

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 «Разработка гоночного болида для участия в соревнованиях Formula Student»

Обучающийся

М. А. Щеглов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, А. В. Зотов

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

Консультант

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

Аннотация

Разработка гоночного болида для участия в соревнованиях Formula Student. Выпускная квалификационная работа. Тольяттинский Государственный Университет, 2024.

Целью данной работы является разработка гоночного болида класса «Формула Студент», который должен соответствовать регламенту соревнований «Формула Студент», более того, гоночный болид должен иметь значительные отличительные особенности относительно автомобилей прошлых лет, при этом обладать улучшенными динамическими показателями. Были поставлены задачи, направленные на разработку гоночного болида:

- 1) описать проект «Формула Студент»;
- 2) изучить основной регламент соревнований «Формула Студент» и определить основные пункты регламента, которые могут ограничивать на этапе разработки;
- 3) провести анализ существующих конструкций гоночных болидов класса «Формула Студент»;
- 4) определить исходные данные, провести расчеты и разработать системы гоночного болида.

В ходе работы был проведен анализ конструкций гоночных автомобилей зарубежных команд, участвующих в соревнованиях «Формула Студент», в ходе которого был выявлен ряд положительных и отрицательных конструкторских решений, применяемых в болидах. Кроме того, в работе представлен принцип проектирования и оптимизации узлов гоночного болида класса «Формула Студент», показаны некоторые расчетные случаи.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки в размере 57 страниц, содержащей 4 таблицы, 34 рисунка и графической части, содержащей 6 листов.

Abstract

Development of a racing car for participation in Formula Student competitions. Graduation qualification work. Togliatti State University, 2024.

The purpose of this work is to develop a racing car of the Formula Student class, which must comply with the regulations of the Formula Student competitions, moreover, the racing car must have significant distinctive features compared to cars of past years, while having improved dynamic performance. The following tasks were set aimed at developing a racing car:

- 1) describe the Formula Student project.
- 2) study the main regulations of the Formula Student competitions and identify the main points of the regulations that may limit the development stage.
- 3) analyze the existing designs of Formula Student racing cars.
- 4) determine the initial data, carry out calculations and develop racing car systems.

During the work, an analysis of the designs of racing cars of foreign teams participating in the Formula Student competitions was carried out, during which several positive and negative design solutions used in the cars were identified. In addition, the work presents the principle of designing and optimizing the units of a Formula Student racing car and shows some calculation cases.

The final qualifying work consists of an explanatory note of 57 pages, containing 4 tables, 34 figures and a graphic section containing 6 sheets.

Содержание

Введение.....	5
1 Состояние вопроса	6
1.1 «Формула Студент» – международные соревнования. Высшая инженерная школа.....	6
1.2 Регламент соревнований «Формула Студент». Основные пункты.....	8
2 Анализ существующих конструкций гоночных болидов класса «Формула Студент» российских и зарубежных команд	12
3 Основные системы гоночного болида и их разработка	19
3.1 Подвеска и шины.....	19
3.2 Пространственная рама	29
3.3 Органы управления	37
3.4 Силовой агрегат, система впуска	45
5 Безопасность и экологичность технического объекта	49
Заключение	54
Список используемых источников.....	55

Введение

В данный момент остро стоит вопрос в создании высококвалифицированных инженерных кадров и в организации эффективных методов получения студентами необходимых теоретических и практических навыков.

Одним из таких методов можно по праву считать проект «Формула Студент». Данный проект объединяет в себе и теоретические и практические развитие для студентов высших учебных заведений. Соревнования «Формула Студент» имеют регламент, в котором указано, что студенческая команда каждый год должна создавать новый гоночный болид, за счет чего студенты за четыре года обучения могут получить колоссальный инженерный опыт, и в будущем использовать его на предприятиях.

Цель данной работы: разработать с нуля прототип гоночного автомобиля класса «Формула Студент» с учетом общего регламента соревнований, опыта прошлых лет, опыта российских и зарубежных команд, участвующих в соревнованиях «Формула Студент».

Задачи работы:

- изучить основной регламент соревнований «Формула Студент». Определить основные разделы, касающиеся проектирования непосредственно узлов гоночного автомобиля;
- проанализировать существующие конструкции гоночных болидов класса «Формула Студент» российских и зарубежных команд-участниц соревнований;
- исследовать основные теоретические аспекты проектирования узлов гоночного автомобиля, а также представить практическое их применение.

1 Состояние вопроса

1.1 «Формула Студент» – международные соревнования. Высшая инженерная школа.

Соревнования «Формула Студент» – студенческие соревнования международного уровня. На данный момент в соревнованиях участвует более двух тысяч команд со всего мира, из которых 15 команд российские. На рисунке 1 изображен один из дней российского этапа соревнований.



Рисунок 1 – Российский этап соревнований «Формула Студент»

У соревнований «Формула Студент» существует основной регламент, который диктует общие требования для участников соревнований, правила проектирования гоночного болида, сведения о безопасности, правила гоночных заездов и конфигурации трасс. По правилам соревнований, участие могут принимать только студенты высших учебных заведений. Регламент

соревнований требует от студентов проектировать и создавать новый гоночный болид класса «Формула Студент» каждый год, причем новый болид должен иметь серьезные отличия в конструкции относительно болида прошлого года. Более того, чтобы получать высокие баллы и занимать призовые места, команде необходимо постоянно развиваться, применять новые технологии, новые конструкторские решения, развивать свои компетенции, чтобы иметь конкурентоспособность среди остальных команд.

Проект «Формула Студент» по праву можно назвать высшей инженерной школой для студентов высших учебных заведений, а также настоящей кузницей высококвалифицированных инженерных кадров. Дело в том, что студент, прийдя в проект, несколько раз проходит полный производственный цикл настоящего автомобиля. Студент принимает участие в каждой вехе своего же проекта, начиная от создания концепции прототипа гоночного автомобиля, и заканчивая сборкой физической модели гоночного автомобиля, и его испытаниями. Пройдя несколько полных циклов, студент набирается достаточно опыта, как в инженерной деятельности (работа в программах для моделирования и в программах для тестирования и симуляций, навык проектирования), так и получает умение работы в команде, понимание производственных процессов (с точки зрения экономической части проекта, логистики, менеджмента). По итогу студент, прошедший высшую инженерную школу, является желанным кадром на многих предприятиях.

Сами же соревнования состоят из нескольких важных этапов, которые необходимо пройти студентам, чтобы заработать баллы. Первым этапом является пре-инспекция, которая включает в себя проверку оборудования, экипировки и огнетушителей. По сути, данная проверка необходима для подтверждения сертификации всего оборудования и экипировки, используемых командой во время соревнований. Далее идет этап технической инспекции самого гоночного болида. Инспекторы проверяют автомобиль на полное соответствие всем пунктам основного регламента соревнований «Формула Студент», что подтверждает безопасность болида. Болид, не

прошедший техническую инспекцию (не соответствующий регламенту), не может быть допущен к динамическим дисциплинам. В следующем этапе студентам необходимо пройти статические дисциплины, которые включают в себя защиту конструкции (студенты должны доказать судьям грамотность и обоснованность своих инженерных решений), защиту отчета о стоимости (студенты должны предоставить судьям отчет о стоимости всего производства болида, включая затраты на материалы, услуги, оплату труда, тесты), бизнес презентация (студенты представляют свой болид с точки зрения бизнес концепции, и должны доказать, что идея, связанная с гоночным болидом, рентабельна и способна приносить прибыль). Хотелось бы отметить, что практически половина всех баллов зарабатывается студентами именно в статических дисциплинах. Последним этапом проходят динамические дисциплины. Динамические дисциплины – это гоночные испытания, такие как восьмерка, ускорение 75 метров, автокросс и гонка на выносливость (которая также включает в себя топливную эффективность). Пилотами гоночного болида во время динамических испытаний являются также студенты. Соответственно вторая половина всех баллов зарабатывается студентами именно на данном этапе соревнований.

1.2 Регламент соревнований «Формула Студент». Основные пункты.

Как и у всех серьезных гоночных соревнований, у «Формула Студент» есть собственный регламент, который включает в себя общие требования для участников соревнований, правила проектирования гоночного болида, сведения о безопасности, правила гоночных заездов и конфигурации трасс. Регламент является неоспоримым документом, которому должны подчиняться все участники соревнований. Регламент создавался на базе различных травм и происшествий, происходивших за все время проведения соревнований, за счет чего в регламенте прописаны все необходимые требования по безопасности и

технике безопасности для студентов, для обеспечения порядка и безопасности для всех участников и организаторов соревнований. Более того, регламент по сей день обновляется каждый год, и каждая новая версия этого документа включается в себя все больше требований к конструкции гоночного болида.

Разберемся, какие же разделы включает в себя регламент соревнований «Формула Студент»:

- раздел административных постановлений, который включает в себя обзор соревнований, правила поведения в зоне проведения соревнований «Формула Студент», общие требования для команд, перечень необходимых документов и крайние сроки их подачи, общие сведения;

- раздел с общими техническими требованиями к конструкции автомобиля, в котором приводятся требования, которые должны быть учтены студентами на этапе проектирования прототипа гоночного болида, чтобы соответствовать нормам безопасности;

- раздел с требованиями только для автомобилей с двигателем внутреннего сгорания, в котором прописаны требования к конструкции автомобиля, относящиеся к автомобилям с ДВС;

- раздел с требованиями только для электромобилей, в котором прописаны требования к конструкции автомобиля, относящиеся к автомобилям с электрической силовой установкой;

- раздел с требованиями только для автономных автомобилей, в котором прописаны требования к конструкции автомобиля, относящиеся к автомобилям-беспилотникам;

- раздел с требованиями, относящимися к технической инспекции и предварительной инспекции, в котором описаны общие сведения о технической инспекции, сведения о специфичных этапах технической инспекции (аккумуляторная инспекция, электрическая инспекция, инспекция автономности, тест водонепроницаемости), а также сведения об основных этапах технической инспекции (механическая инспекция, тест на опрокидывание, тест на шум, тест на торможение, взвешивание авто), а также

сведения об инспекции, которую команды должны пройти после прохождения всех динамических дисциплин;

– раздел со сведениями о статических дисциплинах, где прописаны общие сведения обо всех статических дисциплинах, которые включают в себя защиту конструкции (студенты должны доказать судьям грамотность и обоснованность своих инженерных решений), защиту отчета о стоимости (студенты должны предоставить судьям отчет о стоимости всего производства болида, включая затраты на материалы, услуги, оплату труда, тесты), бизнес презентация (студенты представляют свой болид с точки зрения бизнес концепции, и должны доказать, что идея, связанная с гоночным болидом, рентабельна и способна приносить прибыль);

– раздел со сведениями о динамических дисциплинах, в котором описаны правила вождения для студентов, сведения о возможных штрафах и штрафных очках, сведения о каждой динамической дисциплине, таких как восьмерка, ускорение 75 метров, автокросс, гонка на выносливость, топливная эффективность.

Регламент соревнований «Формула Студент» достаточно объемный документ, и включает в себя более 150 страниц с общими сведениями и правилами соревнований. На рисунке 2 изображен пример одного из общих требований регламента соревнований.

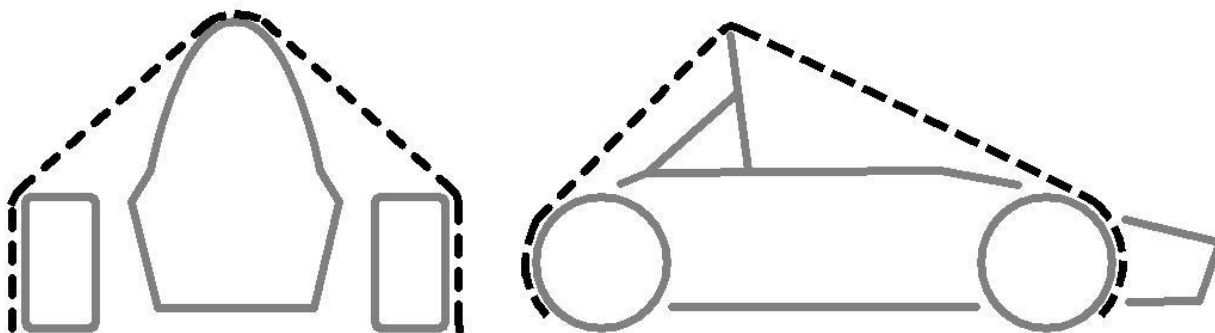


Рисунок 2 – требование к огибающей поверхности автомобиля.

