

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра Проектирование и эксплуатация автомобилей

(наименование)

23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Автомобили и автомобильный сервис

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Оптимизация несущей конструкции спортивного болида EScorpion

Обучающийся

Е.А. Еремишин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.А. Горохова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

Аннотация

В настоящее время университеты по всему миру развивают студенческие инженерные проекты. Одним из самых успешных является проект Formula Student, в рамках которого будущие инженеры проектируют, создают и испытывают гоночные автомобили. На протяжении последних нескольких лет, отвечая современным вызовам, тематика проекта ставит перед студентами задачу – разработка болида с электрической силовой установкой.

Важнейшим элементом такого болида является рама – несущая конструкция. Миссия инженеров – разработать оптимальную конструкцию, которая способна обеспечить необходимую жесткость конструкции при наименьшем весе.

В данной работе рассматривается вопрос оптимизации несущей конструкции электроболида класса «Formula Student».

Приведены основные требования к несущей конструкции болидов в соответствии с регламентом FS Rules.

Выполнен тягово-динамический расчет, спроектирована ходовая часть, разработана конструкция аккумулятора.

В ходе работы был проведен сравнительный анализ веса рамных конструкций, созданных ранее болидов с ДВС, а также проведены прочностные анализы оптимизированной конструкции.

Выпускная квалификационная работа состоит из: 58 страниц, 10 таблиц, 40 рисунков, 6 чертежей.

Содержание

Введение.....	4
1. Состояние вопроса.....	6
1.1. Актуальность разработки электробоида.....	6
1.2. Цель и задачи проекта.....	7
2. Требования регламента к несущей конструкции.....	9
2.1. Шаблон перцентиля.....	9
2.2. Шаблон кокпита.....	11
2.3. Шаблон поперечного сечения.....	12
2.4. Основные требования к конструкции рамы.....	12
3. Конструирование гоночного электробоида с оптимизацией несущей конструкции.....	18
3.1. Проектирование ходовой части автомобиля.....	18
3.2. Тягово-динамический расчет.....	23
3.3. Разработка конструкции аккумулятора.....	37
3.4. Проектирование рамы гоночного болида на электротяге.....	43
Заключение.....	54
Список используемой литературы и используемых источников.....	55

Введение

«Formula Student» - инженерный студенческий проект, соединяющего в себе образовательную, спортивную и инженерную составляющие в рамках которого разрабатываются гоночные автомобили как с ДВС, так и с электрической силовой установкой. Работа над проектом предполагает участие студентов различных направлений обучения, объединенных в инженерную команду. Разрабатываемый болид должен быть спроектирован и построен в течение одного года, а также соответствовать техническому регламенту международных соревнований «Formula Student», организатором которых выступает сообщество автомобильных инженеров SAE. В проекте принимают участие студенческие команды, представляющие различные высшие учебные заведения по всему миру.

Тольяттинская команда Togliatti Racing Team была создана на базе Тольяттинского государственного университета в 2008 году. За время существования команды ее участниками было построено девять гоночных болидов класса «Formula Student», а также команда неоднократно принимала участие в соревнованиях – как в России, так и за рубежом.

В 2014 году команда заняла 8 место в общем зачете на соревнованиях «Formula Student Russia 2014», впервые представив разработанный болид.

В 2015 году более успешное выступление с новой машиной позволило занять 3 призовое место.

В 2017 году был построен пятый гоночный болид «Violet Demon», с которым команда выступила на соревнованиях в России, а также хорошо показала себя на международных соревнованиях в Венгрии и Италии.

В 2018 году был разработан шестой по счету гоночный болид «Black Scorpion», с которым команда приняла участие в международных соревнованиях «Formula Student Italy 2018» в Италии, а также в Москве на соревнованиях «Formula Student Moscow 2018». По итогам общего зачета команда заняла 1 место из 12 команд, участвовавших в российских

соревнованиях.

В 2019 году команда Togliatti Racing Team команда приняла участие в соревнованиях «Formula Student Italy 2019», где выиграла малой номинации по топливной экономичности Fuel Efficiency, представив болид «Black Scorpion G2», а по итогам общего зачета команда заняла 13 место из 43, показав лучший результат среди российских команд на международном уровне.

В 2020 году команда подтвердила свой статус чемпиона России, выступив с новой разработкой – гоночным болидом «Red Scorpion G3».

В 2021 году команда ТГУ Togliatti Racing Team стала четырехкратным победителем российских соревнований в классе CV (с болидом на двигателе внутреннего сгорания).

В рамках статических дисциплин был также представлен гоночный болид «EScorpion» – первый болид, разработанный командой для класса EV (с электрической силовой установкой). Команда заняла 3 место в общем зачете, а также 1 место в презентации бизнес-плана и 3 место в защите дизайна конструкции и отчете о стоимости производства.

Опыт выступления позволил выявить слабые стороны несущей конструкции автомобиля и поставить задачи ее по оптимизации с целью участия как в статических, так и в динамических дисциплинах соревнований Formula Student 2022 года.

1. Состояние вопроса

1.1. Актуальность разработки электроболида

В настоящее время крайне актуальным является вопрос экологии, что в том числе относится к индустрии автомобилестроения. Это подтверждается повышенным интересом европейских стран к введению в эксплуатацию электротранспорта, а также инициативами крупных автомобильных компаний, направленных на разработку новых моделей на электротяге. Экологические проблемы, связанные с большим количеством выбросов CO₂, выбрасываемых в атмосферу в результате использования транспорта на двигателе внутреннего сгорания, являются причиной того, что на данный момент переход на электрический транспорт видится многим наиболее эффективным способом решения данных проблем. Постепенно мировая тенденция на электрификацию транспорта будет все больше внедряться в производство, как легковых пассажирских автомобилей, так и других видов транспорта.

В этих условиях вполне закономерным будет проявление видимых изменений в сфере производства, а именно: введение новых технологий и доработка или обновление старых методов производства; представление принципиально новых концепций и моделей продукции; разработка стратегий и плана производства, при которых выпуск продукции в условиях работающего предприятия будет сопровождаться наименьшим количеством вырабатываемых заводом вредных веществ. Все это неизменно влияет на то, какими знаниями и навыками должен обладать работник того или иного предприятия, а также какими компетенциями необходимо обладать будущему сотруднику – выпускнику высшего учебного заведения, который будет заниматься проектированием и разработкой концептов новых автомобилей.

Так, в сложившейся ситуации организации заинтересованы в том,

чтобы привлечь к работе как можно больше молодых квалифицированных специалистов, которые выпускаясь из университета, уже имели бы достаточно навыков и знаний для того, чтобы сразу влиться в производственный процесс. С другой стороны, тот же интерес преследуют и сами выпускники ВУЗов, которым выгодно не только получить теоретические знания, но и приобрести практические навыки и необходимые компетенции для последующего трудоустройства. [17]

На решение данной задачи – подготовки квалифицированного специалиста, обладающего как обширными теоретическими знаниями, так и практическими навыками, и опытом, а также пониманием того, как устроен настоящий производственный процесс – направлен международный проект «Formula Student». В соответствии с мировой тенденцией, направленной на поддержание экологических инициатив и переход на использование электротранспорта, организаторами «Formula Student» поддерживается развитие класса электрических болидов. Поскольку проект является образовательным и направлен на выработку широкого спектра компетенций у студента как будущего специалиста в своей области, проектирование и разработка гоночного болида на электротяге представляет собой процесс получения ценных навыков разработки электротранспорта, что является крайне актуальным на сегодняшний день.

1.2. Цель и задачи проекта

Целью проекта является повышение качества инженерного образования благодаря внедрению практико-ориентированной формы обучения. Основные направления деятельности в рамках реализации проекта относятся к сфере разработок оригинальных технологий, конструкций, оборудования и продуктов на основе передовых производственных технологий.

Трансформация самой концепции инженерной подготовки

обеспечивает непрерывное формирование у студентов компетенций, применимых к решению конкретных производственных задач, которые связаны с проектированием и разработкой конструкций и технологий, востребованных на рынке.

В рамках работы над проектом обеспечивается встречное взаимодействие различных структурных подразделений, таким образом в проекте задействованы студенты различных направлений подготовки.

Основной задачей проекта «Formula Student» является создание рабочего прототипа гоночного болида согласно требованиям технического регламента и в условиях ограниченных временных и финансовых ресурсов.

Вывод по разделу

Анализируя вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что в последние годы наблюдаются мировые тенденции ускоренного развития электротранспорта. Для развития лучших практик в этом направлении необходимо детальное знакомство с возможностями современных систем накопления энергии и изменение парадигмы в проектировании транспортных платформ. Этому способствуют такие международные проекты как Formula Student, которые являются площадкой для подготовки кроссплатформенных специалистов, способных разрабатывать автомобили с электрической силовой установкой.

2. Требования регламента к несущей конструкции

Для обеспечения соответствия несущей конструкции регламенту FS Rules 2022 необходимо проанализировать его требования и определиться с рядом параметров еще до начала разработки. Также необходимо утвердить типоразмер шин и тип силовой установки.

Разделы T.3, T.4 регламента содержат информацию о шаблонах, представленных на рисунке 1, которым должна соответствовать несущая конструкция:

- шаблон перцентиля;
- шаблон кокпита;
- шаблон поперечного сечения кокпита. [23]

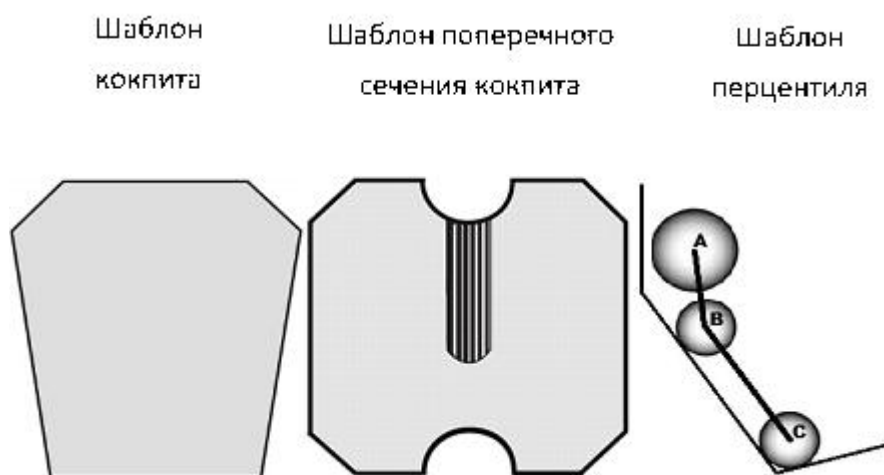


Рисунок 1 – Шаблоны для несущей конструкции

2.1. Шаблон перцентиля

Данный шаблон соответствует параметрам 95-го перцентиля мужчины, используемых в краштестах. Его параметры были подобраны в соответствии размерами и массой среднестатистического человека.

Регламент FS Rules 2022 описывает правильное расположение шаблона в автомобиле, как показано на рисунке 2:

- сиденье должно быть отрегулировано в крайнее заднее положение;
- педали должны быть установлены в крайнее переднее положение;
- нижний круг диаметром 200 мм, должен быть расположен на дне сиденья. Расстояние между центром данного круга и крайней задней поверхностью педалей должно составлять не менее 915 мм.;
- средний круг должен быть расположен на спинке сиденья;
- верхний 300-миллиметровый круг должен быть расположен на расстоянии 25 мм от подголовника. [23]

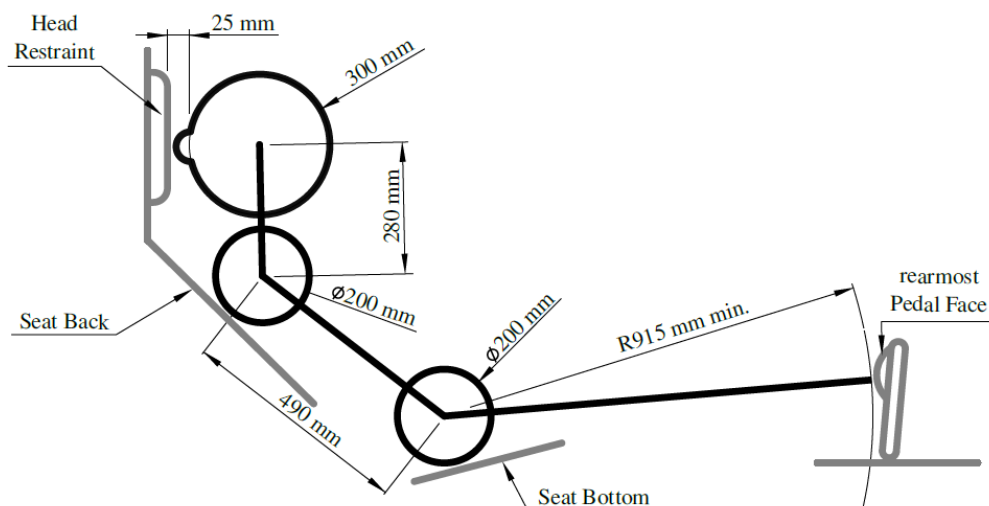


Рисунок 2 – Расположение шаблона перцентеля

При описанном выше расположении шаблона, должен оставаться зазор равный 50 мм над шлемом пилота, если производить измерение от линии между верхних точек главной и передней дуг автомобиля. Кроме этого, если распорки главной дуги находятся сзади, то необходим зазор 50 мм от линии, проведенной между верхней точкой главной дуги и нижней точкой ее распорки, как показано на рисунке 3.

