные двигателя сведены в таблицу 3.3. Рабочие характеристики представлены на рисунке 3.4, эскиз данного электродвигателя представлен в приложение А.

Таблица 3.3 – Номинальные данные двигателя *EMRAX 208 (HV)* с воздушным охлаждением

Наименование показателя	Обозначение	Размерность	Величина
Номинальная мощность на валу	$P_H$	кВт	35
Номинальная частота вращения	$n_H$	об/мин	3000-5000
Номинальный ток статора	$I_H$	А	100
Максимальный ток статора	$I_{max}$	А	200
Номинальный момент	$M_H$	Н·м	80
Максимальный (критический) момент	$M_{max}$	Н·м	150
Вес	$J_{дв}$	кг	9,5

В качестве аппаратуры управления нами был выбран синусный контроллер *EmDrive 500*, характеристики котроллера представлены в таблице 3.4. Данный контроллер рекомендован производителем и имеет ряд преимуществ: режим автоматического ослабления поля для асинхронных двигателей и двигателей *PMSM*, различные режимы рекуперации энергии, защита контроллера и двигателя с постепенным снижением мощности при высокой температуре или низком напряжении батареи, компактный размер и легкий вес. Чертеж контроллера представлен в приложение Г.

Таблица 3.4 – Характеристики контроллера *EmDrive 500*

Наименование показателя	Размерность	Величина
Номинальная мощность	кВт	62
Диапазон напряжения аккумулятора	В	120-500
Номинальный ток двигателя	А	120
Интерфейс		CAN ( <i>CANopen</i> )
Охлаждение		Жидкостное
Максимальный (критический) момент	Н·м	150
Вес	кг	5