Для выполнения данной работы наиболее значимым разделом является раздел с общими техническими требованиями к конструкции автомобиля. Данный раздел включает в себя:

- общие требования к проектированию;
- требования к конструкции шасси (пространственная рама или монокок, а также подвеска автомобиля). В данном пункте регламента для пространственной рамы и монокока описываются требования к наружным и внутренним габаритам (с учетом процентилей и шаблонов технической инспекции, а также с учетом посадки пилота внутри кокпита), требования к материалам и сортаменту труб (или сот для монокока), требования к форме и конструкции, требования к прочности и крутильной жесткости. Для подвески прописаны общие требования, требования к ходу подвески, к колесной базе и колею, требования к минимальному дорожному просвету, а также требования к системе рулевого управления;
- требования к тормозной системе, касающиеся конструкции самой системы, а также конструкции педали тормоза;
- требования к силовому агрегату, к трансмиссии, к системе впуска и выпуска, где описаны тип и максимальный объем силового агрегата, система защиты пилота и окружающих людей от подвижных деталей трансмиссии гоночного автомобиля, максимальный диаметр впускного отверстия (рестриктор), требования к уровню шума, а также к расположению выпускной системы;
- требования к аэродинамической системе гоночного автомобиля, где прописаны требования к прочности и жесткости конструкции аэродинамического обвеса, требования к расположению аэродинамического обвеса на автомобиле, требования к креплению аэродинамического обвеса.

Выводы по разделу

В данном разделе были описаны международные соревнования «Формула Студент», а также проанализирован основной регламент соревнований, определены необходимые разделы.

2 Анализ существующих конструкций гоночных болидов класса «Формула Студент» российских и зарубежных команд

Анализ конструкций предыдущего года, конструкций российских команд и конструкций зарубежных команд – очень важный этап подготовки к проектированию нового гоночного болида. Такой анализ позволяет учесть все собственные и чужие ошибки еще на этапе проектирования, а также позволяет позаимствовать различные полезные инженерные решения, которые могут помочь добиться большей эффективности автомобиля на трассе.

Достаточно полезно анализировать конструкции особенно зарубежных команд, потому что большинство из них имеют колоссальный опыт участия в соревнованиях «Формула Студент». На рисунке 3 можно увидеть гоночный болид класса «Формула Студент» от команды рижского университета.



Рисунок 3 – гоночный болид класса «Формула Студент» команды Ertu University.

Хотелось бы сразу отметить, что команда использует пространственную металлическую раму, скрывающуюся под массивным аэродинамическим обвесом, но не монокок, что, казалось бы, удешевляет производство болида в несколько раз, однако цельный аэродинамический обвес такого типа требует также крупных экономических затрат. На мой взгляд затраты на цельный аэродинамический обвес не целесообразны, и вместо данной аэродинамичной конструкции было бы наиболее логично установить переднее и заднее антикрыло с диффузором. Дело в том, что соревнования «Формула Студент» не имеют затяжных прямых участков трассы, а обвес, что показан на рисунке 3, скорее снижает сопротивление встречного потока воздуха, чем дает прижимную силу. А вот как раз прижимной силы гоночным болидам класса «Формула Студент» не хватает, из-за маленького веса, и чтобы это компенсировать, и иметь достаточное сцепление на скоростных поворотах, чаще всего команды используют полноценный комплект аэродинамики, состоящий из переднего антикрыла, заднего антикрыла, боковых диффузоров и диффузора, проходящего под машиной. На автомобиль с рисунка 3 установили 10-дюймовые колеса, что уменьшило неподрессоренные массы и дало большего сцепления на неровной дороге, однако хотелось бы отметить, что компоновка 10-дюймовых колес и внутренних узлов приводит ко многим компромиссам при проектировании подвески и пространственной рамы. Также хотелось бы отметить достаточно сильно завышенную носовую часть автомобиля, что очень сильно снижает обзор для пилота, и делает автомобиль не эргономичным.

На рисунке 4 изображен гоночный болид класса «Формула Студент» студенческой команды из Великобритании.

Данный автомобиль также использует пространственную раму, однако в сочетании с 13-дюймовыми колесам (это позволяет снизить податливость рамной конструкции во время работы подвески), а также практически полный аэродинамический пакет без боковых диффузоров и без диффузора под автомобилем.

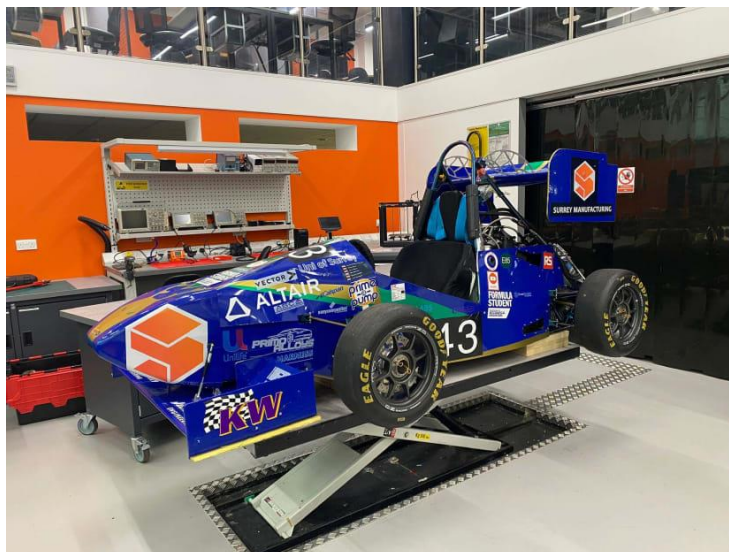


Рисунок 4 – гоночный болид класса «Формула Студент» команды SURTES.

Хочется отметить не очень удачное расположение радиатора, он находится в не очень обдуваемой зоне, что хорошо видно на рисунке 5, и, кажется, есть риск перегрева двигателя автомобиля.



Рисунок 5 – гоночный болид класса «Формула Студент» команды SURTES, вид сзади.

Кроме того, хотелось бы акцентировать внимание на конструкции ступицы и механизма крепления колес. Это конструкция называется моногайка, и используется, в основном, в тех случаях, когда быстрая смена комплекта колес необходима. Для соревнований «Формула Студент» отводится достаточно времени на смену комплекта колес, и поэтому, в данном случае, это неоправданное экономическое удорожание.

На рисунке 6 изображен гоночный болид класса «Формула Студент» немецкой команды, занимающей достаточно высокую позицию в мировом рейтинге, что доказывает эффективность инженерных решений, применяемых в данном автомобиле.



Рисунок 6 – гоночный болид класса «Формула Студент» команды SEFST.

На рисунке 6 можно увидеть очень эффективный, но при этом очень дорогой гоночный автомобиль. В данном случае мы видим гоночный автомобиль класса «Формула Студент» с карбоновым монококом, в связке с 10-дюймовыми колесами, карбоновыми элементами подвески и полным аэродинамическим пакетом со всеми необходимыми для увеличения прижимной силы элементами обвеса. В совокупности все эти дорогостоящие решения дают автомобилю хорошую динамику и маневренность за счет легкости автомобиля, низкого центра тяжести и хорошо развитой аэродинамики. В любом случае, нужно понимать, что разные команды находятся в разных экономических положениях, и некоторым командам не

удастся позаимствовать у этой команды многие инженерные решения. Также хотелось бы отметить чрезмерно длинную толкающую тягу подвески на передней оси автомобиля, что увеличивает податливость конструкции при передачи вертикальной нагрузки на шток амортизатора.

На рисунке 7 представлен механизм распределения работы амортизаторов, данную конструкцию нередко можно увидеть у зарубежных команд, в особенности для передней подвески. Нужно отметить, что данное решение стоит применять для автомобилей, обладающих невысокой подрессоренной массой, иначе эффективность работы подвески может быть снижена.



Рисунок 7 – Механизм, распределяющий включение амортизаторов при разных маневрах.

«Данный механизм позволяет разделить амортизаторы по назначению: один – при одноименном ходе подвески (сжатие, отбой), а второй при разноименном ходе подвески (крен кузова). Из недостатков данного механизма можно отметить увеличение веса передней подвески, кроме того, конструкция габаритная и чаще всего ее устанавливают в верхней части автомобиля, за счет чего высота центра тяжести болида поднимается. Положительный же момент данного решения в том, что можно произвести

тонкую настройку отдельно амортизатора для одноименного хода, а также для разноименного. Помимо этого, можно регулировать жесткость подвески при крене и при сжатии, установив разные по жесткости пружины. При своем недостатке большого веса, данное решение, скорее имеет больше положительного влияние на управляемость автомобиля, а также дает большие возможности регулировки.

На рисунке 8 можно увидеть заднюю подвеску одной из лидирующих на данный момент команды. На первый взгляд это обычная подвеска с системой толкающей тяги Push rod. Однако, система также использует тяги и коромысла для управления наклоном заднего крыла. Управление аэродинамическими элементами во время движения называется активной аэродинамикой. Это позволяет антикрыльям достигать наилучших аэродинамических характеристик во время гонки» [20].

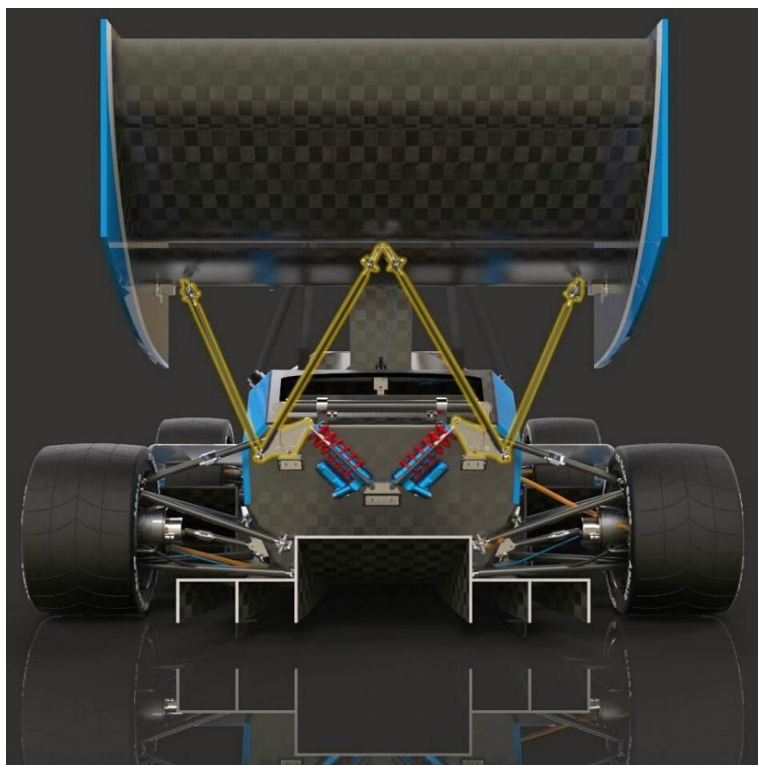


Рисунок 8 – Задняя подвеска с высоким центром крена и активной аэродинамикой

«Кроме того, коромысла и стойки амортизаторов были опущены для достижения более низкого центра тяжести. В частности, схема задней подвески этого автомобиля имеет неправильный угол наклона толкающих штанг, и такое расположение не позволяет обеспечить достаточный ход амортизаторов. Вы также заметите отсутствие стабилизатора поперечной устойчивости. Кинематическая схема этой подвески показывает, что центр крена находится довольно высоко, как видно из расположения рычагов на изображении, что приводит к повышенному износу шин. Можно заметить довольно острый угол, под которым работает толкающая тяга push-rod. Однако, еще можно заметить с каким передаточным отношением выполнены коромысла. Даже при том, что толкающие тяги push-rod, казалось бы, не должны обеспечивать достаточный ход амортизатором, с таким передаточным отношением коромысла команда компенсировала недостающий ход. Также можно увидеть, что в коромыслах предусмотрена регулировка передаточного числа. Более того, можно заметить, что амортизаторы установлены в нестандартном для них положении, и казалось бы, в таком положении они не должны работать, однако данные масляные амортизаторы могут работать при любой компоновке за счет дополнительного выносного резервуара, куда через клапанную систему перемещается жидкость при сжатии штока» [17].

Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены и проанализированы различные конструкции гоночных автомобилей класса «Формула Студент с целью анализа ошибочных и эффективных инженерных решений, применяемых зарубежными командами, участвующими в международных соревнованиях.

3 Основные системы гоночного болида и их разработка

3.1 Подвеска и шины

Шины являются связывающим компонентом между автомобилем и дорогой. В особенности для гоночного автомобиля очень важно иметь хорошее сцепление с дорожным покрытием. Именно поэтому начало проектирования начинается с подбора шин и колесных дисков.

В соревнованиях «Формула Студент» наиболее частым размером колесных дисков выбирают либо 10-и, либо 13-дюймовые. Дело в том, что использование колес меньшего размера может привести к недостаточному дорожному просвету автомобиля, и кроме того, компоновать ступичный узел с кулаком и тормозной системой будет достаточно сложно и проблематично. Что касается колес большего размера, то в них нет смысла, потому что это увеличивает неподрессоренную массу и ухудшает параметры управляемости, а также увеличивает нагрузку на силовой агрегат, при условии, что в соревнованиях «Формула Студент» нельзя использовать двигатели с объемом более 710 кубических сантиметров. Выбирая между тринадцати- и десятидюймовыми колесными дисками были выбраны именно тринадцатидюймовые диски OZ Formula Student Magnesium 4H wheel, который показан на рисунке 9. Это достаточно прочные, а самое главное легкие диски от известной компании. Дело в том, что, проводя анализ, было обнаружено, что можно использовать магниевые колесные диски с низкопрофильными шинами, и иметь практически такие же показатели массы, как и 10-дюймовые колесные диски с 16-дюймовыми шинами.



