

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра Проектирование и эксплуатация автомобилей

(наименование)

23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Автомобили и автомобильный сервис

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Разработка органов управления гоночного болида класса Formula Student

Обучающийся

И.Н. Василенко

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

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

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

Тольятти 2023

Аннотация

В данной бакалаврской работе рассмотрены вопросы разработки органов управления автомобиля на примере рулевого и pedalного узлов гоночного болида класса Formula Student.

В ходе исследования произведен анализ конструкторских решений, применяемых российскими и зарубежными студенческими командами, принимающими участие в международном инженерном проекте FSAE. Сформулированы основные задачи, которые должны решаться в ходе проектирования органов управления болида G5, а именно: облегчение рулевого управления, уменьшение радиуса поворота, обеспечение адаптивности конструкции pedalного узла.

На основании выявленных требований, а также с учетом ограничений регламента соревнований Formula Student, предложена модель рулевого и pedalного узла для гоночного автомобиля.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки в размере 46 страниц, содержащей 2 таблицы, 24 рисунка и графической части, содержащей 6 листов.

Содержание

Введение.....	4
1 Состояние вопроса	5
1.1 Органы управления автомобилем	5
2 Анализ органов управления на гоночных автомобилях класса FSAE	10
2.1 Специфика инженерного проекта FSAE	10
2.2 Правила технического регламента.....	13
2.3 Анализ решений инженерных команд.....	19
3 Проектирование органов управления болида G5	28
3.1 Проектирование рулевой системы	28
3.2 Проектирование педального узла.....	35
Заключение	43
Список используемой литературы и используемых источников.....	44

Введение

Студенческий практикоориентированный проект FS (Formula Student) создавался Обществом автомобильных инженеров SAE как способ обеспечить обучающихся высших учебных заведений возможностью опробовать теоретические знания на практике через конструирование и испытание прототипа гоночного автомобиля.

Целью данной работы выступила разработка рулевой системы и pedalного узла как основных органов управления болида Formula Student. При выборе целей проектирования были учтены компоновочные решения, принятые при проектировании болида G5, а также требования технического регламента.

Для достижения цели был поставлен ряд задач:

- описать специфику FSAE как международного студенческого проекта;
- выявить и описать основные понятия, связанные с органами управления автомобилем;
- провести анализ конструкторских решений других инженерных команд;
- на основе проведенного анализа предложить концепт рулевой системы болида;
- спроектировать и предложить модель pedalного узла болида.

Результатом работы является проект рулевой системы и pedalного узла для гоночного автомобиля G5.

1 Состояние вопроса

1.1 Органы управления автомобилем

Компоненты системы рулевого управления являются ключевыми при взаимодействии пилота и гоночного автомобиля. Износ шин практически полностью зависит от состояния и регулировки компонентов рулевого управления [13].

Новое поколение систем активного рулевого управления отличает необходимость подруливания задних колес по причине курсовой устойчивости от необходимости подруливания задних колес по причине прохождения поворотов на малой скорости.

Из всех ручных систем рулевого управления выбирают рулевой механизм по следующим признакам:

- имеет простую конструкцию,
- недорогой и легко доступный,
- имеет высокий механический КПД,
- занимает мало места.

При повороте автомобиля на входе в поворот речь идет об увеличении сопротивления внутренней шины. По мере увеличения силы поворота внутренняя шина в какой-то момент должна достичь оптимального поперечного сцепления.

Успешно проведенная автомобильная гонка во многом зависит от способности водителя получить максимальную отдачу от оптимально спроектированного автомобиля. Однако традиционная динамика автомобиля не полностью применима к гоночному автомобилю, а это означает, что жестко следовать заданному критерию невозможно. За последние несколько десятилетий многочисленные исследования были сосредоточены на методах проектирования, направленных на повышение производительности гоночных автомобилей, включая проектирование аэродинамического пакета, настройку

двигателя, расчет параметров регулировки подвески и проектирование системы рулевого управления.

Способность гоночного автомобиля проходить повороты и управляемость чрезвычайно важны для общих характеристик автомобиля. Система рулевого управления может напрямую влиять на характеристики рулевого управления автомобиля, что указывает на то, что конструкция системы рулевого управления особенно важна для гоночного автомобиля [12].