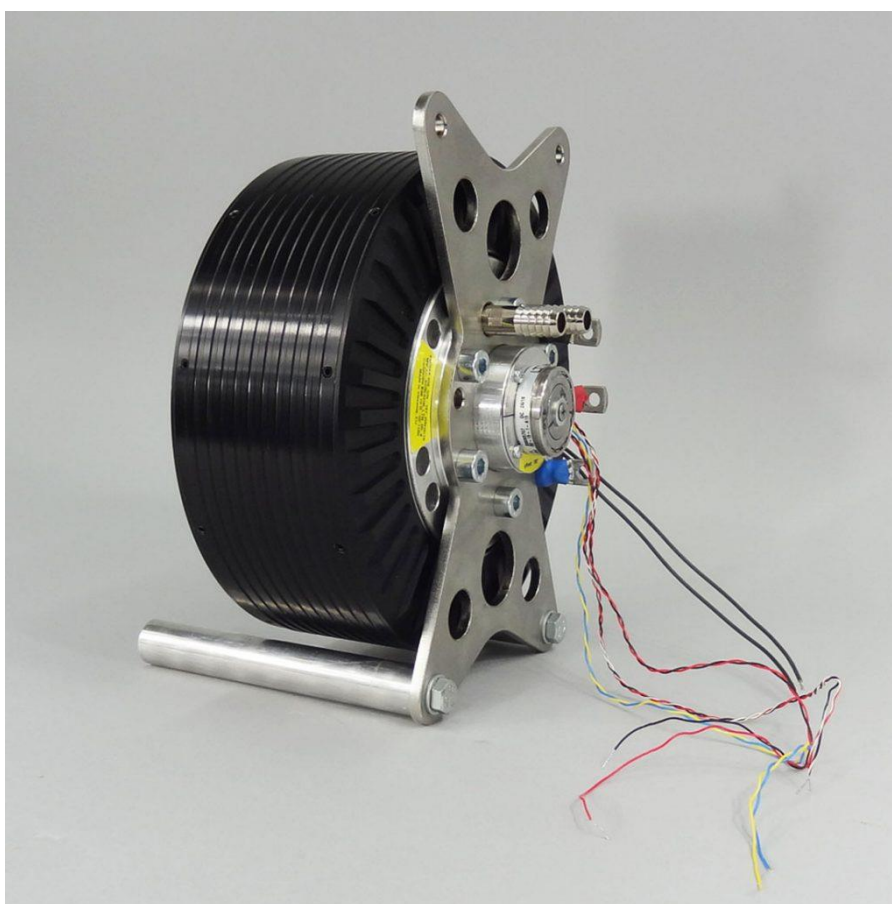


Рисунок 3.3 – электродвигатель *EMRAX 208 (HV)* с жидкостным охлаждением

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ

Лист

29

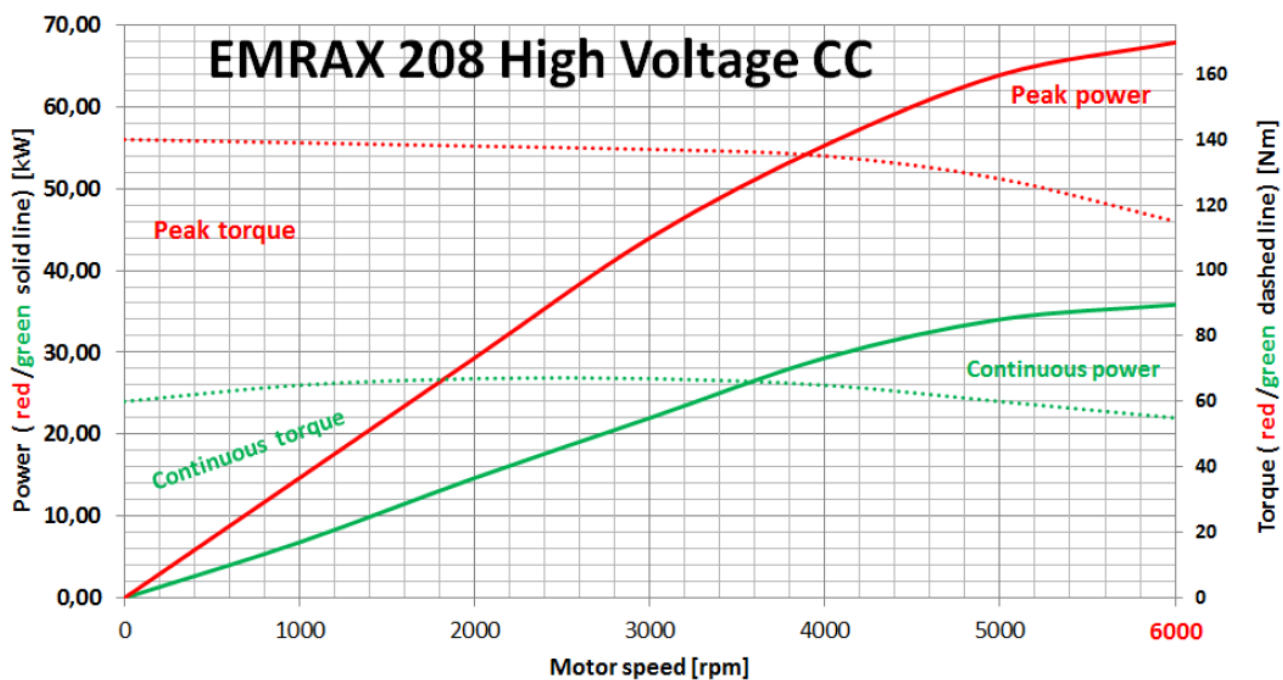


Рисунок 3.4 – Рабочие характеристики электродвигателя *EMRAX 208 (HV)*

### 3.4 Выбор редуктора

Передаточное число редуктора для выбранного двигателя:

$$j_p = \frac{\omega_H \cdot D}{2v_0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H \cdot D}{2 \cdot 60 \cdot v_0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000 \cdot 0,33}{2 \cdot 60 \cdot 11,29} = 4,5, \quad (3.13)$$

где  $D$  – диаметр колеса, преобразующего движение вала в поступательное движение машины;

$\omega_H$  - номинальная скорость вращения выбранного двигателя;

$v_0$  - основная скорость движения исполнительного органа (11,29 м/с).

Для реализации полученного передаточного числа было решено использовать цепную передачу. Конструктивные элементы: цепь *VX 525 G&G 114* звена, 2 звездочки большого и малого диаметров (количество зубьев и диаметр звездочек подбираются индивидуально, (3D модель привода представлена на рисунке 3.5)). Изготовленный редуктор представлен в приложении Д.



Статические моменты на валу с учетом потерь в редукторе ( $\eta_p < 1$ ) рассчитывают в зависимости от режима работы электропривода.

Статический момент на валу в двигательном режиме:

$$M_{BC} = \frac{M_{PP}}{\eta_p} = \frac{18,623}{4,5} = 4,05 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (3.15)$$

Приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции движущихся исполнительных органов рабочей машины и связанных с ними движущихся масс:

$$J_{PP} = \frac{J_{PO}}{J_p^2} = \frac{13,099}{4,5^2} = 0,62 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}. \quad (3.16)$$

Суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции системы может быть рассчитан по соотношению:

$$J = \delta \cdot J_{дв} + J_{pp} = 1,1 \cdot 0,026 + 0,62 = 0,651 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}, \quad (3.17)$$

где  $J_{дв}$  - момент инерции ротора двигателя;

$\delta$  - коэффициент, учитывающий момент инерции остальных элементов электропривода: муфт, тормозного шкива, редуктора и др. (примем  $\delta=1,1$ ).

Установившаяся скорость двигателя:

$$\omega_c = \frac{2V_{max}}{D} \cdot j_p = \frac{2 \cdot 28,23}{0,33} \cdot 4,5 = 314 \left( \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right). \quad (3.18)$$

Динамический момент двигателя (при данном допустимом ускорении):

$$M_{дин} = J \frac{2 \cdot \frac{V_{max}}{t_p} \cdot j_p}{D} = 0,651 \cdot \frac{2 \cdot \frac{28,23}{5,6} \cdot 4,5}{0,33} = 102,1 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (3.19)$$

						Лист
					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Пусковой и тормозной моменты при движении с допустимым ускорением:

$$M_{\Pi} = M_{\text{ПР}} + M_{\text{ДИН}} = 18,623 + 102,1 = 120,384 \text{ (Н} \cdot \text{м)}; \quad (3.20)$$

$$M_{\text{T}} = \left| |M_{\text{ПР}}| - M_{\text{ДИН}} \right| = \left| |102,1| - 18,623 \right| = 83,138 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (3.21)$$

Из расчётов видно, что ни один из пусковых и тормозных моментов двигателя не превышает пусковой момент двигателя (таблица 3.3).

					<i>ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		33

## 4 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ АКБ

На сегодняшний день существуют различные типы аккумуляторных батарей, у каждого из них есть свои сильные и слабые стороны, которые обуславливают область их применения.

### 4.1 Сравнение различных типов АКБ

Свинцово-кислотные батареи являются наиболее устаревшим типом АКБ. Аккумуляторы подобного типа используются в источниках аварийного и бесперебойного питания различных объектов гражданского и специального назначения. К достоинствам данных АКБ относятся дешевизна, надежность и высокая перегрузочная способность, недостатки: низкая плотность энергии и малый срок службы.

