

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 Проектирование передней и задней подвески перспективного болида
Formula Student

Студент

В.С. Власов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, доцент А.В. Бобровский

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

Тольятти 2022

Аннотация

Проектирование передней и задней подвески перспективного болида Formula Student. Выпускная квалификационная работа. Тольяттинский Государственный Университет, 2022.

Целью данной работы является разработка подвески болида класса Formula Student, соответствующей основному регламенту соревнований Formula Student, а также превосходящую в динамических качествах подвеску предыдущих моделей команды ТГУ. В связи с этим был определен ряд задач: 1) описать проект Formula Student; 2) провести анализ существующих конструкций подвески болидов FSAE; 3) определить исходные данные, провести расчеты и спроектировать переднюю и заднюю подвеску болида; 4) описать основные неисправности подвески и методы ее обслуживания.

В ходе работы был проведен анализ конструкций подвески болидов соревнований Formula Student, описан процесс проектирования подвески, приведен расчет перераспределения масс и расчет угла крена автомобиля, составлена технологическая карта по сборке подвески гоночного автомобиля.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки в размере 78 страниц, содержащей 6 таблиц, 32 рисунка, 2 приложения и графической части, содержащей 6 листов.

Abstract

The title of the bachelor's thesis is "Design of front and rear suspension of the perspective Formula Student racing car".

The work consists of a 78-page explanatory note including 32 figures, 6 tables, a list of 20 references including 5 foreign sources, 2 appendices and the graphic part on 6 A1 sheets.

The aim of the work is to design a new improved front and rear suspension of the Formula Student racing car.

In the first part we describe the international Formula Student project and outline the notion of suspension as a system.

In the second part we conduct analysis of the existing designs of the front and rear suspensions on the Formula Student racing cars.

In the next part we define the input data which are necessary for further design of the suspension and describe the calculations as well as the design process of the front and rear suspension of the racing car.

The last part is dedicated to the suspension maintenance of the Formula Student car. Apart from that, the technological map for assembling the suspension is developed.

Overall, the results suggest that the presented work can be used for design of the front and rear suspension for another racing cars of the same class.

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение..... | 5 |
| 1 Состояние вопроса | 6 |
| 1.1 Описание международного проекта Formula Student..... | 6 |
| 1.2 Подвеска в автомобиле | 7 |
| 2 Исследование и анализ конструкторских решений зарубежных команд- участников проекта Formula Student | 11 |
| 2.1 Анализ конструкций передних подвесок болидов FSAE | 11 |
| 2.2 Анализ конструкций задних подвесок болидов FSAE..... | 15 |
| 3 Проектирование и расчет подвески болида FSAE 2022..... | 19 |
| 3.1 Определение исходных данных..... | 19 |
| 3.2 Проектирование передней подвески болида FSAE 2022 | 26 |
| 3.3 Проектирование задней подвески болида FSAE 2022 | 47 |
| 4 Обслуживание подвески гоночного болида FSAE 2022 | 51 |
| 4.1 Описание автомобиля | 51 |
| 4.2 Описание деталей рассматриваемого узла | 52 |
| 4.3 Основные неисправности и их устранение | 54 |
| 4.4 Общая последовательность установки подвески..... | 57 |
| 4.5 Разработка инструктивно-технологической карты | 61 |
| 5 Безопасность и экологичность технического объекта | 67 |
| Заключение | 72 |
| Список используемой литературы и используемых источников..... | 73 |
| Приложение А Спецификация к сборочному чертежу | 75 |
| Приложение Б Спецификация к сборочному чертежу..... | 77 |

Введение

Проект Formula Student – международный проект, в котором принимают участие высшие учебные заведения со всего мира. Студенты, принимающие участие в проекте должны за один год спроектировать и построить гоночный болид класса Formula Student, который будет полностью соответствовать основному регламенту соревнований. В рамках данного проекта студенты применяют теорию, изученную в университете, на практике.

Целью данной работы является разработка подвески болида класса Formula Student, соответствующей основному регламенту соревнований Formula Student, а также превосходящую в динамических качествах подвеску предыдущих моделей команды ТГУ.

В связи с этим был определен ряд задач:

1. Описать проект Formula Student.
2. Провести анализ существующих конструкций подвески болидов FSAE.
3. Определить исходные данные, провести расчеты и спроектировать переднюю и заднюю подвеску болида.
4. Описать основные неисправности подвески и методы ее обслуживания.

В рамках данной выпускной квалификационной работы были проанализированы существующие конструкции подвесок, применяемые другими командами Formula Student, а также описаны основные методы проектирования с учетом поставленных задач по увеличению скорости прохождения динамических дисциплин в ходе соревнований.

Результатом работы является разработанная передняя и задняя подвеска гоночного автомобиля класса «Формула Студент», а также инструктивно-технологическая карта по сборке подвески болида.

1 Состояние вопроса

1.1 Описание международного проекта Formula Student

Проект Formula Student – международный инженерно-спортивный проект для студентов Высших учебных заведений со всего мира. Formula Student – это уникальный проект, который расширяет границы существующего образования. Система проекта построена на максимальном внедрении эффективных методов инженерной подготовки. Благодаря теоретическим знаниям и практическим умениям, получаемыми студентом в процессе создания гоночного болида, студент после выпуска из университета является квалифицированным, опытным и легко обучаемым кадром.

Проект создает для студентов условия, которые полностью соответствуют реальной инженерной деятельности, это позволяет студенту развивать инженерное мышление, учит комплексно решать конструкторско-проектировочные задачи.

Целью проекта является формирование нового подхода обучения инженерных кадров, способных к решению перспективных производственных задач, связанных с инжинирингом, которые будут актуальны ближайшем будущем.

Задачей же самих студентов является создание максимально быстрого и управляемого автомобиля при минимальных экономических затратах, соблюдая регламент соревнований Formula Student.

Регламент соревнования задает нормируемый показатель надежности и безопасности для данного класса гоночных болидов. Регламент соревнований обновляется каждый год. При этом регламенты соревнований, проводимых в разных странах, могут незначительно отличаться.

Сами соревнования проходят в три этапа:

- техническая инспекция,
- статические дисциплины,

– динамические дисциплины.

Для участия в динамических дисциплинах каждый автомобиль должен пройти техническую инспекцию. Во время технической инспекции каждый автомобиль проверяется на полное соответствие регламенту соревнований Formula Student.

Статические дисциплины подразумевают защиту конструкции болида, отчет о стоимости производства, а также бизнес презентацию проекта, как запуск прототипа в серию.

Динамические дисциплины – это непосредственно гоночные испытания на треке болида, построенного студентами. Во время гоночных испытаний автомобиль должен показать высокую скорость, маневренность, а также топливную эффективность.

Эффект от участия ВУЗа в международном проекте Formula Student - увеличение спроса на выпускников ВУЗа, а также популяризация инженерно-технических направлений подготовки в регионе.

1.2 Подвеска в автомобиле

Подвеска автомобиля – система, которая позволяет осуществлять упругую связь несущей системы автомобиля с дорожным полотном. Подвеска автомобиля помимо передачи на кузов сил и моментов, возникающих во время движения, позволяет гасить или же смягчать колебания, передаваемые на несущую систему автомобиля при езде по неровностям. Также система подвески предназначена для осуществления маневров, посредством перемещения поворотных колес независимо относительно кузова. В зависимости от назначения, подвеска автомобиля может обеспечивать как комфорт передвижения, так и проходимость в труднодоступных местах. При правильной настройке подвеска автомобиля позволяет сохранять максимальное сцепление колес с дорогой. Подвеска гоночного автомобиля предназначена для выполнения точно таких же задач, как и подвеска

гражданского автомобиля, с отличием только в повышенной нагрузке и повышенных требованиях безопасности и жесткости.

Подвеска автомобиля – сложная конструкция, которая включает в себя следующие элементы:

- Упругие – принимают и распределяют нагрузку на кузов автомобиля при езде по неровной дороге.
- Гасящие – функцией гасящих элементов является подавление колебаний, передаваемых от упругих элементов.
- Направляющие – рычаги и тяги, соединяющие подвеску с кузовом, и определяющие перемещение колес и кузова относительно друг друга.
- Стабилизаторы поперечной устойчивости – элементы подвески, которые препятствуют отрыву колес от дороги во время крена автомобиля.
- Опорные – кулаки, которые несут функцию опоры колеса, а также распределяют нагрузку с колес на всю подвеску.
- Элементы крепления подвески к кузову – несут функцию жесткого соединения подвески с кузовом.

На данный момент существует множество различных типов подвески. Различают зависимые, независимые и полунезависимые: механические, пневматические, гидравлические и электромагнитные типы подвески. Зависимая подвеска подразумевает жесткую ось, соединяющую оба колеса. Колеса постоянно связаны между собой и в любом случае расположены одинаково относительно друг друга. В независимой подвеске колеса одной оси не связаны между собой. Изменение положения одного колеса никак не влияет на положение второго колеса. В полунезависимой конструкции подвески оба колеса зависимы друг от друга, как и в зависимой подвеске, однако в меньшей степени за счет скручиваемой балки, которая также выполняет функцию стабилизатора поперечной устойчивости.

Сравнивая механическую, гидравлическую, пневматическую и электромагнитную подвески, можно выделить механическую, как самую простую в реализации, а также самую надежную и дешевую в обслуживании.

Плюсом трех последних подвесок является возможность регулировки положения кузова и дорожного просвета при помощи пульта управления из салона автомобиля. Настройка подвески также может производиться непосредственно из салона. Помимо этого, данные три вида подвесок обеспечивают комфортабельную плавную езду даже по крупным неровностям. Из недостатков можно выделить недолговечность, высокую стоимость как самого оборудования, так и дальнейшего обслуживания подвески.

Самыми популярными типами подвесок у производителей на данный момент являются: подвеска типа МакФерсон и многорычажная подвеска. Подвеска МакФерсона на рисунке 1 состоит из одного нижнего поперечного рычага и основной амортизаторной стойки, которая выполняет функцию упругого, гасящего, а также направляющего элемента.



Рисунок 1 – Подвеска типа МакФерсон

Из плюсов подвески типа МакФерсон можно выделить большой эксплуатационный ресурс, а также хорошие динамические характеристики за счет относительно компактных размеров и небольшого веса.

Многорычажная подвеска на рисунке 2 по сравнению с подвеской типа МакФерсон подразумевает более комфортную езду, а также увеличение сцепления колес с дорожным покрытием за счет ограничения степеней свободы перемещения колеса во всех шести направлениях.

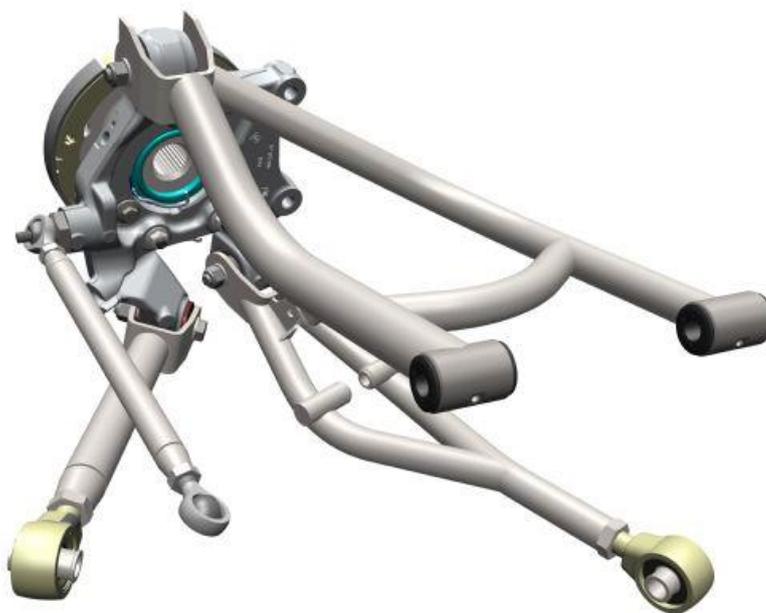


Рисунок 2 – Многорычажная подвеска автомобиля

Еще одно преимущество многорычажной подвески – возможность продольной и поперечной регулировки. Данная подвеска в большинстве случаев устанавливается на автомобилях среднего класса и выше, а также на спортивных автомобилях. Однако недостатками являются сложность конструкции, а соответственно и дорогостоящее обслуживание.

Выводы по разделу

В первом разделе была описана специфика проекта Formula Student, а также рассмотрены популярные типы подвесок, такие как МакФерсон и многорычажная подвеска.

2 Исследование и анализ конструкторских решений зарубежных команд-участников проекта Formula Student

2.1 Анализ конструкций передних подвесок болидов FSAE

В проекте на рисунке 3 изображена система с толкающей тягой push-rod. Тяга передает перемещение подвески через коромысло на амортизаторную стойку. В этой схеме не предусмотрено никаких дополнительных регулировок подвески, однако здесь присутствуют два симметрично установленных амортизатора на каждое колесо, что позволяет точно произвести настройку отбоя и сжатия, при помощи регулировок, заложенных в амортизаторные стойки. Из недостатков конкретно этой компоновки, хотелось бы отметить чрезмерно длинные толкающие тяги, из-за чего могут увеличиться податливости при работе подвески. Чтобы избежать этого достаточно изменить угол коромысла подвески и закрепить толкающую тягу к верхнему рычагу. Также амортизаторы расположены достаточно высоко, что непременно повлияет на высоту центра тяжести автомобиля.



Рисунок 3 – Проект передней подвески FSAE

На рисунке 4 изображена передняя подвеска с тянущей тягой pull-rod. По сравнению с предыдущей схемой подвески, данная схема установки амортизаторной стойки положительно влияет на центр тяжести автомобиля, так как все элементы подвески расположены в нижней части автомобиля. Также тянущая тяга pull-rod обеспечит уменьшение податливости нежели толкающая тяга push-rod.

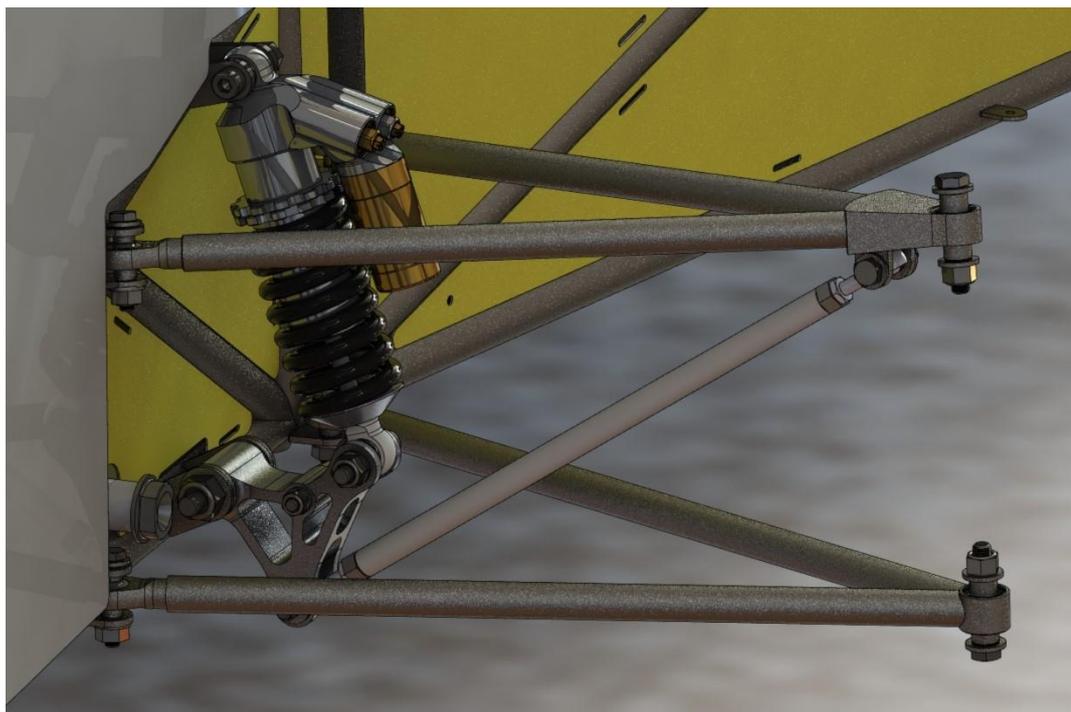


Рисунок 4 – Передняя подвеска Queen's Formula Racing

На рисунке 5 изображена схема присоединения амортизаторной стойки напрямую к нижнему рычагу подвески. Данная схема позволяет снизить вес автомобиля за счет отказа от тяги и коромысла. Однако, при этом сама амортизаторная стойка гораздо больших размеров, чем используемые в компоновках с коромыслом, что тоже добавляет вес. Минусами данной конструкции подвески являются малый ход амортизатора, а также неправильное распределение сил, при работе подвески удлиненный амортизаторный шток может работать на излом.