За последнее время были проведены многочисленные исследования метода проектирования системы рулевого управления транспортных средств. Был изучен метод оптимизации параметров четырехзвенного рычажного механизма с геометрией рулевого управления Аккермана в качестве цели оптимизации. Также была создана математическая модель трапеции рулевого управления и рассмотрены характеристики эластичных шин с использованием абсолютной ошибки вращения угла поворота внутреннего колеса [2].

Была предложена разработка метода рулевого механизма с помощью двух эвристических методов оптимизации, а именно алгоритма искусственной иммунной системы (AIS) и генетического алгоритма (GA). Их результаты показали, что алгоритм AIS может генерировать функцию, наиболее близкую к желаемой. GA может генерировать функцию, наиболее близкую к желаемой функции, с наименьшей ошибкой.

На сегодняшний день существует лишь несколько работ, в которых при проектировании системы рулевого управления учитывается большой угол бокового скольжения шин [20]. Однако учет угла бокового скольжения шин может улучшить способность гоночного автомобиля проходить повороты.

Как показано на рисунке 1, система рулевого управления гоночного автомобиля состоит из рулевого колеса, рулевой оси, универсального шарнира, реечного рулевого механизма, рулевой тяги и т.д.

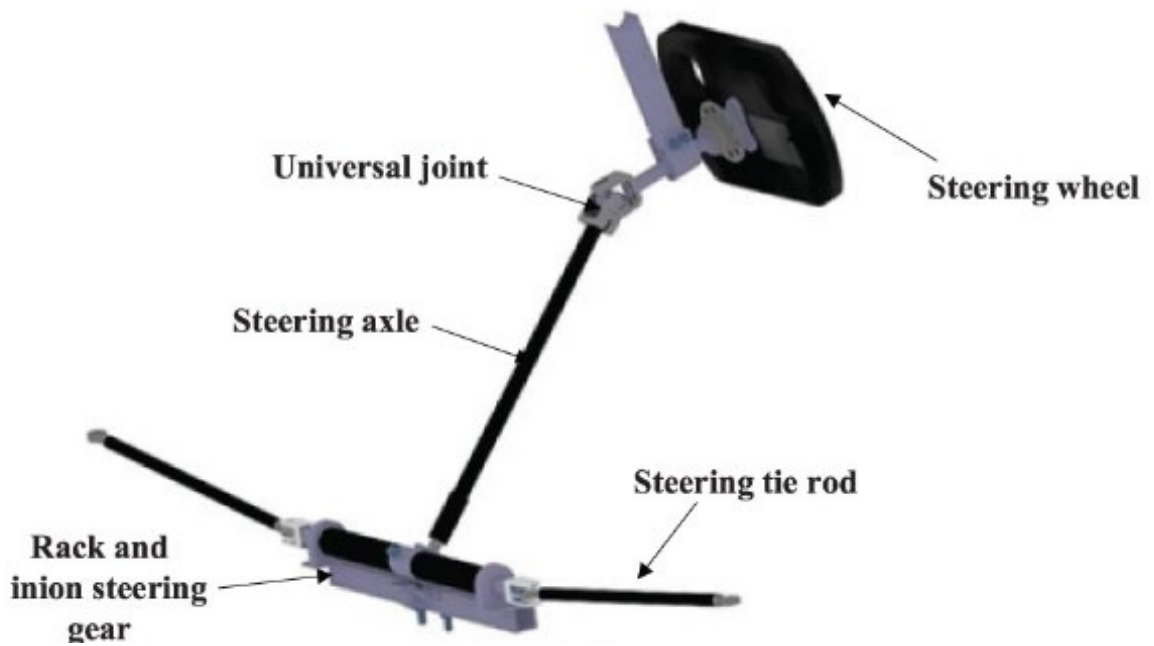


Рисунок 1 – Устройство рулевой системы

Структура системы рулевого управления гоночного автомобиля (т.е. положение и размер соответствующих компонентов) напрямую определяет соотношение углов поворота между внутренними и внешними колесами. Эту взаимосвязь можно описать с помощью модели рулевого механизма, как показано на рисунке 2.