Никель-кадмиевые (*NiCd*) АКБ так же, как и свинцово-кислотные считаются устаревшим типом батарей, но в отличие от свинцово-кислотных являются более надежными и долговечными, имеют большой ток разрядки и способны работать в экстремальных температурах. Серьезным недостатком данного типа АКБ является высокая токсичность. Никель-кадмиевые АКБ запрещены к продаже в странах Европы.

Никель-металлогидридные (*NiMH*) АКБ – это своеобразная замена никель-кадмиевых АКБ. Данные батареи применяются в медицинском оборудовании и в некоторых космических аппаратах. Достоинствами никель-металлогидридных АКБ являются повышенная плотность энергии, уменьшенное количество токсичных металлов в составе АКБ.

Литий-ионные (*Li-ion*) аккумуляторные батареи – это наиболее перспективный тип АКБ. У них есть ряд недостатков: высокая стоимость, чувствительность к перезаряду (это требует наличия аппаратуры контроля заряда/разряда), низкая устойчивость к пониженным температурам. Но у данного типа батарей самая высокая плотность энергии, этот факт нивелирует выше изложенные недостатки и

									Лист
									34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ				



обуславливает широкое распространение этих АКБ в бытовой технике и электронике. Литий-ионные аккумуляторы можно разделить на 3 группы по типу материала катода: кобальт лития, литий-марганцевая шпинель и литий-феррофосфат [9]. Сведем все данные в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики различных типов АКБ

Параметр	Свинцово-кислотные	<i>NiCd</i>	<i>NiMH</i>	<i>Li-ion</i>		
				Кобальт лития	Литий-марганцевая шпинель	Литий-феррофосфат
Удельная плотность энергии, Вт*ч/кг	30-50	45-80	60-120	150-190	100-135	90-120
Жизненный цикл	200-300	10 <sup>3</sup>	300-500	500-10 <sup>3</sup>	500-10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> -2000
Устойчивость к перезаряду	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая		
Саморазрядка (за месяц)	5%	20%	30%	Менее 10%		
Обслуживание	Требуется			НЕ требуется		
Безопасность	Термостабильны	Требуют наличия термopедохранителей		Обязательный защитный контур		

Из таблицы 4.1 мы можем сделать вывод, что наиболее перспективными АКБ являются литий-ионные с катодом на основе кобальта лития. Данный тип АКБ имеет самую большую плотность энергии и все остальные достоинства литий-ионных АКБ. Единственной проблемой является низкий жизненный цикл АКБ, но данная проблема решается путем более точного процесса зарядки/разрядки, а также этот факт не играет роли для гоночного болида. Для разработки батареи нами был выбран аккумулятор *Panasonic NCR18650B*, так как он зарекомендовал себя как наиболее надежный и долговечный. Подобные аккумуляторы используются в автомобилях марки *TESLA* (представлен на рисунке 4.1).

Таблица 4.2 – Характеристики элемента *Panasonic NCR18650B*

Параметр	Размерность	Значение
Модель		<i>Panasonic NCR18650B</i>
Типоразмер		18650
Технология		<i>Li-ion</i>
Емкость	мА·ч	3200
Рабочее напряжение	В	3,7



Рисунок 4.1 - Аккумулятор *Panasonic NCR18650B*

#### 4.2 Расчет аккумуляторной батареи

Зададимся исходными данными для расчета АКБ, которые представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Исходные данные для расчета АКБ

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Напряжение питания двигателя	$U$	В	470
Потребляемая мощность	$P$	кВт	34
Средняя скорость	$V_{\text{сред}}$	м/с	11,3
Напряжение элемента (тип 18650)	$U_э$	В	3,7
Емкость элемента (тип 18650)	$C_э$	А·ч	3,2
Количество кругов	$z$		24
Время круга	$t_{\text{круг}}$	с	90
Протяженность заезда	$S$	м	24000

Найдем расчетное время работы нашего болида:

$$t = \frac{K_3 \cdot S}{V_{\text{сред}} \cdot 3600} = \frac{1,5 \cdot 24000}{11,9 \cdot 3600} = 0,88 \text{ (ч)}. \quad (4.1)$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса, равный 1.5;

3600 – данное число в знаменателе служит для перевода секунд в часы.

Потребляемая мощность:

$$W = P \cdot t = 34000 \cdot 0,88 = 30110 \text{ (Вт} \cdot \text{ч)}. \quad (4.2)$$

Общая емкость АКБ:

$$C = \frac{W}{U} = \frac{30110}{470} = 64,05 \text{ (А} \cdot \text{ч)}. \quad (4.3)$$

Число групп, соединенных последовательно:

$$N_{\Gamma} = \frac{U}{U_{\text{э}}} = \frac{470}{3,7} = 127. \quad (4.4)$$

Число параллельно соединенных элементов:

$$N_{\text{э}} = \frac{C}{C_{\text{э}}} = \frac{64,05}{3,2} = 20. \quad (4.5)$$

Общие число элементов в батарее:

$$N = N_{\Gamma} \cdot N_{\text{э}} = 127 \cdot 20 = 2540. \quad (4.6)$$

						Лист
					ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ	37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