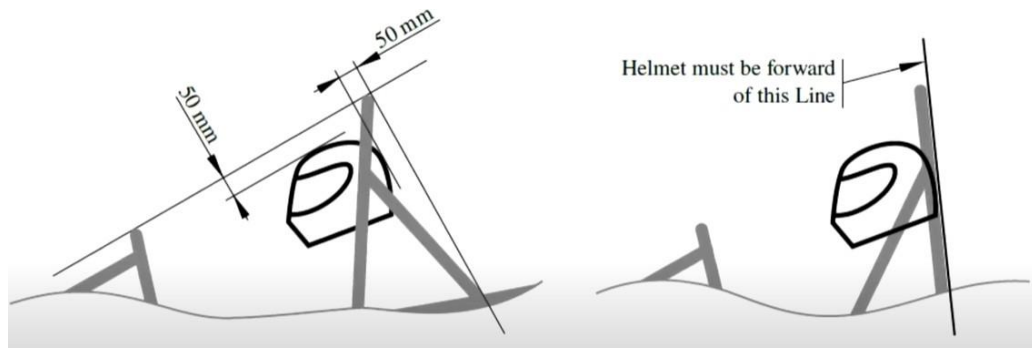


Рисунок 3 – Минимальный зазор над шлемом пилота

2.2. Шаблон кокпита

Данный шаблон, изображенный на рисунке 4, был разработан для проверки минимального размера проема кокпита в соответствии с требованием регламента. Дело в том, что в случае нештатной ситуации пилот должен как можно быстрее покинуть автомобиль и у него должно быть достаточно места для движений. Во время проверки шаблон должен быть перемещен без касания каких-либо элементов вертикально вниз кокпита до верхней части боковой защитной конструкции. Во время проверки разрешается демонтировать сиденье, рулевые колеса и рулевую колонку.

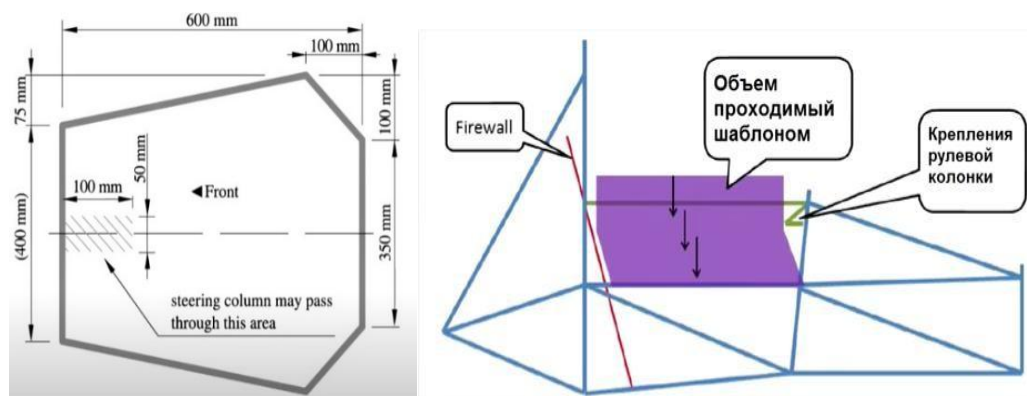


Рисунок 4 – Шаблон кокпита

2.3. Шаблон поперечного сечения

Для прохождения проверки данным шаблоном необходимо, чтобы кокпит имел свободное внутреннее поперечное сечение, достаточное для того, чтобы шаблон, показанный справа на рисунке 5, проходил от проема кокпита до точки, расположенной на расстоянии 100 мм задней поверхности педали в нерабочем положении. Рулевое колесо и любая обивка, которую можно снять без использования инструментов, могут быть сняты во время проверки.

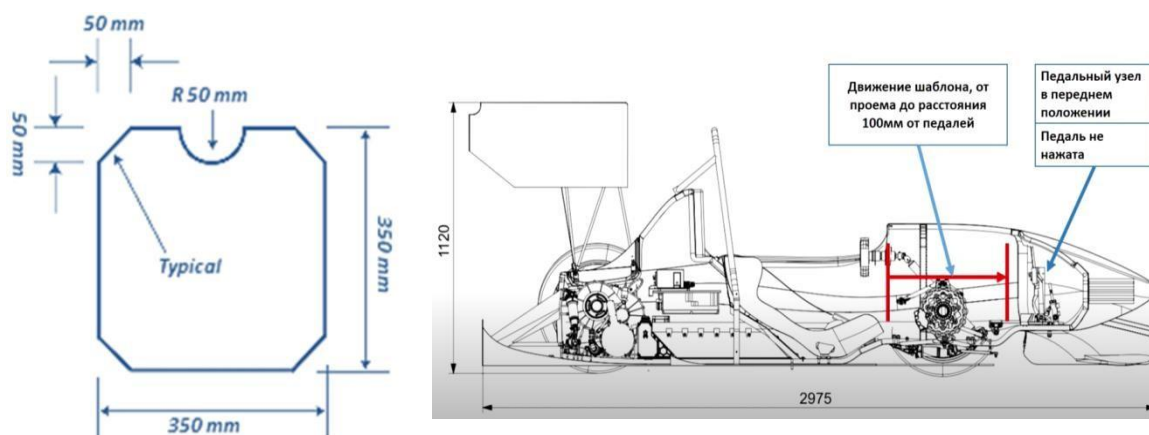


Рисунок 5 – Шаблон поперечного сечения кокпита

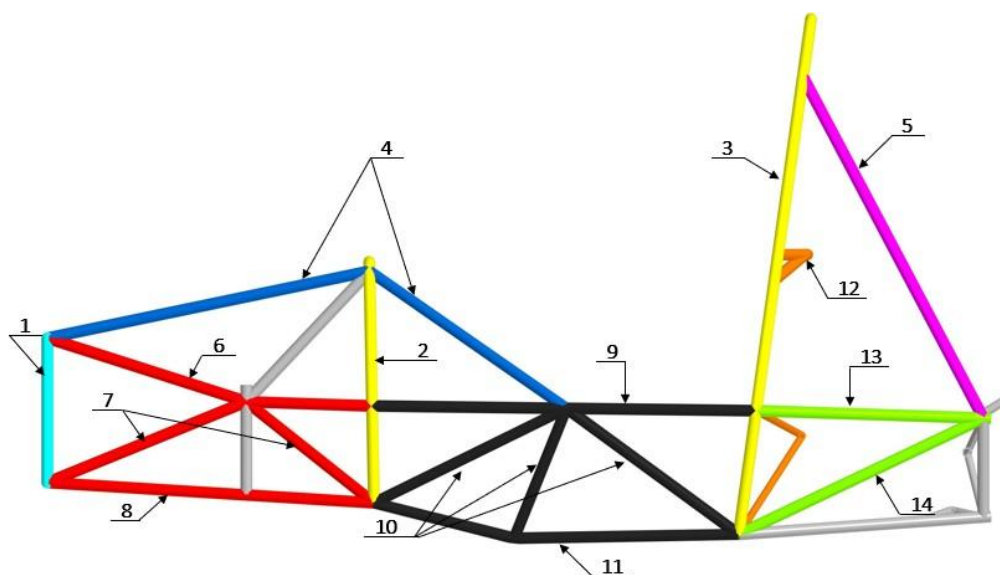
2.4. Основные требования к конструкции рамы

Согласно разделу регламента Т.3 несущая конструкция должна иметь следующие составляющие:

- главной дуга с распорками и их опорами;
- передняя дуга с распорками и их опорами;
- боковые защитные конструкции;
- передняя перегородка и ее опоры. [23]

На рисунке 6 наглядно представлена типовая рама болида класса

Formula Student с наименованием ее составляющих.



- 1 – передняя перегородка; 2 – передняя дуга; 3 – главная дуга; 4 – распорки передней дуги; 5 – распорки главной дуги;
6 – верхний элемент опоры передней перегородки; 7 – диагональный элемент опор передней перегородки;
8 – нижний элемент опор передней перегородки; 9 – верхний элемент боковой защитной структуры;
10 – диагональный элемент боковой защитной структуры; 11 – нижний элемент боковой защитной структуры;
12 – монтажная перемычка плечевого ремня; 13 – верхний элемент опор распорок главной дуги,
14 – нижний элемент опор распорок главной дуги

Рисунок 6 – Составляющие типовой рамы болида класса Formula Student

Регламентом также описаны требования к материалу, минимальной толщине, минимальной площади труб и минимальной площади момента инерции. В качестве материала для рамы мы берем сталь, в таблице 1 приведены требования к трубам в соответствии с их расположением.

Но в том случае, если используется альтернативный материал, то регламентом прописаны следующие исключения:

- главная дуга и крепление главной дуги должны быть выполнены из стали;
- передняя дуга должна быть выполнена из металла;
- сварные элементы основной конструкции должны быть стальными, однако передняя дуга может быть алюминиевой сварной конструкцией. [23]

Таблица 1 – Минимальные требования к трубам

Наименование трубы	Минимальная толщина	Минимальная площадь	Минимальная площадь момента инерции
Главная дуга	2 мм	175 мм ²	11 320 мм ⁴
Передняя дуга			
Крепление плечевых ремней			
Боковая защитная конструкция	1,2 мм	119 мм ²	8 509 мм ⁴
Передняя перегородка			
Распорка главной и/или передней дуги			
Опора передней перегородки	1,2 мм	91 мм ²	6 695 мм ⁴
Опора распорки главной дуги			

Кроме этого, перед тем, как приступить к разработке несущей конструкции следует знать, что регламент требует соблюдения принципа триангуляции, изображенного на рисунке 7.

Триангуляция - это инженерная практика формирования жестких треугольников вместе с соответствующими крепежными элементами на стыках. Обычно это связано с использованием треугольных форм для придания устойчивости конструкциям.

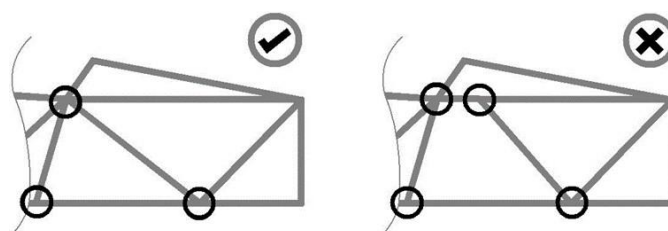


Рисунок 7 – Примеры триангуляции (слева - ОК, справа - NOK)

2.4.1. Требования регламента относительно передней дуги

Передняя дуга должна быть изготовлена из цельного и замкнутого профиля. Если передняя дуга состоит более чем из одной детали, она должна

поддерживаться триангуляцией от узла к узлу или эквивалентной конструкцией.

При виде сбоку ни одна часть передней дуги не может быть наклонена более чем на 20° от вертикали. [20]

2.4.2. Требования регламента к распорке передней дуги

Распорки передней дуги должны крепиться с каждой стороны передней дуги. Таким образом необходимы минимум две трубы без каких-либо изгибов, находящиеся на одной линии, если смотреть на раму сбоку.

Распорка передней дуги должна быть прикреплена не ниже 50 мм, чем нижний край самой верхней поверхности передней дуги.

Если передняя дуга наклонена более чем на 10° назад, требуются дополнительные распорки, выступающие назад.

2.4.3. Требования регламента относительно главной дуги

Главная дуга должна быть изготовлена из цельного куска неразрезанной непрерывной стальной трубы закрытого сечения.

При виде сбоку часть главной дуги, которая находится выше верхней точки крепления к боковой конструкции, должна быть наклонена менее чем на 10° от вертикали.

На виде сбоку любые изгибы главной дуги выше верхней точки ее крепления к основной конструкции должны быть прикреплены к узлу опорной конструкции крепления главной дуги с помощью труб, отвечающих требованиям распорки главной дуги.

При виде сбоку любая часть ниже верхней точки крепления к боковой ударной конструкции должна быть наклонена либо вперед, либо не более чем на 10° назад. [20]

2.4.4. Требования регламента относительно распорок главной дуги

Главная дуга должна поддерживаться спереди или сзади с помощью

распорных трубок с каждой стороны.

При виде сбоку, главная дуга и распорки не должны лежать по одну сторону от вертикальной линии, совпадающей с вершиной главной дуги.

Распорки главной дуги должны быть прикреплены к главной дуге не ниже, чем на 160 мм ниже самой верхней поверхности главной дуги. Прилежащий угол, образованный главной дугой и распорками, должен быть не менее 30° . Распорки главной дуги должны быть прямыми.

Нижние концы распорок главной дуги должны быть подперты назад к верхней точке крепления главной дуги к боковой защитной конструкции и к нижней точке крепления главной дуги к боковой защитной конструкции методом узловой триангуляции. Если какой-либо элемент, выходящий за пределы основной конструкции, прикреплен к распоркам главной дуги, требуется дополнительная распорка для предотвращения изгибающих нагрузок в случае опрокидывания. [20]

2.4.5. Требования регламента относительно боковой защитной конструкции

Боковая защитная конструкция должна состоять как минимум из трех стальных труб с каждой стороны кокпита. Верхний элемент должен соединять главную дугу и переднюю дугу. Он должен находиться на высоте от 240 мм до 320 мм над самой нижней внутренней точкой рамы между главной и передней дугами. Нижний элемент должен соединять низ передней дуги и низ главной дуги.

2.4.6. Требования регламента относительно передней перегородки

Любой альтернативный материал, используемый для передней перегородки, должен иметь прочность на сдвиг по периметру, эквивалентную стальному листу толщиной 1,5 мм.

2.4.7. Требования регламента относительно опоры передней перегородки

Передняя перегородка должна поддерживаться сзади передней дуги как минимум тремя трубками с каждой стороны; верхний элемент, нижний элемент и диагональная распорка для обеспечения триангуляции.

Верхний опорный элемент должен быть прикреплен к передней перегородке не более чем на 50 мм ниже самой верхней поверхности передней перегородки и прикреплен к передней дуге не более чем на 50 мм ниже верхнего элемента боковой защитной конструкции. Если точка крепления верхнего элемента находится более чем на 100 мм выше верхнего элемента боковой защитной конструкции, требуется треугольная распорка от узла к узлу для передачи нагрузки на главную дугу.

Нижний опорный элемент должен быть прикреплен к основанию передней перегородки и основанию передней дуги, а диагональные распорки должны триангулировать верхние и нижние опорные элементы от узла к узлу. [20]

Вывод по разделу

В данном разделе были рассмотрены основные требования регламента FS Rules 2022 к несущей конструкции и ее материалам. Данные требования необходимо учитывать перед началом проектирования конструкции.

Основными составляющими несущей конструкции являются главная и передняя дуги, боковая защитная конструкция и передняя перегородка.

В качестве материала изготовления рамы обычно используется сталь, но допустимо использование альтернативных материалов, которые обеспечат эквивалентную жесткость конструкции.

Соответствие рамы автомобиля регламенту проверяется в ходе технической инспекции при помощи трех шаблонов: шаблона кокпита, шаблона поперечного сечения кокпита и шаблона перцентиля.