Рисунок 9 – Тринадцатидюймовые диски OZ Formula Student Magnesium 4H wheel

Хотелось бы отметить, что несмотря на достаточную легкость колеса в сборе, ступичный узел и кулак для 13-дюймовых колес больше по габаритам, а соответственно и по массе. Однако, с учетом того, что автомобиль строится не на базе карбонового монокока, а на базе металлической пространственной рамы, то с точки зрения управляемости автомобиль с 13-дюймовыми колесами и металлической пространственной рамой будет иметь лучшие показатели управляемости, чем автомобиль с 10-дюймовыми колесами и металлической пространственной рамой. Все дело во взаимном расположении рычагов подвески. При компоновке подвески для 10-дюймовых колес рычаги подвески находятся достаточно близко друг к другу как на кулаке, так и на самой раме, что в разы может увеличивать податливость всей системы и иметь негативное влияние на работу подвески. На рисунке 10 можно увидеть, насколько близко рычаги подвески располагаются относительно друг друга.

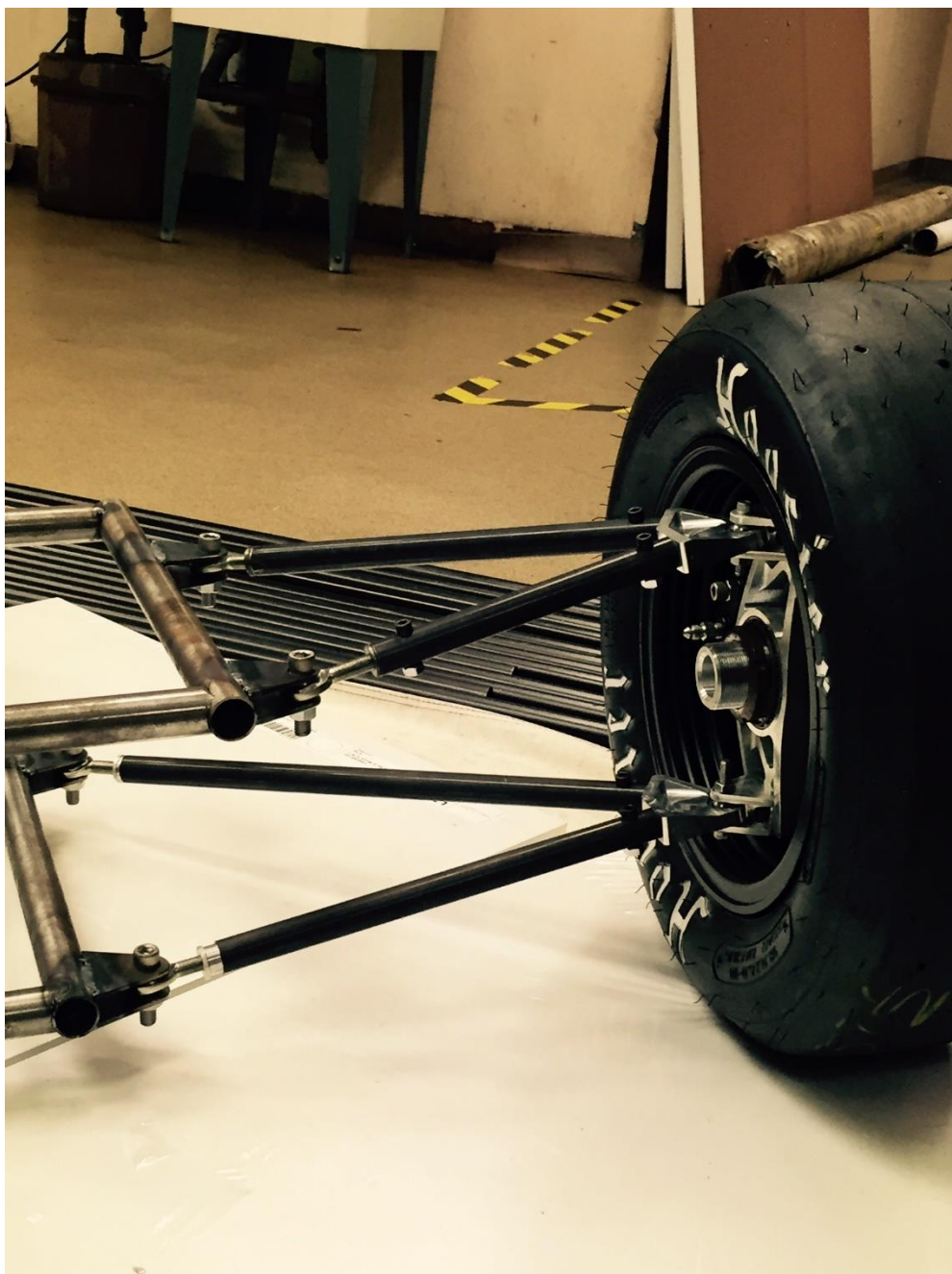


Рисунок 10 – подвеска гоночного автомобиля класса «Формула Студент»,
скомпонованная в 10-дюймовое колесо.

«Для максимально быстрого прохождения трассы Formula Student с многочисленными крутыми поворотами, а также, чтобы справиться с избыточной мощностью двигателя (средний вес болидов класса Formula Student – 200 кг) необходимо использовать шины, которые обеспечат достаточное сцепление с дорожным покрытием. Для болидов класса Formula

Student несколько компаний изготавливают шины с повышенным коэффициентом сцепления. Выбор пал на низкопрофильные шины Continental. Данное решение обосновывается тем, что это самые легкие шины с радиальным строением корда. Таким образом, связка дисков OZ Racing и шин Continental позволила снизить вес каждого колеса на 1,5 кг по сравнению со связкой, используемой на болиде прошлого года, а именно диски Keizer и шины Hoosier. Кроме того, хоть шины Hoosier имеют более высокий коэффициент сцепления с дорогой, за счет радиального строения корда (на Hoosier диагональное строение корда), а также за счет того, что шины Continental низкопрофильные недостаток сцепных свойств шины компенсируются» [1].

В качестве гасящих элементов подвески болида были выбраны амортизаторы Öhlins TTX 25, которые изображены на рисунке 11.



Рисунок 11 – Амортизаторы Öhlins TTX 25

«Данные амортизаторы являются наилучшим решением для автомобилей класса Formula Student. За счет маленьких размеров данные амортизаторы достаточно легкие. К тому же, несмотря на небольшие размеры, они обеспечивают минимально допустимый ход подвески болида, а именно 57 мм. Кроме того, эти амортизаторы имеют возможность настройки отбоя и сжатия по четырем параметрам, что позволяет проводить тонкую настройку подвески во время тестов. В качестве упругих элементов были подобраны пружины Cane creek 350x2.25 фунт/дюйм. Так как нельзя абсолютно точно определить будущий вес болида, а также распределение веса, то пружинные элементы подбирались по опыту прошлых наработок. Для автомобиля прошлого года были подобраны пружины 350 фунт/дюйм, и так как проектируемая машина будет легче, то было принято решение использовать менее жесткие пружины. Если же необходимо будет добавить жесткости пружинам или убавить, то это нетрудно сделать при помощи изменения передаточного отношения коромысел подвески. Кроме того, настройки амортизаторов позволят отрегулировать быстрое и медленное сжатие, чтобы пружина не успевала сжиматься полностью при резком крене и наезде на неровность» [2].

«Проектирование автомобиля начинается от точек контакта автомобиля с дорогой, а именно с колес. Далее проектируется подвеска и только после этого разрабатывается несущая конструкция и остальные узлы. Однако так происходит при проектировании подвески для несущей системы монокок. Если же автомобиль строится на базе пространственной рамы, то расположение точек подвески ограничено. Это происходит потому, что для обеспечения жесткости пространственной рамы и снижения податливости подвески необходимо точки крепления подвески располагать в основных узлах рамы» [21].

«Самое первое, что необходимо сделать – задать расположение колес в пространстве, зная необходимую колесную базу и ширину передней и задней

колеи, учитывая вылет колесного диска. Далее передняя и задняя подвеска проектируются отдельно друг от друга. Когда колеса выставлены в пространстве, с помощью точек внутри обода колесного диска задается геометрия опорного элемента, а именно точек крепления рычагов к поворотному кулаку. Геометрия подбирается в зависимости от требуемых характеристик подвески. Далее задаются крепления рычагов подвески к несущей силовой раме, при этом также задается необходимая геометрия. Рулевая рейка, рулевые сошки, а также амортизаторы и коромысла подвески komponуются после разработки пространственной рамы. Во время разработки силовой конструкции по возможности основные узлы рамы располагают в точки подвески или же рядом с ними. Когда рама спроектирована, то начинается процесс корректировки уже спроектированных точек подвески под пространственную раму. Характеристики скорректированной подвески чаще всего хуже первоначальной, однако если этого не сделать, то в жесткой конструкции возникают податливости, которые не позволяют раскрыть потенциал подвески» [19].

Как и к любой системе еще на стадии разработки концепции автомобиля предъявляются определенные цели и требования для достижения улучшенных показателей автомобиля на трассе по сравнению с автомобилем прошлого года. Такими целями стали:

- Снижение массы элементов подвески, в особенности элементов неподрессоренных масс,
- Уменьшение усилия на рулевом колесе за счет кинематики рулевого управления,
- Достижение нейтральной управляемости,
- Увеличение сцепления шин в пятнах контакта при прохождении скоростных поворотов за счет настройки статических углов подвески и кинематических характеристик.

Итак, кинематические точки подвески выставляются в специализированной программе относительно предварительно выставленных

колес, с заданными параметрами колеи, колесной базы, размерами колес. На рисунке 12 можно увидеть кинематическую схему подвески гоночного автомобиля класса «Формула студент».

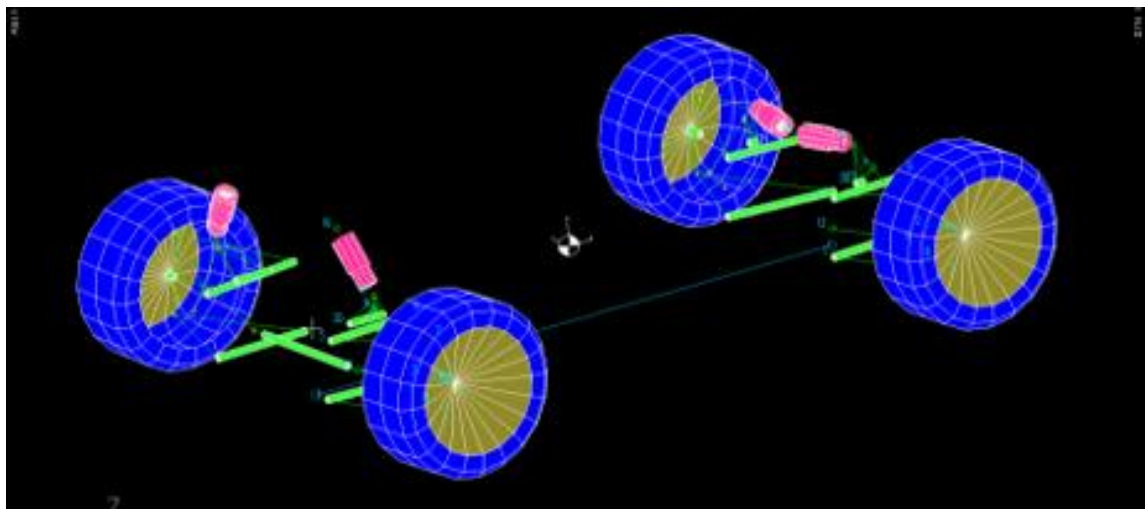


Рисунок 12 – Упрощенная кинематическая модель подвески гоночного автомобиля класса «Формула Студент»

За счет кинематических характеристик полученной передней и задней подвески (взаимного расположения точек крепления подвески) удалось снизить негативные эффекты подруливания при одноименном ходе передней и задней подвески, а также при разноименном ходе, например при крене кузова. Более того, за счет использования жестких шарниров в роли крепления элементов подвески, а также за счет жесткой рамной конструкции и использования 13-дюймовых колесных дисков, податливости системы подвески были сильно снижены. Таким образом за счет кинематических показателей, была улучшена управляемость болида.