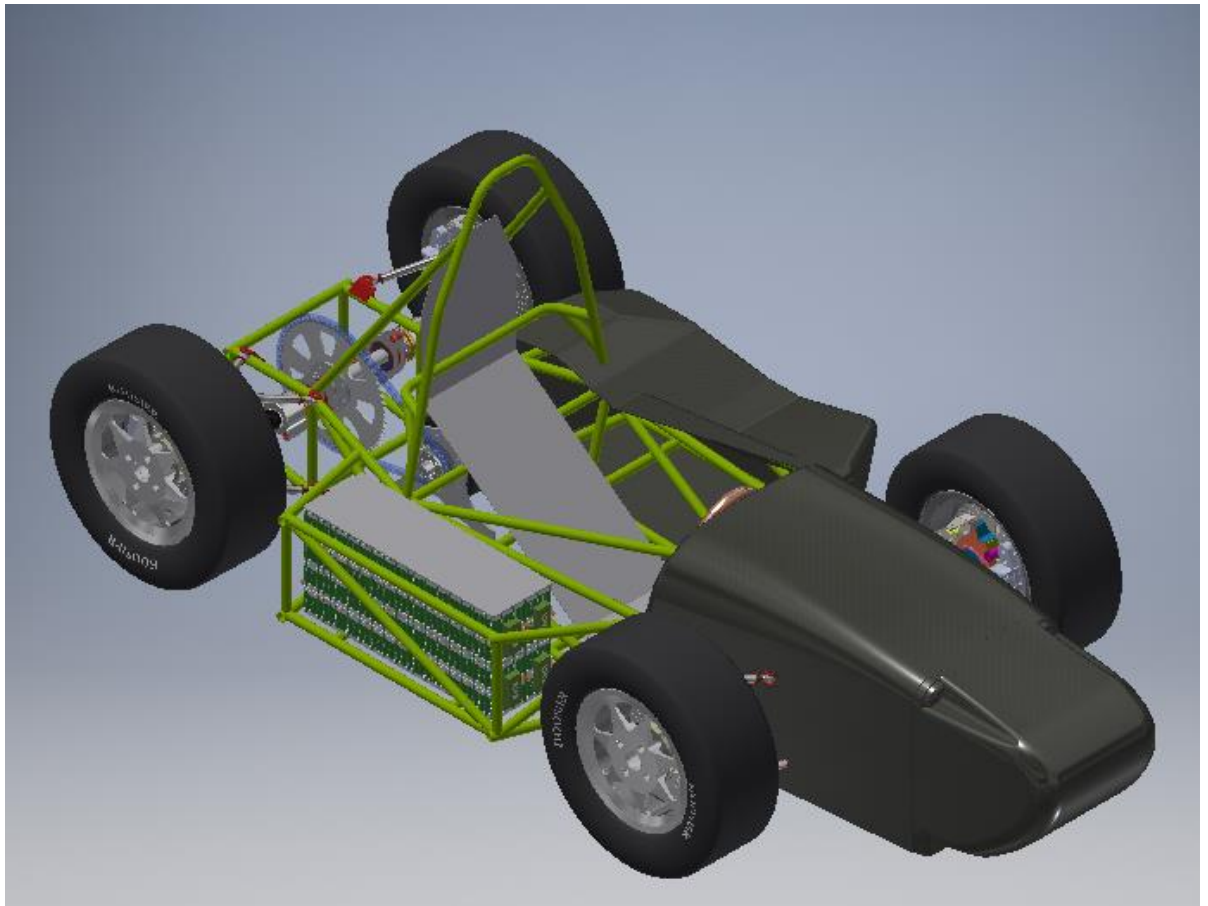


Рисунок 4.2 – Модель электроботида

Тяговая АКБ нашего болида распределена на два борта симметрично, 3D модель болида представлена в приложение Б), Батарея подразделяется на 254 группы (127 групп на 1 борт), в каждой группе по 10 элементов типоразмера 18650. Элементы в группе соединены параллельно, а группы – последовательно, это дает возможность обеспечить заданное напряжение и емкость АКБ. Батарея собирается из блоков, состоящих из двух групп, представленных на рисунке 4.3, затем блоки собираются в модули по 8 штук, на каждый модуль предусмотрена *BMS* плата (модуль представлен на рисунке 4.4). Принципиальная схема АКБ представлена в приложение В. Блоки соединяются между собой медными перемычками с помощью пайки.

Подобная компоновка батареи позволят легко реализовать систему воздушного охлаждения, а модульная структура дает возможность менять параметры батареи в зависимости от условий соревнований.

В ходе исследования было проведено сравнение разработанной нами АКБ и АКБ на основе литий-железо-фосфатных элементов с такими же характеристиками

					ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

(номинальное напряжение  $U=470$  В, емкость  $C=64$  А·ч). Масса разработанной нами АКБ (*Li-io*) составляет 120 кг (с учетом дополнительного оборудования), масса подобной АКБ на основе *LiFePo* составляет 443 кг. Можно сделать вывод, что использование литий-ионных АКБ является наиболее перспективным направлением развития АКБ для автономного электротранспорта.