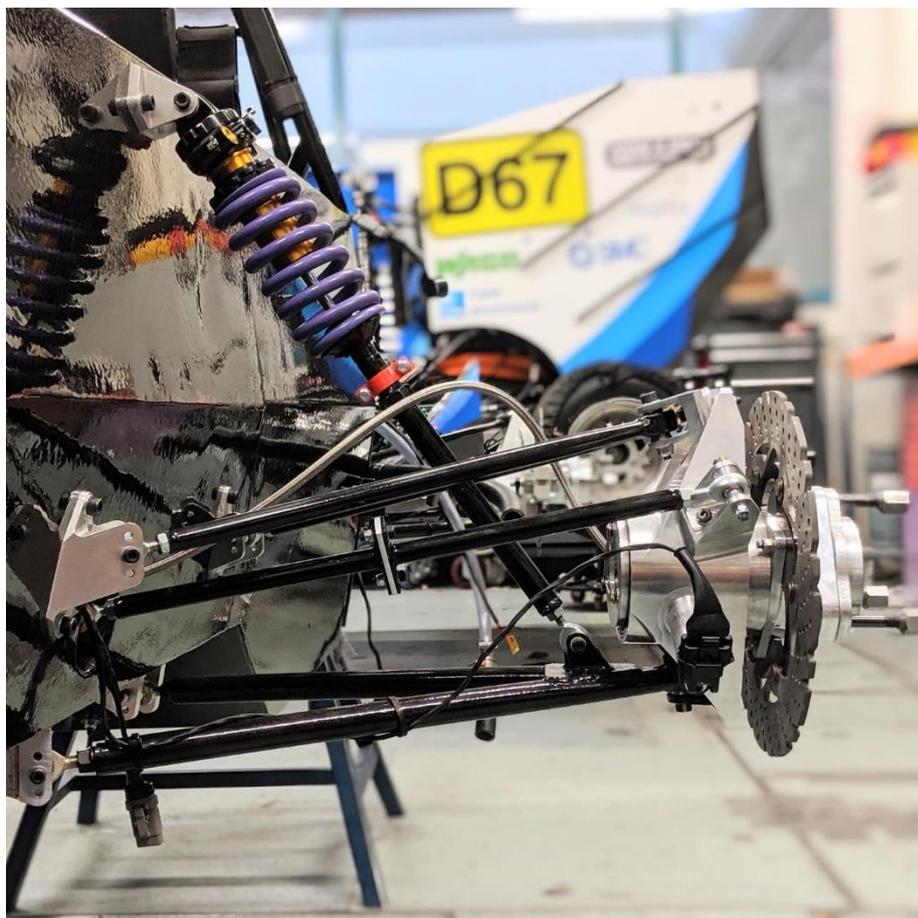


Рисунок 5 – Передняя подвеска команды Monash Motorsport

На рисунке 6 изображен болид команды, которая выбрала компоновку mono shock или же моноамортизатор. При такой схеме из положительных моментов можно отметить снижение веса автомобиля, а также снижение стоимости оборудования подвески. Однако негативных моментов в такой компоновке значительно больше. Из основных недостатков можно выделить недостаточную жесткость подвески при крене и во время работы подвески в вертикальном направлении. Помимо этого, при данной схеме амортизатор работает только при одноименном ходе колес, но практически не задействован во время прохождения поворота. Также достаточно сложно производить настройку подвески с данной компоновкой.

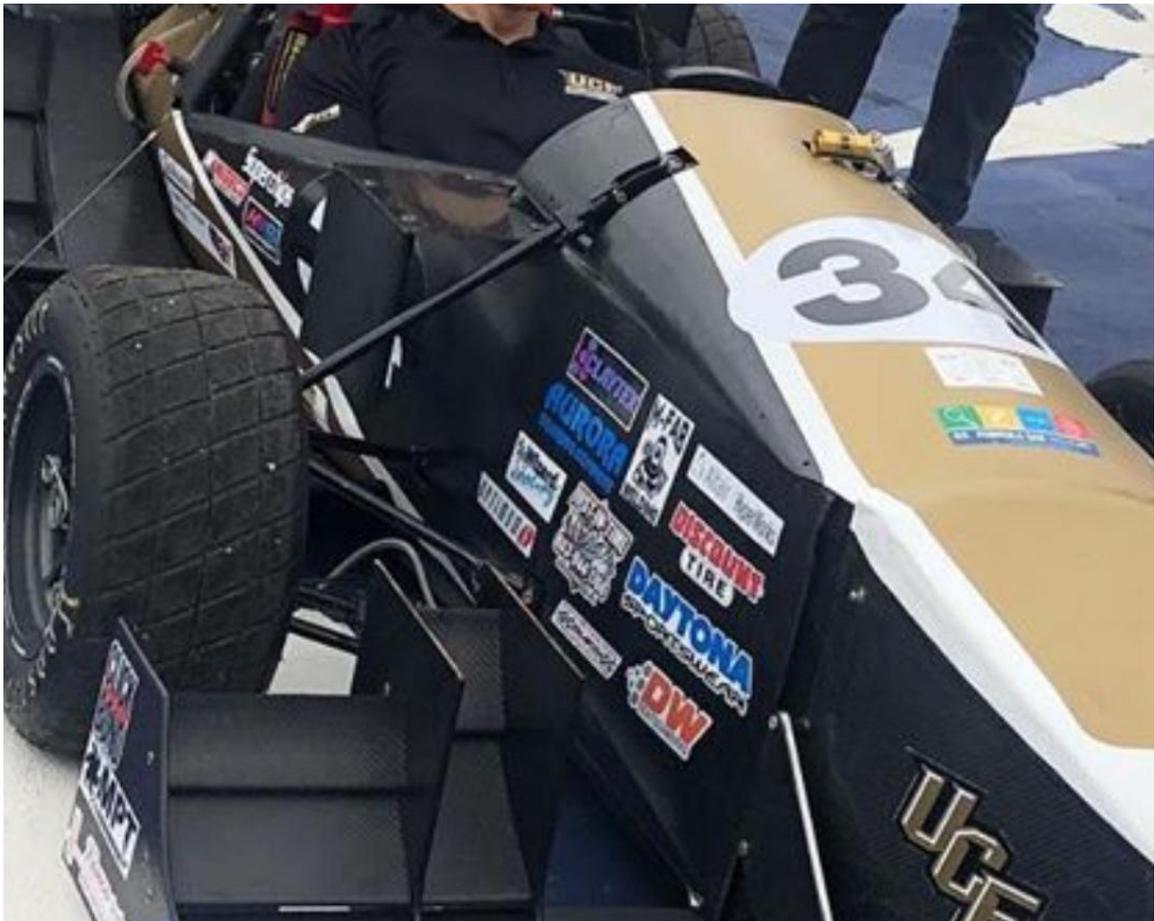


Рисунок 6 – Передняя подвеска команды UCF

Схема данной подвески, изображенной на рисунке 7, называется Decoupled heave roll suspension или «система разделения колебаний при одноименном ходе и при крене». Такая схема подразумевает отдельную работу двух амортизаторов. При одноименном ходе подвески работает один амортизатор, который расположен горизонтально. Второй амортизатор работает при разноименном ходе подвески во время крена, а именно тот, который установлен под углом к горизонту.

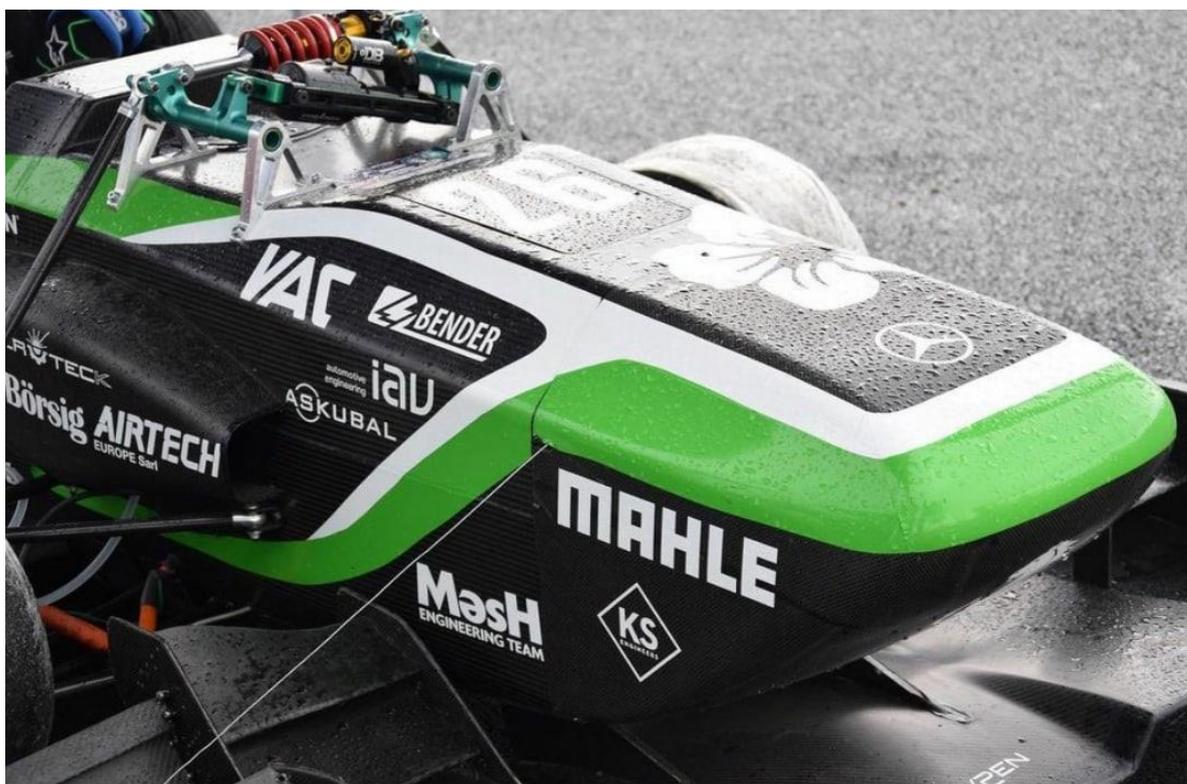


Рисунок 7 – Передняя подвеска команды Greenteam Stuttgart

Из недостатков можно отметить высокое расположение конструкции, что влияет на центр тяжести автомобиля, а также при использовании автомобиля на плохом дорожном покрытии конструкция теряет весь смысл, так как начинают работать оба амортизатора. Из положительных моментов можно отметить отдельный контроль динамического развала во время крена, а также отдельный контроль аэродинамики с точки зрения высоты кузова, а также продольный угол наклона (pitch control).

2.2 Анализ конструкций задних подвесок болидов FSAE

На рисунке 8 изображена схема задней подвески с толкающими тягами push-rod. Также в этой системе тяги и коромысла управляют наклоном заднего антикрыла. Управление аэродинамическими элементами во время движения называется активной аэродинамикой. Это позволяет достигать лучших аэродинамических качеств антикрыльев на протяжении всего заезда.

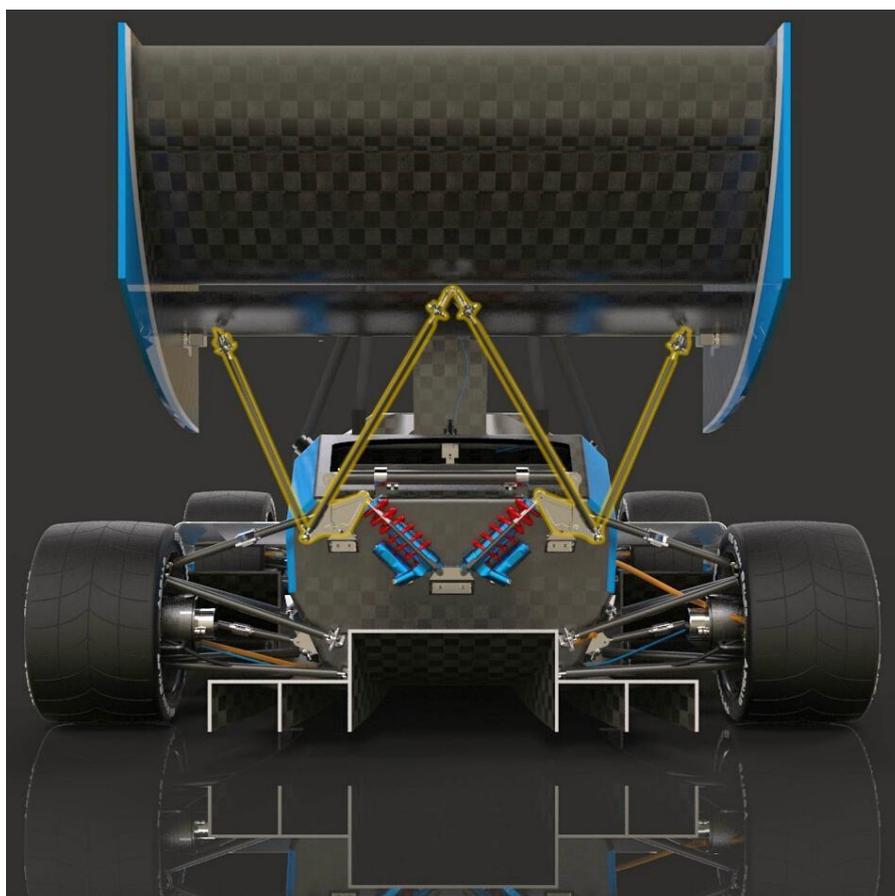


Рисунок 8 – Задняя подвеска команды TU Delft

Из положительных моментов можно отметить низкое расположение коромысел и амортизаторных стоек, что позволило понизить центр тяжести автомобиля. Конкретно в компоновке задней подвески этого автомобиля хотелось бы отметить неправильный угол установки толкающих тяг push-rod's, при таком расположении тяга не обеспечивает достаточного хода амортизатора. Также можно увидеть отсутствие стабилизатора поперечной устойчивости. И хотя на изображении по расположению рычагов можно определить, что в кинематической схеме данной подвески центр крена расположен достаточно высоко, в таком случае повышается износ покрышек.

На рисунке 9 представлена задняя подвеска с толкающими тягами push-rod's, которые крепятся к верхним рычагам. 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's, 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.



Рисунок 9 – Задняя подвеска команды FIU SAE

На рисунке 10 представлена задняя подвеска так же с толкающими тягами push-rod's, однако крепления коромысел реализовано на распорках главной дуги. Отсюда, сразу же, проявляется недостаток такой компоновки, так как согласно пункта T3.10.6 регламента FS Rules 2022 команда для прохождения технической инспекции будет вынуждена внедрить в раму болида поддержку распорки главной дуги в место крепления коромысла.