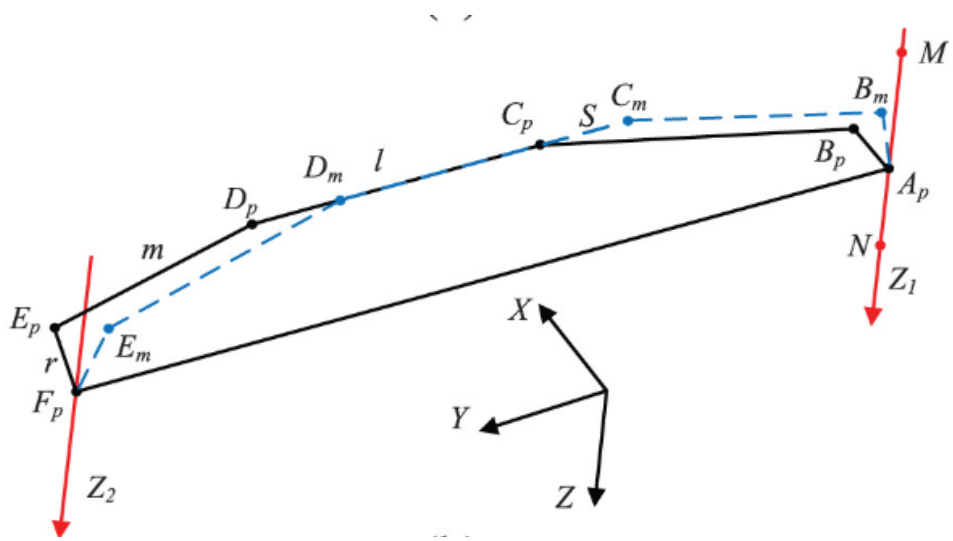


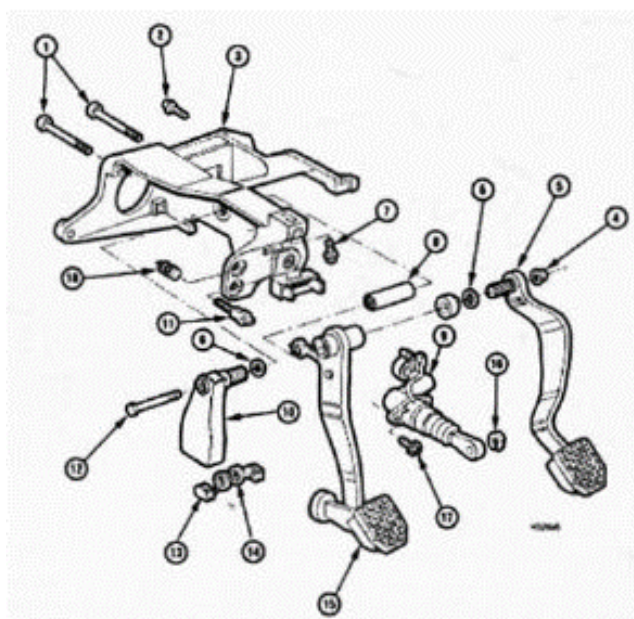
Рисунок 2 – Модель рулевого механизма

Ось X указывает направление движения транспортного средства, ось Z указывает вертикально вниз, а ось Y, перпендикулярная плоскости XOZ, указывает влево.

Другой важной составляющей органов управления автомобилем является педальный узел, состоящий из педали сцепления, педали тормоза и педали акселератора [3].

Педаля сцепления управляется левой ногой. «При отпущенной педали диски в сцеплении замкнуты, при работающем двигателе и включенной передаче через сцепление передается крутящий момент от двигателя на ведущие колеса. При выжатой педали диски разомкнуты и связи двигателя с ведущими колесами нет» [1]. В этот момент можно беспрепятственно включать нужную передачу.

На рисунке 3 показано устройство педального узла.



1 – болт; 2 – болт; 3 – кронштейн; 4 – гайка; 5 – педаль тормоза; 6 – проставка; 7 – болт; 8 – втулка; 9 – главный цилиндр; 10 – рычаг; 11 – выключатель педали сцепления; 12 – болт; 13 – держатели пружины; 14 – пружина; 15 – педаль сцепления; 16 – фиксатор; 17 – болт; 18 – фиксатор.