3. Конструирование гоночного электроболида с оптимизацией несущей конструкции

3.1. Проектирование ходовой части автомобиля

Автомобильная подвеска — это система, состоящая из шин, пружин, амортизаторов и рычажных механизмов, которая соединяет транспортное средство с его колесами и обеспечивает относительное движение между ними. Системы подвески должны поддерживать как сцепление с дорогой/управляемость, так и плавность хода, которые противоречат друг другу. Разработка подвески предполагает поиск правильного компромисса. Для подвески важно удерживать опорное колесо в максимально возможной степени в контакте с поверхностью дороги, потому что все силы, действующие на дорогу или грунт, действуют на автомобиль через пятна контакта шин [1].

Подвеска гоночного автомобиля выполняет все те же задачи, что и подвеска гражданского автомобиля. Однако подвеска городского автомобиля универсальная, и предназначена для умеренной городской езды при разных погодных условиях. [10] Гоночная подвеска не может быть универсальной, она разрабатывается под определенные условия, на определенной трассе, иначе, весь потенциал автомобиля в гонке раскрыт не будет. Помимо этого, гоночный автомобиль развивает в разы большую скорость, по сравнению с городским автомобилем, следовательно, нагрузки на подвеску тоже выше.

Правильно спроектированная подвеска позволяет автомобилю раскрыть весь свой потенциал на трассе [11]. Очень важно держать сцепление с дорогой на протяжении всей гонки, особенно во время поворотов. Правильная подвеска позволит автомобилю не только не терять сцепление с дорогой, но и проходить все участки трассы на более высокой скорости, что значительно сократит время круга. [24]

Именно поэтому проектирование гоночного болида начинается с

выбора шин и разработки подвески [14]. Очень сложно или даже невозможно скомпоновать подвеску с необходимой геометрией уже в готовую раму или кузов, так как при разработке подвески придется отталкиваться от геометрии рамы, что приведет к большому количеству компромиссных решений, которые не лучшим образом скажутся на трекке во время гонки.

Таким образом, изначально выбираются наиболее подходящие шины и колесные диски. На выбор влияет множество факторов, зависящих от: концепции будущего болида, условий, в которых болид будет эксплуатироваться, необходимых сцепных характеристик и необходимой геометрии подвески. Все это расходные материалы для автомобиля, но очень дорогие, поэтому выбор должен быть хорошо обдуман и взвешен.

В большинстве своем студенческие команды инженерно-спортивных соревнований «Formula Student» используют колесные диски с посадочным размером 10 и 13 дюймов. [2] И тот и другой вариант хорошо показывает себя на трассах соревнований, при условии правильной геометрии подвески.

Десятидюймовые колесные диски больше подходят для команд, использующих монокок (альтернатива пространственной рамы, практически полностью выполненная из углеродного волокна с эпоксидными смолами) (рисунок 8). Дело в том, что десятидюймовые колесные диски меньше, поэтому опорный узел внутри колеса имеет небольшие размеры – это приводит к тому, что крепления рычагов подвески на несущей системе расположены достаточно близко. [5] Если монокок можно усилить в местах крепления подвески, то пространственную раму – нет. Если на пространственной раме крепления нагруженных узлов (таких, как подвеска), расположены близко друг к другу, то жесткость рамы значительно снижается [12]. Нежесткая рама не может обеспечить правильную работу подвески, она становится податливой.



Рисунок 8 – Болид класса Formula Student с системой монокок и колесами 10"

Преимущества десятидюймовых колес:

- небольшой вес колес и опорных узлов;
- снижение момента инерции;
- легкое рулевое управление;
- увеличение эффективности ускорения.

Пространственная рама надежна, проста в изготовлении и не требует больших финансовых затрат. Поэтому было принято решение о разработке болида с пространственной рамой. [16] По указанным выше причинам, для пространственной рамы подходят тринадцатидюймовые колеса (рисунок 9).



Рисунок 9 – Болид класса Formula Student с пространственной рамой и колесами 13”

Преимущества тринадцатидюймовых колес:

- снижение податливости рамы и подвески;
- увеличение сцепления;
- удобная компоновка опорных узлов;
- возможность установки более эффективной тормозной системы;
- увеличение максимальной скорости.

Для проектируемого болида были выбраны диски Keizer 13" Formula 4L и шины Hoosier Slicks 20.5×7-13". Данное решение обосновано тем, что это наиболее широкие колесные диски, для обеспечения более плотной посадки шин, это позволяет уменьшить угол увода.[11 - 14]

Помимо этого, необходимо знать сцепные характеристики шин, отталкиваясь от которых, происходит дальнейшее проектирование. [9] Для этого нами проводится ряд испытаний для определения коэффициента сцепления и площади пятна контакта при разных нагрузках с помощью специальных испытательных стендов (рисунок 10).

Получив данные по шинам, производится тягово-динамический расчет, исходя из данных по шинам, мощности двигателя, планируемого веса самого болида, а также условий трассы. На данном этапе определяется передаточное отношение трансмиссии, а также определяется ускорение и максимальная скорость болида. [13]



Рисунок 10 – Стенд для определения коэффициента сцепления шин

3.2. Тягово-динамический расчет

«Исходные данные, которые понадобятся для проведения тягово-динамического расчета болида класса «Formula Student» запишем в таблицу

2. Расчеты проведем с помощью методики, описанной в источнике.» [19].

Таблица 2 - Данные для проведения тягово-динамического расчета

Параметр	Значение
Колесная формула	4x2
Количество мест	1
Снаряженная масса m_0 , кг	280
Максимальная скорость V_{\max} , км/ч (м/с)	123,48(34,3)
Угловая скорость ω_e^{\max} , рад/с (об/мин)	3000
Максимальная мощность двигателя N_e^{\max} , кВт	52
Максимальный крутящий момент двигателя M_e^{\max} , Н·м	226
Тип и размерность колеса	200/75R13
Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x	0,7
Величина максимального преодолеваемого уклона i , %	0,34
КПД трансмиссии $\eta_{\text{тр}}$	0,93
Габаритная ширина автомобиля B , мм	1444
Габаритная высота автомобиля H , мм	1136
Коэффициент сопротивления качению f_0	0,02
Передаточные числа:	
Первая передача U_1	3

«Подготовим исходные данные для тягового расчета.

Полная масса болида:

$$m_a = m_0 + m_q \cdot n + m_6 \cdot n, \quad (1)$$

где: m_0 – снаряженная масса болида, кг;

$m_{\text{ч}} = 75$ кг – масса одного человека;

n – число пассажиров;

$m_{\text{б}}$ – вес багажа.» [19]

$$m_{\text{а}} = 280 + 75 \cdot 1 = 365 \text{ кг}$$

Полный вес болида:

$$G_{\text{а}} = m_{\text{а}} \cdot g , \quad (2)$$

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

$$G_{\text{а}} = 365 \cdot 9,81 = 3580,7 \text{ Н}$$

«Болид имеет только задний привод, то есть задние колеса ведущие, примем распределение веса по осям в соотношении: 40% на передние колеса и 60% - на задние.» [19]

Вес, который приходится на ведущие колеса:

$$G_2 = 0,6 \cdot G_{\text{а}} = 0,6 \cdot 3580,7 = 2148,4 \text{ Н}$$

Вес, который приходится на ведомые колеса:

$$G_1 = 0,4 \cdot G_{\text{а}} = 0,4 \cdot 3580,7 = 1432,3 \text{ Н}$$

Параметры обтекаемости автомобиля.

Коэффициент обтекаемости

$$k = \frac{c_x \cdot \rho}{2} , \quad (3)$$

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

$$k = \frac{0,7 \cdot 1,293}{2} = 0,452$$

Лобовая площадь автомобиля

$$F = 0,8 \cdot B \cdot H , \quad (4)$$

где: B – габаритная ширина автомобиля, м;

H – габаритная высота автомобиля, м.

$$F = 0,8 \cdot 1,44 \cdot 1,136 = 1,312 \text{ м}^2$$

«Так как размер шин был выбран 200/75R13, то радиус качения данной шины будет рассчитываться по формуле:

$$r_k = 0,5 \cdot d + \lambda_z \cdot H , \quad (5)$$

где: d – посадочный диаметр шины, м;

$\lambda_z = 0,85$ – коэффициент вертикальной деформации;

H – высота профиля шины, м.» [19]

$$r_k = 0,5 \cdot 0,33 + 0,85 \cdot 0,15 = 0,293 \text{ м}$$

«Внешняя скоростная характеристика (ВСХ) двигателя.

ВСХ двигателя рассчитывается по формуле:

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

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

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

N_e – текущее значение эффективной мощности двигателя, Вт.

Для того, чтобы построить кривую эффективного момента M_e (Н·м) необходимо применить следующую формулу:

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

Далее рассчитываем зависимости $N_e(\omega_e)$ и $M_e(\omega_e)$.

Данные, которые были получены при испытаниях двигателя, приведены в таблице 3. Результаты расчетов сводим в таблицу 7 и представляем в виде графика (рисунок 11, 12).» [19]

Таблица 3 - Результаты со стенда испытания двигателя.

$M_e, \text{Н} \cdot \text{м}$	$n_e, \text{об/мин}$	$N_e, \text{кВт}$
225,4	1329	30556
223,4	1464	33378

Продолжение таблицы 3

$M_e, \text{Н} \cdot \text{м}$	$n_e, \text{об/мин}$	$N_e, \text{кВт}$
221,4	1533	34644
216,6	1814	40098
212,6	1954	42382
210,4	1980	42518
208,4	2049	43568
210,4	2115	45426
222,8	2243	51004
204,2	2368	49362
196	2481	49616
183,6	2545	47680
181,6	2575	47712
165	2706	45568
158,8	2782	45102
150,6	2823	43388
143,4	2882	42168
134,2	2966	40590

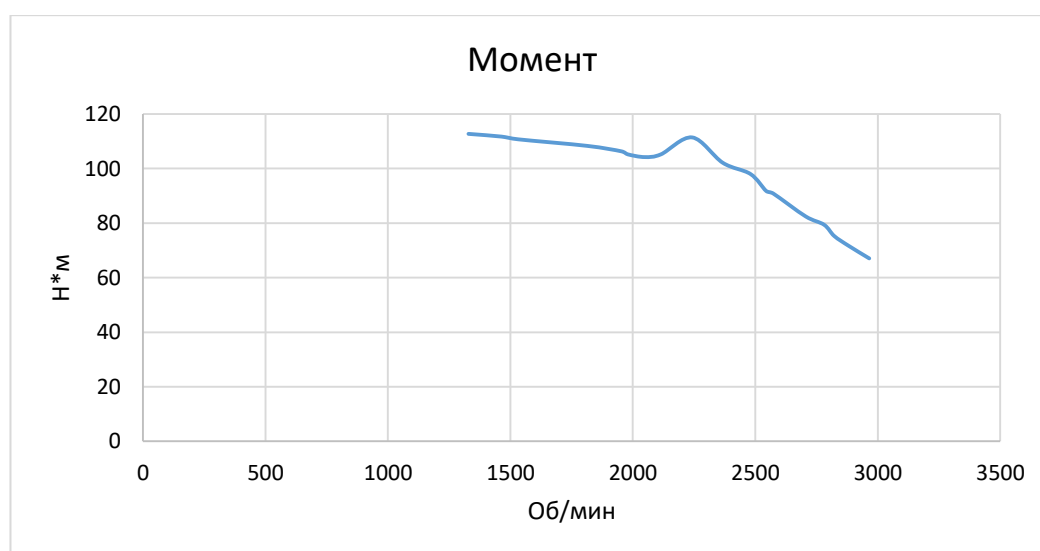


Рисунок 11 - График зависимости крутящего момента от частоты вращения со стенда

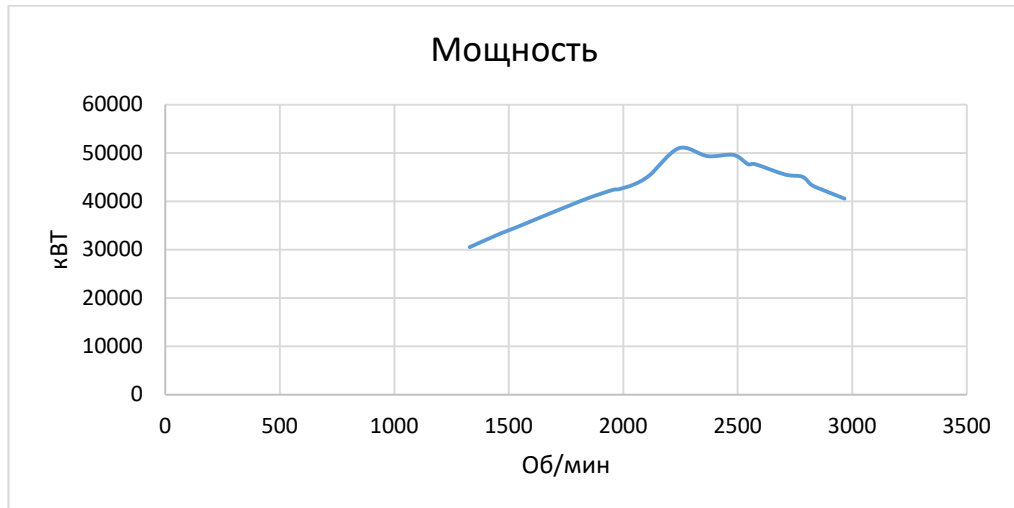


Рисунок 12 - График зависимости мощности от частоты вращения со стенда

«Передаточное число U_0 определяется, исходя из заданного значения максимальной скорости автомобиля V_{max} и передачи на которой мы хотим достигнуть эту скорость. Опыт прошлых лет показал, что на соревнованиях в динамических дисциплинах, не используется больше трех передач и нет возможности из-за конфигурации трассы достигнуть максимальную скорость. В болиде на электрической тяге отсутствует коробка переключения передач, потому исходя из этого подбираем главную передачу позволяющая достигнуть хороших показателей на всех дисциплинах.» [19]

Расчет производится по данной формуле:

$$U_0 = \frac{r_k \cdot \omega_{max}}{U_4 \cdot V_{max} \cdot U_0'} \quad (8)$$

$$U_0 = \frac{0,293 \cdot 356,5}{1 \cdot 34,81} = 3$$

«Силовой баланс болида.