Рисунок 10 – Задняя подвеска команды The university of Maine

Также хотелось бы отметить чрезмерно длинные толкающие тяги, из-за чего могут увеличиться податливости при работе подвески.

Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены конструкции передних и задних подвесок болидов класса Formula Student. Описаны самые распространенные варианты подвесок, применяемых в соревнованиях Formula Student. Выявлены положительные и отрицательные моменты различных конструкции.

3 Проектирование и расчет подвески болида FSAE 2022

3.1 Определение исходных данных

Перед началом проектирования любого узла необходимо определить исходные данные, которые будут задавать определенные параметры и функции будущего узла. Для допуска болида к динамическим испытаниям, автомобиль полностью должен соответствовать основному регламенту соревнований Formula Student. Регламент Formula Student Rules 2022 содержит раздел по подвеске. В данном разделе содержится всего два пункта, что дает возможность применения различных компоновок подвески в болидах класса Formula Student, однако автомобиль при любой компоновке должен соответствовать данному разделу в регламенте.

T 2.4 Suspension

T 2.4.1 The vehicle must be equipped with fully operational front and rear suspension systems including shock absorbers and a usable wheel travel of at least 50 mm and a minimum jounce of 25 mm with driver seated.

T 2.4.2 All suspension mounting points must be visible at technical inspection, either by direct view or by removing any covers.

Основной язык соревнований – английский, поэтому регламент для всех команд на английском языке. В данном разделе прописан минимальный ход подвески, а именно минимум 25 миллиметров на сжатие и минимум 50 миллиметров общего хода подвески. Так же, прописано, что все крепления подвески автомобиля должны быть видимыми на технической инспекции или при условии снятия обвесов.

Так же в регламенте прописан минимальный дорожный просвет автомобиля – 30 мм:

T 2.2 Ground Clearance

T 2.2.1 The minimum static ground clearance of any portion of the vehicle, other than the tires, including a driver, must be 30 mm.

Кроме того, минимальная колесная база автомобиля должна быть минимум 1525 мм:

T 2.8 Wheelbase

T 2.8.1 The vehicle must have a wheelbase of at least 1525 mm

И последнее правило, касающееся проектирования подвески автомобиля про переднюю и заднюю колею:

T 2.9 Track and Rollover Stability

T 2.9.1 The smaller track of the vehicle (front or rear) must be no less than 75 % of the larger track [16].

Колея автомобиля не ограничена, однако по регламенту меньшая колея (передняя или задняя) должна в ширину составлять не менее 75 % от наибольшей колеи.

Это основные пункты, которые в любом случае должны быть соблюдены. Остальные исходные данные определяются в зависимости от желаемых характеристик управляемости автомобиля.

Для дальнейшего проектирования передней и задней подвески понадобится определить следующие параметры и компоненты: колесная база, колея передней и задней оси, используемые колесные диски и шины, используемые амортизаторы и упругие элементы, конструкция рулевого механизма и рулевой рейки.

По регламенту колесная база болида Formula Student должна быть не менее 1525 мм. Как известно, чем короче колесная база, тем маневреннее автомобиль, а также, его проще вывести из заноса. Безусловно, длинная колесная база дает автомобилю устойчивость при разгоне, так как с длинной колесной базой распределение веса не так значительно, как у автомобиля с короткой колесной базой. Однако, в большинстве своем трассы соревнований Formula Student не имеют длинных прямых участков, и требуют от автомобиля больше маневренности [17]. Из компоновочных соображений была выбрана оптимально короткая колесная база – 1540 мм. За счет этого автомобиль будет

обладать маневренностью и будет допущен к прохождению динамических дисциплин.

Ширина передней колеи 1200 мм была выбрана исходя из опыта предыдущих соревнований Formula Student, кроме того данная ширина колеи позволяет без проблем транспортировать болид к месту соревнований. Задняя колея уже передней на 30 мм, это необходимо для того, чтобы пилот не задевал конусы во время прохождения поворотов по ближайшей к внутреннему радиусу поворота траектории.

Колесные диски выбирались по нескольким пунктам: вес диска, вылет и размер. Чем легче автомобиль, тем быстрее и легче он может передвигаться как прямолинейно, так и в поворотах. Поэтому очень важно подбирать наименее тяжелые компоненты для гоночного болида. Кроме того, колесные диски являются частью неподрессоренных масс и имеют момент инерции. То есть, снижая вес колесного диска, мы снижаем общий вес автомобиля, а также увеличиваем мощность. Это позволяет автомобилю быстрее ускоряться на прямых и быстрее сбавлять скорость. Вылет колеса играет важную роль при разработке геометрии подвески, от вылета зависит длина рычагов подвески, а также плечо обкатки управляемых колес автомобиля. Чаще всего в Formula Student используют 10-и и 13-и дюймовые колесные диски, потому что на меньших дисках достаточно трудно обеспечить дорожный просвет, допустимый регламентом, а на больших дисках возрастает момент инерции и маломощному двигателю (регламентом соревнований разрешены двигатели объемом до 710 куб. см) тяжелее обеспечить быстрое ускорение, к тому же увеличивается общий вес автомобиля [20]. Выбирая между тринадцати- и десятидюймовыми колесными дисками выбор пал на тринадцатидюймовые диски OZ Formula Student Magnesium 4H wheel (рисунок 11).



Рисунок 11 – Тринадцатидюймовые диски OZ Formula Student Magnesium 4H wheel

Был проведен анализ имеющихся на рынке, подходящих по этим трем критериям. В ходе анализа было выявлено, что по весу вместе с установленными шинами, самыми легкими оказались тринадцатидюймовые колесные диски. Однако, колесно-ступичный узел для десятидюймовых колесных дисков будет весить меньше, к тому же меньшие колеса позволяют быстрее разогнаться. Это действительно так, но у тринадцатидюймовых колесных дисков есть такие преимущества как: удобная компоновка колесно-ступичного узла и тормозной системы, а также возможность отдалить крепления рычагов подвески друг от друга, что позволяет снизить податливости несущей конструкции автомобиля. Кроме того, автомобиль строится на базе рамной несущей системы, а не на базе цельного монокока (несущая оболочка), что ограничивает при расположении креплений подвески

к несущей конструкции. При компоновке подвески с десятидюймовыми колесными дисками рычаги подвески присоединяются к раме достаточно близко друг к другу, из-за чего точки креплений могут не попасть в основные узлы рамы, а это приведет к добавлению лишних труб в конструкцию рамы для увеличения жесткости, и в последствии к увеличению веса автомобиля. Вылет выбранных колесных дисков составляет плюс 30 мм, что при одной и той же колесной базе позволяет увеличить длину рычагов подвески, и позволит уменьшить плечо обкатки на передней оси, что уменьшит усилие на рулевом колесе, а также уменьшить плечо обкатки на задней оси, чтобы уменьшить момент, создающий податливость по схождению задней оси.

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.

В качестве гасящих элементов подвески болида были выбраны амортизаторы Öhlins TTХ 25 (рисунок 12).



Рисунок 12 – 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, не смотря 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.

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 13). Данная рейка обеспечивает максимальный ход 82,5 мм при повороте рулевого колеса на 248 градусов.

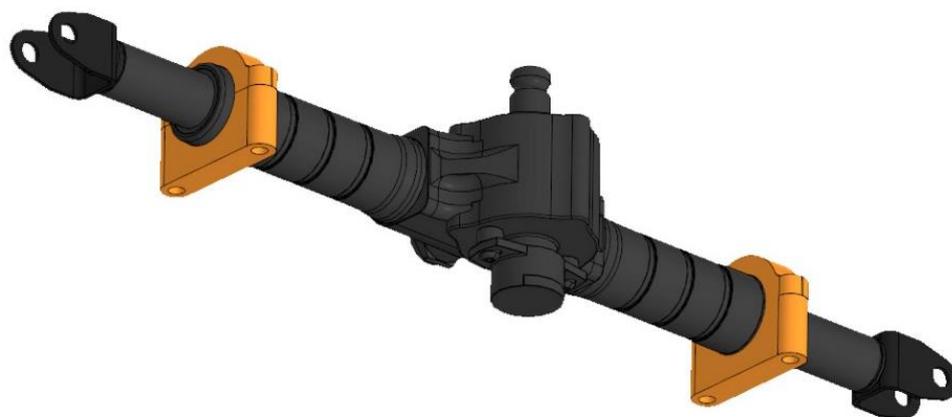


Рисунок 13 – Рулевая рейка KazTechnologies

Таким образом, передаточное отношение рейки составляет 4.71" на оборот.

3.2 Проектирование передней подвески болида FSAE 2022

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.

Помимо уже перечисленных исходных данных, еще один важный момент – не допускать ошибок прошлых автомобилей. Очень важно тщательно проанализировать ошибки предыдущей машины и исправить их при проектировании нового болида.

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 нежесткой конструкции возникают податливости, которые не позволяют раскрыть потенциал подвески.

Перед началом проектирования любой системы ставятся определенные цели. Перед проектированием подвески были определены цели относительно болида прошлого года:

- облегчение работы пилота (уменьшение усилий на рулевом колесе),
- уменьшение радиуса поворота болида (исправить недостаточную поворачиваемость),
- уменьшение крена кузова,
- увеличение пятен контакта колес с дорогой (исправить динамический развал),
- уменьшение износа шин (за один сезон шины изнашивались на 50 %).

При пилотировании болида прошлого года пилоты часто уставали крутить рулевое колесо и проходили некоторые участки трассы с неправильной траекторией, из-за чего время круга увеличивалось. Руль достаточно тяжело было повернуть, однако он очень легко и быстро возвращался. Для улучшения временных показателей в гонке появилась необходимость уменьшить усилие на рулевом колесе. Регламентом соревнований Formula Student запрещены какие-либо усилители рулевого колеса:

T 2.7 Steering

T 2.7.2 The steering wheel must directly mechanically actuate the front wheels.

Созданию усилий на рулевом колесе способствует множество факторов. Такими факторами являются: углы осей поворота управляемых колес (угол наклона кастера и угол наклона шкворня), плечо стабилизации, плечо обкатки,

а также передаточное число рулевой рейки [14]. Так как в гоночном болиде важна скорость маневров, то самой оптимальной системой рулевого управления является та, в которой угол поворота рулевого колеса в каждую сторону не превышает 100 градусов. Поэтому была выбрана рулевая рейка с передаточным отношением 4.71" на оборот. Было решено реализовывать уменьшение усилий на рулевом колесе за счет изменения геометрии опорного элемента подвески. Практически все параметры поворотного кулака обладают стабилизирующим эффектом. Когда во время движения автомобиля направление колес изменяется, они стремятся вернуться в исходное положение за счет возникновения момента. Таким образом, возникла необходимость полного изменения геометрии и конструкции поворотных кулаков подвески. Основные изменения углов подвески указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение геометрии опорного узла 2022-го года

| Вариант подвески | Угол кастера | Угол шкворня | Плечо обкатки | Плечо стабилизации |
|------------------|--------------|--------------|---------------|--------------------|
| Подвеска 2021 | +3.2 град | +10.3 град | +30 мм | +15 мм |
| Подвеска 2022 | +2.2 град | +6.5 град | +7 мм | +9 мм |

Угол кастера был уменьшен на 1 градус и приближен к вертикали. Тем самым было уменьшено и плечо стабилизации управляемых колес на 6 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.

Также был уменьшен угол шкворня на 3,8 градусов. За счет увеличенного вылета выбранных колесных дисков, а также за счет уменьшения угла шкворня удалось уменьшить плечо обкатки на 23 мм. Было принято решение уменьшить угол наклона шкворня на 30 %, чтобы снизить

перераспределение масс на передней оси во время поворота управляемых колес и уменьшить усилие, возникающее на рулевом колесе, но при этом оставить стабилизирующий эффект, чтобы не увеличить работу пилота при возвращении рулевого колеса в исходное положение. Также уменьшение плеча обкатки до практически нулевого значения имеет ряд преимуществ для спортивного автомобиля [11]. При том, что плечо обкатки осталось положительным – сохранился «эффект прямого руля», то есть, это увеличение управляемости на прямых участках трассы. Кроме того, большое плечо обкатки может сделать рулевое управление тяжелым, тем более с широкими гоночными шинами. Поэтому для заднеприводных гоночных автомобилей рекомендуется близкое к нулю положительное плечо обкатки. Также за счет уменьшения плеча обкатки снижается износ шин.

Уменьшение крена автомобиля способствует снижению перераспределения веса во время маневров, а также не позволяет установить положительный развал внешних колес, что позволяет не потерять сцепление колес, движущихся по внутреннему радиусу поворота и не уменьшить пятно контакта на внешнем колесе [5]. Это позволит увеличить управляемость автомобиля, а также предотвратить переворот болида при сильных боковых нагрузках. Есть несколько способов уменьшения крена автомобиля:

- опустить ниже центр тяжести автомобиля,
- установить более жесткие пружины,
- установить более жесткий стабилизатор поперечной устойчивости,
- изменить геометрию подвески и поднять выше центр крена.

По компоновочным причинам из-за многочисленных ограничений в регламенте соревнований Formula Student, а также из-за высокой стоимости более легких компонентов болида удалось опустить центр тяжести болида 2022 года на 32 мм, и на данный момент высота центра тяжести составляет 250 мм от земли.

Установка более жестких пружин, определенно поспособствует уменьшению крена автомобиля, однако, вместе с этим уменьшится и общий ход подвески автомобиля. Можно увеличить ход подвески за счет коромысел, но это также увеличит общий вес болида за счет пружин, рычагов и увеличенных коромысел подвески.

Установка более жесткого стабилизатора поперечной устойчивости никак не повлияет на общий ход подвески при одноименном ходе, однако тоже увеличит общий вес болида. Было принято решение уменьшить плечо коромысла стабилизатора, за счет чего уменьшить вес и увеличить жесткость.

Поднятие высоты центра крена подвески практически равноценно снижению высоты центра тяжести. Точка центра крена автомобиля является точкой, относительно которой автомобиль кренится, а расстояние от центра крена до центра тяжести является плечом приложения нагрузки. Однако, чем ближе центр крена к центру тяжести автомобиля, тем больше изнашиваются шины при повороте, так как шины начинают работать еще в роли упругого элемента [6]. По компоновочным причинам на болиде прошлого года центр крена располагался ниже уровня земли на 5 мм. В этом году было решено исправить это и поднять высоту центра крена на 50 мм над уровнем земли.

Для того, чтобы минимизировать недостаточную поворачиваемость необходимо задать нужный угол Аккермана. Существует три вида установки угла Аккермана (рисунок 14).