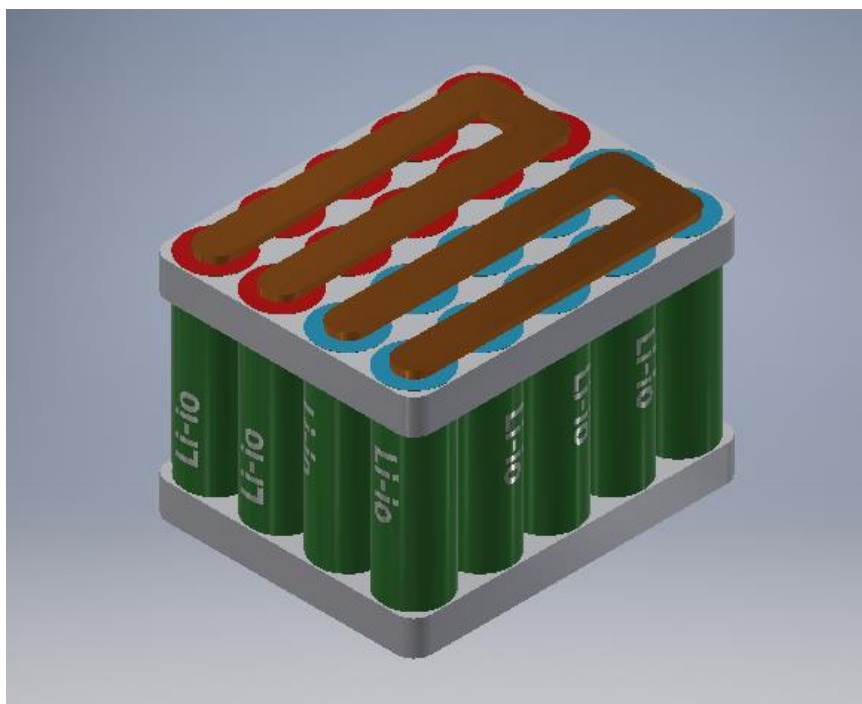


Рисунок 4.3 – Блок АКБ

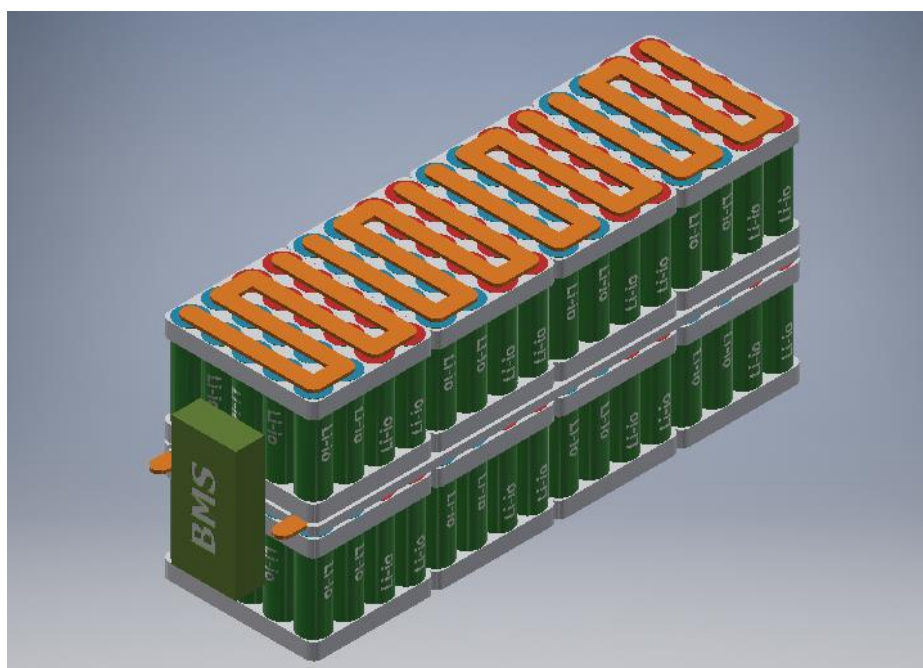


Рисунок 4.4 – Модуль в сборе

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ

Лист

40

## 5 ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ

Из теории литиевых аккумуляторов можно узнать, что им противопоказан перезаряд, переразряд или разряд слишком большими токами, а также короткие замыкания. При переразряде в аккумуляторе образуются металлические взаимосвязи между катодом и анодом, которые могут привести к короткому замыканию при зарядке аккумулятора, что может привести к выходу из строя не только элементов питания, но и зарядного устройства. Перезаряд же (набор аккумулятором напряжения больше разрешенного) почти сразу ведёт к возгоранию, а зачастую даже к взрыву.

Для возгорания литиевых аккумуляторов не нужен кислород – оно происходит анаэробно, поэтому стандартные методы тушения не подходят; также при реакции лития с водой выделяется еще и горючий газ водород, который только ухудшает ситуацию. Разряд высокими токами приводит к вздутию аккумулятора, а если нарушается целостность оболочки – происходит реакция лития с водяными парами в воздухе, что само по себе способно спровоцировать возгорание.

Для предотвращения подобных ситуаций применяются так называемые *BMS* (*Battery Management System*) – система управления батареей. *BMS* представляет собой плату защиты, которая может включать в себя ряд функций: защита по току (от короткого замыкания / превышения допустимого тока), защита по напряжению (от перезаряда или переразряда), защита по температуре, балансировка батареи. Данные функции могут быть как по одной, так и все вместе.

Для разработанной нами батареи мы используем 16 плат *BMS\PCM 16S LiFePO4, Li-Ion HP20S* (32А) (представлена на рисунке 5.1) и 2 платы *BMS\PCM 8S LiFePO4, Li-Ion GP24S* (64А) (представлена на рисунке 5.2). Функции данных плат защита от перезаряда, защита от переразряда, защита от перегрузки по току, защита от КЗ, балансировка.