Уравнение силового баланса:

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

где: F_T – сила тяги ведущих колес, Н;

F_d – сила дорожного сопротивления, Н;

F_B – сила сопротивления воздуха, Н;

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

Силу тяги рассчитаем по формуле:

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

Силу аэродинамического сопротивления воздуха найдем из выражения:

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

Силу дорожного сопротивления автомобиля (без учета сопротивления подъему) найдем из выражения:

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

где: $f = f_0 \cdot \left(1 + \frac{V_a^2}{2000}\right)$ – зависимость коэффициента трения качения от скорости движения болида.» [19]

«Далее пользуемся выбранными при расчете ВСХ значениями ω_e , приводим в соответствие с ними скорости болида и результат сводим в таблицу 4.» [19]

Таблица 4 – Силовой баланс автомобиля

Рсц	2140	2140	2140	2140	2140	2140	2140	2140
об/мин	1300	1800	2000	2400	2700	2800	2900	3000
ω_e	157	188,5	240,9	261,8	303,7	324,6	345,6	356,5
Me	226	220	210	204	164	150	142	134
V	15,333	18,410	23,527	25,569	29,661	31,702	33,753	34,818
Pt	2152,1	2094,8	1999,6	1942,5	1561,6	1428,3	1352,1	1275,9
Pв	139,43	200,99	328,27	387,70	521,74	596,02	675,63	718,92
Pд	75,646	79,160	86,424	89,815	97,465	101,70	106,24	108,71
f	0,022	0,023	0,025	0,026	0,028	0,030	0,031	0,032

На рисунке 13 представлено графическое отображение табличных данных.

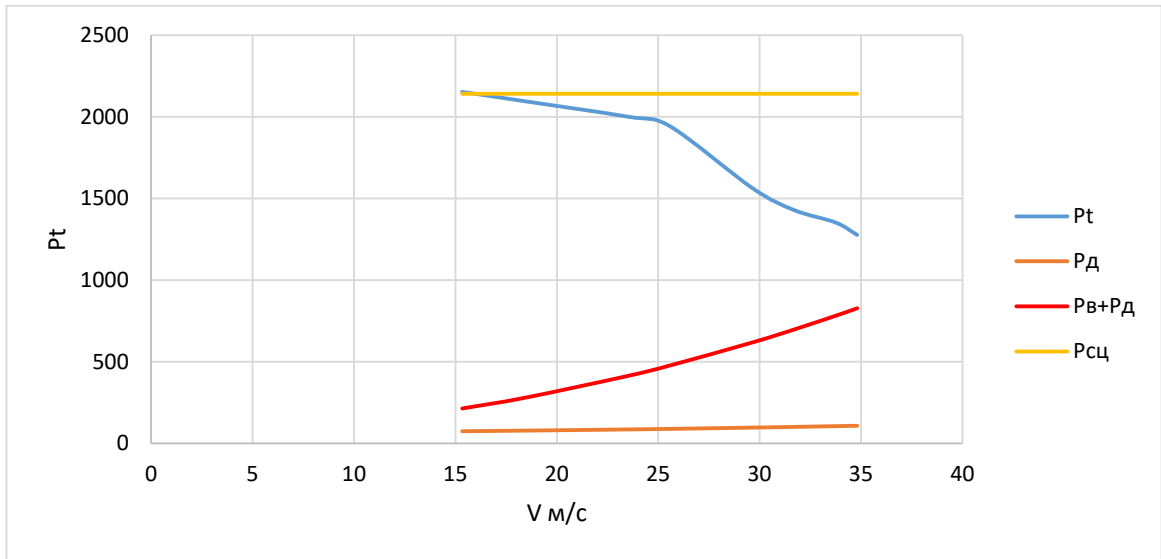


Рисунок 13 – Тяговый баланс болида

«Динамическая характеристика автомобиля

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

По приведенной формуле и данным силового баланса мы можем рассчитать и построить динамическую характеристику болида, которая будет являться графическим изображением зависимости динамического фактора D от скорости движения при полной загрузке болида.» [19]

«Данные расчета занесем в таблицу 5 и представим графически на рисунке 14.

Для того, чтобы учесть влияние буксования ведущих колес, определим динамический фактор по сцеплению:» [19]

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

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

Таблица 5 - Данные расчета динамической характеристики

Динамическая характеристика автомобиля D							
0,594	0,559	0,493	0,459	0,307	0,245	0,199	0,165

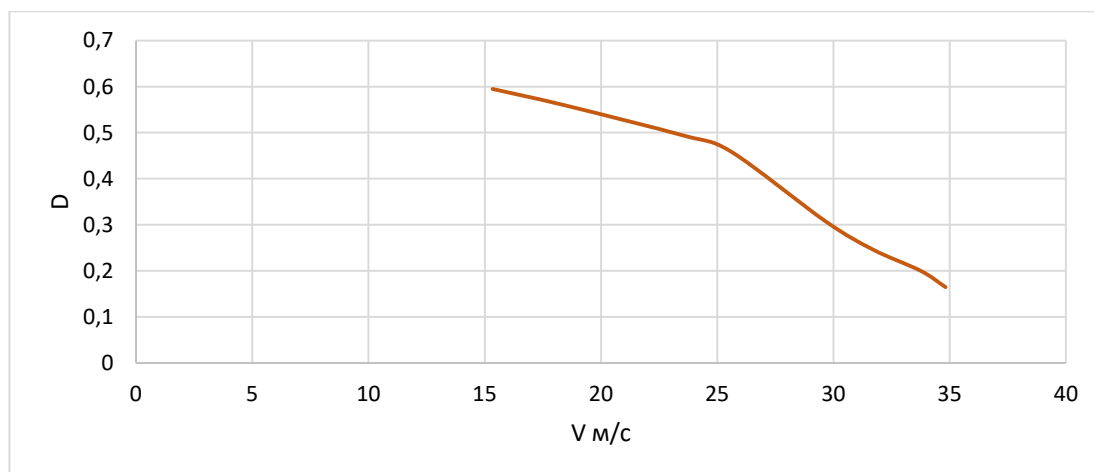


Рисунок 14 - Динамическая характеристика автомобиля

Разгон автомобиля.

«Ускорение во время разгона определим для такого случая, в котором автомобиль движется по горизонтальной дороге с твердым покрытием хорошего качества при максимальном использовании мощности двигателя и отсутствии буксования ведущих колес.

Ускорение найдем из выражения:» [19]

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

«где: $\delta_{вр} = 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_k^2)$ – коэффициент учета вращающихся масс двигателя, который определим по формуле:

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

Данные, полученные в ходе решения, представим в таблице 6 и изобразим графически на рисунке 15.» [19]

Таблица 6 – Значения ускорения при разгоне

Ускорение автомобиля j , m/c^2							
4,639	4,347	3,796	3,509	2,257	1,750	1,366	1,073

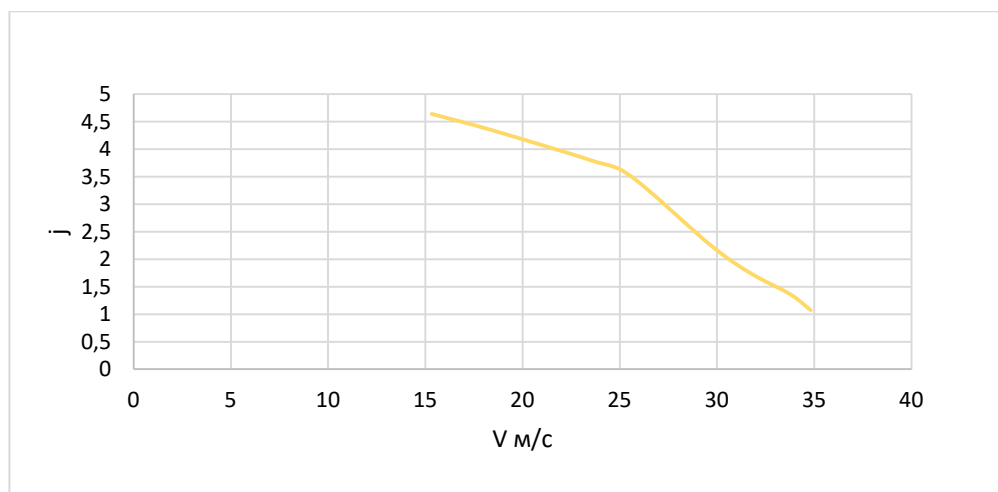


Рисунок 15 - Ускорение автомобиля при разгоне

«Далее определили значения обратных ускорений ($1/j$) и изобразили их на рисунке 16 и внесли их в таблицу 7. Так как при скоростях, близких к максимальным значениям, ускорение стремится к нулю, то для расчета обратных ускорений ограничиваются скоростью $V = (0,8-0,9) V_{max}$.» [19]

Таблица 7 – Значения обратных ускорений.

Обратные ускорения								
0,2	0,215	0,230	0,263	0,284	0,442	0,571	0,732	0,931

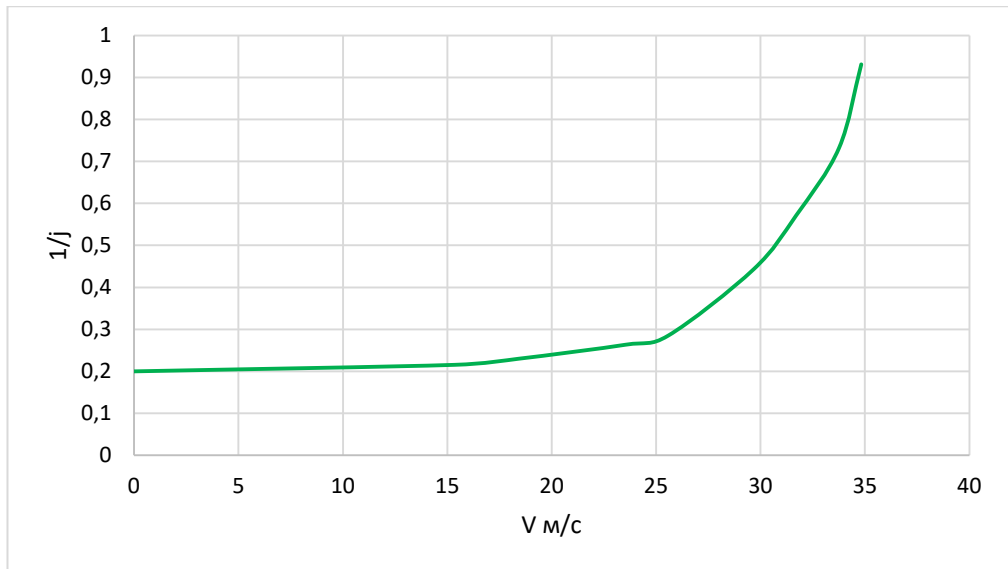


Рисунок 16 - Обратные ускорения автомобиля

Время и путь разгона.

«Время и путь разгона автомобиля мы определили графоаналитическим способом. Суть данного способа заключается в замене интегрирования суммой конечных величин:

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

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

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

где: k – порядковый номер интервала.» [19]

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

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

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

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

t_2 – время разгона до скорости V_2 .» [19]

Результаты данного расчета сведем в таблицу 8 и изобразим графически на рисунке 18.

Таблица 8 – Значения скорости и времени

$V_a, \text{ м/с}$	$t, \text{ с}$
15,33	3
18,41	3,67
23,52	4,92
25,56	5,47
29,66	6,95
31,7	7,98
33,75	9,31
34,81	10,18

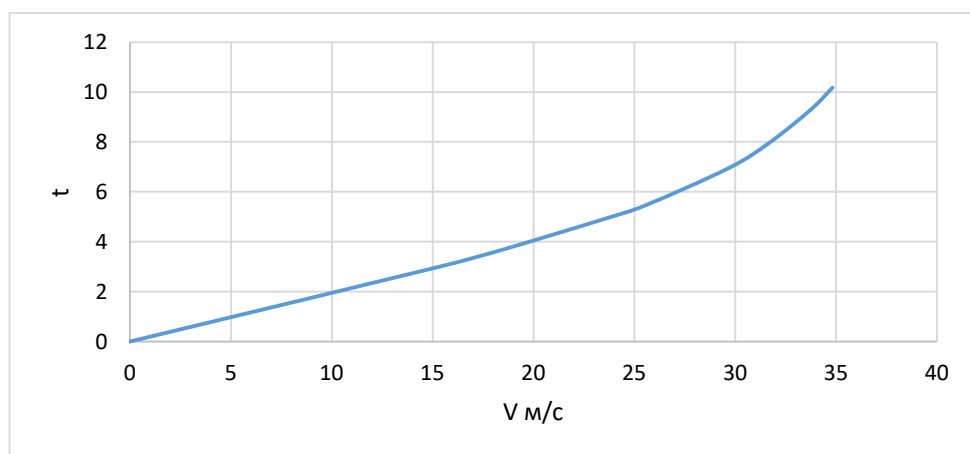


Рисунок 17 – Время разгона автомобиля

«Таким же образом провели графическое интегрирование (рисунок 19) зависимости $t=f(V)$ для получения зависимости пути разгона S от скорости болида.

В данном случае кривую $t=f(V)$ разбили на временные интервалы, для каждого из которых нашли соответствующие значения V_{cpk} .» [19]

«Площадь элементарного прямоугольника в интервале Δt_k - путь, преодолеваемый болидом от отметки t_{k-1} до отметки t_k , который движется с постоянной скоростью V_{cpk} .

Величину площади элементарного прямоугольника определили следующим образом:

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

где: k – порядковый номер интервала, m выбирается произвольно.

Путь разгона от скорости V_0 до скорости V_1 : $S_1 = \Delta S_1$, до скорости V_2 :

$$S_2 = \Delta S_1 + \Delta S_2, \text{ до скорости } V_n: S_n = \sum_{k=1}^m \Delta S_k \text{ .}» [19]$$

Результаты внесем в таблицу 9 и изобразим графически на рисунке 18.