Рисунок 3 – Устройство педали сцепления

Педаль тормоза управляется правой ногой. В отличие от педали сцепления упор можно почувствовать в промежуточном положении, когда тормозные колодки упираются в тормозные барабаны или диски. Усилия нажатия на тормозную педаль определяет эффективность торможения. Чем меньше скорость движения автомобиля, тем меньшее усилие необходимо прикладывать к тормозной педали.

Педаль акселератора управляется так же, как и педаль тормоза – правой ногой – и работает в небольшом диапазоне. Характеризуется плавным режимом работы. Работающий двигатель при нажатии на педаль реагирует увеличением оборотов.

Рычаг управления коробкой переключения передач управляется правой рукой и устанавливается водителем в положение, соответствующее конкретной передаче. В нейтральном положении, когда передача не включена, рычаг имеет свободу перемещения в поперечном направлении. Включение передачи производится продольным перемещением рычага вперед или назад.

Таким образом, при разработке органов управления автомобилем следует уделить внимание таким элементам, как руль и рулевой механизм, педальный узел и рычаг переключения передач.

Выводы по разделу

К органам управления автомобилем относятся рулевая система, педали, а также рычаг управления КПП. От разработки данных элементов будет зависеть то, как водитель сможет взаимодействовать с транспортным средством.

2 Анализ органов управления на гоночных автомобилях класса FSAE

2.1 Специфика инженерного проекта FSAE

Одним из проектов, реализуемых на базе технических ВУЗов в России и мире, является проект Formula SAE (сокр. «FSAE»); студенческое соревнование, организованное Обществом автомобильных инженеров – Society of Automotive Engineers). На территории РФ проект получил известность под названием «Формула Студент». Примечательно, что данному студенческому инженерному движению присущи образовательный и технический аспекты. Образовательная составляющая заключается в том, что проект встраивается в процесс обучения и позволяет студентам пополнять базу знаний и навыков в ходе работы над конкретными инженерными задачами. Технический уклон проекта прослеживается в основной задаче, поставленной перед обучающимися – самостоятельно спроектировать и собрать прототип гоночного автомобиля.

Кроме того, работа над проектом Formula Student требует от участников иметь широкий круг знаний, умений и навыков. Так, студентам важно не только разработать болид, но и организовать производство, необходимые закупки, рассчитать стоимость промышленного образца и, по возможности, уменьшить ее путем оптимизации производственных процессов, доказать рентабельность проекта через грамотно оформленный бизнес-план.

Все перечисленные умения являются как никогда актуальными в отрасли отечественного автомобилестроения, где работодатель заинтересован в том, чтобы привлечь к работе как можно больше молодых квалифицированных специалистов, которые уже на выходе из университета имели бы достаточные компетенции для того, чтобы сразу влиться в производственный процесс. С другой стороны, тот же интерес преследуют и

сами выпускники ВУЗов, которым выгодно не только получить теоретические знания, но и отточить навыки, а также приобрести необходимые сейчас умения, что даст им возможность без труда найти место работы и быть востребованным специалистом.

Соревнования Formula SAE предназначены для студентов, которые должны придумать, спроектировать, изготовить, сконструировать, протестировать и продать прототип гоночного автомобиля класса Formula Student. Именно поэтому в студенческую команду обычно входят как студенты-инженеры, так и обучающиеся других направлений подготовки, связанных с менеджментом и экономикой и др.

Поскольку на конструкцию шасси и двигателя транспортных средств, участвующих в проекте, накладываются ограничения, участникам проекта приходится прибегать к собственным знаниям, творческим способностям и воображению, чтобы найти нестандартные и наиболее эффективные решения. Дизайн каждой конструкции сравнивается с другими конкурирующими проектами, чтобы определить лучший автомобиль в общем зачете.