Уменьшения усилия на рулевом колесе также было достигнуто за счет кинематической оптимизации передней подвески гоночного автомобиля. Дело в том, что во время поворота рулевого колеса, в точке пятна контакта возникает множество воздействий и стабилизирующих моментов, которые возникают за счет:

- трения шин о поверхность дороги
- плеча обкатки (это расстояние от точки пятна контакта до мнимой линии оси поворота колеса, замеренное на поверхности земли)
- угла поперечного наклона шкворня (чем больше угол, тем больше перераспределения массы передней оси, за счет чего пилоту при повороте колеса приходится в какой-то степени приподнимать переднюю ось)
- массы передней оси
- угла продольного наклона кастера (во время движения создает стабилизирующий момент, пытающийся вести колеса в прямом направлении)
- размера плеча рулевой сошки (чем меньше плечо рулевой сошки, тем больше угол поворота колес мы получим, но при этом пропорционально увеличится и усилие на рулевом колесе)
- размера самого рулевого колеса (иногда достаточно увеличить диаметр рулевого колеса, чтобы сделать поворот руля более комфортным)

Таблица 1 – Изменение геометрии опорного узла 2024 года

Подвеска	Угол кастера	Угол шкворня	Плечо обкатки	Плечо стабилизации
Подвеска 2023	+4.2 град	+10 град	+45 мм	+14 мм
Подвеска 2024	+2.6 град	+5.4 град	+7 мм	+5 мм

«Угол кастера был уменьшен на 1.6 градуса и приближен к вертикали. Тем самым было уменьшено и плечо стабилизации управляемых колес на 9 мм. Положительные эффекты от уменьшения угла кастера: уменьшение стабилизации управляемых колес – уменьшение усилий на рулевом колесе, снижение износа управляемых колес, увеличение поворачиваемости при заходе в поворот» [12].

Что касается нейтральной управляемости, то данная цель достигалась за счет геометрии рулевого управления и перераспределения масс и момента рысканья за счет креновой жесткости передней и задней подвески. С учетом

углов увода при прохождении дисциплины восьмерка, которая показана на рисунке 13, был рассчитан угол Аккермана.

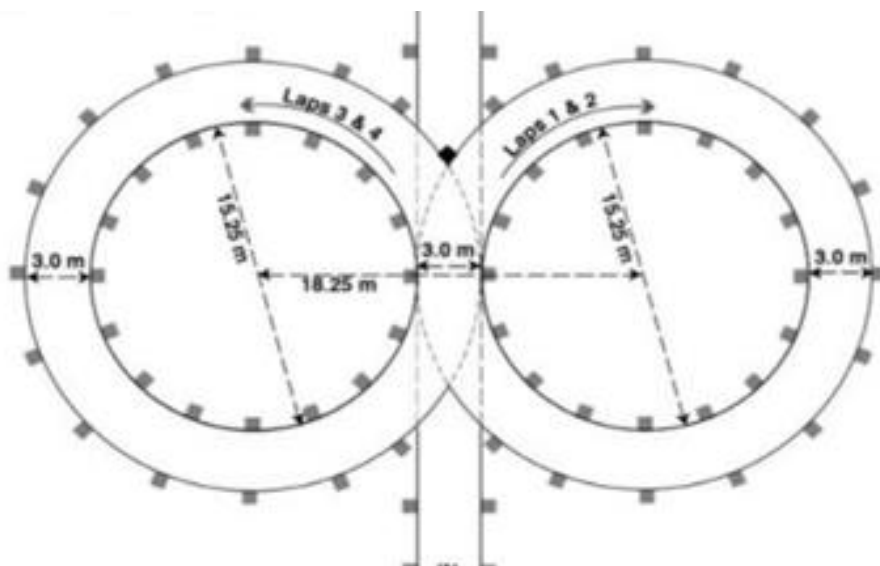


Рисунок 13 – Параметры трассы восьмерка

Так как дисциплины автокросс и гонка на выносливость имеют множество различных маневров, которые проходятся с различной скоростью, то подобрать конкретную геометрию Аккермана здесь не получится, поэтому геометрия рулевого управления проектируется по большей степени для получения преимущества на восьмерке. На рисунке 14 можно увидеть разновидности геометрий Аккермана. Для прохождения восьмерки с учетом углов увода при прохождении испытания подбирается точный Аккерман, что дает больше управляемости и стабильности автомобилю при прохождении данной дисциплины. При этом при увеличении скорости прохождения маневров, как например в автокроссе, пилот почувствуют небольшую недостаточную поворачиваемость, что является наиболее приемлемым для пилота с точки зрения чувствительности и контроля.

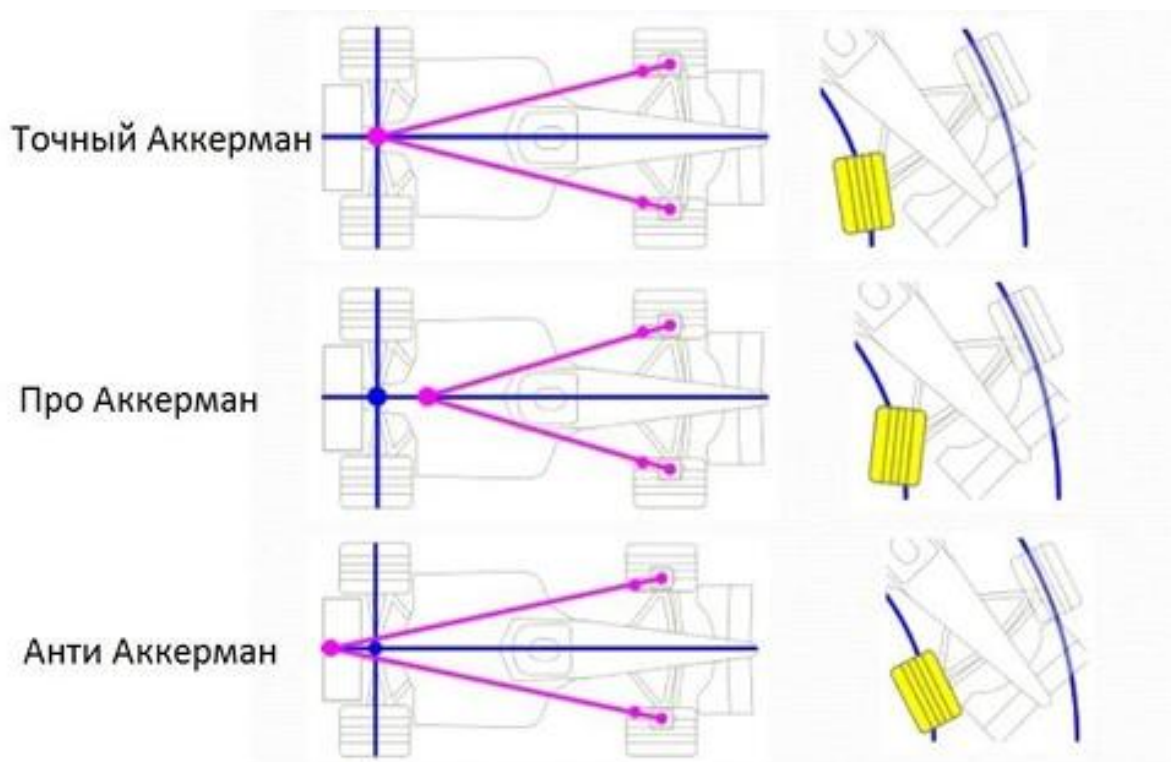


Рисунок 14 – Три вида установки угла Аккермана

Увеличение сцепления шин с дорожным покрытием при прохождении скоростных поворотов достигалось за счет кинематики подвески и оптимизации статических углов подвески на передней и задней оси. Угол развала изменяется при появлении бокового ускорения и крена кузова, и поэтому в момент максимального бокового ускорения необходимо иметь околонулевой угол развала на внешнем к повороту колесе, чтобы в этот момент сцепление шины с дорожным покрытием было максимальным, с учетом деформации шин от силы трения. Для этого необходимо знать угол крена кузова с учетом жесткостей передней и задней подвески и с учетом моментов действующих на автомобиль при определенном боковом ускорении. Угол крена кузова рассчитывается по формуле 1.

$$\alpha = \frac{MR_o + Mr_1 + Mr_2}{Roll\ rate\ rear + Roll\ rate\ front} \quad (1)$$

где α – угол крена кузова, град;

M_{Ro} – момент поддрессоренных масс, Нм;

M_{r1} – момент передних неподдрессоренных масс, Нм;

M_{r2} – момент задних неподдрессоренных масс, Нм;

$Roll\ rate\ rear$ – угловая жесткость передней подвески, Нм/град;

$Roll\ rate\ front$ – угловая жесткость передней подвески, Нм/град.

Рассчитав угол крена автомобиля, через кинематику подвески мы можем определить, каким должен быть статический угол развала на передней и на задней оси, чтобы при достижении необходимого угла крена кузова развал становился околонулевым [14].

3.2 Пространственная рама

В соревнованиях «Формула Студент» разрешено использовать в автомобиле только два типа шасси, а именно композитный карбоновый монокок или металлическую пространственную раму. И тот и другой тип шасси через регламент соревнований «Формула Студент» подвержен сильному контролю, так как шасси в гоночном болиде является оболочкой безопасности для студента, сидящего за рулевым колесом, так как студент часто не является профессиональным пилотом гоночных автомобилей.

Рассмотрим оба этих типа шасси и определим основные преимущества и недостатки данных конструкций. На рисунке 15 можно увидеть композитный монокок для гоночного болида класса «Формула Студент». Данный монокок был изготовлен при помощи негативной матрицы, с использованием большого количества карбонового волокна разного типа, направленности и плетения, а также алюминиевых сот высотой не менее 12 мм [16].



Рисунок 15 – композитный монокок зарубежной команды соревнований
«Формула Студент»

Можно заметить, что монокок также обладает металлическими трубами, однако эти трубные вставки требуются только в критических зонах и требуются регламентом соревнований. Критическими зонами являются передняя дуга (находится прямо перед пилотом) и главная дуга (находится за и над пилотом). Эти металлические вставки необходимы для предотвращения травм при перевороте гоночного автомобиля, ведь именно на этих элементах монокока будет держаться автомобиль в опрокинутом состоянии.

Разберемся с преимуществами данного типа шасси для гоночного болида класса «Формула Студент»:

- низкая масса за счет использования карбонового волокна и пустотелых сот из алюминия,
- усиленные точки фиксации подвески (для монокока нет проблем усилить точки подвески в любом месте, за счет чего облегчается проектирование подвески и увеличивается эффективность ее работы),

– Высокая прочность, что хорошо влияет на безопасность пилота, а также высокая крутильная жесткость, что уменьшает податливость конструкции,

– Возможность применения любой аэродинамической формы передней и задней части автомобиля.

Что же касается недостатков, то такими являются:

- высокая стоимость матрицы для производства,
- высокая стоимость материалов для производства,
- трудоемкий процесс производства,
- вредность работы с материалами из которых изготавливается монокок,
- дорогостоящий и трудоемкий ремонт в случае поломки какого-либо элемента монокока [11].

Если же говорить о пространственной металлической рамной конструкции, которая изображена на рисунке 16, то это наиболее простой и дешевый вариант шасси для болидов класса «Формула Студент».

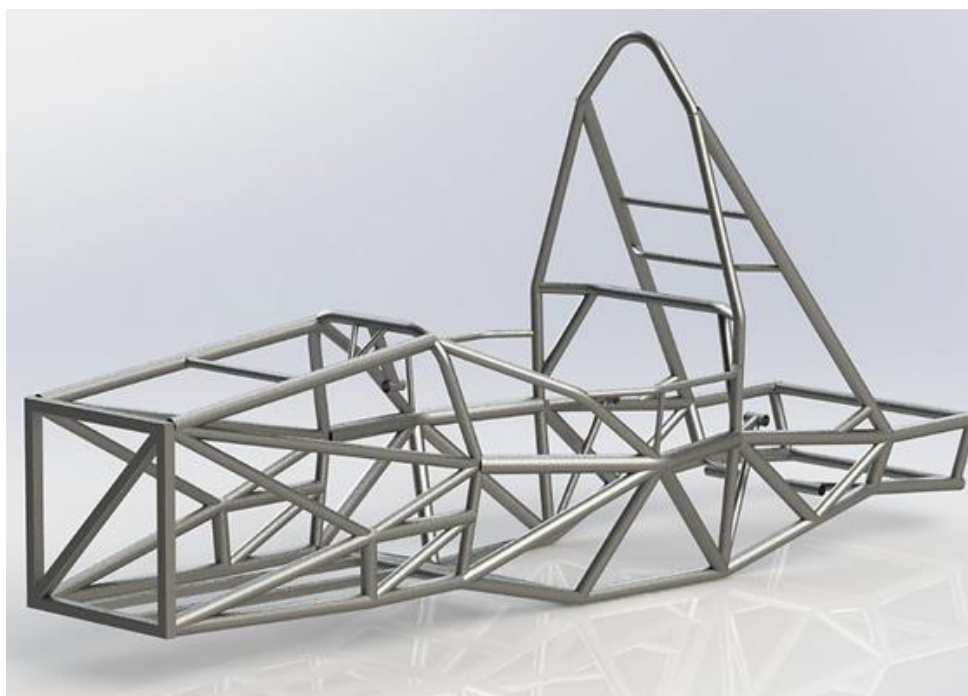


Рисунок 16 – металлическая пространственная рама гоночного болида класса «Формула Студент»

Металлическая пространственная рама должна изготавливаться из стальных труб с определенным моментом инерции для каждой из зон:

- основная структура рамы (передняя дуга, главная дуга),
- зоны фронтального и бокового удара,
- остальные распорки и опоры конструкции.