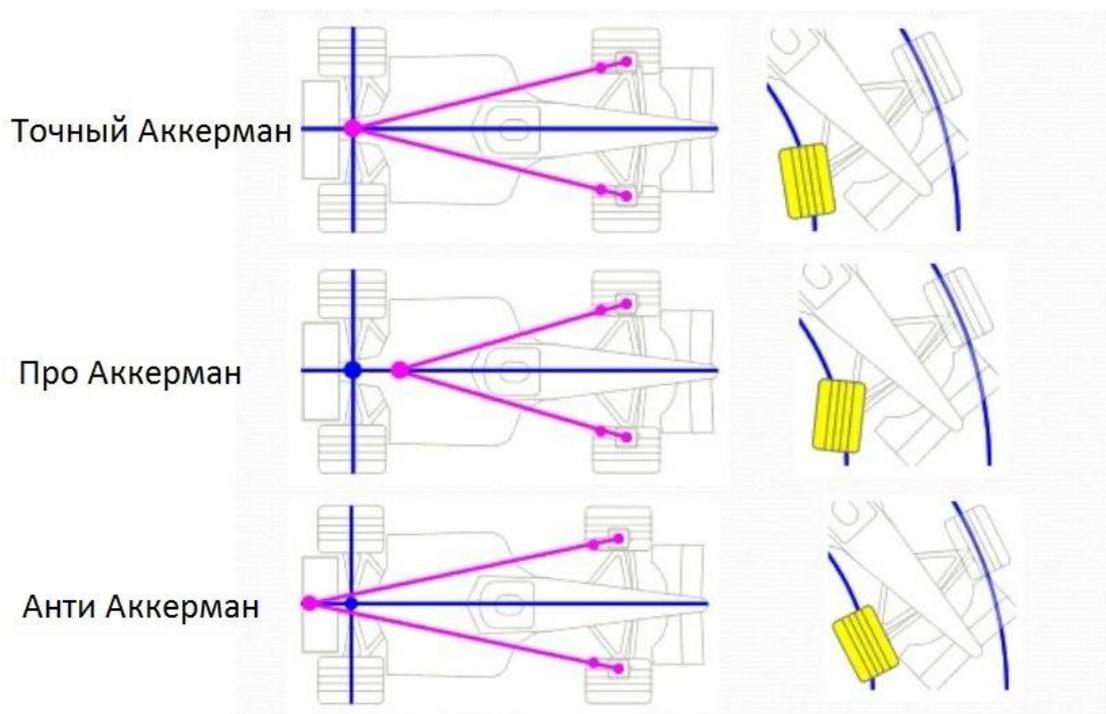


Рисунок 14 – Три вида установки угла Аккермана

При идеальных условиях для максимального повышения управляемости самым лучшим вариантом является точный угол Аккермана. Точный угол Аккермана подразумевает точные углы поворота управляемых колес по радиусу их движения, так как во время поворота внутреннее и внешнее колеса проходят разный путь и располагаются при этом на разных радиусах поворота. Однако точный угол Аккермана не учитывает угол увода шин. Дело в том, что шина имеет свойство деформироваться и за счет деформации образуется угол увода [8]. Угол увода – угол между действительным направлением качения колеса и центральной продольной осью колеса. Угол Аккермана чаще всего проектируется под динамическую дисциплину SkidPad (рисунок 15).

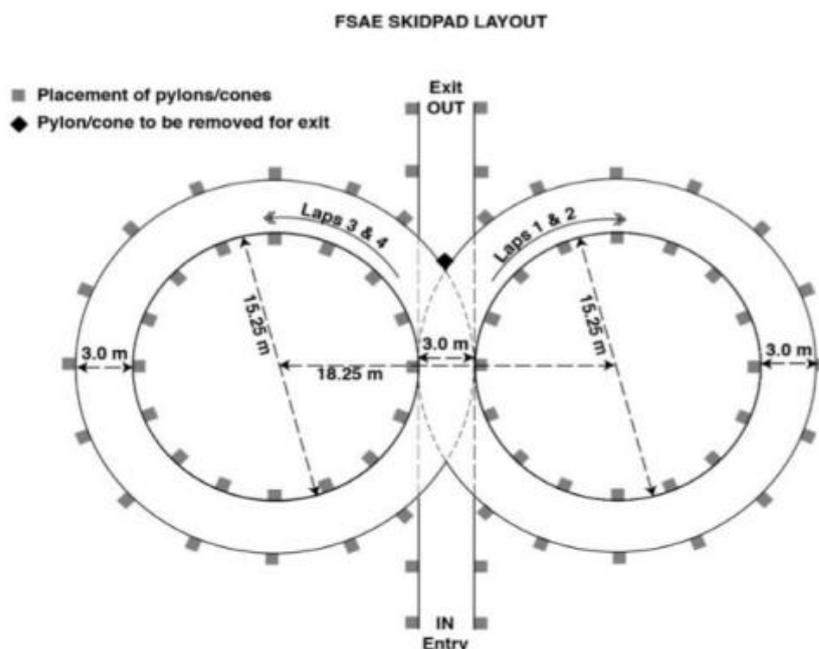


Рисунок 15 – Параметры трассы SkidPad (восьмерки)

Для максимально быстрого прохождения трассы SkidPad (восьмерки) необходимо правильно подобрать угол Аккермана, чтобы избежать проскальзывания управляемых колес. Для быстрого прохождения пилот выбирает внутреннюю траекторию движения по кругу, поэтому при проектировании нужно это учитывать. Для этого составляется схема движения автомобиля по кругу и определяются необходимые углы поворота внутреннего и внешнего колеса [9]. При этом необходимо учитывать, что задняя колея движется по еще меньшему радиусу, чем передние (рисунок 16).

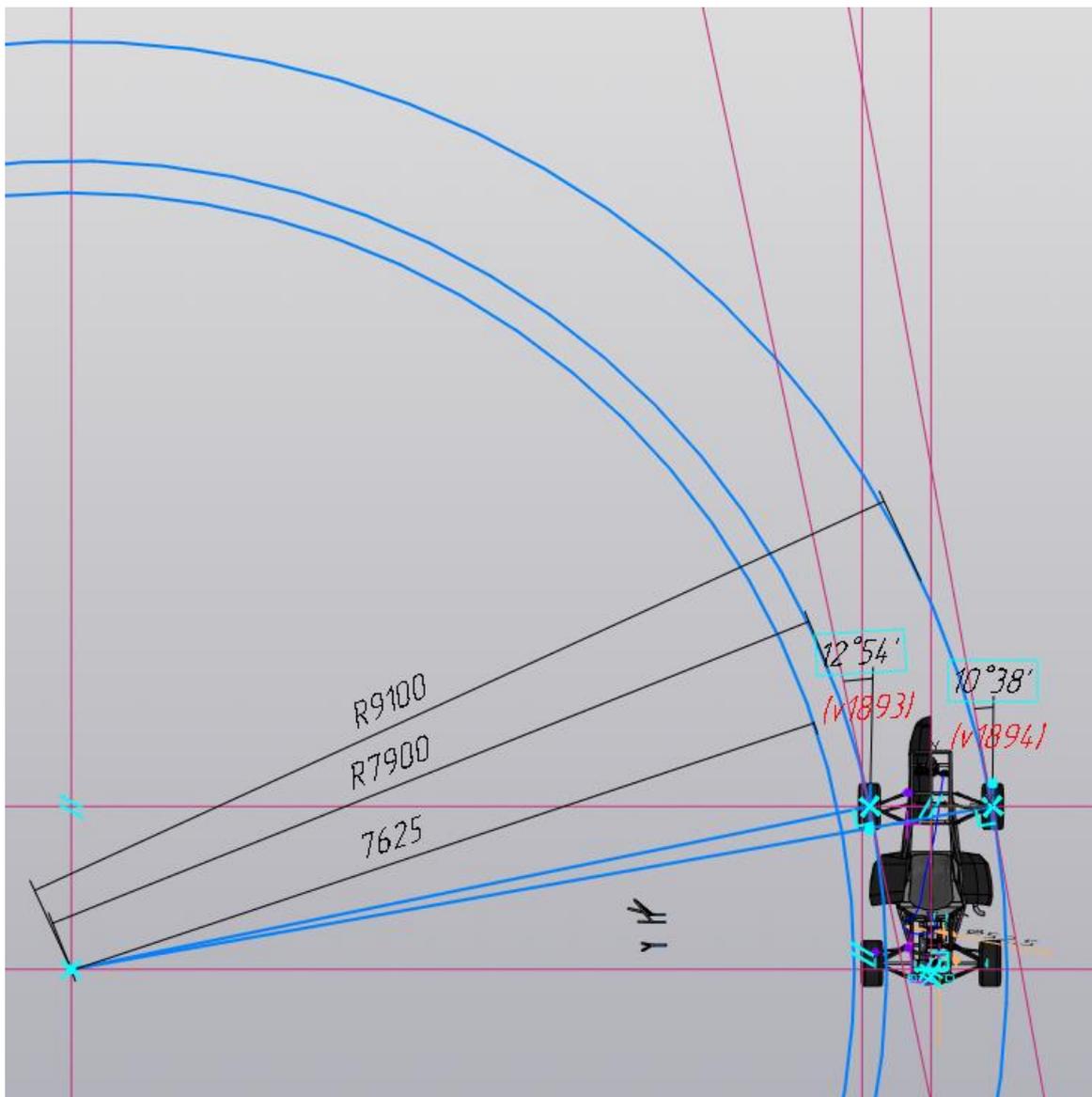


Рисунок 16 – Схема движения автомобиля по трассе SkidPad

При составлении схемы выявляются точные углы поворота внутреннего и внешнего колеса, поэтому для выбора угла Аккермана необходимо знать углы увода управляемых колес. Для этого необходимо вычислить перераспределение нагрузки на внутреннее и внешнее колесо во время движения по трассе SkidPad:

Среднее время прохождения SkidPad – 5,8 секунд; путь, который проходит автомобиль рассчитывается по формуле (1).

$$S = 2\pi r \quad (1)$$

где r – радиус поворота, м.

За радиус поворота выбираем радиус, по которому движется центр тяжести автомобиля:

$$S = 2 \times \pi \times 8,5 = 53,38 \text{ м}$$

Скорость автомобиля находим по формуле (2).

$$v = \frac{S}{t} \quad (2)$$

где v – скорость автомобиля, м/с;

S – путь, м;

t – время прохождения круга, с.

$$v = \frac{53,38}{5,8} = 9,2 \text{ м/с}$$

Центростремительное ускорение при движении по окружности можно вычислить по формуле (3).

$$A_y = \frac{v^2}{r} \quad (3)$$

где A_y – центростремительное ускорение, м/с².

$$A_y = \frac{9,2^2}{8,5} = 9,96 \approx 9,81 \approx 1 \text{ g}$$

Величина перераспределения массы автомобиля находится по формуле (4)

$$W_y = A_y \times \frac{W}{T} \times \frac{H \cdot R_{rf}}{R_{rf} + R_{rr}} \times \frac{B}{L} \times Z \quad (4)$$

где W_y – величина перераспределенной массы, кг;
 W – общая масса автомобиля с пилотом, кг;
 T – ширина передней колеи, м;
 H – расстояние центра тяжести автомобиля до центра крена, м;
 R_{rf} – Roll rate front, Нм/град;
 R_{rr} – Roll rate rear, Нм/град;
 B – расстояние центра тяжести от задней оси, м;
 L – колесная база автомобиля, м;
 Z – высота переднего центра крена, м.

$$W_y = 1 \times \frac{280}{1.2} \times \frac{0.2 \cdot 250.7}{250.7 + 283.47} + \frac{0.613}{1.54} \times 0,054 = 21,92 \text{ кг}$$

Величина перераспределения веса автомобиля во время прохождения дисциплины SkidPad в процентном соотношении указана на рисунке (17).

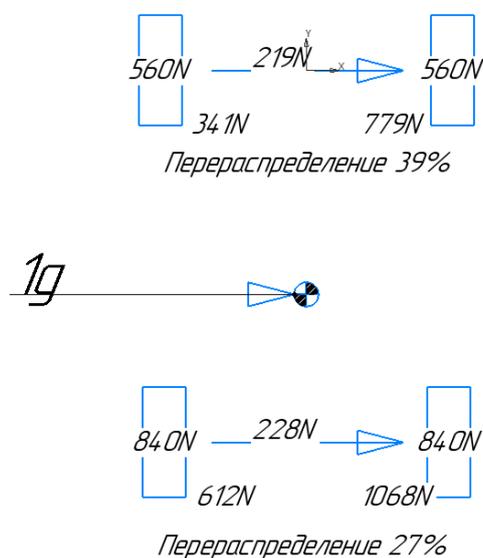


Рисунок 17 – Перераспределение нагрузки на колеса при центростремительном ускорении в 1g

Теперь, когда известна нагрузка на колеса нужно определить углы увода шин, которые будут возникать при повороте управляемых колес. Для

определения угла увода шины необходимо дорогостоящее оборудование, однако тесты по шинам для класса автомобилей Formula Student уже провели в консорциуме по тесту шин. Удалось найти график зависимости угла увода от боковой нагрузки, в котором присутствуют данные по шинам Continental (рисунок 18).

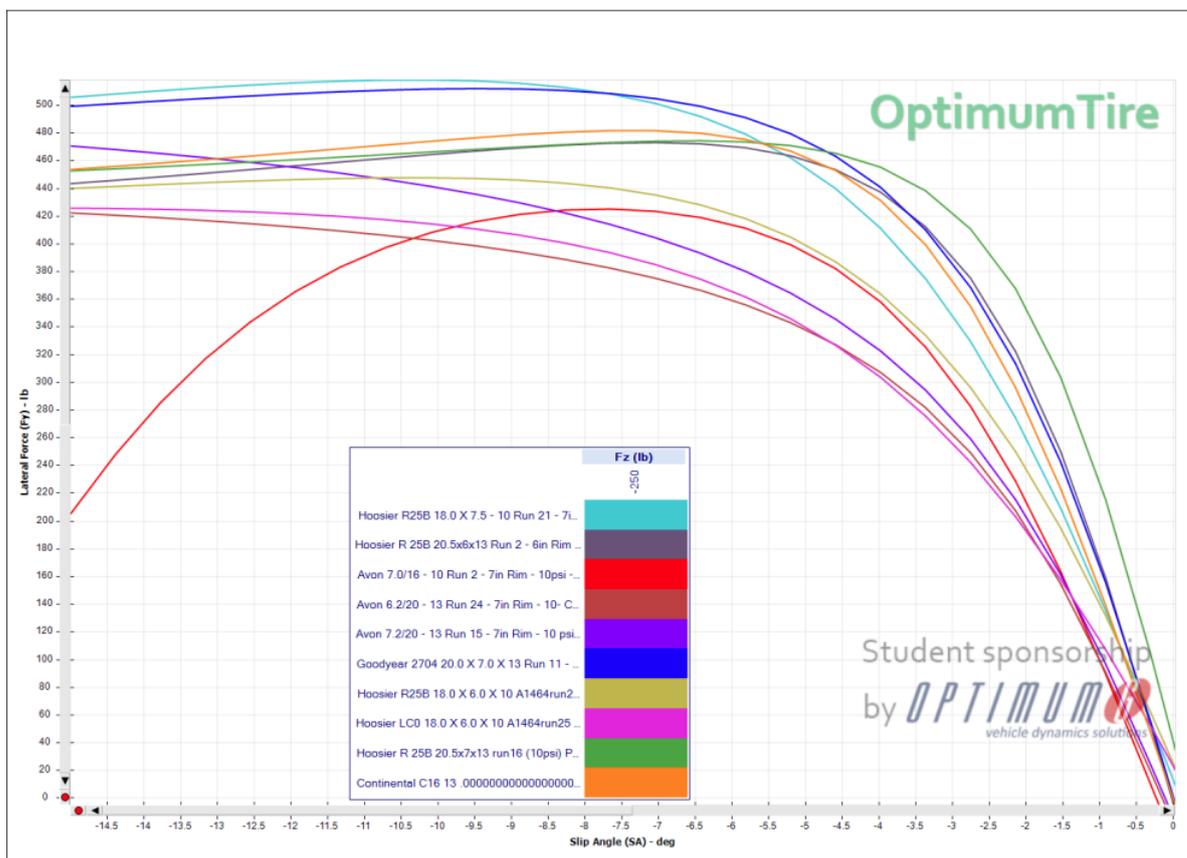


Рисунок 18 – График зависимости угла увода от боковой нагрузки

Из графика можно увидеть, что во время поворота при боковом ускорении в 1 g на внутреннем колесе будет возникать угол увода в 0,5 градусов, а на внешнем колесе угол увода в 1,2 градуса. После определения углов увода подбирается угол Аккермана, при котором, повернув руль на определенное количество градусов удастся, с учетом углов увода, получить углы поворота управляемых колес, которые показаны на рисунке 16.