Автомобиль должен демонстрировать превосходные характеристики наряду с простотой обслуживания и ремонта и надежностью при минимально возможных производственных затратах. Он должен быть эстетичным, инновационным, его конструкция должна обеспечивать комфорт и хорошую эргономику. Команде необходимо объединить все перечисленные аспекты в хорошо сбалансированный пакет, который покажет хорошую динамику в ходе соревнований. При этом командам необходимо придерживаться правил регламента, поскольку соблюдению безопасности уделяется очень большое внимание.

Требования правил регламента охватывают как конструкцию транспортного средства, так и проведение всех мероприятий, связанных с соревнованиями, и поведение участников на площадке FSAE.

Ежегодно спроектированные и полностью собранные болиды команд из различных университетов принимают участие в статических дисциплинах и гоночных заездах во время одноименных соревнований.

Для оценки успешности презентации разработанного автомобильного прототипа в ходе соревнований был разработан ряд критериев, по которым студенческим командам выставляются баллы. На рисунке 4 представлена выдержка из англоязычного регламента.

	CV & EV	DC
Static Events:		
Business Plan Presentation	75 points	-
Cost and Manufacturing	100 points	-
Engineering Design	150 points	150 points
Dynamic Events:		
Skidpad	50 points	-
Driverless (DV) Skidpad	75 points	75 points
Acceleration	50 points	-
DV Acceleration	75 points	75 points
Autocross	100 points	-
DV Autocross	-	100 points
Endurance	250 points	-
Efficiency	75 points	-
Trackdrive	-	200 points
Overall	1000 points	600 points

Рисунок 4 – Элементы оценочной таблицы Formula SAE

Как видно из рисунка, одной из основных дисциплин является Engineering Design, т.е. защита конструкции автомобиля. От того, насколько обоснованными являются конструкторские решения, принятые инженерами команды, будет зависеть итоговый балл, полученный за данную дисциплину. По этой причине разработке узлов автомобиля, в том числе органов управления, отводится ключевое место при планировании работ.

Помимо этого, органы управления будут играть важную роль при взаимодействии с пилотом болида во время прохождения им динамических

испытаний: Skidpad, Acceleration, Autocross (Sprint в русскоязычной версии соревнований), Endurance.

Перед динамическими испытаниями все автомобили проходят строгий комплекс проверок безопасности. На этом этапе судьи могут потребовать внесения изменений, прежде чем автомобиль будет допущен к участию в динамических соревнованиях [15].

2.2 Правила технического регламента

Проектирование органов управления болида класса Formula Student включает в себя формирование математической и геометрической модели, включая работу с CAD и FEA программами. Подход к проектированию систем обычно включает следующие этапы [17]:

- определение концепта автомобиля и его основных технических параметров,
- настройка геометрии,
- валидация геометрии,
- проектирование системы,
- моделирование и анализ с помощью CAD и FEA программ соответственно.

Первый этап связан с определением исходных данных, которые, в свою очередь, тесно связаны с ограничениями, накладываемыми на конструкцию автомобиля регламентом проекта Formula Student [9].

Внешний вид автомобиля «формульного класса» представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Автомобиль класса Formula Student

Для определения исходных данных рассмотрим изменения регламента 2024 года, которые занесены в таблицу 1:

Таблица 1 – Изменения технического регламента

Пункт	Изменение в регламенте	Суть изменения
T1.1.2	Кузов – внешняя поверхность шасси, включая все детали обтекателя и щитки.	Добавлено определение понятия bodywork
T1.1.16	Зона защиты от опрокидывания состоит из: <ul style="list-style-type: none"> • основной структуры и любых дополнительных прикрепленных к ней конструкций, которые соответствуют минимальным техническим требованиям, определенным в T3.2 или эквивалентным • плоскости от верхней точки главной дуги до верхней точки передней дуги • плоскость от верхней точки главной дуги до самой задней конструкции в соответствии с T3.2 или эквивалентным примером, изображенным на рисунке 2. 	Обновлено определение rollover protection envelope
T1.1.18	Огибающая поверхности объединяет в себе зону защиты от опрокидывания, см. T1.1.16, и объем, определяемый: <ul style="list-style-type: none"> • верхней точкой главной дуги и внешними краями четырех шин • плоскостью от вершины главной дуги до вершины передней перегородки • плоскостью от верхней точки главной дуги до самой задней конструкции в соответствии с T3.2 или эквивалентной • горизонтальной плоскостью в самой нижней точке любой конструкции в соответствии с T3.2 или эквивалентной 	Обновлено определение surface envelope
T2.2.1	Минимальный статический дорожный просвет любой части автомобиля, кроме шин, вместе с пилотом, должен составлять 30 мм. Если установлена система активной подвески, статический дорожный просвет измеряется в самом нижнем регулируемом положении.	Добавлено ограничение, связанное с активной подвеской