Также в некоторых местах допускаются алюминиевые трубы в виде отдельных вставок для облегчения конструкции рамы, однако полностью алюминиевой рама быть не может.

Также одно из основных требований регламента к пространственной металлической рамной конструкции – соблюдение триангуляции (соблюдение треугольных промежутков между основными узлами рамной конструкции).

Преимущества металлической пространственной рамы:

- дешевизна производственного оборудования,
- дешевизна материалов для изготовления,
- легкость в производстве,
- меньшая трудоемкость по сравнению с композитным карбоновым монококом,
- хорошая ремонтпригодность в любых условиях.

Однако у такого типа шасси есть свои недостатки, например:

- большой вес всей конструкции,
- меньшая точность производства,
- компромиссные решения при проектировании подвески из-за правила триангуляции,
- компромиссные решения при проектировании аэродинамического обвеса.

Одним из главных преимуществ пространственной металлической рамы все-таки является ее низкая стоимость, потому что многие команды не могут позволить себе применение композитного монокока [24].

При условии, что команда использует именно металлическую пространственную раму, ее проектирование производится совместно с

кинематическими точками подвески, так как точки подвески должны приходить именно в жесткие узлы рамы, иначе подвеска будет неэффективна из-за сильной податливости всей конструкции [6].

Также при проектировании рамы необходимо соблюдать правило шаблонов безопасности, которые предусмотрены основным регламентом соревнований «Формула Студент». На рисунке 17 можно увидеть пространственную раму с шаблонами, которые металлические трубы должны огибать.

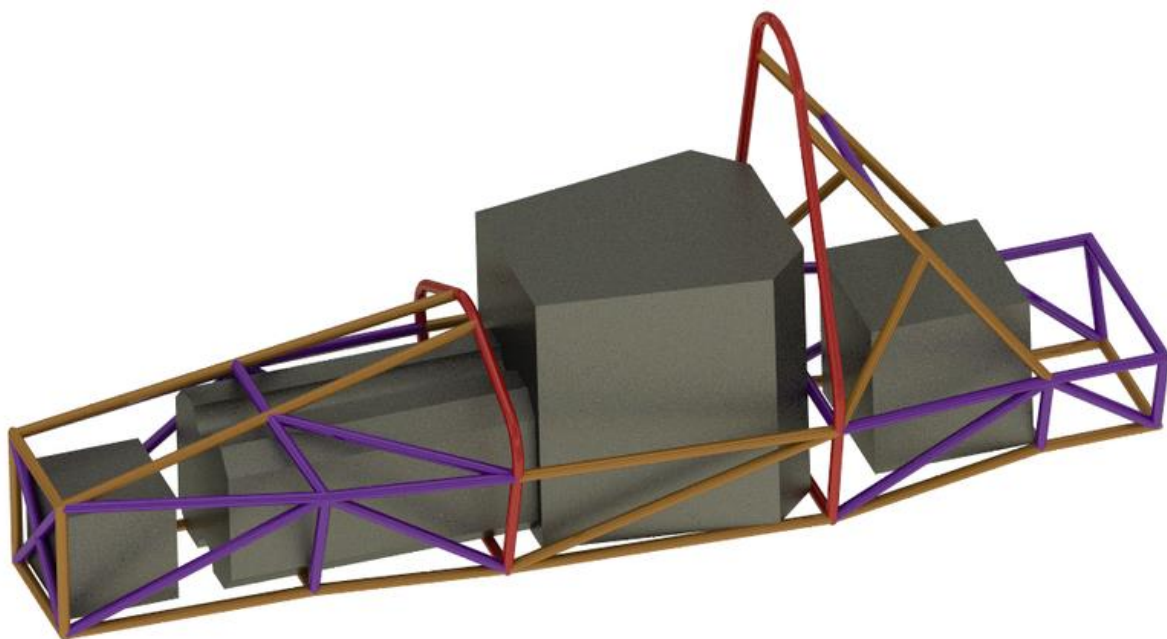


Рисунок 17 – шаблоны безопасности из регламента соревнований «Формула Студент»

На рисунке 17 можно увидеть 4 шаблона, два из которых регулируются регламентом соревнований «Формула Студент». Можно увидеть, два шаблона, расположенных посередине пространственной рамы и являются шаблонами безопасности и необходимы они для обеспечения необходимого пространства для тела и ног пилота, чтобы при посадке пилот ни одной частью своего тела не мог касаться конструкции шасси [7].

Что касается переднего и заднего шаблона, то это шаблоны, имитирующие расположение педального узла и силового агрегата. В данном случае шаблон педального узла показывает расстояние до зоны передней перегородки, а также до ног пилота. Шаблон силового агрегата также необходим, потому что часть двигателя и трансмиссии не могут выходить за пределы рамной конструкции, также в целях безопасности [25].

Помимо данных шаблонов в регламенте есть шаблон под названием 95-процентиль. Данный шаблон имитирует среднестатистического человека и может быть применим к 95 процентам населения всей земли. На рисунке 18 можно увидеть расположение данного шаблона.

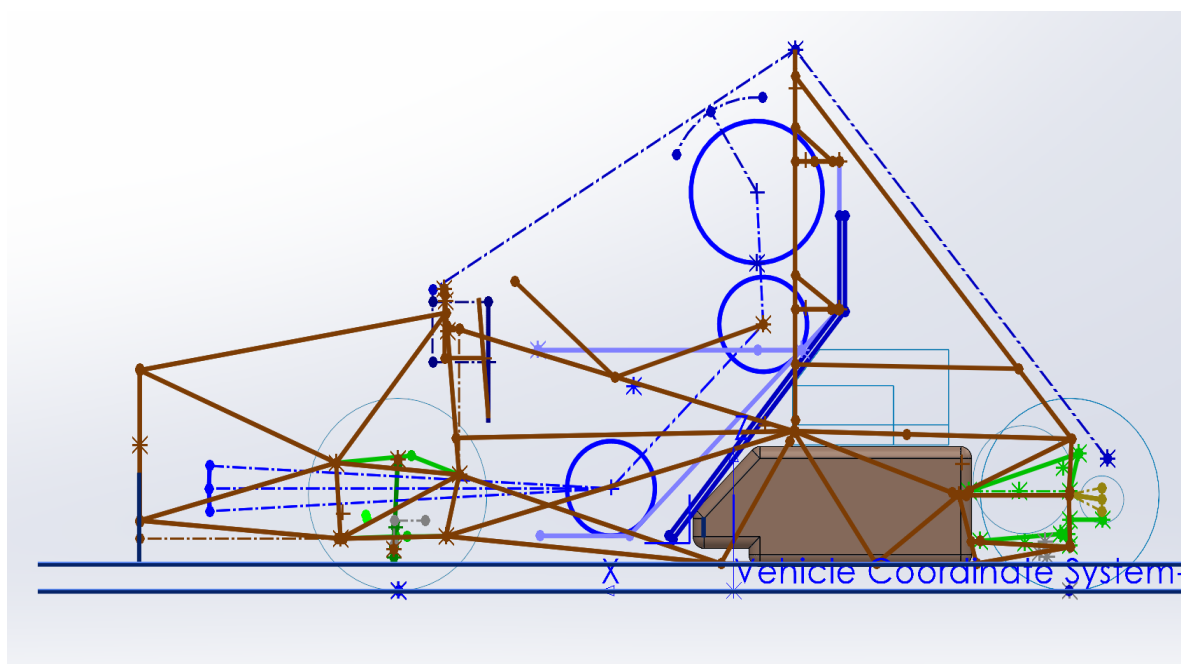


Рисунок 18 – шаблон имитации тела пилота 95-процентиль из основного регламента соревнований «Формула Студент»

Также на рисунке 18 можно увидеть, что регламентом соревнований также регулируется расстояние от головы пилота в шлеме до подголовника, а также до мнимой линии, проходящей по касательной поверх главной и

передней дуги. именно данное расстояние позволяет пилоту не повредить шею при перевороте гоночного болида.

Для точности изготовления пространственной рамы чаще всего используют специализированное оборудование под названием стапель. Стапель необходим для удерживания элементов конструкции в неподвижном состоянии во время сварки элементов между собой. Стапель препятствует уводу металла во время сильного его нагрева от сварки. Это позволяет получить качественное изделие в пределах разумных допусков. На рисунке 19 можно увидеть пример такого стапеля.

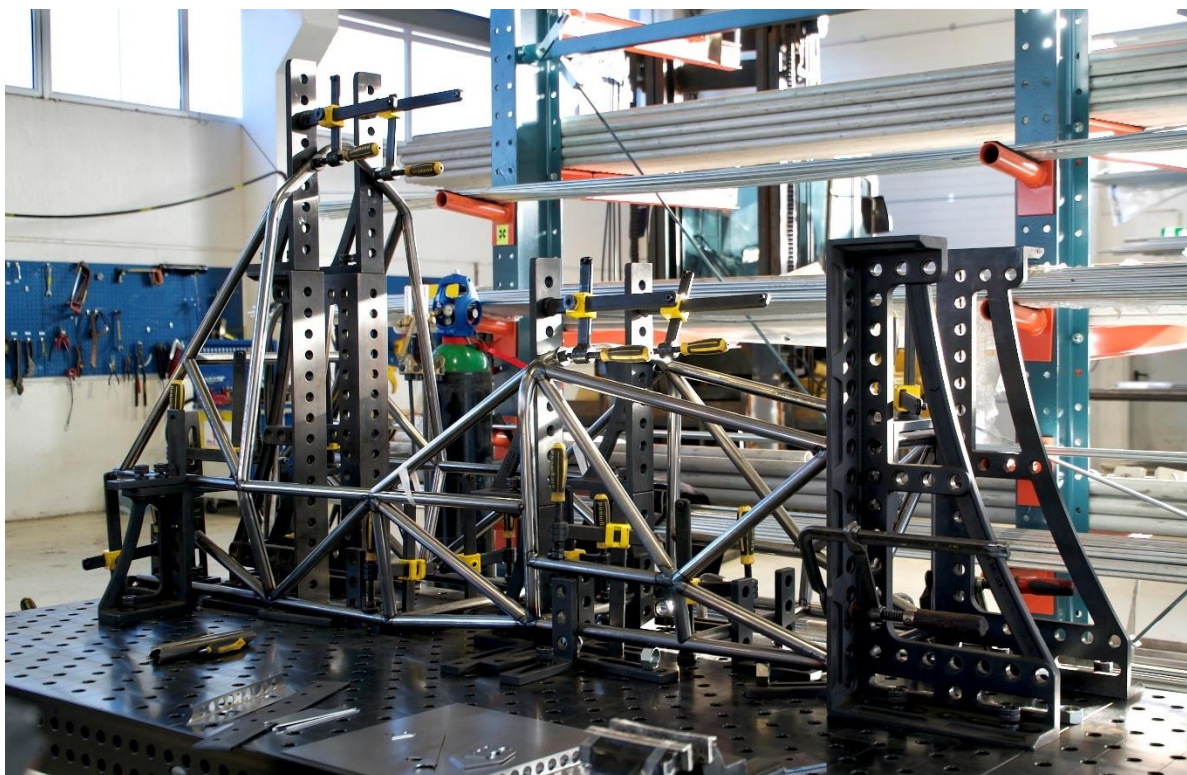


Рисунок 19 – стапель для сварки пространственной металлической рамы гоночного болида «Формула Студент»

Также одним из важных пунктов, который следует учесть при проектировании рамного шасси – жесткость конструкции. Всем известно, что при различных маневрах все моменты с колес и подвески передаются на раму, из-за чего рама может изгибаться. Чаще всего показателем хорошей рамы

является крутильная жесткость. Симуляции крутильной жесткости имитируют торможение в повороте, а также высокоскоростные маневры. Крутильная жесткость также определяет эффективность работы подвески автомобиля, ведь с малой жесткостью реакция подвески на управление будет неудовлетворительной [23]. Симуляции проводят при помощи специализированных программ для моделирования и симуляций. Типичный метод симуляции крутильной жесткости рамной конструкции, это фиксация задней части рамы в точках крепления задней подвески, и приложение закручивающего момента в точку пятна контакта одного из передних колес, при условии абсолютно жесткого амортизатора. Таким образом получается значение крутильной жесткости в Нм/град. Считается плохим шасси в том случае, если результат симуляций показывает менее 2000 единиц. На рисунке 20 показан пример симуляции.