										Лист
										41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ					



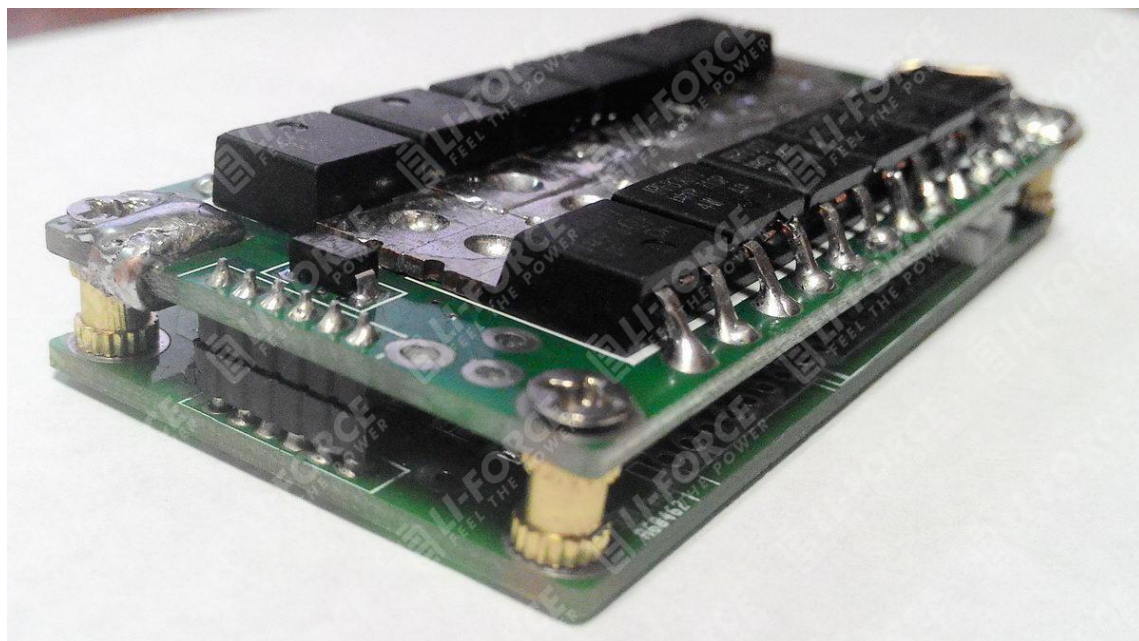


Рисунок 5.1 - *BMS\PCM 16S LiFePO<sub>4</sub>, Li-Ion HP20S (32A)*

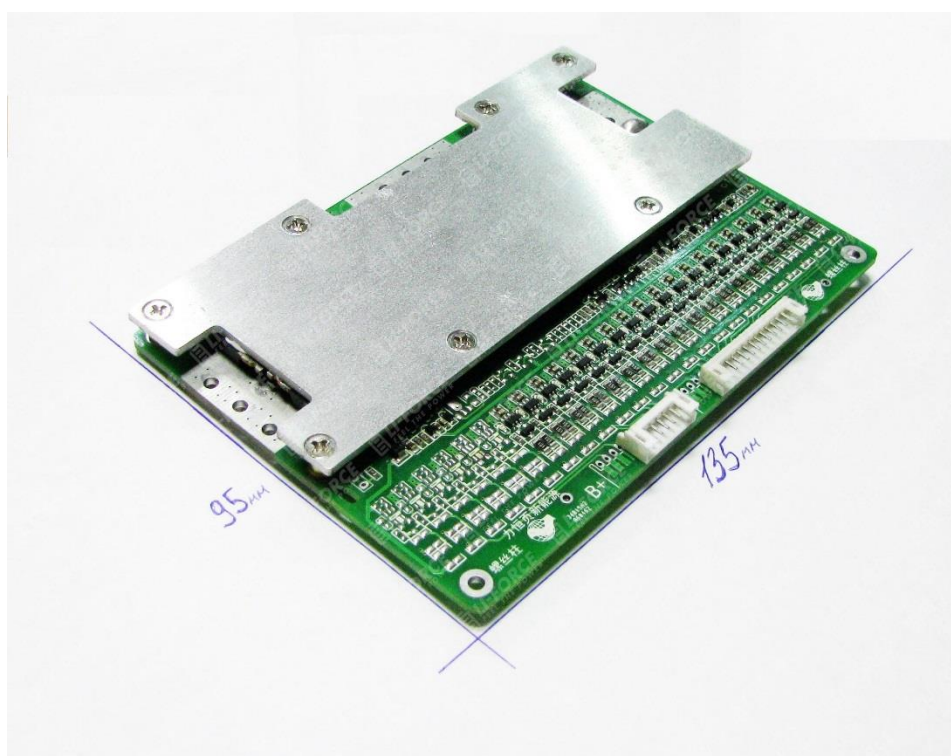


Рисунок 5.2 - *BMS\PCM 8S LiFePO<sub>4</sub>, Li-Ion GP24S (64A)*

Для обеспечения качественной зарядки аккумуляторов были выбраны 2 зарядных устройства. *ABL SURSUM EVSE 6B2* (представлены на рисунке 5.3). Данное зарядное устройство работает от сети переменного тока 230/400 В, 50Гц, номинальный ток зарядки 32 А, номинальная мощность 22 кВт. Два зарядных устройства позволят зарядить батарею максимально быстро, расчетное время

						<i>Лист</i>
					<i>ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	42
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		



зарядки составляет 1 час. Каждое зарядное устройство подключается к одну из бортов, возможно заряжать как каждый борт по очереди, так и оба одновременно.



Рисунок 5.3 - Зарядное устройства. *ABL SURSUM EVSE 6B2*

С целью защиты от утечки тока из силовой цепи вследствие нарушения изоляции или обрыва токоведущих частей предусмотрена система защиты, состоящая из двух электронных амперметров, контролера и *IGBT* транзистора (схема представлена на рисунке 5.4).