Таким образом, на рисунке 19 указаны значения углов поворота управляемых колес относительно хода рулевой рейки.

| FRONT SUSPENSION - STEERING TRAVEL | | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|---------------|----------------------------|
| TYPE 14 Double Wishbone, Push Rod to damper | | | | | | |
| INCREMENTAL GEOMETRY VALUES | | | | | | |
| RACK TRAVEL (mm) | TOE ANGLE RHS (deg) | TOE ANGLE LHS (deg) | CAMBER ANGLE RHS (deg) | CAMBER ANGLE LHS (deg) | ACKERMANN (%) | TURNING CIRCLE RADIUS (mm) |
| -35.00 | 23.77 | -32.47 | -1.91 | 1.04 | 88.60 | 2958.53 |
| -34.00 | 23.10 | -31.06 | -1.90 | 0.89 | 86.56 | 3083.23 |
| -33.00 | 22.44 | -29.73 | -1.88 | 0.76 | 84.73 | 3212.90 |
| -32.00 | 21.78 | -28.45 | -1.86 | 0.64 | 83.10 | 3348.31 |
| -31.00 | 21.12 | -27.22 | -1.85 | 0.53 | 81.62 | 3490.28 |
| -30.00 | 20.46 | -26.05 | -1.83 | 0.43 | 80.28 | 3639.68 |
| -29.00 | 19.80 | -24.91 | -1.81 | 0.33 | 79.05 | 3797.45 |
| -28.00 | 19.13 | -23.81 | -1.80 | 0.25 | 77.93 | 3964.64 |
| -27.00 | 18.47 | -22.74 | -1.78 | 0.16 | 76.90 | 4142.43 |
| -26.00 | 17.81 | -21.70 | -1.76 | 0.08 | 75.95 | 4332.15 |
| -25.00 | 17.14 | -20.68 | -1.74 | 0.01 | 75.08 | 4535.34 |
| -24.00 | 16.48 | -19.69 | -1.72 | -0.06 | 74.27 | 4753.77 |
| -23.00 | 15.82 | -18.73 | -1.71 | -0.13 | 73.52 | 4989.52 |
| -22.00 | 15.15 | -17.78 | -1.69 | -0.19 | 72.83 | 5245.03 |
| -21.00 | 14.48 | -16.85 | -1.67 | -0.26 | 72.19 | 5523.18 |
| -20.00 | 13.82 | -15.94 | -1.65 | -0.31 | 71.59 | 5827.44 |
| -19.00 | 13.15 | -15.04 | -1.63 | -0.37 | 71.04 | 6162.00 |
| -18.00 | 12.48 | -14.16 | -1.60 | -0.42 | 70.54 | 6531.95 |
| -17.00 | 11.80 | -13.29 | -1.58 | -0.48 | 70.07 | 6943.60 |
| -16.00 | 11.13 | -12.44 | -1.56 | -0.53 | 69.63 | 7404.81 |
| -15.00 | 10.46 | -11.59 | -1.54 | -0.58 | 69.23 | 7925.56 |
| -14.00 | 9.78 | -10.76 | -1.52 | -0.62 | 68.87 | 8518.63 |
| -13.00 | 9.10 | -9.94 | -1.49 | -0.67 | 68.53 | 9200.77 |
| -12.00 | 8.42 | -9.13 | -1.47 | -0.71 | 68.23 | 9994.30 |
| -11.00 | 7.73 | -8.33 | -1.45 | -0.75 | 67.95 | 10929.62 |
| -10.00 | 7.05 | -7.54 | -1.42 | -0.79 | 67.70 | 12049.31 |
| -9.00 | 6.36 | -6.75 | -1.40 | -0.83 | 67.48 | 13414.89 |
| -8.00 | 5.66 | -5.98 | -1.37 | -0.87 | 67.28 | 15118.59 |
| -7.00 | 4.97 | -5.21 | -1.35 | -0.91 | 67.11 | 17305.36 |
| -6.00 | 4.27 | -4.44 | -1.32 | -0.95 | 66.96 | 20216.77 |
| -5.00 | 3.57 | -3.69 | -1.29 | -0.98 | 66.83 | 24287.67 |
| -4.00 | 2.86 | -2.94 | -1.26 | -1.02 | 66.73 | 30387.70 |
| -3.00 | 2.15 | -2.20 | -1.24 | -1.05 | 66.65 | 40546.04 |
| -2.00 | 1.44 | -1.46 | -1.21 | -1.08 | 66.60 | 60850.20 |
| -1.00 | 0.72 | -0.73 | -1.18 | -1.11 | 66.56 | 121737.74 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | -1.15 | -1.15 | 88.60 | 0.00 |

Рисунок 19 – Выходные данные с программы lotus suspension по рулевому управлению

Таким образом, оптимальный статический угол Аккермана – 66,5 %. При ходе рейки в 17 мм управляемые колеса приобретают необходимые углы с учетом углов увода, при этом динамический Аккерман становится 70 %.

Для того, чтобы пилот мог проходить повороты на более высокой скорости, и при этом, чтобы болид не потерял сцепление, необходимо сохранять максимальный контакт шин с дорогой [19]. Развал колес нужен для того, чтобы во время крена автомобиля увеличивать площадь пятна контакта с дорогой, за счет чего увеличивать сцепление внешних к повороту колес. Динамический развал при определенном центростремительном ускорении

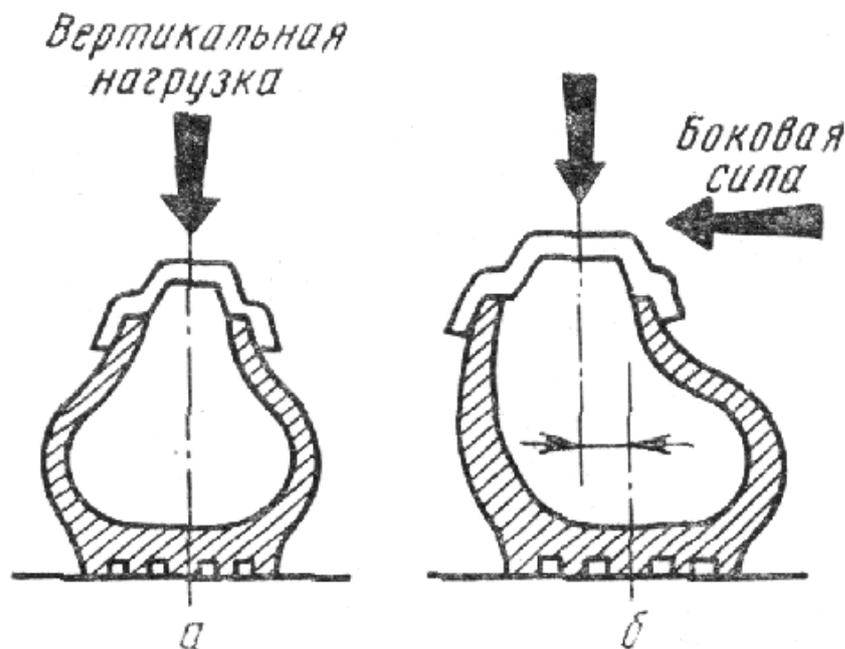
должен перестраиваться в практически нулевое положение, с учетом деформации шин. Это один из важнейших параметров, который необходимо рассчитать. Для определения необходимого угла развала нужно узнать угол крена автомобиля при самых частых нагрузках во время прохождения трассы. Средняя боковая перегрузка в поворотах на трассе Autocross и Endurance равна 1,5 g. Поэтому расчет угла крена автомобиля нужно проводить именно при этих нагрузках. Кроме того, нужно знать угол деформации шины при данных нагрузках и при давлении в шинах с которым автомобиль проходит дисциплины Autocross и Endurance, это можно определить при помощи стенда (рисунок 20)



Рисунок 20 – Стенд для определения коэффициента сцепления

При проведении лабораторных работ с шиной болида класса Formula Student были определены коэффициенты сцепления шины Hoosier R25B при разном давлении, а также при разных вертикальных нагрузках на колесо. Было выявлено, что при среднем давлении в шине 0,8-0,9 бар (такое давление выбирается для прохождения дисциплин Autocross и Endurance) при различных нагрузках угол боковой деформации шин (рисунок 21)

варьировался от 0,1-0,55 градусов. Из формулы (4) мы получаем необходимую нагрузку на шины при 1,5 g боковом ускорении. Таким образом, деформация внешней к повороту шины передней оси составляет 0,35 градусов.



11. Деформация шины при нагрузках

Рисунок 21 – Деформация шины при возникновении боковой силы

Расчет угла крена необходим для выявления необходимого угла развала

Средние боковые перегрузки во время прохождения трассы Autocross и Endurance составляют 1,5 g.

Расположение центра тяжести автомобиля по оси X относительно задней оси находится по формуле (5).

$$Bf = \frac{Ror - Wnr}{W} \times l \quad (5)$$

где Bf – расположение центра тяжести автомобиля на оси X, мм;

Ror – реакция опоры на задней оси, Н;

Wnr – вес неподрессоренной массы задней оси, Н;

W – вес поддресоренной массы, Н;

l – колесная база, мм.

Расположение центра тяжести автомобиля по оси X относительно передней оси находится по формуле (6).

$$Br = \frac{Rof - Wnf}{W} \times l \quad (6)$$

где Br – расположение центра тяжести автомобиля на оси X , мм;

Rof – реакция опоры на передней оси, Н;

Wnf – вес неподдресоренной массы передней оси, Н.

Высоту центра тяжести неподдресоренной массы можно вычислить по формуле (7).

$$hm = \frac{|(Gh - (Wnf + Wnr)rd)|}{W} \quad (7)$$

где hm – центр тяжести поддресоренных масс, мм;

Gh – общий вес автомобиля с пилотом, мм;

rd – радиус колеса, мм.

Расстояние от центра тяжести поддресоренных масс до оси крена можно рассчитать по формуле (8).

$$h0 = hm - \frac{(Rcf \times Bf + Rcr \times Br)}{l} \quad (8)$$

где $h0$ – расстояние от центра тяжести поддресоренных масс до оси крена, мм;

Rcf – высота переднего центра крена, мм;

Rcr – высота заднего центра крена, мм.

Расчет жесткости пружин был произведен по формуле (9).

$$K = k \times \left(\frac{u}{v}\right)^2 \quad (9)$$

где k – жесткость пружины КН/м;

u – расстояние крепления упругого элемента на рычаге, мм;

v – длина рычага, к которому крепится упругий элемент, мм.

Расчет жесткости стабилизаторов поперечной устойчивости был произведен по формуле (10).

$$K_e = k_e \times \left(\frac{u}{v}\right)^2 \quad (10)$$

где k_e – жесткость стабилизатора поперечной устойчивости, КН/м.

Жесткость упругого элемента, приведенная к колесу для передней оси, находится по формуле (11).

$$K_{wheel\ front} = K_f \times \cos\beta \quad (11)$$

где $K_{wheel\ front}$ – жесткость упругого элемента, приведенная к колесу, КН/м;

β – угол установки упругого элемента, град.

Жесткость упругого элемента, приведенная к колесу для задней оси, находится по формуле (12).

$$K_{wheel\ rear} = K_r \times \cos\beta \quad (12)$$

Сопротивление крену пружинного элемента на задней оси вычисляется по формуле (13).

$$R_{sf} = \frac{T_f \times K_{wheel\ front}}{2 \times \frac{360}{2 \times 3,14}} \quad (13)$$

где R_{sf} – сопротивление крену на передней оси, Нм/град;

T_f – ширина передней колеи, м.

Сопротивление крену пружинного элемента на задней оси вычисляется по формуле (14).

$$R_{sr} = \frac{T_r \times K_{wheel\ rear}}{2 \times \frac{360}{2 \times 3,14}} \quad (14)$$

где R_{sr} – сопротивление крену на задней оси, Нм/град;

T_r – ширина задней колеи, м.

Сопротивление крену переднего стабилизатора поперечной устойчивости находится по формуле (15).

$$R_{sfab} = \frac{T_f \times K_{ef}}{2 \times \frac{360}{2 \times 3,14}} \quad (15)$$

где R_{sfab} – сопротивление крену переднего стабилизатора поперечной устойчивости, Нм/град.

Сопротивление крену заднего стабилизатора поперечной устойчивости находится по формуле (15).

$$R_{srab} = \frac{T_r \times K_{er}}{2 \times \frac{360}{2 \times 3,14}} \quad (16)$$

где R_{srab} – сопротивление крену заднего стабилизатора поперечной устойчивости, Нм/град.

Угловая жесткость передней подвески рассчитывается по формуле (17).

$$\text{Roll rate front} = R_{sf} + R_{sfab} \quad (17)$$

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

Угловая жесткость задней подвески рассчитывается по формуле (18).

$$\text{Roll rate rear} = R_{sr} + R_{srab} \quad (18)$$

где Roll rate rear – угловая жесткость задней подвески, Нм/град.

Момент поддресоренных масс можно вычислить по формуле (19).

$$Mr_0 = 1,5g \times W \times h_0 \quad (19)$$

где Mr₀ – момент поддресоренных масс, Нм.

Момент передних неподресоренных масс можно вычислить по формуле (20).

$$Mr_1 = 1,5g \times W_{nf} \times rd \quad (20)$$

где Mr₁ – момент передних неподресоренных масс, Нм.

Момент задних неподресоренных масс можно вычислить по формуле (21).

$$Mr_2 = 1,5g \times W_{nr} \times rd \quad (21)$$

где Mr₂ – момент задних неподресоренных масс, Нм.

Угол крена автомобиля вычисляется по формуле (22).

$$\alpha = \frac{MRo + Mr1 + Mr2}{Roll\ rate\ rear + Roll\ rate\ front} \quad (22)$$

где α – угол крена автомобиля, град.

$$Bf = \frac{1620-200}{2360} \times 1540 = 926,6 \text{ мм},$$

$$Br = \frac{1080-140}{2360} \times 1540 = 613,3 \text{ мм},$$

$$hm = \frac{|(2700 \times 250 - (140 + 200)225)|}{2360} = 253 \text{ мм},$$

$$h0 = 253 - \frac{(50 \times 926,6 + 70 \times 613,3)}{1540} = 195 \text{ мм}.$$

Жесткость пружин 300 фунт/дюйм = 52,53 КН/м.

$$Kf = 52,53 \times \left(\frac{250}{366}\right)^2 = 24,39 \frac{\text{КН}}{\text{м}},$$

$$Kr = 52,53 \times \left(\frac{240}{330}\right)^2 = 27,5 \frac{\text{КН}}{\text{м}},$$

$$Kef = 10 \times \left(\frac{250}{366}\right)^2 = 4,6 \frac{\text{КН}}{\text{м}},$$

$$Ker = 11 \times \left(\frac{240}{330}\right)^2 = 5,7 \frac{\text{КН}}{\text{м}},$$

$$KWheel\ front = 24,3 \times 0,63 = 15,36 \frac{\text{КН}}{\text{м}},$$

$$KW_{\text{Wheel rear}} = 27,5 \times 0,656 = 18,04 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$Roll\ stiffness\ front = \frac{1,2 \times 15360}{2 \times \frac{360}{2 \times 3,14}} = 192,93 \frac{\text{Нм}}{\text{град}},$$

$$Roll\ stiffness\ rear = \frac{1,170 \times 18040}{2 \times \frac{360}{2 \times 3,14}} = 215,41 \frac{\text{Нм}}{\text{град}},$$

$$Roll\ stiffness\ of\ antiroll\ bar\ front = \frac{1,2 \times 4600}{2 \times \frac{360}{2 \times 3,14}} = 57,78 \frac{\text{Нм}}{\text{град}},$$

$$Roll\ stiffness\ of\ antiroll\ bar\ rear = \frac{1,170 \times 5700}{2 \times \frac{360}{2 \times 3,14}} = 68,06 \frac{\text{Нм}}{\text{град}},$$

$$Mr_0 = 236 \times 14,715 \times 0,195 = 677,18 \text{ Нм},$$

$$Mr_1 = 20 \times 14,715 \times 0,225 = 66,21 \text{ Нм},$$

$$Mr_2 = 14 \times 14,715 \times 0,225 = 46,35 \text{ Нм},$$

$$\alpha = \frac{677,18 + 66,21 + 46,35}{192,93 + 215,41 + 57,78 + 68,06} = 1,48 \text{ град.}$$

Таким образом, имея расчет угла крена, а также угол деформации шины при определенных нагрузках можно определить необходимый статический развал, чтобы получить наиболее оптимальный динамический развал колес (рисунок 22).