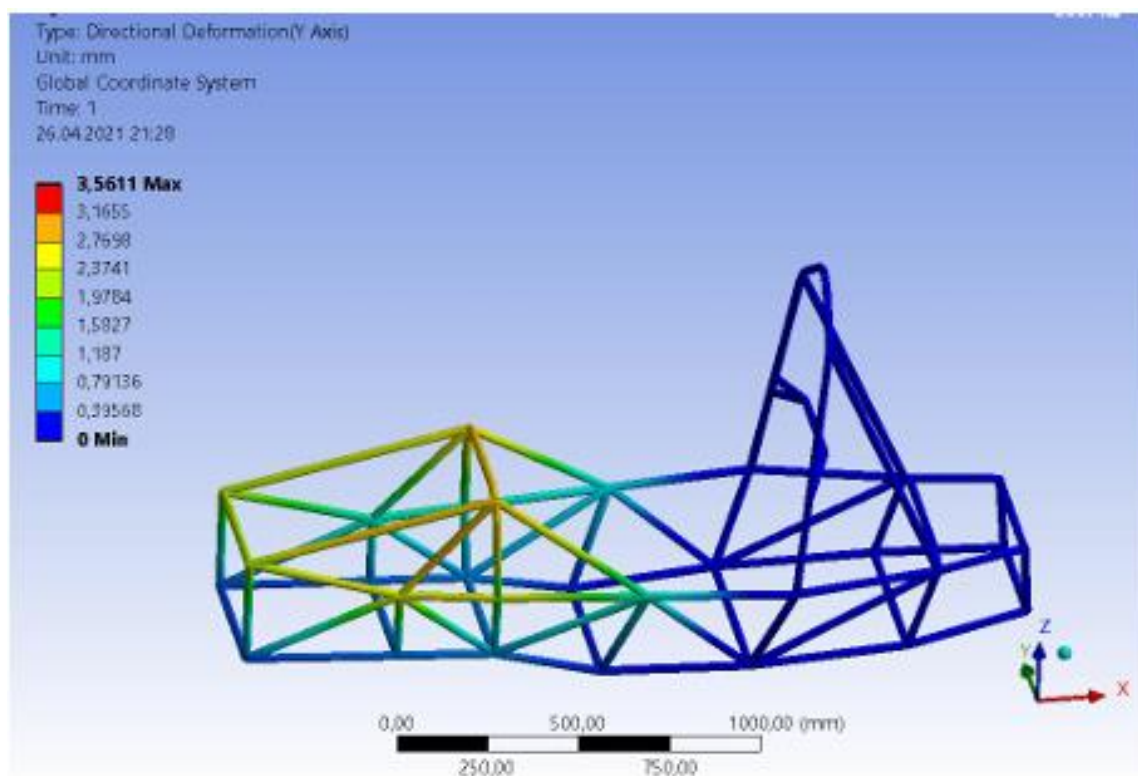


Рисунок 20 – Анализ рамы гоночного болида на кручение при повороте (по оси Y)

3.3 Органы управления

Основными органами управления гоночного болида «Формула Студент» являются рулевая система и педальный узел. Это два немаловажных узла автомобиля, которые влияют на эргономику автомобиля наравне с правильной посадкой пилота внутри кокпита. Именно поэтому данным элементам автомобиля необходимо также уделять достаточно внимания, иначе эффективность пилота в неудобном автомобиле сильно ухудшается.

У рулевой системы есть основные аспекты, которые необходимо учитывать при проектировании:

- расположение рулевого колеса в кокпите гоночного болида относительно пилота,
- количество оборотов рулевого колеса (зависит от передаточного отношения рулевого механизма, а также от конструкции поворотных кулаков и рулевых сошек),
- усилие на рулевом колесе,
- симметричность крутящего момента при повороте направо и при повороте налево,
- плавность крутящего момента.

С учетом всех этих аспектов и пожеланий пилотов можно получить очень удобную и отзывчивую рулевую систему.

На рисунке 21 можно увидеть изображение из регламента соревнований «Формула Студент», с требованиями по установке рулевого колеса относительно пилота и пространственной рамы.

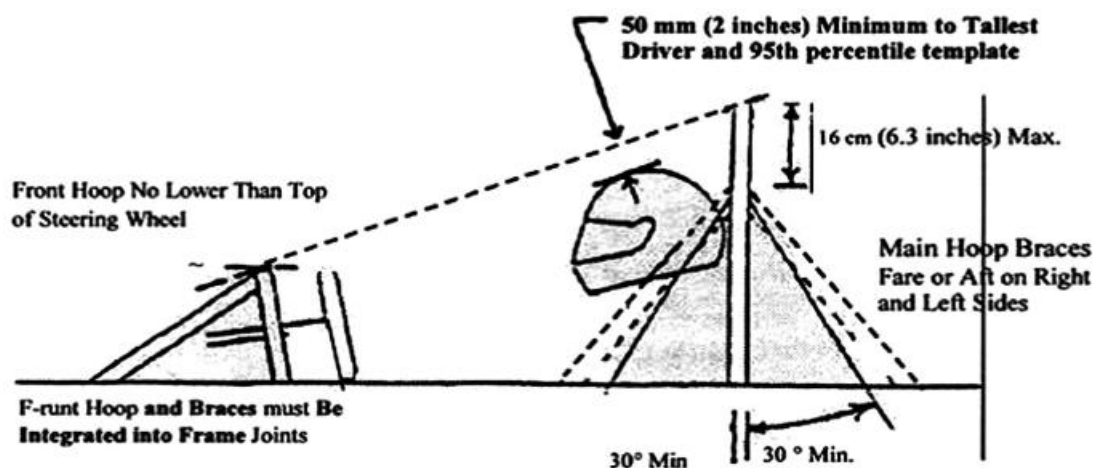


Рисунок 21 – изображение из регламента соревнований «Формула Студент»

Регламентом соревнований «Формула Студент» регулируется расстояние рулевого колеса по высоте и по вылету относительно передней дуги пространственной рамы или монокока, однако угол установки рулевого колеса команды вправе подбирать самостоятельно по удобству для пилота. Некоторые команды изготавливают проверочные стенды для проверки эргономики, на рисунке 22 можно увидеть пример.



Рисунок 22 – стенд для проверки эргономики гоночного болида

Усилие на руле определяется множеством факторов и частично оптимизируется еще на этапе проектирования подвески и ее кинематики. Таким образом усилие на рулевом колесе может быть отрегулировано за счет кинематических характеристик подвески, таких как плечо обкатки, плечо стабилизации, угол продольного наклона шкворня, угол поперечного наклона шкворня, угол Аккермана, а также за счет ширины и сцепных характеристик шин и конструкции поворотного кулака. Помимо уже перечисленных параметров, влияющих на усилие на рулевом колесе, также на него влияют диаметр рулевого колеса, кинематика рулевых тяг, взаимное расположение рулевых карданных шарниров [18].

Кинематика и расположение рулевого механизма в пространстве определяется при помощи упрощенной схемы, которая может быть построена в программе для моделирования, пример можно увидеть на рисунке 23.

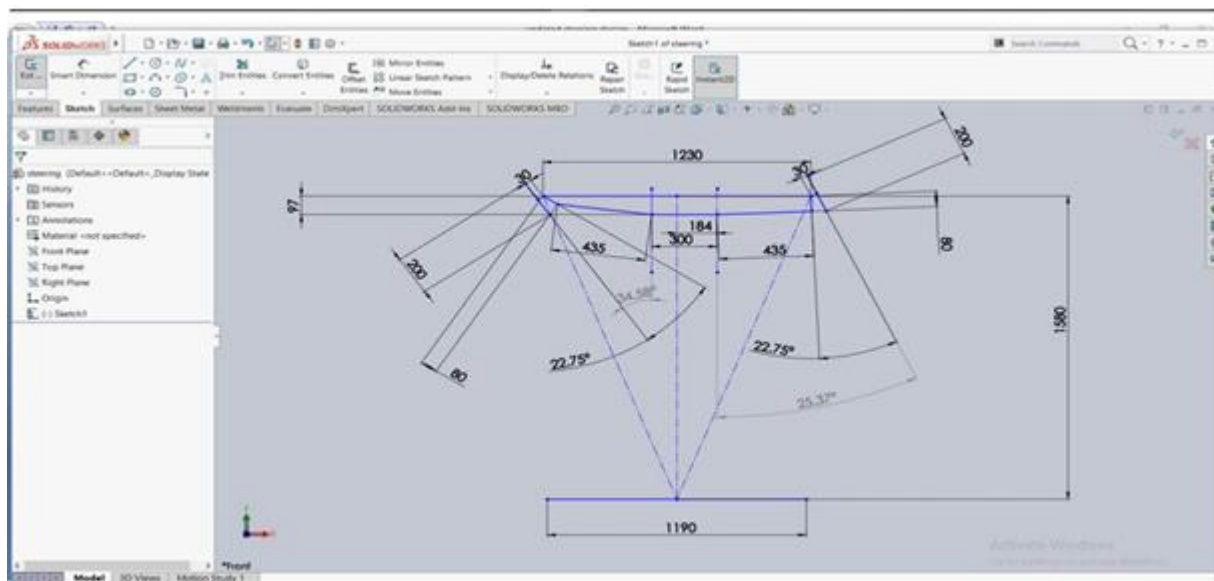


Рисунок 23 – кинематика и расположение рулевого механизма в пространстве

Усилие на рулевом колесе может быть рассчитано по формуле 2.

$$F = 1,8 \times Mr \times \cos \gamma / (L1 \times \sin \beta) \quad (2)$$

где $L1$ – длина рулевой трапеции, мм;

γ – угол между рулевой тягой и рейкой, град;

β – угол между трапецевидным рычагом и рулевой тягой, град;

F – усилие на рулевом колесе, Н;

Что касается количества оборотов рулевого колеса и передаточного отношения, то этот аспект зависит от передаточного числа механизма рулевой рейки, а также от максимального хода рейки, или же от максимального поворота управляемых колес (данное значение не всегда ниже максимального хода рулевой рейки) [8].

«Для снижения усилия на рулевом колесе было принято решение отказаться от рулевого редуктора, так как редуктор увеличивает сопротивление вращению рулевого колеса на 7 %. За основу взята конструкция с карданной передачей. Так как для правильной работы карданов без закусывания необходимо обеспечить правильный угол установки рулевого вала, то рулевая рейка была смещена ближе к передней части автомобиля на 100 мм. В качестве рулевой рейки была выбрана KazTechnologies (рисунок 24). Данная рейка обеспечивает максимальный ход 82,5 мм при повороте рулевого колеса на 248 градусов» [3].



Рисунок 24 – Рулевая рейка KazTechnologies

Таким образом, передаточное отношение рейки составляет 4.71" на оборот, при условии, что ход рулевого колеса вправо и влево не превышает 130 градусов, что является приемлемым для пилотов гоночного болида класса «Формула Студент».

Для того, чтобы иметь симметричный и плавный крутящий момент, без рывков необходимо правильно расположить карданные шарниры рулевой системы. Основные правила:

- карданные шарниры не должны закусывать (не должно быть контакта верхней и нижней головки кардана,
- рабочий укол кардана не должен превышать 30 градусов (чем меньше, тем лучше),
- верхний и нижний кардан должны иметь приблизительно одинаковый угол поворота для снижения момента флуктуации.

На схеме с рисунка 25 можно увидеть взаимное расположение карданных шарниров.

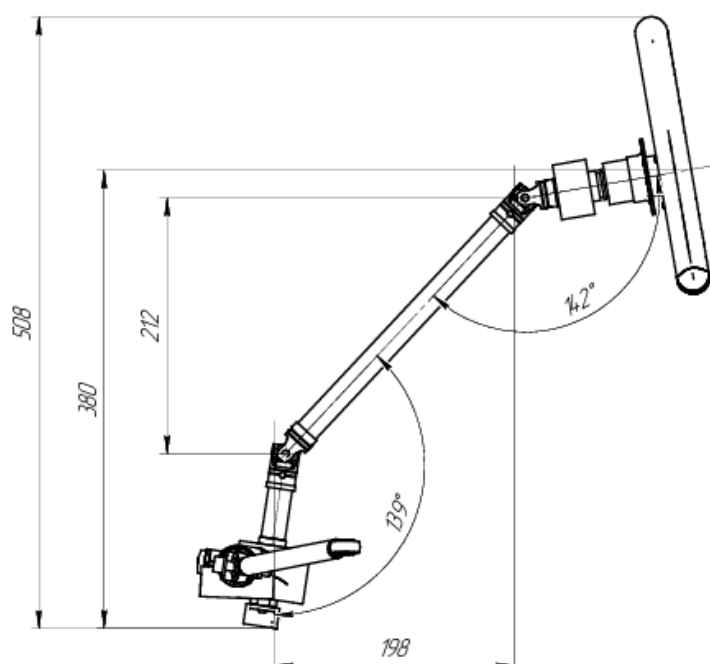


Рисунок 25 – схема рулевого механизма гоночного болида

Что касается педального узла, то данный узел также является немаловажным элементом с не меньшим количеством тонкостей, которые необходимо учитывать инженеру при проектировании. Вот основные пункты, которые следует учесть:

- педальный узел не может входить в зону передней перегородки твердыми частями конструкции (гнувшиеся тормозные шланги не попадают под правило),

- педаль тормоза должна быть рассчитана на усилие не менее 2000 ньютонов,

- педаль сцепления, если такая присутствует, стоит располагать дальше от педали тормоза в целях безопасности,

- педаль тормоза должна быть оснащена баланс баром для распределения нагрузки между передним и задним тормозным контуром, а также для возможности прожима педали тормоза до кнопки отключения питания в случае выхода из строя одного из контуров.