Таблица 9 – Значение пути и скорости разгона

$v_a, \text{м/с}$	$S, \text{м}$
15,33	22,99
18,41	34,29
23,52	60,49
25,56	73,92
29,66	114,78
31,7	146,38
33,75	189,9
34,81	219,72

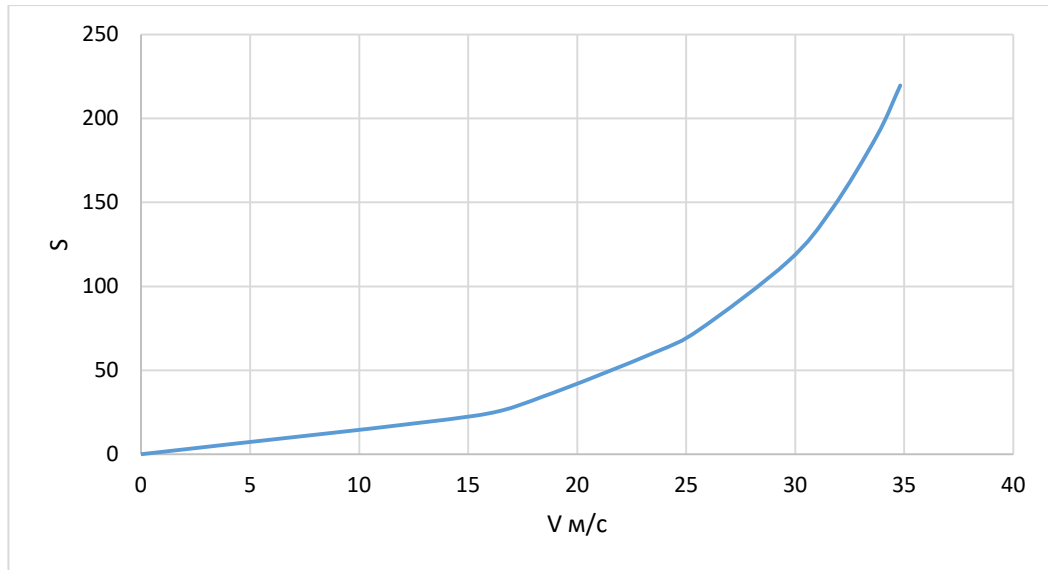


Рисунок 18 – Путь разгона болида

«Уравнение мощностного баланса:

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

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

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

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

N_f – мощность, затраченная на преодоление сил сопротивления подъему, Вт;

N_B – мощность, затраченная на преодоление сил сопротивления воздуха, Вт;

N_D – мощность, затраченная на преодоление силы инерции электроболида Вт.

Внесем полученные данные в таблицу 10 и изобразим зависимости на рисунке 19.» [19]

Таблица 10 – Значения мощностного баланса болида

Мощностной баланс автомобиля								
N_T	32998,6	38567,1	47047,7	49668,7	46320,2	45281,7	45639,9	44427,0
N_D	1159,9	1457,3	2033,3	2296,5	2890,9	3224,3	3586,2	3785,3
N_{D+N_B}	3297,9	5157,7	9757,1	12209,8	18366,4	22119,7	26391,3	28817,1

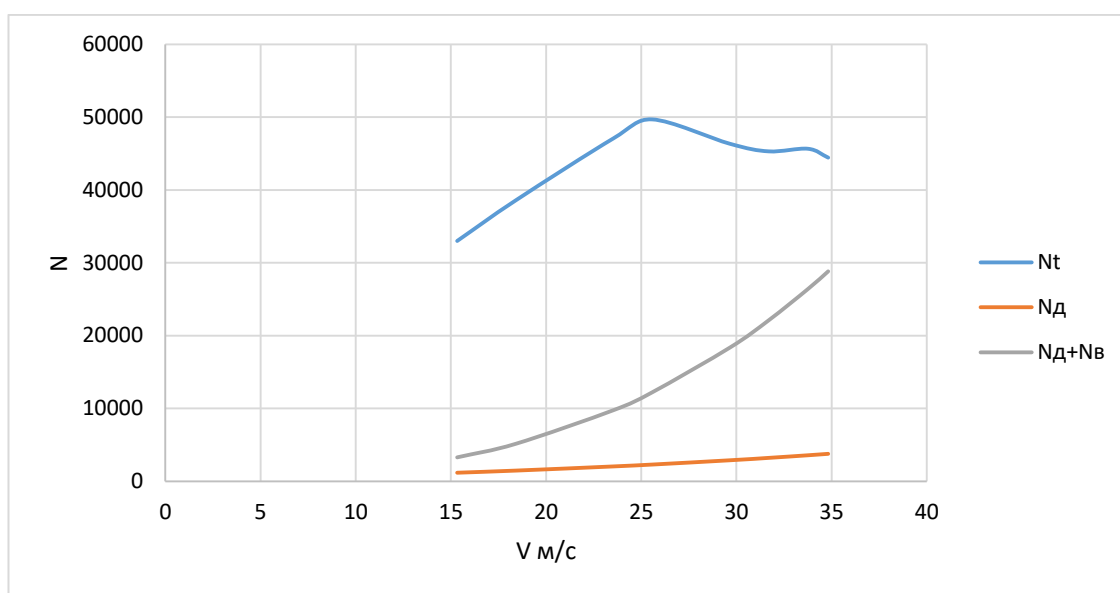


Рисунок 19 – Мощностной баланс автомобиля

Таким образом, получен комплекс необходимых характеристик для конструирования электроболида

3.3. Разработка конструкции аккумулятора

3.3.1. Проектирование несущей системы аккумулятора

Регламент Formula SAE Rules 2022 позволяет изготавливать контейнер аккумулятора из стали минимальной толщиной 2 мм, либо из алюминия минимальной толщиной 3,2 мм, либо из композита, если доказана его эквивалентность. Выбор был сделан в пользу алюминиевого сварного контейнера, так как это позволило нам выиграть в весе 30 % в сравнении со стальным контейнером при той же трудоемкости работ.

После того как были подобраны компоненты и определены габариты сегментов аккумулятора, был сконструирован сам контейнер. Внутреннее пространство контейнера, в соответствии с регламентом соревнований, было разделено на секции. Четыре секции заняли сегменты с энергетическими элементами, один сегмент с предохранителем и силовыми реле и еще одна секция была занята контроллерами, отвечающими за балансировку сегментов при заряде, контроле над температурой и исправностью аккумулятора, а также, понижения напряжения для зарядки слаботочной системы. [22]

Для удобства изготовления и сборки, детали контейнера были выполнены в виде конструктора. Это решение облегчило позиционирование деталей при сборке и сварке (рисунок 20).



Рисунок 20 – Внешний вид контейнера аккумулятора

Для аккумулятора было решено использовать элементы формата 21700.

Данный формат элементов был выбран, поскольку использование аккумулятора Samsung INR21700-40T на 29 % более выгодно с точки зрения тока на единицу мощности, чем Samsung INR18650-25R. Плотность энергии у Samsung INR21700-40T на 8 % выше, чем у Samsung INR18650-25R [25]. Чтобы получить аналогичные характеристики нашей батареи как при использовании элемента Samsung-INR21700-40T, потребуется на 38 % больше элементов Samsung-INR18650-25R, а вес аккумулятора вырастет как минимум на 8 % (рисунок 21). Таким образом, получаем 4 сегмента каждый из которых имеет 99 элементов, 9 параллелей и каждая параллель состоит из 11 последовательно соединенных элементов.

Так как мы используем аккумуляторы формата 21700 и их количество меньше чем 18650, то и количество термодатчиков необходимых для измерения нужно меньше (рисунок 22).

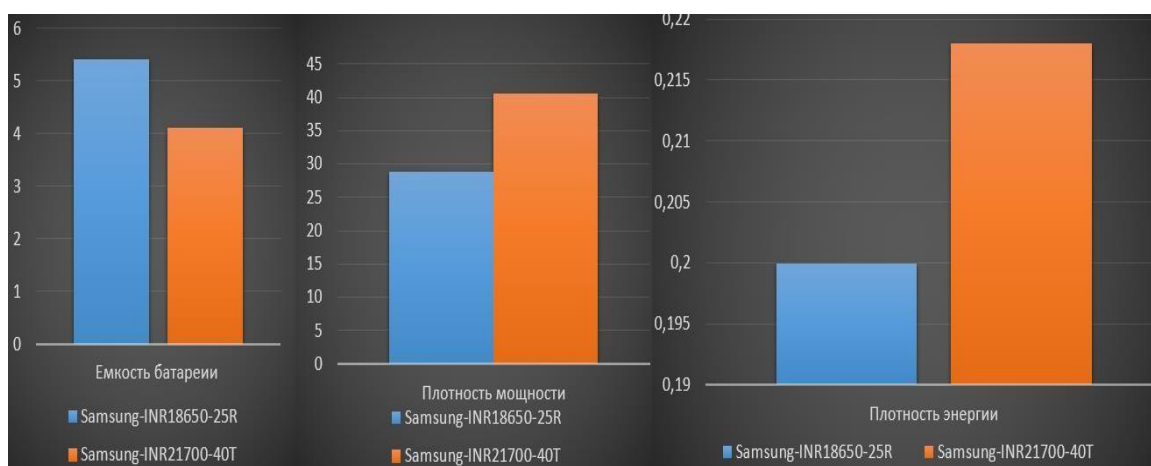


Рисунок 21 – Сравнение аккумуляторных батарей

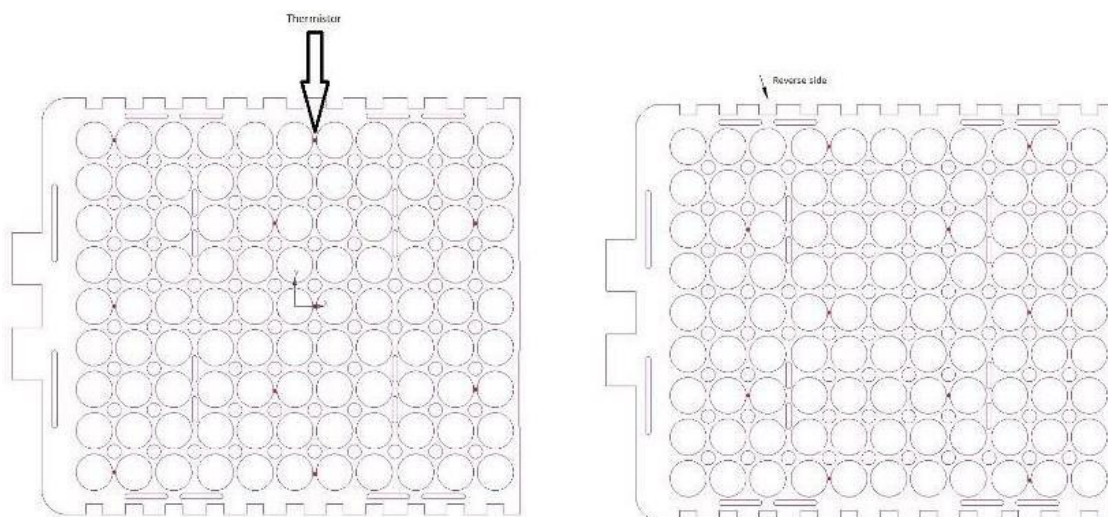


Рисунок 22 – Расположение датчиков контроля температуры

В центральном (главном) элементе (рисунок 23) располагаются изоляционные реле, резистор, предохранитель и датчик тока.

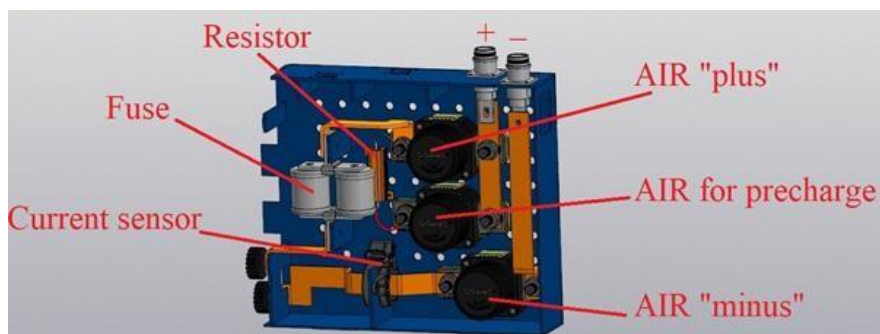


Рисунок 23 - Составляющие главного элемента

Элементы между собой соединяются медными шинами (рисунок 24).

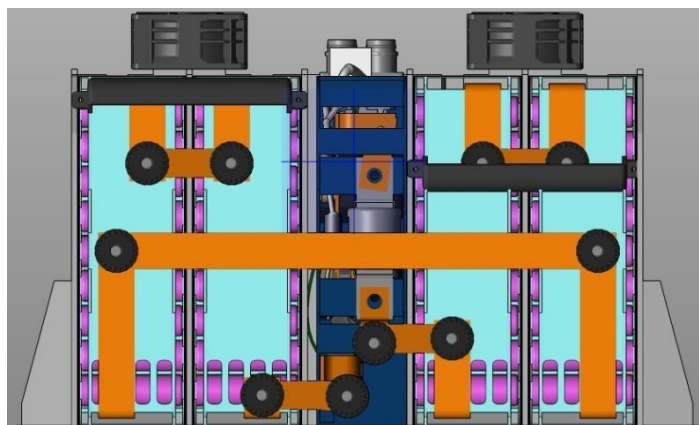


Рисунок 24 – Соединения медными шинами

Каждый сегмент скрепляется с помощью нескольких пластин из стеклопластика (рисунок 25). Первый слой обеспечивает форму сегмента, второй и третий служат для изоляции элементов.

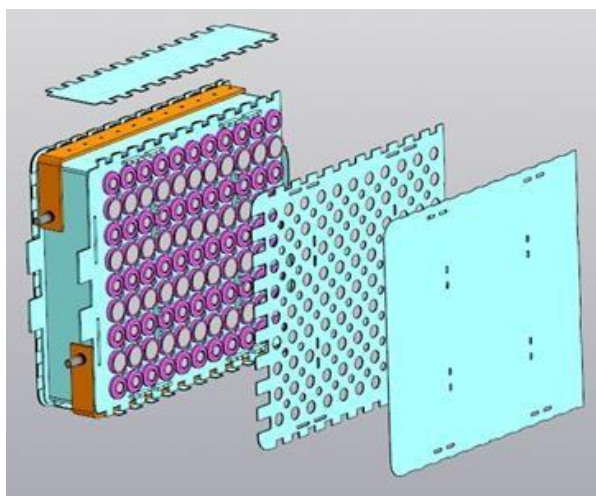


Рисунок 25 – 3D-модель модуля, содержащего 99 аккумуляторных элементов

Все необходимые пластины для сборки модулей были вырезаны на фрезерном ЧПУ-станке и склеены между собой в несущую конструкцию негорючей эпоксидной смолой, соответствующей стандарту UL94 V-0 (рисунок 26). В качестве эпоксидной смолы мы используем Biresin CR132

FR. Данная эпоксидная смола обеспечивает высокую жесткость, малый вес и при возгорании имеет свойство затухать [8].