FRONT SUSPENSION - ROLL
 RHS WHEEL (+ve Y)
 TYPE 14 Double Wishbone, Push Rod to damper

INCREMENTAL GEOMETRY VALUES

| ROLL ANGLE (deg) | CAMBER ANGLE (deg) | TOE ANGLE (deg) | CASTOR ANGLE (deg) | KINGPIN ANGLE (deg) | DAMPER RATIO [-] | SPRING RATIO [-] |
|------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| -2.00 | -2.3111 | 0.0375 | 2.7471 | 5.7446 | 1.309 | 1.309 |
| -1.75 | -2.1628 | 0.0350 | 2.7139 | 5.5964 | 1.310 | 1.310 |
| -1.50 | -2.0153 | 0.0318 | 2.6806 | 5.4489 | 1.310 | 1.310 |
| -1.25 | -1.8684 | 0.0280 | 2.6475 | 5.3022 | 1.311 | 1.311 |
| -1.00 | -1.7224 | 0.0236 | 2.6144 | 5.1562 | 1.311 | 1.311 |
| -0.75 | -1.5770 | 0.0186 | 2.5813 | 5.0111 | 1.312 | 1.312 |
| -0.50 | -1.4325 | 0.0130 | 2.5483 | 4.8667 | 1.314 | 1.314 |
| -0.25 | -1.2887 | 0.0068 | 2.5154 | 4.7231 | 1.315 | 1.315 |
| 0.00 | -1.1458 | 0.0000 | 2.4825 | 4.5804 | 1.316 | 1.316 |
| 0.25 | -1.0036 | -0.0073 | 2.4497 | 4.4384 | 1.318 | 1.318 |
| 0.50 | -0.8623 | -0.0152 | 2.4170 | 4.2973 | 1.320 | 1.320 |
| 0.75 | -0.7217 | -0.0236 | 2.3843 | 4.1571 | 1.323 | 1.323 |
| 1.00 | -0.5821 | -0.0325 | 2.3517 | 4.0177 | 1.326 | 1.326 |
| 1.25 | -0.4432 | -0.0419 | 2.3192 | 3.8791 | 1.329 | 1.329 |
| 1.50 | -0.3053 | -0.0518 | 2.2868 | 3.7415 | 1.332 | 1.332 |
| 1.75 | -0.1682 | -0.0622 | 2.2544 | 3.6047 | 1.336 | 1.336 |
| 2.00 | -0.0321 | -0.0731 | 2.2221 | 3.4689 | 1.340 | 1.340 |

INCREMENTAL SUSPENSION PARAMETER VALUES

Рисунок 22 – Угол развала передних колес при крене автомобиля 1,5 градусов

В данном случае наиболее оптимальным статическим развалом для передних колес является (минус 1,15 град) – (минус 1,2 град).

Кроме всего прочего, важным моментом является изменение углов подвески во время ее работы. Изменения должны быть минимальными для правильной работы рассчитанной кинематики, это позволит повысить эффективность подвески. При работе подвески:

- изменение схождения $\pm 0,025$ градусов (меньше 0,1 мм),
- изменение угла кастера $\pm 0,4$ градусов,
- изменение шкворня $\pm 1,5$ градусов,
- изменение ширины колеи $\pm 0,15$ мм,
- изменение длины колесной базы $\pm 0,15$ мм.

Проект передней подвески представлен на рисунке 23.

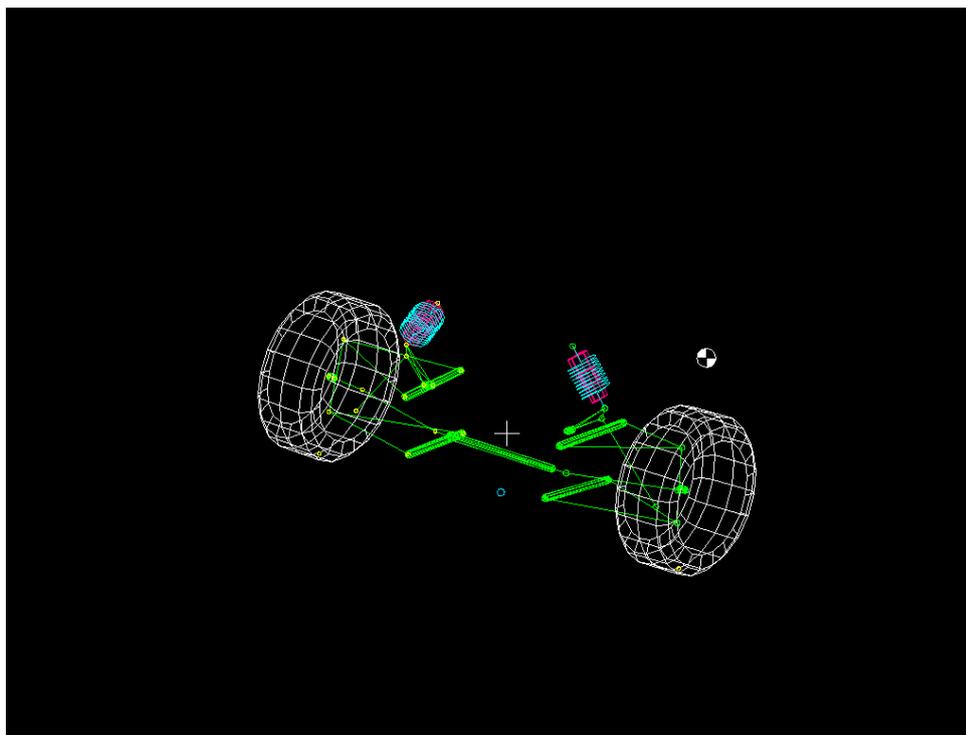


Рисунок 23 – Проект передней подвески в программе lotus suspension

По компоновочным причинам была выбрана схема подвески с двойными поперечными рычагами и тягой push rod через коромысло.

3.3 Проектирование задней подвески болида FSAE 2022

Проектирование задней подвески подразумевает практически идентичные задачи, как и при проектировании передней подвески, за исключением того, что колеса не являются управляемыми [18].

Основные изменения углов подвески указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение геометрии задней подвески 2022

| Вариант подвески | Угол кастера | Угол шкворня | Плечо обкатки | Центр крена |
|------------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
| Подвеска 2021 | +3.8 град | +8.3 град | +30 мм | -25 мм |
| Подвеска 2022 | +2.8 град | +2.8 град | +7 мм | +73 мм |

При проектировании задней подвески были поставлены цели:

- уменьшение крена автомобиля,
- уменьшение податливости по схождению,
- увеличение пятен контакта колес с дорогой (исправить динамический развал).

Крен автомобиля был уменьшен за счет поднятия центра крена задней оси на 98 мм относительно конфигурации предыдущего автомобиля.

Уменьшения податливостей по схождению удалось добиться за счет уменьшения плеча обкатки и уменьшения углов опорного элемента на задней оси. Таким образом был уменьшен момент, сопротивляющийся прямолинейному движению колеса.

Получив необходимую нагрузку на шины при 1,5 g боковом ускорении из формулы (4), можно определить статический развал на задней оси. Исходя из тестов деформация шины на задней оси при 1,5 g боковом ускорении составляет 0,5 градусов. Далее подбирается необходимый угол статического развала колес (рисунок 24).

REAR SUSPENSION - ROLL
RHS WHEEL (+ve Y)

TYPE 14 Double Wishbone, Push Rod to damper

INCREMENTAL GEOMETRY VALUES

| ROLL ANGLE (deg) | CAMBER ANGLE (deg) | TOE ANGLE (deg) | CASTOR ANGLE (deg) | KINGPIN ANGLE (deg) | DAMPER RATIO [-] | SPRING RATIO [-] |
|------------------|--------------------|-----------------|--------------------|---------------------|------------------|------------------|
| -2.00 | -1.8330 | -0.0749 | 3.1514 | 3.6662 | 1.207 | 1.207 |
| -1.75 | -1.7337 | -0.0659 | 3.1166 | 3.5663 | 1.206 | 1.206 |
| -1.50 | -1.6348 | -0.0568 | 3.0819 | 3.4668 | 1.205 | 1.205 |
| -1.25 | -1.5362 | -0.0476 | 3.0473 | 3.3676 | 1.205 | 1.205 |
| -1.00 | -1.4379 | -0.0383 | 3.0130 | 3.2688 | 1.205 | 1.205 |
| -0.75 | -1.3400 | -0.0289 | 2.9787 | 3.1703 | 1.205 | 1.205 |
| -0.50 | -1.2424 | -0.0194 | 2.9447 | 3.0722 | 1.205 | 1.205 |
| -0.25 | -1.1452 | -0.0097 | 2.9108 | 2.9744 | 1.206 | 1.206 |
| 0.00 | -1.0484 | 0.0000 | 2.8771 | 2.8771 | 1.207 | 1.207 |
| 0.25 | -0.9520 | 0.0099 | 2.8435 | 2.7801 | 1.208 | 1.208 |
| 0.50 | -0.8559 | 0.0198 | 2.8101 | 2.6835 | 1.210 | 1.210 |
| 0.75 | -0.7603 | 0.0299 | 2.7768 | 2.5873 | 1.213 | 1.213 |
| 1.00 | -0.6650 | 0.0401 | 2.7437 | 2.4916 | 1.216 | 1.216 |
| 1.25 | -0.5702 | 0.0505 | 2.7108 | 2.3962 | 1.219 | 1.219 |
| 1.50 | -0.4758 | 0.0609 | 2.6780 | 2.3013 | 1.223 | 1.223 |
| 1.75 | -0.3819 | 0.0715 | 2.6454 | 2.2069 | 1.228 | 1.228 |
| 2.00 | -0.2884 | 0.0822 | 2.6130 | 2.1129 | 1.233 | 1.233 |

Рисунок 24 – Угол развала задних колес при крене автомобиля 1,5 градусов

Наиболее оптимальный статический развал для колес задней оси является (минус 1 град) – (минус 1,2 град).

При работе подвески (рисунок 25):

- изменение схождения $\pm 0,045$ градусов (меньше 0,1 мм),
- изменение угла кастера $\pm 0,4$ градусов,
- изменение шкворня $\pm 0,7$ градусов,
- изменение ширины колеи $\pm 0,1$ мм,
- изменение длины колесной базы $\pm 0,2$ мм.

INCREMENTAL SUSPENSION PARAMETER VALUES

| ROLL ANGLE (deg) | ROLL CENTRE X (mm) | POSITION Y (mm) | Z (mm) | HALF TRACK CHANGE (mm) | WHEELBASE CHANGE (mm) | DAMPER TRAVEL (mm) | SPRING TRAVEL (mm) |
|------------------|--------------------|-----------------|--------|------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| -2.00 | 1540.00 | -81.52 | 72.52 | -0.18 | 0.26 | 16.77 | 16.77 |
| -1.75 | 1540.00 | -71.36 | 72.84 | -0.14 | 0.23 | 14.67 | 14.67 |
| -1.50 | 1540.00 | -61.20 | 73.12 | -0.10 | 0.20 | 12.58 | 12.58 |
| -1.25 | 1540.00 | -51.02 | 73.35 | -0.07 | 0.17 | 10.48 | 10.48 |
| -1.00 | 1540.00 | -40.83 | 73.54 | -0.05 | 0.14 | 8.38 | 8.38 |
| -0.75 | 1540.00 | -30.63 | 73.69 | -0.03 | 0.11 | 6.29 | 6.29 |
| -0.50 | 1540.00 | -20.42 | 73.80 | -0.01 | 0.07 | 4.19 | 4.19 |
| -0.25 | 1540.00 | -10.21 | 73.87 | 0.00 | 0.04 | 2.09 | 2.09 |
| 0.00 | 1540.00 | 0.00 | 73.89 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.25 | 1540.00 | 10.21 | 73.87 | 0.00 | -0.04 | -2.09 | -2.09 |
| 0.50 | 1540.00 | 20.42 | 73.80 | -0.01 | -0.08 | -4.18 | -4.18 |
| 0.75 | 1540.00 | 30.63 | 73.69 | -0.03 | -0.12 | -6.27 | -6.27 |
| 1.00 | 1540.00 | 40.83 | 73.54 | -0.05 | -0.16 | -8.35 | -8.35 |
| 1.25 | 1540.00 | 51.02 | 73.35 | -0.07 | -0.20 | -10.42 | -10.42 |
| 1.50 | 1540.00 | 61.20 | 73.12 | -0.10 | -0.24 | -12.49 | -12.49 |
| 1.75 | 1540.00 | 71.36 | 72.84 | -0.14 | -0.29 | -14.55 | -14.55 |
| 2.00 | 1540.00 | 81.52 | 72.52 | -0.18 | -0.33 | -16.61 | -16.61 |

Рисунок 25 – Данные по изменению позиции центра крена, а также по изменению колеи и колесной базы на задней оси

Проект задней подвески представлен на рисунке 26.

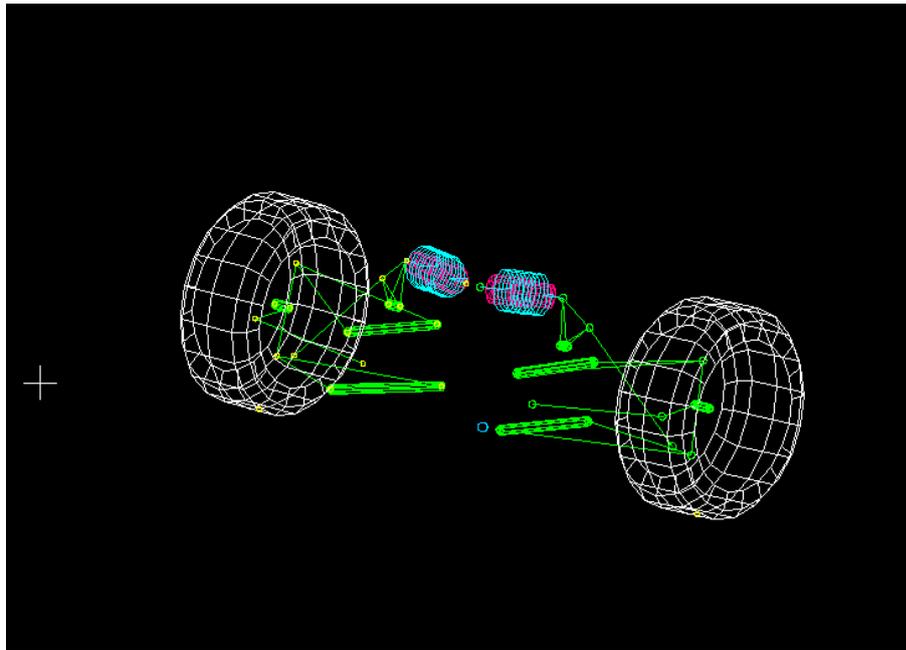


Рисунок 26 – Проект задней подвески в программе lotus suspension

Выводы по разделу

В данном разделе были проанализированы исходные данные, а также выявлены цели проектирования для улучшения динамических характеристик болида и облегчения работы пилота. Далее был описан процесс проектирования передней и задней подвески, сделаны основные расчеты, а также определены характеристики подвески болида 2022 года.