Пример педального узла можно увидеть на рисунке 26.

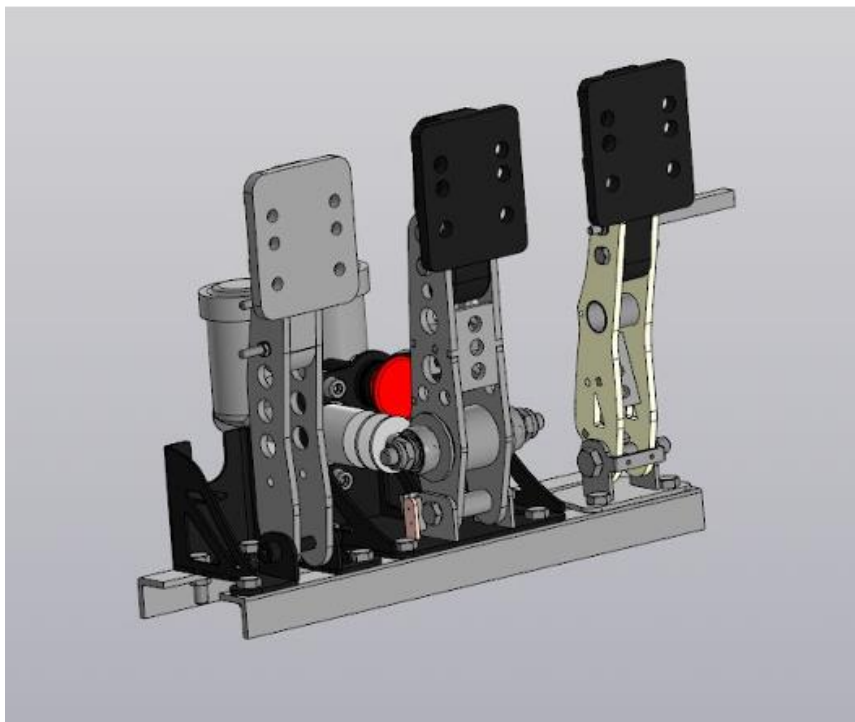


Рисунок 26 – Педальный узел гоночного болида

«Можно увидеть, что педальный узел состоит из трех педалей, а именно из педали сцепления, состоящей из непосредственно педали, пластиковой клавиши, массивного кронштейна под цилиндр сцепления и соответственно самого цилиндра сцепления, также можно увидеть тормозную педаль, которая также состоит из непосредственно педали, пластиковой клавиши, массивного кронштейна под два главных тормозных цилиндра, баланс бара, кнопки отключения питания, и, также педали акселератора, которая состоит из педали, пластиковой клавиши, малого кронштейна и трубки толкателя троса дроссельной заслонки» [13].

«Тормозная педаль. Для обеспечения легкости конструкции был выбран материал – алюминий, а также пластик для изготовления нажимной клавиши педали. Так как бюджет всегда ограничен, то способ изготовления тормозной педали – сварная конструкция, а не фрезерование из цельного бруса алюминия. Данный способ позволяет сократить производственные расходы минимум в 5 раз. Для сварки основной структуры педали был выбран материал марки АМГ6, так как этот материал обладает лучшей свариваемостью.

Для выбора материала для нажимной пластиковой клавиши необходимо провести анализ различных пластиковых материалов, так как АБС пластик больше не может быть использован в производстве педалей по причине плохой надежности, примером чему служит сломанная педаль сцепления предыдущего автомобиля на рисунке 27» [4].



Рисунок 27 – Сломанная педаль сцепления из АБС пластика

Было выявлено, что пластик поликарбонат (РС) является наиболее прочным пластиком для 3Д-печати, поэтому материалом для нажимных пластиковых педалей был выбран именно поликарбонат.

Далее, одним из немаловажных факторов является ход и усилие, прикладываемое пилотом на педаль тормозной системы для приведения системы в действие. Для определения этих факторов обычно выстраивается схема с передаточным отношением педали. Пример схемы тормозной педали можно увидеть на рисунке 28.

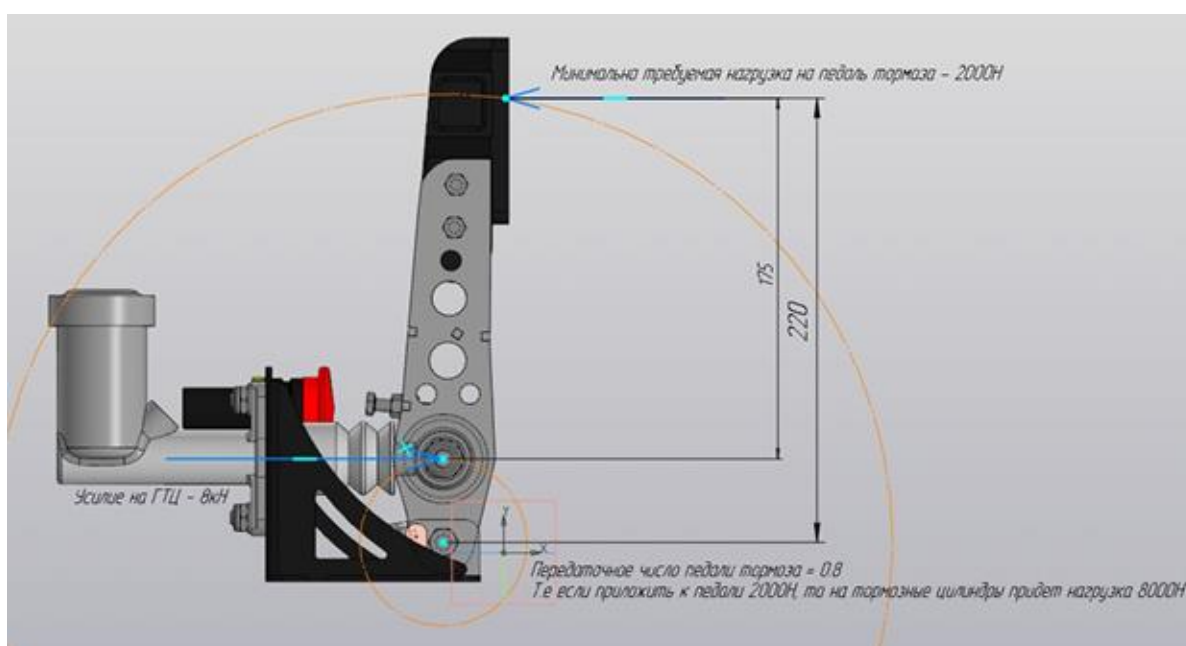


Рисунок 28 – Схема усилий тормозной педали

«Передаточное отношение на схеме было выбрано 0.8. Это означает, что при нажатии пилотом на клавишу с усилием в 2000 Н, усилие, создаваемое на штоке цилиндров, будет равняться 8000 Н. Данное передаточное число тормозной педали обеспечивает необходимый ход тормозной педали в 60 мм в верхней точке педали» [22].

Помимо схемы также необходимо провести анализ педали тормоза на прочность, так как регламентом соревнований требуется минимальное усилие на педаль 2000 Н.

На рисунке 29 можно увидеть симуляцию тормозной педали на прочность. Во время симуляции педель цилиндрически фиксировали в нижней точке и фиксировали в точке упора штока главного тормозного цилиндра, далее прикладывали усилие в 2000 Н на клавишу педали.

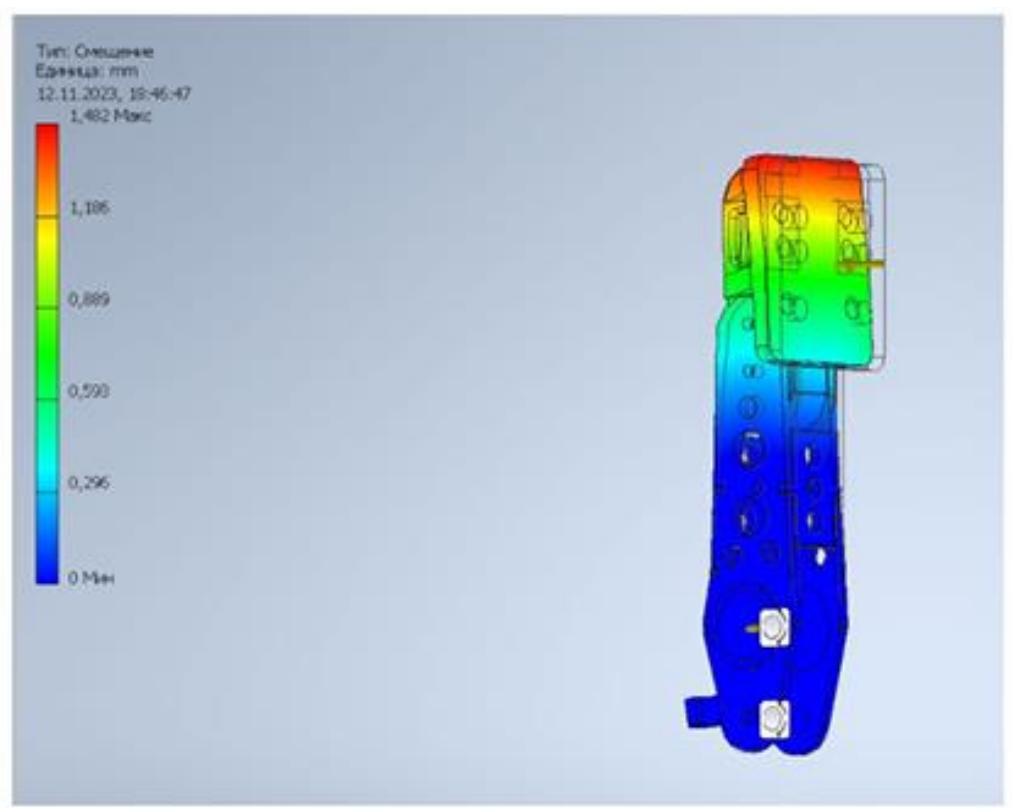


Рисунок 29 – результат симуляции педали тормоза на прочность, максимальное смещение не превышает 1.5 мм.

3.4 Силовой агрегат, система впуска

«Двигатель выбирался по следующим пунктам: высокая удельная мощность к массе двигателя, наименьший диаметр впускного канала для минимализации потери давления во впускном канале из-за рестриктора, доступность деталей и ремкомплектов, рабочий объем двигателя меньше 710 см³. Чаще всего в проектах «Формула Студент» используют двигатели от производителей KTM, Honda и Yamaha. От KTM используют различные

одноцилиндровые двигатели с объемом от 350 до 690 см³ из-за высокой удельной мощности к массе и низкому расходу топлива, в среднем 12 литров на 100 км в заводском исполнении.

Двигатели Honda имеют 4 цилиндра, в свою очередь дают очень высокую мощность, однако имеет высокое потребление топлива, в среднем в 1.5 раза больше своих конкурентов и большой удельный вес, что может сказаться на управлении болида и малых очках в дисциплине на топливную эффективность» [10].

Двигатели Yamaha имеют 1 цилиндр высокую удельную мощность к массе. Как принято, команды начального уровня выбирают двигатели с 4 цилиндрами в угоду массе, так как данный тип позволяет допускать ошибки в тягово-динамических расчетах и настройки двигателя. По техническим характеристикам двигатели Yamaha и KTM схожи, однако многие команды выбирают KTM благодаря его топливной эффективности и отклику педали газа. Выбор пал на двигатель KTM 450 ехс-f 2017 года из-за его превосходных показателей мощность к массе – 54 л.с. к 29,2 кг сухой массы. Двигатель изображен на рисунке 30.