Амперметры, установленные на входе и выходе батареи, передают измеренное мгновенное значение тока в микроконтроллер, который в свою очередь сравнивает пришедшие значения, если происходит резкое изменение тока на одном из амперметров, контроллер подает сигнал на управляющий электрод транзистора, который разрывает силовую цепь.

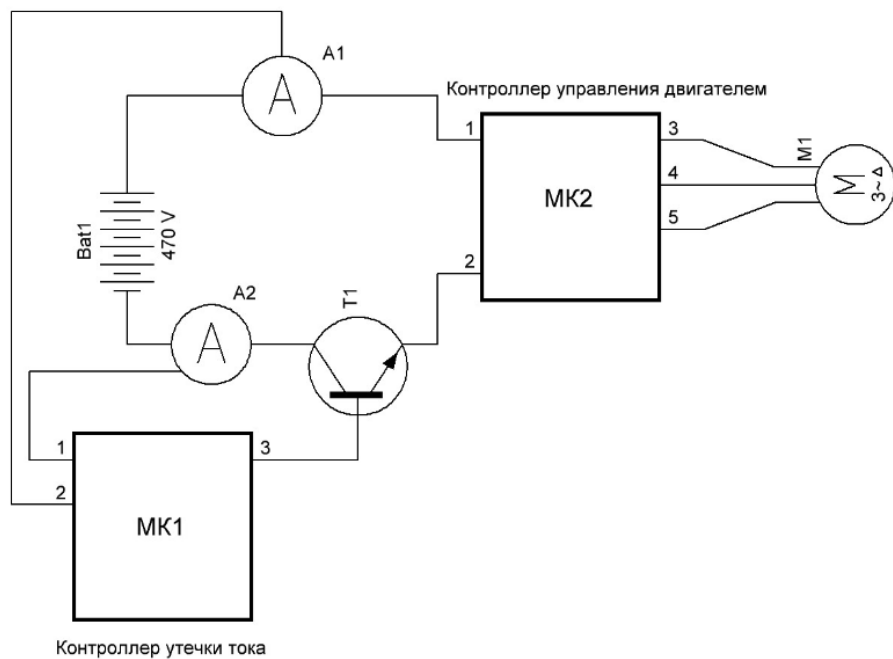


Рисунок 5.4 – Упрощенная схема системы защиты от утечки тока

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ

Лист

44

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе был разработан электропривод гоночного болида, предназначенного для участия в международных соревнованиях «Формула студент» класс «Электрик». Нами были получены исходные данные для проектирования тягового электропривода электроболида от конструкторского бюро Автотракторного факультета, затем мы провели анализ технических решений, применяемых в современном электротранспорте как в серийных автомобилях, так и в штучных гоночных болидах.

На основе полученных данных нами были проведены следующие этапы работы:

1. Разработана компоновка тягового электропривода болида, которая наиболее оптимально подходит для реализации в рамках реального студенческого проекта.

2. Рассчитан и выбран тяговый электродвигатель, а также аппаратура управления к нему. Выбран вентильный электродвигатель с ротором на постоянных магнитах, удельные массоэнергетические показатели которого равны 3,1 кВт/кг, что позволяет снизить общую массу болида, не снижая мощности двигателя.

3. Спроектирован и изготовлен цепной редуктор с передаточным отношением 1/5 (представлен в приложение Д). Данный редуктор является наиболее простым в изготовлении и обслуживании, а также позволяет регулировать динамические характеристики болида путем изменения передаточного отношения (замена звездочек) в зависимости от условий трассы.

4. Исследованы различные типы аккумуляторов. Были выявлены достоинства и недостатки различных типов аккумуляторов. Для дальнейшего проектирования были выбраны литий-ионные аккумуляторы с катодом на основе кобальта лития. Данный тип аккумуляторных батарей обладает наибольшей удельной энергией и не требует обслуживания, минусом данного типа АКБ являются высокие требования к процессам зарядки и разрядки.

5. Разработана АКБ на основе литий-ионных элементов, полностью удовлетворяющая всем требованиям соревнований «Формула студент».

									Лист
									45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ				

Разработанная нами АКБ в два раза легче, чем используемая ранее литий-железо фосфатная батарея. Разработанная нами компоновка позволяет менять конфигурацию АКБ по ходу соревнований, а также обеспечивать легкость монтажа.

6. Разработана элементарная система безопасности. Данная система безопасности защищает АКБ от переразрядки и перезаряда, а также от утечек тока вследствие нарушения целостности изоляции или обрыва проводов.

В ходе проекта были изготовлены пространственная рама болида, трансмиссия, рулевое управление, подвеска электроболида, а также смонтированы некоторые элементы электропривода (двигатель, цепной редуктор), результат работы представлен в приложение Е.

Разработки в области современного автономного электротранспорта являются одними из наиболее перспективных в современном автомобилестроении. В настоящее время почти все мировые производители автомобилей ведут разработки в данном направлении. Соревнования «Формула студент» позволяют молодым специалистам принимать участие в реальных инженерных проектах, что дает незаменимый опыт и компетенции.

Дальнейшее развитие электроболидов класса «Формула студент» идет в сторону облегчения конструкции за счет применения новых материалов, а также применение многодвигательных систем. Данные решения позволяют значительно улучшить динамические и массоэнергетические показатели гоночных болидов.