4 Обслуживание подвески гоночного болида FSAE 2022

4.1 Описание автомобиля

Основные характеристики гоночного болида класса Formula Student модели 2022-го года:

- а) габариты автомобиля:
 - 1) длина – 2687 мм,
 - 2) ширина – 1445 мм,
 - 3) высота – 1170 мм;
- б) колесная база автомобиля – 1540 мм;
- в) передняя колея – 1200 мм;
- г) задняя колея – 1170 мм;
- д) снаряженная масса автомобиля – 205 кг;
- е) распределение веса по осям:
 - 4) 60 % задняя ось,
 - 5) 40 % передняя ось;
- ж) переднее правое колесо – 42 кг;
- и) переднее левое колесо – 40 кг;
- к) заднее правое колесо – 63 кг;
- л) заднее левое колесо – 60 кг;
- м) конструкция рамы – стальная пространственная рама, выполненная из стальных труб (сталь 20) внешним диаметром 25 мм;
- н) двигатель – KTM 450 exc-f six days;
- п) объем двигателя – 450 см³;
- р) мощность двигателя – 33 кВт (45 л.с);
- с) топливо – Gasoline RON98;
- т) трансмиссия – цепная передача;
- у) ведущая звезда – 17 зубьев;
- ф) ведомая звезда – 48 зубьев;

- х) цепь однорядная – длина цепи 909 мм;
- ц) дифференциал повышенного трения – vaz 1111;
- ш) передняя подвеска – двойные А-образные рычаги, тяга push rod;
- щ) амортизаторы – Ohlins 25ТТ;
- э) пружины – Cane creek 300x2.25”;
- ю) стабилизатор поперечной устойчивости – стальной пруток сталь 65 г, диаметр 10 мм;
- я) задняя подвеска – двойные А-образные рычаги, тяга push rod;
- а) амортизаторы – Ohlins 25ТТ;
- б) пружины – Cane creek 300x2.25”;
- с) стабилизатор поперечной устойчивости – стальной пруток сталь 65 г, диаметр 10 мм.

4.2 Описание деталей рассматриваемого узла

- длина амортизатора – 200 мм,
- пружина – Cane creek 300x2.25”,
- ход амортизатора – 57 мм,
- вес изделия – 447 г.

Данный амортизатор и пружина выполняют роль стойки в автомобиле класса «Formula Student» (рисунок 27).



Рисунок 27 – Амортизаторы Öhlins ТТХ 25 в сборе с пружиной

Данный газо-масляный амортизатор имеет четыре типа настроек:

- low speed rebound,
- low speed compression,
- high speed rebound,
- high speed compression.

Настройка отбоя и сжатия выполняются с помощью специальных регуляторов, размещенных над выносной камерой амортизатора.

Рычаги подвески болид класса «Formula Student» (рисунок 28).



Рисунок 28 – Рычаг подвески в специальной оснастке

Сварные рычаги подвески болида выполняются из стальных труб 16x2 (сталь 20), сварка производится исключительно в специальной оснастке для большей точности изделия [7].

Крепление рычагов к пространственной раме производится с помощью шарнирных наконечников, вкрученных во вварные втулки рычага. Для обеспечения свободного движения рычага, используются конические втулки.

Крепление рычага к опорным элементам подвески производится с помощью подшипников типа ШСП. Подшипник впрессован в специальную втулку и застопорен стопорным кольцом. Для обеспечения свободного движения рычага, используются конические втулки.

Опорный элемент подвески, размещенный в кондукторе для сварки представлен на рисунке 29.

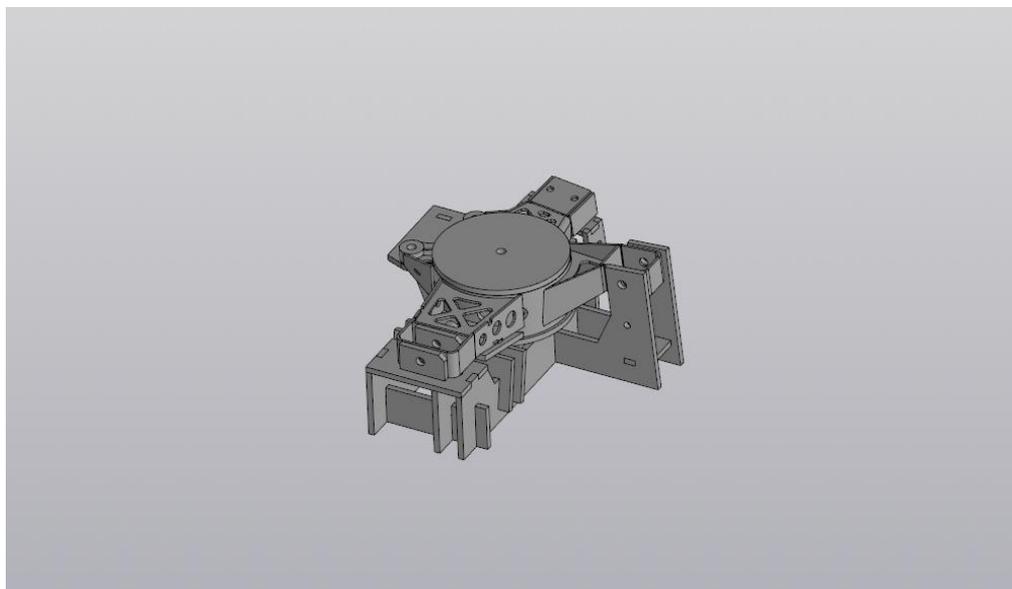


Рисунок 29 – Опорный кулак в специальной оснастке

Опорные элементы (или кулаки подвески) представляют собой стальную сварную конструкцию. Сварка производится исключительно в специальной оснастке для точности изделия [1].

В основную гильзу запрессовываются шариковые подшипники с проставочными кольцами, далее впрессовывается колесно-ступичный узел.

Кулак обеспечивает крепление тормозного суппорта, рычагов подвески, тяги схождения (задний кулак), рулевой тяги (поворотный кулак).

4.3 Основные неисправности и их устранение

Самая распространенная неисправность данной подвески – люфт шарнирных наконечников и подшипников типа ШСП. Данная неисправность возникает после каждой гонки. После каждой гонки или же по завершению

этапов соревнований необходимо провести осмотр всех шарнирных наконечников и заменить те, в которых присутствует люфт [4].

Осмотр производится посредством покачивающих движений, применяемых на рычаги подвески. Если присутствует биение – шарнирные наконечники необходимо заменить.

Необходимый инструмент и компоненты для замены шарнирного наконечника:

- домкрат,
- шестигранный ключ 6 мм,
- рожковый ключ 13 мм,
- длинногубцы,
- запасной шарнирный наконечник.

Замена шарнирного наконечника:

- приподнять домкратом ось болида,
- при помощи шестигранного и рожкового ключа раскрутить болтовое соединение,
- извлечь болт,
- при помощи длинногубцев извлечь конические втулки,
- выдвинуть шарнирный наконечник из кронштейна для удобной замены,
- рожковым ключом расконтрить контрящую гайку,
- выкрутить шарнирный наконечник,
- вкрутить запасной шарнирный наконечник,
- рожковым ключом затянуть контрящую гайку,
- задвинуть шарнирный наконечник в кронштейн подвески,
- при помощи длинногубцев установить конические втулки,
- вставить болт и затянуть гайку,
- смазать шарнирный наконечник универсальной смазкой,
- извлечь домкрат.

Необходимый инструмент и компоненты для замены ШСП:

- домкрат,
- шестигранный ключ 6 мм,
- рожковый ключ 13 мм,
- длинногубцы,
- запасной подшипник ШСП,
- пресс,
- съемник для стопорных колец,
- втулка для выпрессовывания 12 мм,
- трубка для запрессовывания 14x10.

Замена ШСП:

- приподнять домкратом ось болида,
- раскрутить все болтовые соединения нужного рычага подвески,
- длинногубцами извлечь конические втулки,
- обеспечить поддержку кулаку подвески,
- извлечь рычаг подвески из креплений,
- съемником извлечь стопорное кольцо,
- втулкой для выпрессовывания на прессе выпрессовать неисправную ШСП,
- трубкой для запрессовывания запрессовать запасную ШСП,
- при помощи съемника установить стопорное кольцо,
- установить рычаг в крепления,
- установить конические втулки и закрутить болты сначала в кронштейнах пространственной рамы,
- после этого установить конические втулки и закрутить болт в креплении кулака,
- смазать ШСП универсальной смазкой,
- извлечь домкрат.

Существует два вида неисправности опорного узла подвески:

- появление биения подшипников,
- трещина в кулаке или же поломка.

В первом случае необходима диагностика подшипников. Если подшипники в хорошем состоянии и не имеют люфтов и закусываний, то биение началось из-за разбитой гильзы кулака. Данная неисправность могла возникнуть в связи с сильными вибрациями колесно-ступичного узла, или же из-за неправильно подобранного качества посадки подшипников. Так как опорный узел автомобиля данного класса не имеет ремонтных размеров, то в данном случае требуется замена всего опорного узла [2].

Во втором случае ремонт можно произвести только при помощи сварочных работ (рисунок 30). Сварку необходимо производить в специальной оснастке для предотвращения увода основных точек подвески.



Рисунок 30 – Поломка опорного элемента

В случае сильного повреждения кулака, необходимо добавить дополнительные ребра жесткости во время сварочных работ [10]. Если это невозможно – необходима полная замена опорного элемента.

4.4 Общая последовательность установки подвески

Подвеска болида класса Formula Student модели 2022 года (рисунок 31) включает в себя:

- рычаги подвески (8 штук),

- тяги схождения и рулевые тяги (4 штуки),
- тяги типа Pull rod и Push rod (4 штуки),
- коромысла подвески (4 штуки),
- тяги стабилизаторы (4 штуки),
- амортизаторные стойки (4 штуки),
- поворотные и задние кулаки (4 штуки).

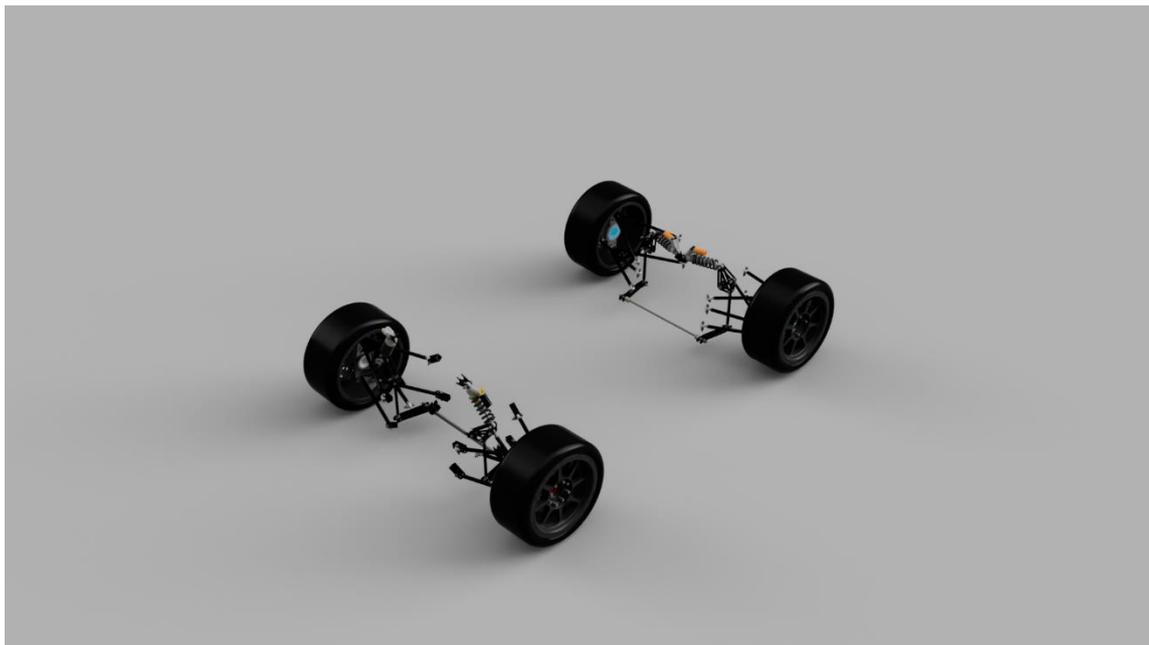


Рисунок 31 – Подвеска болида FSAE 2022 в сборе

Общая последовательность установки:

- установка всех рычагов подвески,
- установка коромысел подвески,
- установка амортизаторных стоек,
- установка тяг стабилизатора,
- установка Pull и Push тяг,
- установка Поворотных и задних кулаков,
- установка рулевых тяг и тяг схождения.

Рычаги подвески устанавливаются в кронштейны рамы при помощи конических втулок и болтов М8 и гаек М8 с нейлоном.

Общее количество крепежных элементов:

- болтов – 16 штук,
- гаек с нейлоном – 16 штук,
- конических втулок – 32 штуки.

Необходимый инструмент:

- шестигранный ключ 6 мм,
- рожковый ключ 13 мм,
- длинногубцы.

Коромысла подвески устанавливаются в специальные кронштейны в пространственной раме при помощи болтов М8, гаек М8 с нейлоном и цилиндрических втулок, распирающих кронштейн и внутреннюю обойму подшипников, интегрированных в коромысла.

Общее количество крепежных элементов:

- болтов – 4 штуки,
- гаек – 4 штуки,
- цилиндрических втулок – 8 штук.

Необходимый инструмент:

- шестигранный ключ 6 мм,
- рожковый ключ 13 мм.

Амортизаторные стойки устанавливаются в специальный кронштейн пространственной рамы стороной с выносным резервуаром при помощи болта М8, гайки М8 и нейлоновых шайб. Вторая сторона амортизаторной стойки устанавливается в коромысло при помощи болта М8, гайки М8 и нейлоновых шайб.

Общее количество крепежных элементов:

- болтов – 8 штук,
- гаек – 8 штук,
- нейлоновых шайб – 16 штук.

Необходимый инструмент:

- шестигранный ключ 6 мм,

- рожковый ключ 13 мм,
- пинцет металлический для установки нейлоновых шайб.

Тяги стабилизатора устанавливаются одной стороной в коромысло подвески при помощи конических втулок и болтов М8 и гаек М8 с нейлоном, другой стороной в коромысло стабилизатора при помощи конических втулок и болтов М8 и гаек М8 с нейлоном.

Общее количество крепежных элементов:

- болтов – 8 штук.
- гаек с нейлоном – 8 штук.
- конических втулок – 16 штук.

Необходимый инструмент:

- шестигранный ключ 6 мм,
- рожковый ключ 13 мм,
- длинногубцы.

Pull и Push тяги устанавливаются одной стороной в коромысло подвески при помощи конических втулок и болтов М8 и гаек М8 с нейлоном, другой стороной в крепление на рычаге подвески при помощи конических втулок и болтов М8 и гаек М8 с нейлоном.

Общее количество крепежных элементов:

- болтов – 8 штук,
- гаек с нейлоном – 8 штук,
- конических втулок – 16 штук.

Необходимый инструмент:

- шестигранный ключ 6 мм,
- рожковый ключ 13 мм,
- длинногубцы.