Рисунок 30 – Двигатель KTM 450 ехс-f 2017

«В новой системе впуска изменения коснулись длины раннера, он был подобран под пик крутящего момента двигателя, около 5600 об/мин. Объем ресивера составил 3 л, что является компромиссом между откликом на педаль газа и сглаживанием пульсаций потока, ограниченного рестриктором. По результатам расчета получили:

- 0,01 с – время оборота коленчатого вала;
- 0,02 с – время одного цикла;
- 430 градусов – угол закрытия впускного клапана;
- 0,012 с – время, когда впускной клапан закрыт во время одного цикла;
- 4116 мм – расстояние, которое проходит волна за время, когда впускной клапан закрыт; – 2058 мм – результат расчета длины раннера для 1 волны. Таким образом, оптимальная длина раннера для двигателя с рестриктором составляет 254 мм. Зная, что длина от впускного клапана до начала впускного патрубка составляет 150 мм, выбираем длину раннера 100 мм» [5]

Была построена 3Д модель впускного ресивера с формой, которая была обусловлена характеристиками мотора (длина раннера, угол раструба, объем ресивера). На рисунке 31 изображена 5 итерация формы ресивера, именно она получилась наиболее эффективной

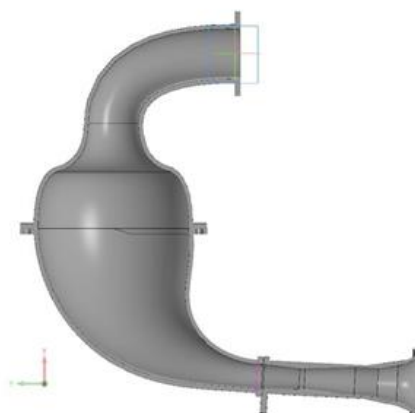


Рисунок 31 – Форма впускного ресивера

5 Безопасность и экологичность технического объекта

«Изготовление узлов гоночного болида болида класса «Формула Студент» связано с опасностью для изготовителя, поэтому весь процесс должен быть заключен в регламенте по охране труда, которое обеспечивает безопасность рабочим при изготовлении деталей. Разработка документации ведется с упором на опыт иностранных предприятий в области машиностроения, а также на законы, действующие на территории Российской Федерации.» [15]

Для производства автомобиля необходимы слесарные, сварочные и сборочные работы. ОВПФ слесарных работ указаны в таблице 2.

Таблица 2 – ОВПФ слесарных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
1	2	3	4
Слесарные работы	– резка металла, – сверление, – резьбонарезание	Углошлифовальная машина, трубка, керн, шуруповерт, молоток, метчик и метчикодержатель	Физические: механизмы, изделия, вращающиеся части, острые кромки, повышенная запыленность и загазованность

Для данного рабочего действуют требования по технике безопасности:

- применять в процессе своей работы оборудование, инструменты и средства малой механизации по назначению, в соответствии с инструкциями завода – изготовителя,
- выполнять только порученную непосредственным руководителем работу и не передавать ее другим без разрешения непосредственного руководителя,
- содержать рабочее место, в том числе и проходы к рабочим местам в чистоте и порядке, при обнаружении захламления рабочей зоны – необходимо обеспечить ее уборку

- систематическая проверка знаний по технике безопасности и охране труда,
- регулярная проверка здоровья и медицинские осмотры,
- соблюдения правил внутреннего распорядка предприятия,
- соблюдать пожарную безопасность и правила охраны труда на рабочем месте.

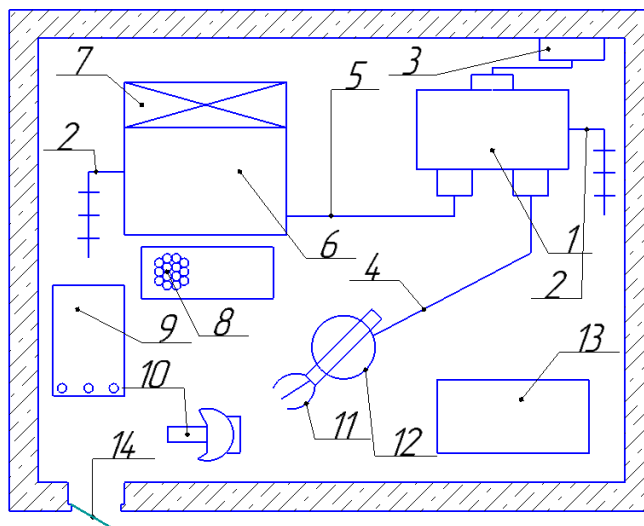
ОВПФ сварочных работ указаны в таблице 3.

Таблица 3 – ОВПФ сварочных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
1	2	3	4
Сварочные работы	Сварка деталей	Сварочная оснастка, источник сварочного тока, пинцы, ручной инструмент.	Физические: механизмы, изделия, острые кромки, повышенная запыленность и загазованность, высокая температура, ультрафиолетовое и инфракрасное излучение, излишняя яркость сварочной дуги, опасность ожогов, возможность взрыва баллонов и систем, электромагнитные поля.
			Химические: –аргон, вольфрам, хлориды железа, натрия и калия.

Для данного рабочего действуют требования по технике безопасности:

- необходимо подготовиться и произвести уборку перед сварочными операциями,
- проверка работоспособности и настройка рабочего оборудования происходит перед началом работы,
- систематическая проверка знаний по технике безопасности и охране труда,
- регулярная проверка здоровья и медицинские осмотры,
- соблюдения правил внутреннего распорядка предприятия,
- соблюдать пожарную безопасность и правила охраны труда на рабочем месте.



1 – сварочный аппарат; 2 – заземление; 3 – силовой провод питания; 4 – шланг для подачи проволоки и газа; 5 – обратный токоподводящий провод; 6 – верстак; 7 – вентиляция; 8 – резиновая изоляция рабочего; 9 – проволока; 10 – щиток; 11 – пистолет для подачи проволоки и газа; 12 – стул; 13 – ящик дляотходов; 14 – дверной проем.

Рисунок 33 –Рабочие место для проведения сварочных работ

«К основным задачам сварщика относятся:

- производить сварку конструкций из любых материалов, которые обладают необходимыми свойствами,
- выполнять прихватки деталей,
- ликвидировать дефекты по средствам зачистки,
- резать простые детали с помощью дуговой сварки;
- осуществлять контроль качества сварочного шва и его проникание в материал после сварки, специальными инструментами.» [9]

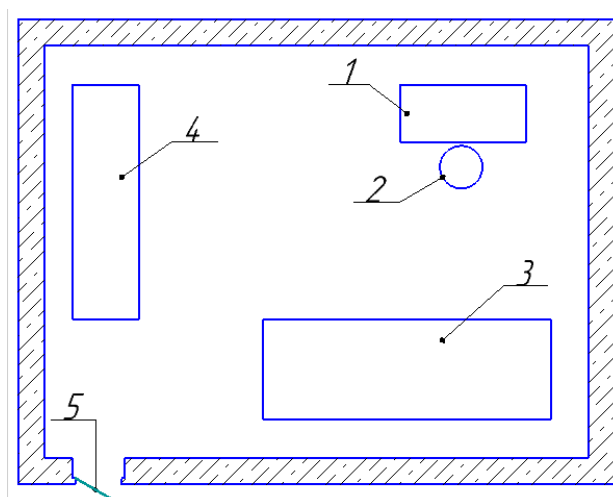
ОВПФ сборочных работ указаны в таблице 4.

Таблица 4 – ОВПФ сборочных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
Сборочные работы	Сборка узла с упором на чертежи и модели	– стол для работы, тиски,инструмент (зубило, молоток, напильник), инструменты для измерения (линейка, штангенциркуль), электроинструмент.	Физические: –части разрушившегося изделия, острые края ; – повышенный уровень шума; – абразивная пыль,воздействие электрического тока

Для данного рабочего действуют требования по технике безопасности:

- ознакомление с инструктажами по технике безопасности,
- промышленная санитария (чистота рабочего места),
- дисциплина на рабочем месте,
- использование оборудования по назначению.
- при обнаружении поломки – сообщать спецгруппе по ремонту оборудования



1 – рабочее место; 2– стул; 3 – верстак; 4 – инструментальный шкаф; 5-дверной проем.

Рисунок 34 – Рабочее место для сборочных работ

К основным задачам сборщика относятся:

- сборка деталей или узлов конструкции в кондукторе по чертежу либомодели,
- проверка точности установки деталей с опорой на чертежи при помощи измерительных инструментов,
- указание примечаний для дальнейшей работы с данной деталью.

Выводы по разделу

Реализация на практике всего комплекса мероприятий и мер, разработанных для данных ОВПФ, позволит практически полностью обезопасить работников во время выполнения технологического процесса.

Заключение

В выпускной квалификационной работе рассмотрено назначение выпускной системы двигателя внутреннего сгорания и их типы. Целью работы являлось проектирование и расчет системы выпуска для гоночного болида класса «Формула Студент», удовлетворяющей требованиям регламента международных соревнований «Формула Студент».

В ходе выполнения работы был изучен основной регламент соревнований «Формула Студент», выделены основные требования регламента, касающиеся узлов болида. Также был проведен анализ существующих конструкций, используемых зарубежными командами для гоночных болидов класса «Формула Студент», определены положительные и отрицательные инженерные решения.

Кроме того, во время работы были описаны основные теоретические аспекты проектирования систем гоночного болида класса «Формула Студент», оснащенных двигателем внутреннего сгорания.

Подготовлена 3D–модель гоночного болида «Формула Студент», а также изготовлены 2Д чертежи. Проведен ряд расчетов и симуляций, в рамках валидации систем гоночного болида. Все симуляции показали ожидаемый результат и доказали рентабельность проведенных оптимизационных работ над системами.

В разработанный болид был установлен двигатель КТМ 450 с рестриктором, на болид была установлена передняя и задняя двух рычажная подвеска с толкающими тягами через коромысла. Специально под обновленные пространственные точки подвески было разработано шасси, состоящее из стальных труб. Системы управления были разработаны согласно регламенту, а также согласно эргономическим предпочтениям пилотов команды.

Список используемых источников

1. Регламент международных соревнований 2022 Formula SAE® Rules
2. 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.
3. Горбачевич, А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие для вузов/ А. Ф. Горбачевич, В.А. Шкред. М: – ООО ИД «Альянс», 2007–256 с.
4. Иванов, А.С. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учебное пособие / А. С. Иванов, П. А. Давыденко, Н.П. Шамов. - М.: ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 276 с.
5. Капрова, В.Г. Учебно-методическое пособие к выполнению курсовой работы по дисциплине «Организация производства» для студентов специальности 190201 –«Автомобиле и тракторостроение» всех форм обучения / В. Г. Капрова. –Т.: ТГУ, 2007. – 63 с
6. Клепиков, В.В. Основы технологии машиностроения: учебник / В. В. Клепиков [и др.]. – М.: ИНФРА-М, 2017. - 295 с.
7. Косилова, А.Г. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах Т2 (Под ред. А. Г. Косиловой 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985, 496 с., ил.).
8. Косов, Н.П. Технологическая оснастка: вопросы и ответы: Учебное пособие для вузов. / Н. П. Косов, А. Н. Исаев, А.Г. Схиртладзе. — Электрон.дан. — М.: Машиностроение, 2007. — 304 с
9. Лебедев, В. А. Технология машиностроения: Проектирование технологий изготовления изделий: учеб.пособие для вузов / В. А. Лебедев, М. А. Тамаркин, Д. П. Гепта. - Гриф УМО. – Р.-на-Д.: Феникс, 2008. – 361с.
10. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учеб. для студ. вузов, обуч. по спец. 151001 напр. "Конструкторско-технологическое обеспечение

машиностроит. производств" / А. А. Маталин. - Изд. 3-е, стер. ; Гриф УМО. – С.-П. [и др.]: Лань, 2010. - 512 с.

11. Михайлов, А.В. Оформление документов на технологические процессы обработки резанием: Метод.указания/Сост.Михайлов А. В.-Т.: ТолПИ, 1993.

12. Раймпель Й. Шасси автомобиля / под. ред. И. Н. Зверева. М.: Машиностроение, 1983. 356 с.

13. Дьяков И. Ф., Оптимальный выбор подвески транспортных средств // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований. Механика и машиностроение. 2020. С. 148–154.

14. Formula SAE [Электронный ресурс] <http://www.fsaeonline.com/> (дата обращения: 05.04.24).

15. Свинов В.В. Моделирование динамики рулевого управления автомобиля // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2008. С. 110–111.

16. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах Т2 / под ред. А. Г. Косиловой. М.: Машиностроение, 1985, 496 с.

17. Шерстобитова О. О., Мошко Д. А. Разработка модульной каркасно сборочной технологической оснастки для производства элементов спортивно гоночных автомобилей» // Ежегодный сборник трудов "Студенческие инженерные проекты". 2017. С. 205–207.

18. Маркина А. А., Чепкасов С.Н., Бережная М.А. Разработка комплексной системы управления движением спортивного автомобиля класса «Формула Студент» по заданной трассе // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2019. С. 1–12

19. Горелов В. А., Косицын Б.Б. Разработка комплексной системы управления движением спортивного автомобиля класса «Формула Студент» по заданной трассе // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. С. 45–55.

20. Formula Student Germany [Электронный ресурс] // URL: <https://www.formulastudent.de/> (дата обращения: 05.04.24).
21. Greg Wheatley, Brent Lane Design of a Rear Suspension for a Race Car // Engineering Letters Journal. 2020. P. 414–418.
22. Badih A. Jawad, Jason Baumann. Design of Formula SAE Suspension // Motorsport Engineering Conference & Exhibition Indianapolis, Indiana December. 2002. P. 2–5.
23. Riley W. and George A. «Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis» / University of Cornwell. 2002. P.85-88.
24. Popa C. 2005 Formula SAE-A Racer Car / University of Southern Queensland. 2005. P.113–124.
25. Li Sun, Zhao Deng, Qing Zhang. Design and Strength Analysis of FSAE Suspension // The open Mechanical Engineering Journal. 2014. P. 414–418.