В ходе разработки пластин было выявлено, что оптимальным для несущей конструкции пластин стоит использовать 12 слоев стеклоткани, для упорных пластин – 8 слоев, а для пластин выполняющих роль изоляции – 2 слоя. [3]

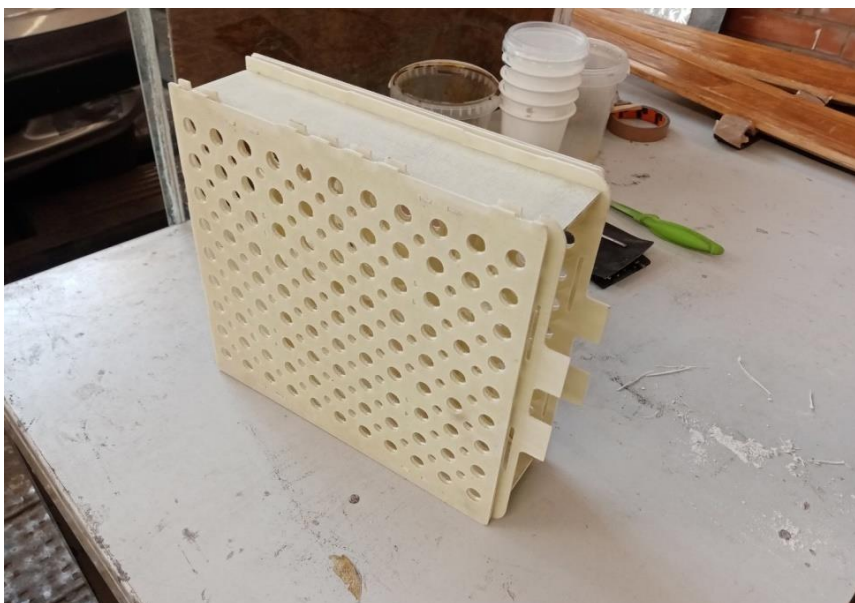


Рисунок 26 – Изготовленный корпус модуля АКБ

После того, как все пластины были склеены, клеиваем элементы аккумулятора на эпоксидную смолу с дробленным стеклом. На элементы клеены термодатчики, чтобы следить за температурами во время их работы. Поверх термодатчиков приваривается точечной сваркой никелевая лента, чтобы объединить все 99 элементов между собой и приклепываются медные шины, которые предварительно залудили. Процесс сборки изложен на рисунке 27.

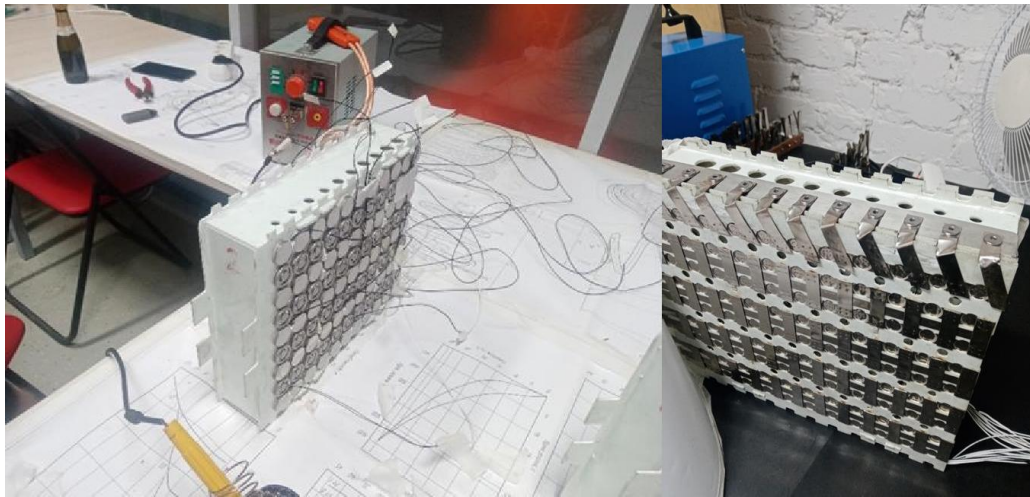


Рисунок 27 – Сборка модуля высоковольтной аккумуляторной батареи

Когда все модули собраны, они устанавливаются в контейнер и соединяются медными шинами, которые прикручиваются барашками, сделанные при помощи 3D- принтера с металлическими гайками внутри (рисунок 28).

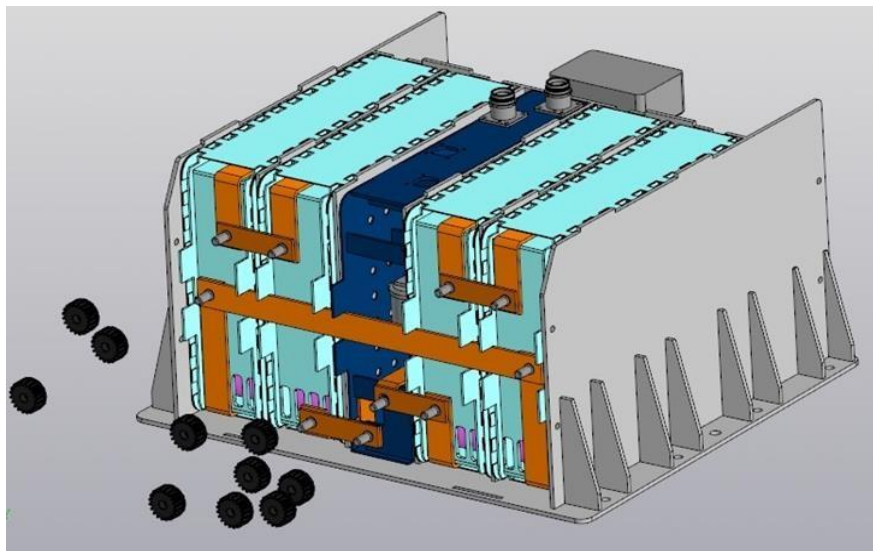


Рисунок 28 – 3D-модель сборки высоковольтной аккумуляторной батареи

3.4. Проектирование рамы гоночного болида на электротяге

За время существования проекта в Тольяттинском государственном университете были построены семь автомобилей с различными несущими конструкциями. Ежегодно преследовалась цель – облегчить несущую конструкцию, однако, как видно на рисунке 29, с 2018 года динамика изменения веса несущей конструкции стала отрицательной. Это было связано с повышением динамических показателей гоночного болида на трассе соревнований. Однако в этом году, причиной повышения массы рамы стал переход на электрическую силовую установку, что в свою очередь потребовало серьезной проработки конструкционных решений, в результате чего произошло удлинение рамы в задней части.

Вес рамы болида «EScorpion» составил 30 кг. Анализируя показатели изменения веса, можно прийти к выводу о том, что вес рамы электроболида, в сравнении с весом рамы первого болида (44 кг.), меньше на 32 %.

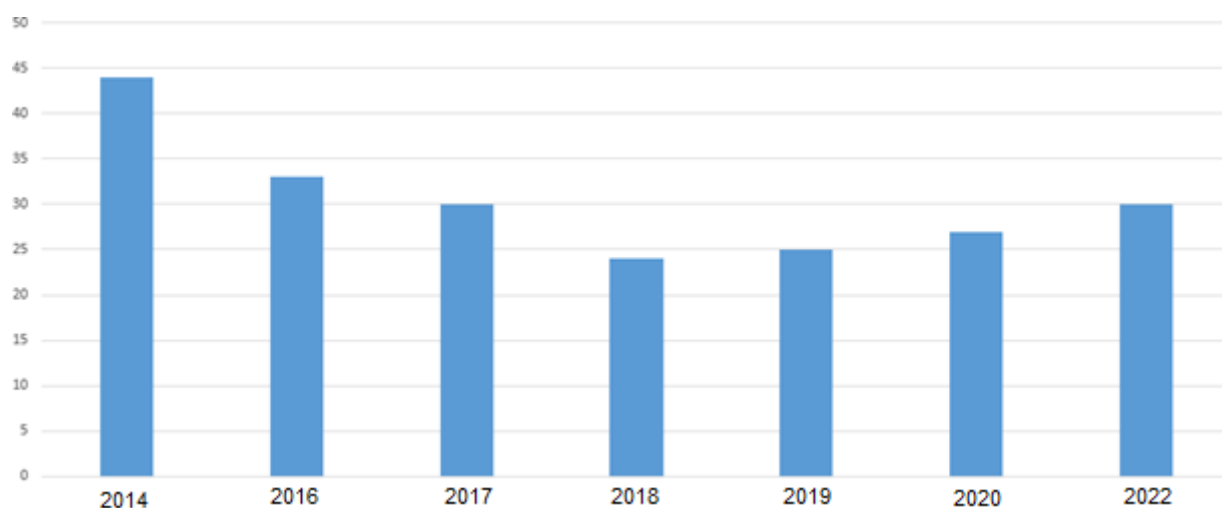


Рисунок 29 – Динамика изменения веса пространственной рамы болида

Разработку рамы вели параллельно с разработкой подвески и аккумулятора.

В первую очередь, были проанализированы требования регламента «Formula Student» для болидов класса EV. Затем, был определен основной фронт работ по проектированию несущей системы болида.

Поскольку регламентом [20] ограничены сроки постройки болида, было решено сконцентрировать внимание на задней части рамы. За основу была взята рама прошлого года и, в результате анализа конструкции, было решено оставить переднюю часть рамы без изменений (рисунок 30).

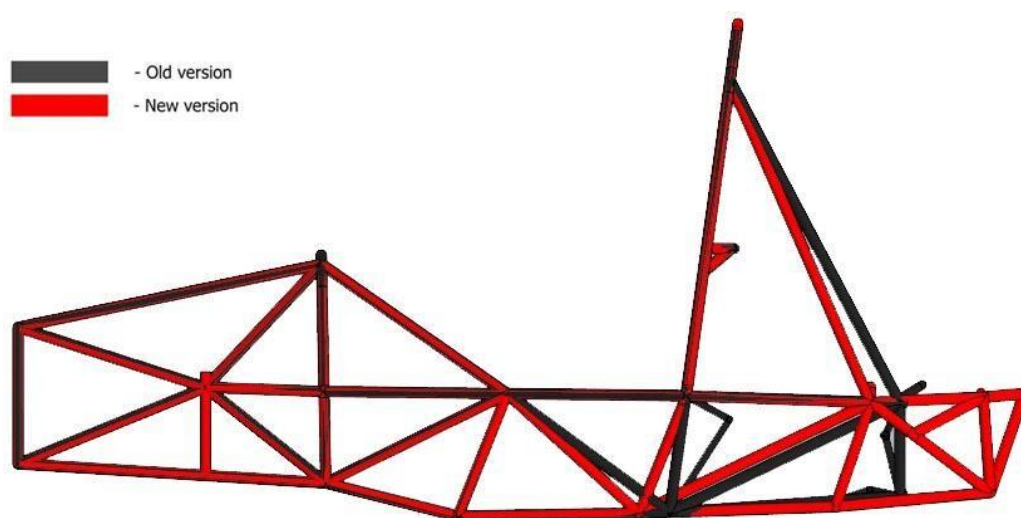


Рисунок 30 – Анализ конструкции рамы в сравнении с предшествующим вариантом

Доработка конфигурации задней части рамы, в основном была продиктована габаритами аккумулятора и трансмиссии. Если в случае с машиной с ДВС [5], мы могли сделать раму максимально короткой, за счет применения косых рычагов подвески и малых габаритов силовой установки, то в электроболиде требуется дополнительное место для размещения батареи и электромоторов (рисунок 31).

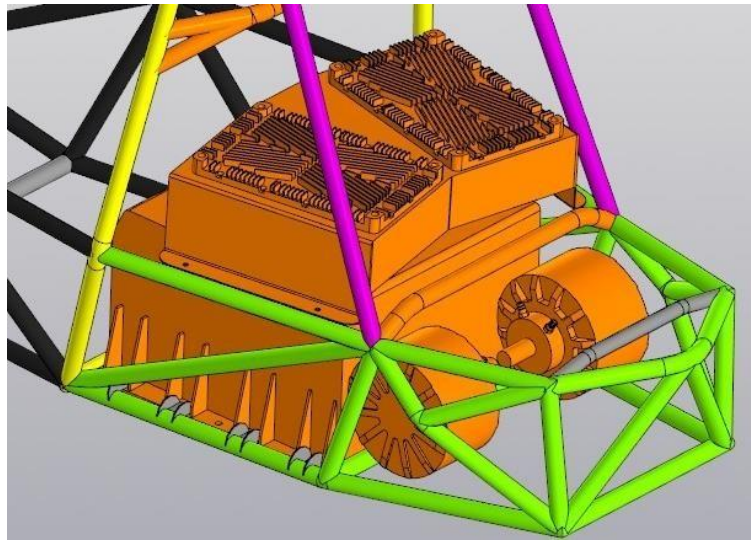


Рисунок 31 – Компоновка элементов высоковольтной системы

Первым серьезным изменением стала форма главной дуги. Ее нижнюю часть пришлось изогнуть во второй плоскости – для того, чтобы переместить нижнюю поперечную трубу рамы вперед. Это решение позволило установить контейнер аккумулятора ближе к центру болида и упростить установку аккумулятора в раму [15]. Следующим шагом потребовалось удлинить раму путем добавления дополнительной секции, в которой расположили электромоторы, элементы трансмиссии и кронштейны задней подвески (рисунок 32).