Поворотные кулаки устанавливаются на рычаги подвески при помощи конических втулок и болтов М8 и гаек М8 с нейлоном. Для установки задних кулаков необходимо установить нижнюю часть кулака на нижний рычаг при помощи конических втулок и болтов М8 и гаек М8 с нейлоном, после чего

необходимо вставить привод в шрус, интегрированный в заднюю ступицу, далее устанавливается верхняя часть кулака на верхний рычаг при помощи конических втулок и болтов М8 и гаек М8 с нейлоном.

Общее количество крепежных элементов:

- болтов – 8 штук,
- гаек с нейлоном – 8 штук,
- конических втулок – 16 штук.

Необходимый инструмент:

- шестигранный ключ 6 мм,
- рожковый ключ 13 мм,
- длинногубцы.

Рулевые тяги и тяги схождения устанавливаются одной стороной в крепление на кулаке при помощи конических втулок и болтов М8 и гаек М8 с нейлоном, другой стороной в крепление на рулевой рейке или же в специальный кронштейн на пространственной раме при помощи конических втулок и болтов М8 и гаек М8 с нейлоном.

Общее количество крепежных элементов:

- болтов 8 штук,
- гаек с нейлоном 8 штук,
- конических втулок 16 штук.

Необходимый инструмент:

- шестигранный ключ 6 мм,
- рожковый ключ 13 мм,
- длинногубцы.

4.5 Разработка инструктивно-технологической карты

Подвеска болида Formula Student собирается перед соревнованиями. После соревнований часть подвески может быть разобрана для проведения технического обслуживания [3].

Технологическая карта сборки подвески представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Инструктивно-технологическая карта процесса сборки передней и задней подвески болида

| № | Наименование и содержание работы | Кол-во точек воздействия | Оборудование и инструмент | Оперативное время, мин | Технические требования |
|---|--|--------------------------|---|------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Установка рычагов подвески в крепления пространственной рамы | 16 | 16 болтов М8 16 гаек М8 с нейлоном Втулки конические 32 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 50 | - Каждый раз использовать новые нейлоновые гайки; - Предварительно проверить все ШС на люфт. |
| 2 | Установка коромысел подвески в крепления пространственной рамы | 4 | 4 болтов М8 4 гаек М8 с нейлоном Втулки цилиндрические 8 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм | 15 | - Каждый раз использовать новые нейлоновые гайки; - Предварительно проверить все шариковые подшипники на закусывание. |
| 3 | Установка амортизаторных стоек | 8 | 8 болтов М8 8 гаек М8 с нейлоном Шайбы нейлоновые 16 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Пинцет металлический | 20 | - Предварительно проверить исправность амортизаторов |

Продолжение таблицы 3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|--|---|--|----|---|
| 3.1 | Установка амортизаторных стоек в крепления пространственной рамы | 4 | 4 болта М8 4 гайки М8 с нейлоном Шайбы нейлоновые 8 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Пинцет металлический | 10 | — |
| 3.2 | Установка амортизаторных стоек в коромысла подвески | 4 | 4 болта М8 4 гайки М8 с нейлоном Шайбы нейлоновые 8 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Пинцет металлический | 10 | — |
| 4 | Установка тяг стабилизатора | 8 | 8 болтов М8 8 гаек М8 с нейлоном Втулки конические 16 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 12 | - Каждый раз использовать новые нейлоновые гайки; - Предварительно проверить все ШС на люфт. |
| 4.1 | Установка тяг стабилизатора В коромысла подвески | 4 | 4 болта М8 4 гайки М8 с нейлоном Шайбы нейлоновые 8 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 6 | — |
| 4.2 | Установка тяг стабилизатора В коромысла стабилизаторов | 4 | 4 болта М8 4 гайки М8 с нейлоном Шайбы нейлоновые 8 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 6 | — |

Продолжение таблицы 3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|--|----|---|----|--|
| 5 | Установка Pull и Push тяг | 8 | 8 болтов М8 8 гаек М8 с нейлоном Втулки конические 16 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 12 | - Каждый раз использовать новые нейлоновые гайки; - Предварительно проверить все ШС на люфт. |
| 5.1 | Установка Pull и Push тяг в коромысла подвески | 4 | 4 болта М8 4 гайки М8 с нейлоном Шайбы нейлоновые 8 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 6 | — |
| 5.2 | Установка Pull и Push тяг в крепления рычагов подвески | 4 | 4 болта М8 4 гайки М8 с нейлоном Шайбы нейлоновые 8 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 6 | — |
| 6 | Установка Поворотных и задних кулаков | 10 | 8 болтов М8 8 гаек М8 с нейлоном Втулки конические 16 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 40 | - Каждый раз использовать новые нейлоновые гайки; - Предварительно проверить все ШСП на люфт. |
| 6.1 | Установка поворотных кулаков | 4 | 4 болта М8 4 гайки М8 с нейлоном Втулки конические 16 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 15 | — |

Продолжение таблицы 3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|---|---|---|----|---|
| 6.2 | Установка заднего кулака в крепление нижнего рычага подвески | 2 | 2 болта М8 2 гайки М8 с нейлоном Втулки конические 16 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 8 | — |
| 6.3 | Установка привода в шрус | 2 | — | 9 | — |
| 6.4 | Установка заднего кулака в крепление верхнего рычага | 2 | 2 болта М8 2 гайки М8 с нейлоном Втулки конические 16 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 8 | — |
| 7 | Установка рулевых тяг и тяг схождения | 8 | 8 болтов М8 8 гаек М8 с нейлоном Втулки конические 16 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 12 | - Каждый раз использовать новые нейлоновые гайки; - Предварительно проверить все ШС на люфт. |
| 7.1 | Установки рулевых тяг и тяг схождения в крепления кулаков | 4 | 4 болта М8 4 гайки М8 с нейлоном Шайбы нейлоновые 8 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 6 | — |
| 7.2 | Установка рулевых тяг и тяг схождения в крепления рейки и пространственной рамы | 4 | 4 болта М8 4 гайки М8 с нейлоном Шайбы нейлоновые 8 шт. Шестигранный ключ 6 мм Рожковый ключ 13 мм Длинногубцы | 6 | — |

В ходе проведенной работы была разработана инструктивно-технологическая карта процесса сборки передней и задней подвески боида

Formula Student 2022. Подробно детали и крепежные изделия для сборки подвески указаны в спецификациях к сборочным чертежам передней и задней подвески в приложении А на рисунках А.1 и А.2, а также в приложении Б на рисунках Б.1 и Б.2.

Выводы по разделу

Таким образом, в данном разделе были рассмотрены были описаны технические характеристики автомобиля – гоночного болида Formula Student. В частности, детально были рассмотрены элементы системы подвески и последовательность их установки на болид.

Кроме того, нами был рассмотрен ряд основных неисправностей, которые могут возникнуть во время прохождения динамических дисциплин соревнований Formula Student или во время проведения тестов гоночного автомобиля, а также были выявлены способы устранения неисправностей и определен необходимый инструмент.

5 Безопасность и экологичность технического объекта

Изготовление узлов подвески болида FSAE связано с опасностью для изготовителя, поэтому весь процесс должен регламентироваться положением 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 [12]. На предприятии систематизированы все необходимые данные для поддержания безопасности, и каждый работник проходит инструктаж, регулярно проходит семинары по повышению квалификации, это способствует созданию безопасных условий труда на производстве.

Для производства подвески автомобиля необходимы слесарные, сварочные и сборочные работы. ОВПФ слесарных работ указаны в таблице 4.

Таблица 4 – ОВПФ слесарных работ

| Направление работы | Сущность работы | Список необходимых инструментов | ОВПФ |
|--------------------|---|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Слесарные работы | - резка металла, - сверление, - резьбонарезание | Углошлифовальная машина, струбцина, 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 5.

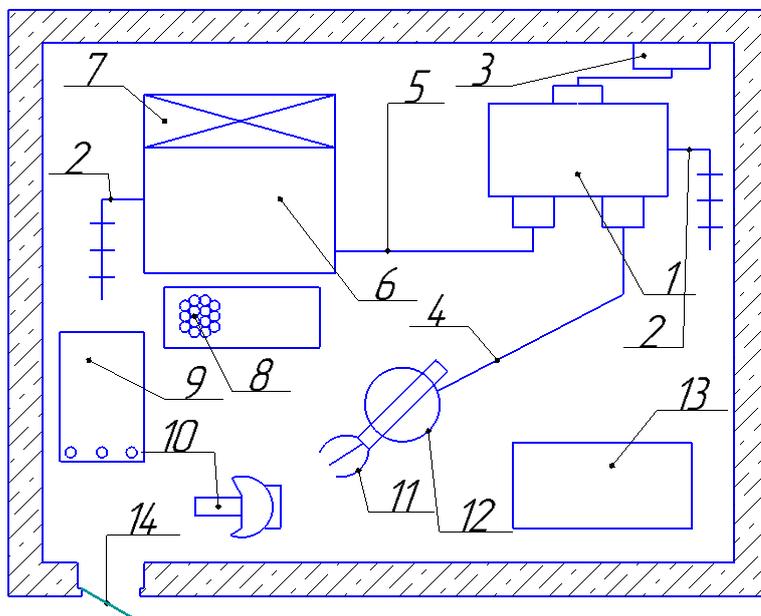
Таблица 5 – ОВПФ сварочных работ

| 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 для отходов; 14 – дверной проем.

Рисунок 32 –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 [13];
- осуществлять контроль качества сварочного шва и его проникание в материал после сварки, специальными инструментами.

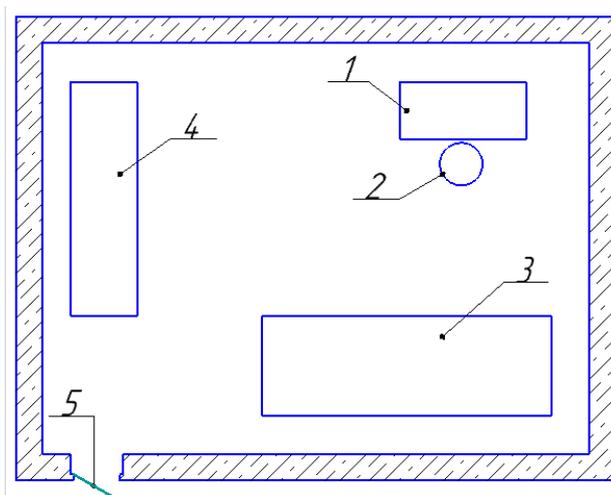
ОВПФ сборочных работ указаны в таблице 6.

Таблица 6 – 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 33 – 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

Будучи уникальным международным проектом на стыке различных научных сфер, Formula Student позволяет студентам не только пополнить базу теоретических знаний, но и применить полученные знания на практике, путем проектирования узлов гоночного болида.

Так, в рамках данной работы была рассмотрена система подвески, которая проектировалась для последней модели гоночного автомобиля класса Formula Student.

В ходе данной работы был поставлен и выполнен ряд задач:

- Был описан передовой инженерный проект Formula Student
- Проанализированы конструкции передних и задних подвесок автомобилей класса Formula Student, которые были разработаны студентами из зарубежных высших учебных заведений. Были выбраны и описаны самые распространенные варианты подвесок, применяемых в соревнованиях Formula Student. Выявлены положительные и отрицательные моменты различных конструкции.
- Для разработки передней и задней подвески перспективного болида класса Formula Student были проанализированы исходные данные, в том числе проанализирована подвеска предыдущей модели команды ТГУ. Далее были проведены расчеты перераспределения масс автомобиля при повороте, а также расчет угла крена автомобиля, для подбора необходимых параметров подвески. При проектировании мы придерживались целей, которых было необходимо достичь для улучшения динамических характеристик болида.
- Была составлена инструктивно-технологическая карта процесса сборки передней и задней подвески болида, а также описаны основные неисправности узлов подвески и методы их обслуживания.

Список используемой литературы и используемых источников

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Клепиков, В.В. Основы технологии машиностроения: учебник / В. В. Клепиков [и др.]. – М. : ИНФРА-М, 2017. - 295 с.
6. 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.).
7. 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
8. 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.
9. 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.

10. Михайлов, А.В. Оформление документов на технологические процессы обработки резанием: Метод.указания/Сост.Михайлов А.В.-Т. : ТолПИ, 1993.
11. Пашкевич, М.Ф. Технология машиностроения :учеб.пособие для вузов / под ред. М. Ф. Пашкевича. – Мин. : Новое знание, 2008. - 477 с.
12. Петрова, М.С. Охрана труда на производстве и в учебном процессе: учеб. пособие. / М.С. Петрова – М.: ЭНАС, 2006. - 232с.
13. Сергель, Н.Н. Технологическое оборудование машиностроительных предприятий: учеб. пособие / Н. Н. Сергель. - Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2013. - 732 с.
14. Суслов, А. Г. Технология машиностроения :учеб.для вузов / А. Г. Суслов. - 2-е изд., перераб. и доп. ; Гриф МО. – М. : Машиностроение, 2007. - 429 с.
15. Formula SAE URL: <http://www.fsaeonline.com/> (дата обращения: 22.05.2019)
16. Formula Student Germany [Электронный ресурс] URL: <https://www.formulastudent.de/fsg/> (дата обращения: 22.02.2022).
17. FSAE rules [Электронный ресурс] URL: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/> (дата обращения: 29.01.2022)
18. Milliken, W. and Milliken, D., 1995. Race Car Vehicle Dynamics. 1st ed. United States of America: SAE Publications Group. pp.857.
19. Pat's Corner - Back to Basics URL: <https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/pats-corner-back-to-basics/> (дата обращения: 11.05.2022)
20. SAE International [Электронный ресурс] URL: <http://students.sae.org/cds/formulaseries/> (дата обращения:09.05.2019)

Приложение Б
Спецификация к сборочному чертежу задней подвески

| Формат | Зона | Поз. | Обозначение | Наименование | Кол. | Примечание |
|--|------|------|----------------------------|--|------|------------|
| | | | | | | |
| <i>Документация</i> | | | | | | |
| А4 | | | 22РБ.ЛиЭА.213.03.00.000.ПЗ | Пояснительная записка | | 74 стр. |
| А1 | | | 22РБ.ЛиЭА.213.03.СБ | Сборочный чертеж | | |
| <i>Сборочные единицы</i> | | | | | | |
| | | 1 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.001 | Амортизатор Ohlins TTX 25 | 1 | |
| | | 2 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.002 | Верхний рычаг подвески | 1 | |
| | | 3 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.003 | Коромысло подвески | 1 | |
| | | 4 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.004 | Кулак подвески задний | 1 | |
| | | 5 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.005 | Нижний рычаг подвески | 1 | |
| <i>Детали</i> | | | | | | |
| | | 6 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.006 | Втулка коническая | 22 | |
| | | 7 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.007 | Крепление амортизаторной стойки | 2 | |
| | | 8 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.008 | Пружина Cape Creek 300 | 1 | |
| | | 9 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.009 | Толкающая тяга Push rod | 1 | |
| | | 10 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.010 | Тяга стабилизатора | 1 | |
| | | 11 | 22РБ.ЛиЭА.213.02.011 | Тяга схождения | 1 | |
| 22.РБ.ЛиЭА.213.03.00.000.ПЗ | | | | | | |
| Изм. Лист № докум. Подп. Дата | | | | | | |
| Разраб. Власов В.С. Пров. Бобровский АВ | | | | Лит. Лист Листов 1 2 | | |
| Н.контр. Бобровский АВ Утв. Бобровский АВ | | | | Подвеска задняя левая ТГУ, ЭТКп-1802а | | |

Копировал

Формат А4

Рисунок Б.1 – Спецификация подвески задней левой