					<i>ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		46

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Формула Студент в России. История. <http://fs-russia.ru/history>.
2. Методика расчета и выбора электродвигателя электроболида с учетом регламента «Formula studen» / А. Г. Возмилов, Д. С. Коробков, В. А. Калмаков, Д. В. Галиуллин // АПК России. 2016. Т. 23. 979-984 с.
3. Википедия. *Nissan\_LEAF*. – [https://ru.wikipedia.org/wiki/Nissan\\_LEAF#Конструкция](https://ru.wikipedia.org/wiki/Nissan_LEAF#Конструкция).
4. Википедия. *Tesla Model S*. – [https://ru.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Model\\_S](https://ru.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S).
5. Швейцарский электромобиль установил рекорд ускорения. – <https://nplus1.ru/news/2016/06/23/record>.
6. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для вузов / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
7. Компоновка тягового электропривода для электроболида «Формулы студент» класс «Электрик» / Д. С. Коробков, Г. Р. Хазиев, В. Б. Приселков, С. А. Малюгин // АПК России. 2015. Т. 74. 86 – 89 с.
8. Драчев, Г.И. Теория электропривода: учебное пособие в 2 ч. / Г.И. Драчев. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – Ч.1. – 207 с; Ч.2. – 203 с.
9. Григорьев М.А. Тяговый электропривод электромобиля / Григорьев М.А., Наумович Н.И., Белоусов Е.В. Электротехника. 2015. № 12. С. 53 – 56.

										Лист
										47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ					



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### 3D Модель болида

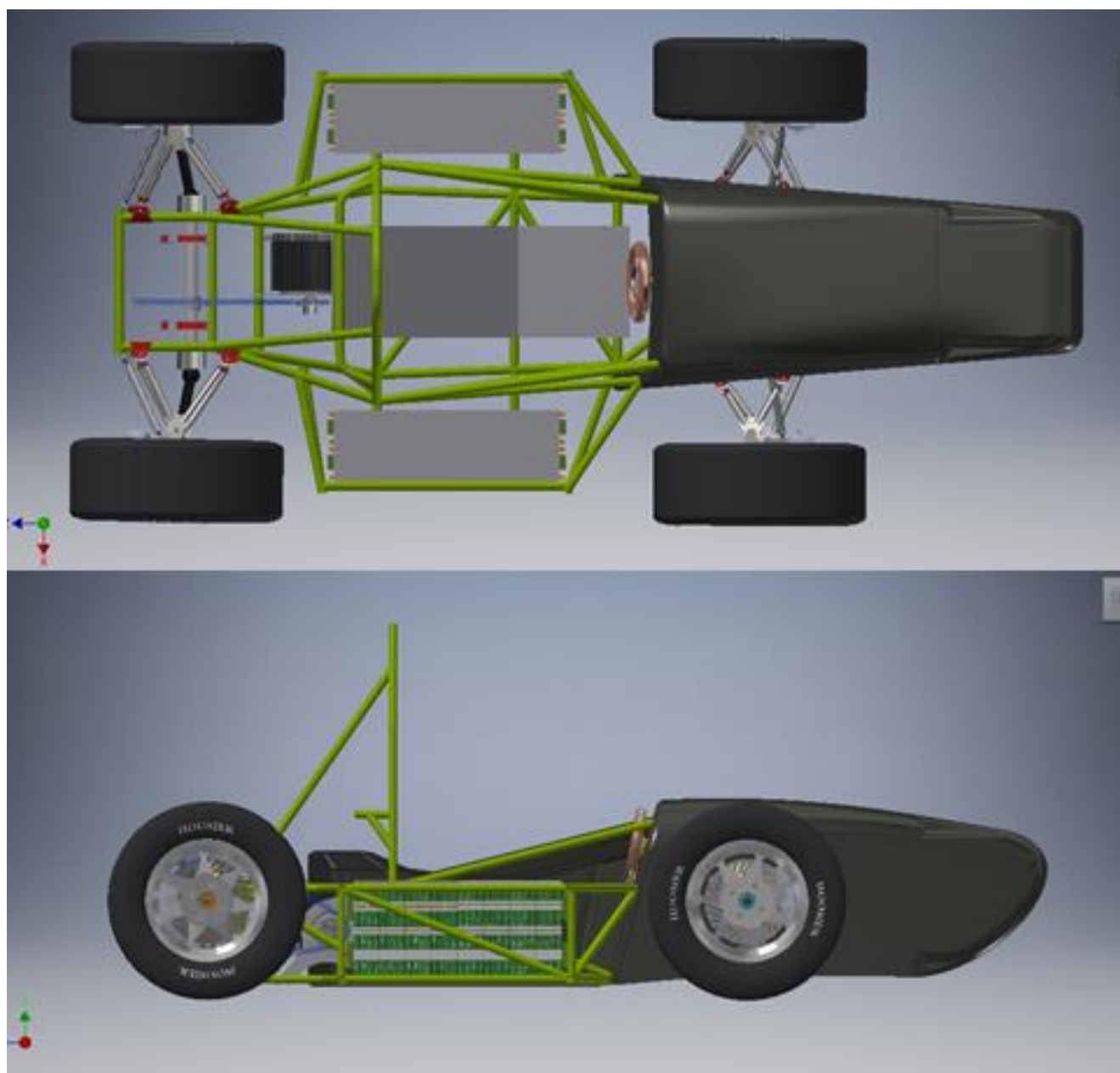


Рисунок Б.1 – 3D Модель болида

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Схема электрическая принципиальная

					<i>ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		50





## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Цепной привод в сборе



Рисунок Д.1 – Цепной привод в сборе



Рисунок Д.2 – Цепной привод в сборе

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ

Лист

52



## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Промежуточные итоги проекта



Рисунок Е.1 – Промежуточные итоги проекта



Рисунок Е.2 – Промежуточные итоги проекта

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮЧДГУ-13.04.02.2019.165.01 ПЗ

Лист

53