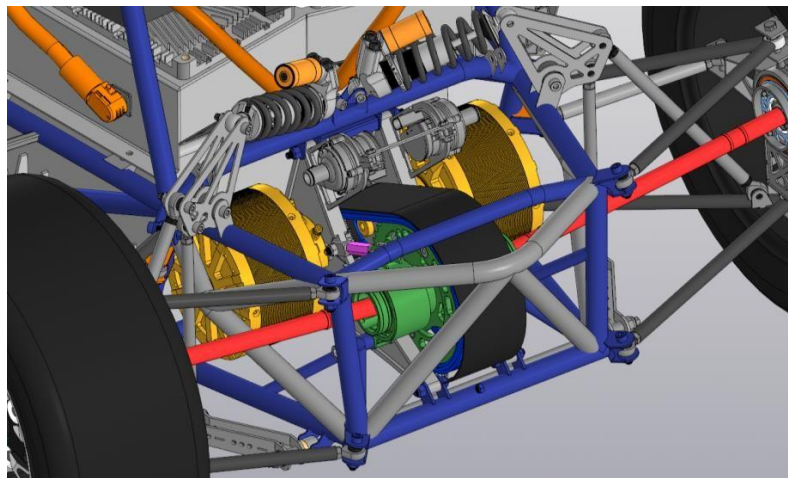


Рисунок 32 – Компоновка навесных узлов и агрегатов в задней части болида

Заключительной частью конструирования трехмерной модели рамы, стал подбор труб определенной толщины, в соответствии с регламентом проекта. Для электроботида было решено использовать трубы с более толстой стенкой, поскольку аккумулятор тяговой системы намного тяжелее, чем двигатель внутреннего сгорания. Схема компоновки труб с учетом толщины их стенок представлена на рисунке 33.

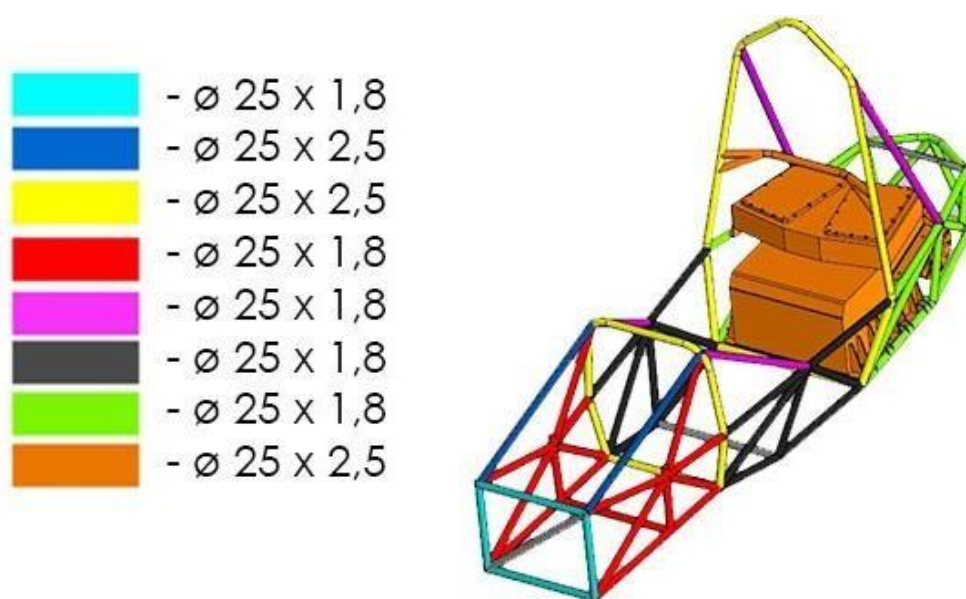


Рисунок 33 – Схема компоновки рамы электроботида

3.4.1. Подготовка одномерной расчетной модели

Для анализа рамы ботида на жесткость, была подготовлена модель рамы в виде образующих линий, по которым были протянуты нужные сечения. Так же, помимо основной несущей системы, была смоделирована упрощенная модель подвески. Далее была проведена симуляция нагружения и произведен анализ полученных деформаций.

Для выполнения расчета жесткости рамы на кручение использовали схему, представленную на рисунке 34. [4] Точки крепления рычагов задней

подвески к раме были определены как точки фиксации. Сила, в данном случае была приложена удаленно к точкам крепления рычагов передней подвески к раме. Для получения скручивающего момента была приложена одинаковая нагрузка в разных направлениях [21].

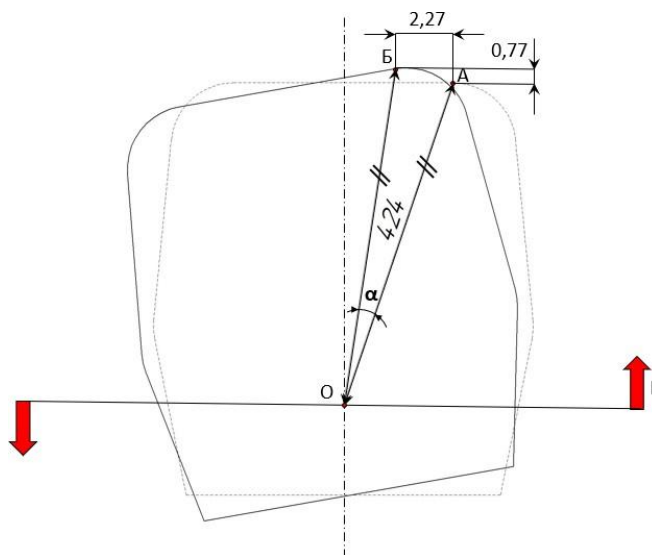


Рисунок 34 – Схема нагружения рамы в сечении передней дуги

«При скручивании рамы измеряется смещение. А сама жесткость на кручение C_p рассчитывается как отношение приложенного крутящего момента M_k к углу деформации рамы α_p :

$$C_p = \frac{M_k}{\alpha_p} \quad (20)$$

Величину крутящего момента рассчитаем по формуле:

$$M_k = P \cdot L \quad (21)$$

где P – величина силы, прикладываемой удаленно, Н;

L – половина длины трека, м.

Нагрузку, прикладываемую на рычаги передней подвески, примем, исходя из анализа источников равной 1500 Н.» [6]

«Определить угол деформации можно по формуле, исходя из схемы нагружения рамы (рисунок 35). Из схемы видно, что точка А при кручении рамы перемещается в точку Б. Расстояние между точками определяется по теореме Пифагора:

$$AB = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (22)$$

где x , y – расстояние между точками А и Б в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

Из схемы нагружения следует, что точка О лежит на оси автомобиля, а угол α является углом деформации рамы. Для нахождения угла α , рассмотрим треугольник ΔOAB , в котором отрезки ОА и ОВ являются равными. По теореме косинусов получаем следующую формулу:

$$AB^2 = OA^2 + OB^2 - 2 \cdot OA \cdot OB \cdot \cos \alpha_p \quad (23)$$

Формулу (5) можно представить в удобном виде для нахождения угла деформации рамы:

$$\cos \alpha_p = \frac{OA^2 + OB^2 - AB^2}{2 \cdot OA \cdot OB}$$

Тогда:

$$\alpha_p = \arccos \left(\frac{OA^2 + OB^2 - AB^2}{2 \cdot OA \cdot OB} \right) (5) \gg [6]$$

Максимальное смещение точки передней дуги под нагрузкой по оси Y составило 2,3 мм (рисунок 35), а по оси Z – 0,8 мм (рисунок 36).

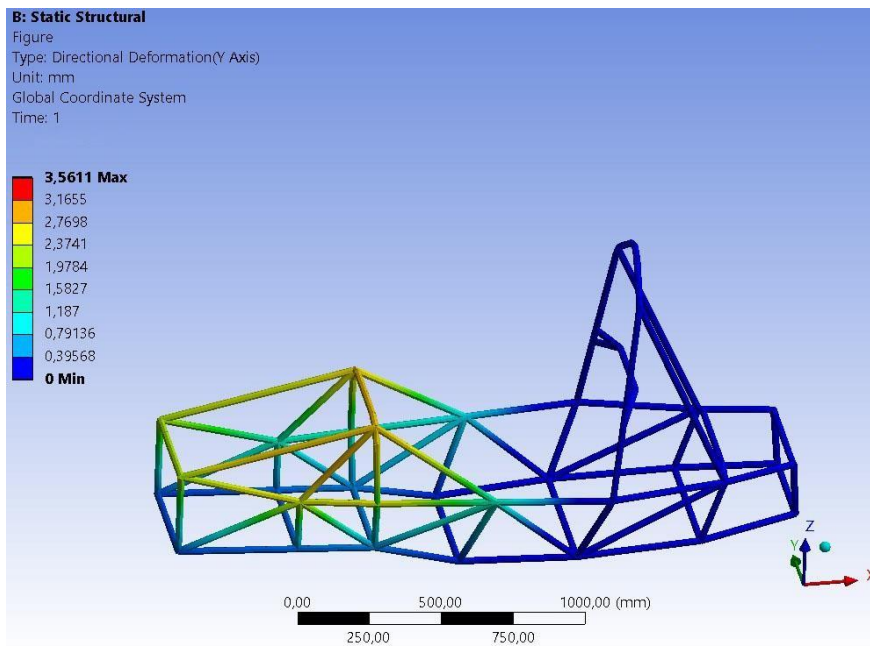


Рисунок 35 – Анализ рамы на кручение при повороте
 (по оси Y)

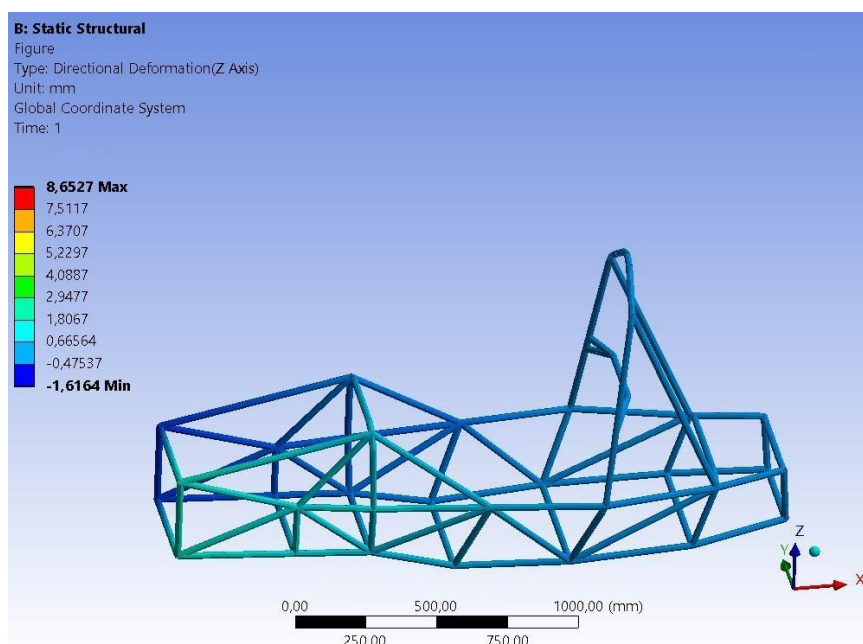


Рисунок 36 – Анализ рамы на кручение при повороте
 (по оси Z)

По результатам прочностного анализа, жесткость рамы на кручение

составила 2700 Н·м/град.

Затем проводился расчет рамы на кручение при торможении [12,13]. Результаты представлены на рисунках 37, 38. Максимальное смещение по оси Y составило 4,3 мм, а по оси Z – 1,6 мм.

Разница значений составляет 0,2 мм в меньшую сторону по сравнению с рамой болида 2020-2021 года «Scorpion G3».

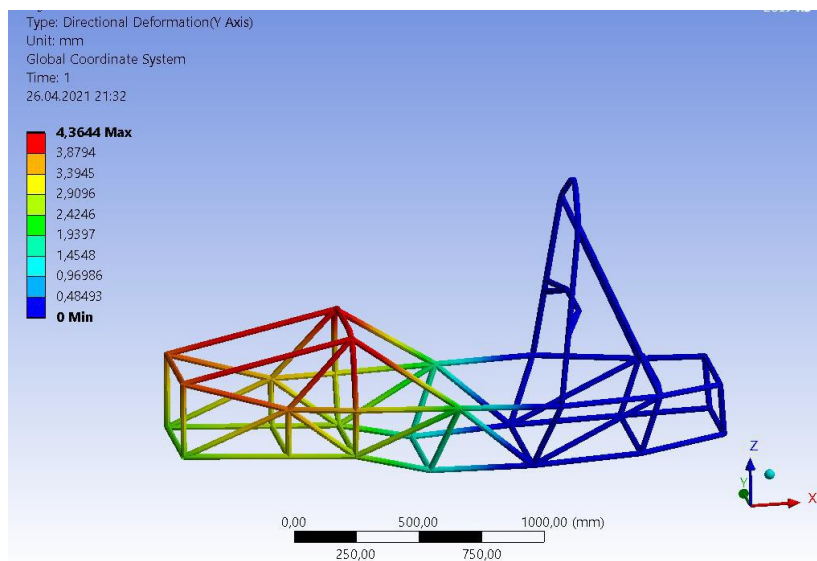


Рисунок 37 – Анализ рамы на кручение при торможении (по оси Y)

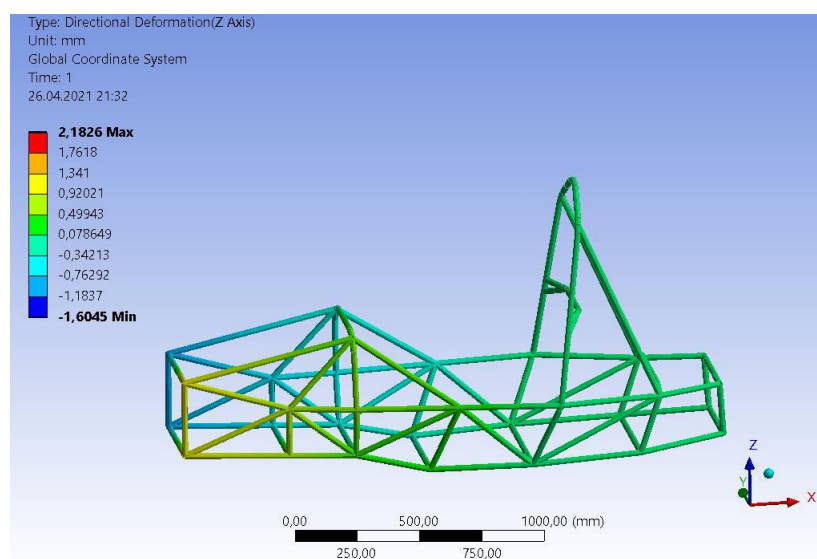


Рисунок 38 – Анализ рамы на кручение при торможении (по оси Z)

Сравнивая показатели веса болида 2021 года «Red Scorpion G3», можно увидеть, что вес рамы автомобиля «EScorpion» разнится в большую сторону на 3 кг. Причина заключается в том, что, несмотря на меньшую длину труб с толщиной стенки 1,8, пришлось добавить боковую защитную конструкцию, что привело к увеличению длины труб с толщиной стенки 1,5. С учетом внесенных изменений в конструкцию, такая разница в весе считается оптимальной.

3.4.2. Анализ конструкции согласно регламенту 2022 года

Основным отличием рамы компоновки болида с ДВС и электромотором является обязательное наличие триангуляции в задней части рамы у последней. Это требование необходимо для защиты элементов высоковольтной тяговой системы при столкновении [7]

Согласно регламенту Formula SAE Rules 2022, задняя часть рамы была триангулирована во фронтальной и боковой проекциях (рисунок 39).

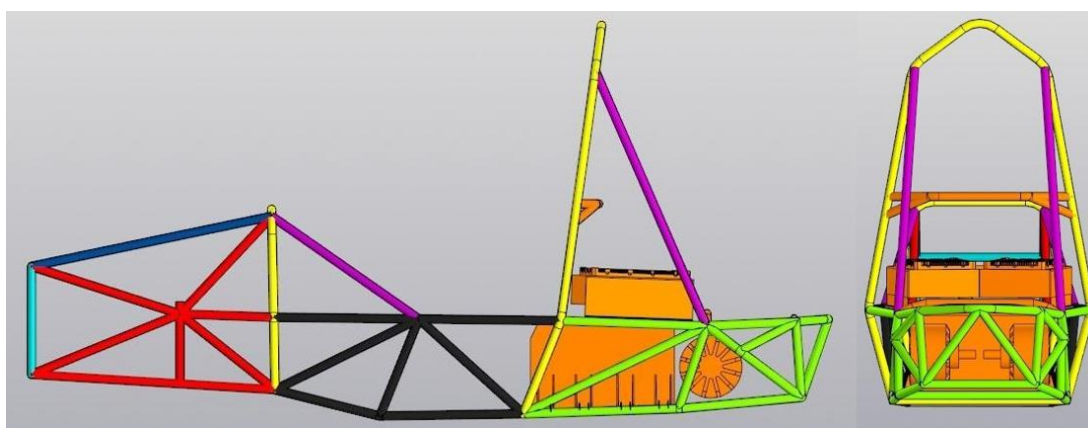


Рисунок 39 – Триангуляция рамы

Таким образом, с точки зрения регламента, увеличение габаритов и массы рамы полностью оправдано.

Так же по регламенту [20] точки крепления аккумулятора тяговой системы в случае непредвидимой ситуации должны выдерживать нагрузку в 20000 Н в любом направлении. Для того, чтобы доказать соответствие регламенту данной конструкции, был проведен ряд симуляций, которые показали, что предельные напряжения не превышают предела прочности, используемой стали (рисунок 40) [18].

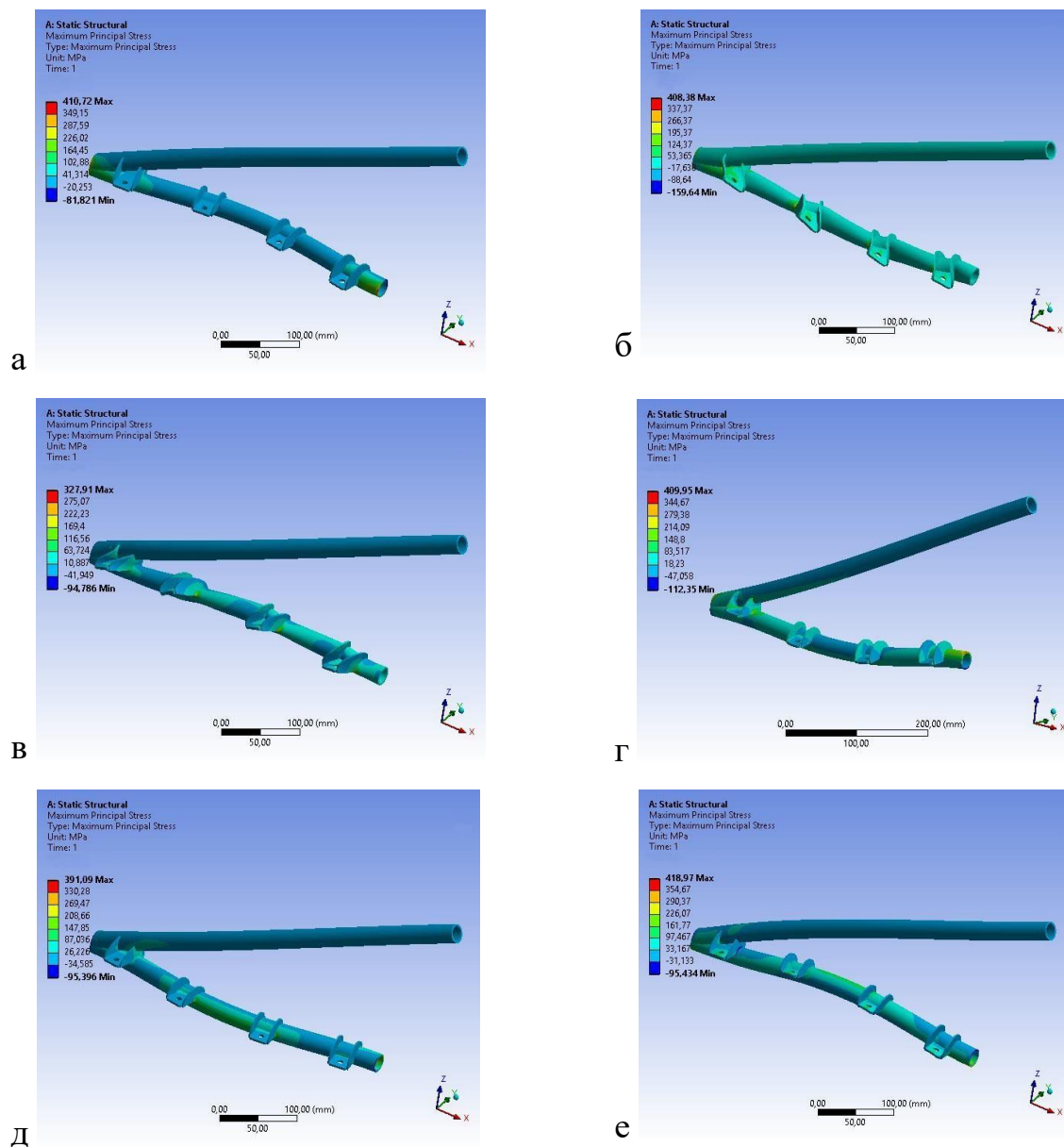


Рисунок 40 – Распределение напряжений в кронштейнах: а-е – деформации по координатным осям соответственно

Вывод по разделу

Анализируя вышеизложенное в данном разделе можно прийти к следующим выводам:

- пространственная рама надежна, проста в изготовлении и не требует больших финансовых затрат;
- при проектировании ходовой части автомобиля был выбран тринадцатый диаметр колес с целью обеспечения более плотной посадки шин, и уменьшения угла увода;
- вес рамы автомобиля составил 30 кг. Данный показатель на 32% меньше веса рамы первого болида «White Shark», созданного в 2014 году;
- по результатам прочностного анализа, жесткость рамы на кручение составила 2700 Н·м/град.;
- разработанная конструкция отвечает требованиям регламента FS Rules 2022.

Заключение

Разработка и создание гоночного автомобиля класса Formula Student – непростая инженерная задача, в которой необходимо учитывать различные факторы и находить оптимальные компоновочные решения.

Важнейшим элементом такого автомобиля является рама – несущая конструкция. Миссия инженеров – разработать оптимальную конструкцию, которая способна обеспечить необходимую жесткость конструкции при наименьшем весе.

В данной работе был комплексно рассмотрен вопрос оптимизации несущей конструкции болида на электрической тяге «EScorpion».

В первой главе были описаны актуальность разработки электроболида, цели и задачи международного проекта Formula Student.

Во второй главе были представлены требования регламента FS Rules 2022 относительно несущей конструкции, перечислены ее составляющие и требования к материалам.

В третьей главе было приведено последовательное описание конструирования электроболида с оптимизацией рамы, включающее проектирование ходовой части, тягово-динамический расчет, разработку конструкции аккумулятора.

В ходе работы был проведен сравнительный анализ веса рамных конструкций, созданных ранее болидов с ДВС, создана одномерная расчетная модель, а также проведены прочностные анализы оптимизированной конструкции. Также в завершении был рассмотрен вопрос соответствия оптимизированной конструкции косвенным требованиям регламента, относящимся к разработке электроболидов.

В результате работы была разработана оптимальная рама электроболида, с последующим изготовлением для участия в соревнованиях Formula Student 2022 года.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Автомобиль гоночный: № 2018501726: заявл. 17.09.2018: опубл. 13.08.2019. – Бюл. № 8 / А. В. Бобровский, Д. А. Горохова, О. О. Шерстобитова [и др.]; патентообл. ФГБОУ «ТГУ». – 2 с.
2. Автомобиль гоночный: № 2019504854: заявл. 01.11.2019: опубл. 21.09.2020. – Бюл. № 10 / А. В. Бобровский, Д. А. Горохова, О. О. Шерстобитова [и др.]; патентообл. ФГБОУ «ТГУ». – 3 с.
3. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т. Т.3. - 8-е изд. Перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестоковой. / В.И. Анурьев. - М.: Машиностроение, 2001. - 864 с.
4. Брюхов А. П. Оценка и оптимизация крутильной жесткости рамы болида «Формула Студент» ПНИПУ / Брюхов А. П., Головин Д. В., Козырин Н. С. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2015. – С. 5-19.
5. Головин Д. В., Разработка общей концепции болида «Формула Студент»/Д. В. Головин//Сборник трудов конференции «Проблемы функционирования систем транспорта». – 2015. – 165-171 с.
6. Иванов А. С., Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учебное пособие / А. С. Иванов, П. А. Давыденко, Н.П. Шамшов. - М.: ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 276 с.
7. Кулагин А. Л., Исследование Свойств Пассивной Безопасности Пространственного Каркаса Рамы Спортивного Автомобиля Класса «Формула Студент» / Кулагин А. Л., Гончаров К. О., Тумасов А.В., Орлов Л. Н.// Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6
8. Кулагин А. Л., Комплексная разработка и оценка прочности пассивной безопасности и элементов спортивных автомобилей класса «Formula Student» на основе композиционных материалов / А. Л. Кулагин, Р.В. Денужаев, К. О. Гончаров, А. В. Тумасов, Л. Н. Орлов // Сборник трудов 4-го Всероссийского форума «Студенческие инженерные проекты» – 2016. – 75-80 с.

9. Кутепов Н. Ю. Разработка методики оптимизации конструкции поворотных кулаков гоночного болида проекта Formula Student / Н. Ю. Кутепов, Р. З. Манджапарашвили // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук: материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых, 2020. – С. 869-872.

10. Логинов Н. Ю. Образовательная модель проектно-ориентированной подготовки молодых специалистов инженерно-технических направлений в концепции индустрия 4.0 / Н. Ю. Логинов, Д. Г. Левашкин, А. А. Козлов, В. А. Гуляев // Инженерное образование. – 2018. – № 23. – С. 77-82.

11. Осепчугов В.В., Фрумкин А. К. Автомобиль: анализ конструкций, элементы расчета: учебник для студентов вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

12. Основы расчетов на прочность и жесткость элементов конструкции [Электронный ресурс] // URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/d/DROBCHIK/materiali/Posobiya/Tab/sopromat.pdf> (дата обращения: 11.04.2022)

13. Пути повышения жесткости конструкции [Электронный ресурс]// URL: https://student.com/503035/tehnika/puti_povysheniya_zhestkosti_konstruktsii (дата обращения: 15.04.2022)

14. Родионов В. Ф., Фиттерман Б.М., Проектирование легковых автомобилей. – М.: машиностроение, – 1980. – 479 с.

15. Сапон В. М. Оптимизация пространственной трубчатой рамы болида класса «Формула Студент» / В. М. Сапон // E-SCIO. – 2020. – С. 526-539.

16. Скутнев В. М. Основы конструирования и расчета автомобиля: учеб. пособие / В. М. Скутнев. – Тольятти: ТГУ, 2012. – 294 с.

17. Хаммилл Д. Подвеска и тормоза: как построить и модифицировать спортивный автомобиль / Д. Хаммилл. – М.: Легион-Автодата, 2009. – 96 с.
18. Хусаинов А. Ш., Пассивная безопасность автомобиля: учебное пособие для студентов направлений 190100.62 «Наземные транспортно-технологические комплексы» по профилю – Автомобиле- и тракторостроение и 190109.65 «Наземные транспортно-технологические средства» по специализации «Автомобили и тракторы» / А. Ш. Хусаинов, Ю. А. Кузьмин. – Ульяновск: УлГТУ, 2011 – 89 с.
19. Черепанов Л. А. Расчет тяговой динамики и топливной экономичности автомобиля: электрон. учеб.-метод. пособие / Л. А. Черепанов. – Тольятти: ТГУ, 2016. – 60 с.
20. 2022 Rules Release [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fsaonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=51cf7622-651e-4b57-8c9c-e0391bc08edc> (дата обращения 22.05.2022).
21. Chambers A. E. Development of a Test Standard for Determining the Torsional Rigidity of a Formula SAE space Frame / A. E. Chambers, S. A. Rodriguez, R. M. Walsh, D. Wootton // American society for Engineering Education, 2016.
22. Elgowainy A. Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles / A. Elgowainy. – NY: Springer, 2021. – 534 p.
23. Formula SAE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fsaonline.com/> (дата обращения 22.05.2022).
24. Gillespie T. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Revised Edition R-506/ T. Gillespie. – SAE International, 2021. – 510 p.
25. Pascale V. D. Torque Vectoring Control for Fully Electric SAE Cars / V. D. Pascale, B. Lenzo, F. Farroni, F. Timpone, X. Zhang // Proceedings of XXIV AIMETA Conference, 2019. – P 1075-1083.