Продолжение таблицы 1

Пункт	Изменение в регламенте	Суть изменения
T2.3.2	Перед проемом кокпита и за пределами зоны, определенной в T8.2, все части кузова не должны иметь внешних вогнутых радиусов.	Добавлено правило о форме кузова
T2.3.4	Кузов перед передними колесами с касательной поверхности выше 45° относительно направления движения должен иметь радиус не менее 38 мм по верху, бокам и низу всех затронутых кромок.	Дано пояснение
T2.4.1	Все края кузова и аэродинамических элементов, которые могут войти в соприкосновение с пешеходом, должны иметь радиус минимум 3 мм.	Единый минимальный радиус для аэродинамических элементов и кузова
T2.6.2	Колесные болты, ведущие штифты и шпильки должны быть изготовлены из стали или титана. Команда должна продемонстрировать хорошую инженерную практику и обеспечить достаточную прочность путем расчетов. Колесные болты, ведущие штифты и шпильки не должны быть полыми.	Дано пояснение
T2.8.9	Рулевая рейка должна быть механически прикреплена к основной структуре и находиться в зоне защиты от опрокидывания.	Предписанное расположение рулевой рейки
T3.2.1	Минимальная площадь поперечного сечения составляет 173 мм ² .	Изменено значение для устранения расхождений с SES
T3.4.4	Если в основной структуре используется асимметричная укладка композитов, то более тонкий слой должен иметь толщину не менее 40% более толстого слоя.	Добавлено ограничение толщины для асимметричных укладок композитов
T3.5.4	Если ламинат не является квазиизотропным, т.е. имеет одинаковую прочность и жесткость в направлениях 0°, 90° и ±45°, результаты испытания на трехточечный изгиб будут относиться к направлению укладки 0°. Чтобы показать эквивалентность в SES, необходимо использовать направление укладки 0° и соответствующим образом ориентировать его в шасси.	Добавлено правило для определения направления и выравнивания неквазиизотропного ламината
T3.15.2	Другие защитные конструкции, см. CV1.3.2, EV4.4.2 и EV5.5.2, должны быть полностью триангулированными и состоять как минимум из трех стальных труб, см. T3.2, с каждой стороны и сзади того компонента, который они защищают. <ul style="list-style-type: none"> • Если деталь выступает наружу от передней или главной дуги, переднюю часть детали также необходимо защитить от ударов. • Верхний элемент не должен быть выше самой нижней внутренней точки шасси между передней и главной дугой более чем на 320 мм. 	Добавлено правило для устранения несоответствий между боковыми и другими ударными структурами

Продолжение таблицы 1

Пункт	Изменение в регламенте	Суть изменения
T3.17.1	Каждый болид должен иметь сборку IA, состоящую из аттенюатора (IA) и пластины аттенюатора (AIP).	Дано пояснение
T3.17.5	Аттенюатор может быть прикреплен к пластине AIP минимум четырьмя метрическими болтами диаметром 8 мм класса 8.8, которые считаются критически важными крепежными элементами и должны соответствовать T10. Крепления с использованием клея должны выдерживать нагрузку 60 кН в любом направлении.	Определены требования к креплению аттенюатора
T5.5.3	Прочность любой перекладины плечевого ремня и распорок должна быть подтверждена в соответствующей вкладке SES.	Уточнено правило: разделены перекладины плечевого ремня и распорки
T6.3.2	Стоп-сигнал должен <ul style="list-style-type: none"> • быть красного цвета. • быть хорошо видимым сзади. • соответствовать требованиям T11.10. 	Изменено определение стоп-сигнала как индикатора состояния системы
T7.2.2	В других системах охлаждения в качестве хладагента можно использовать только простую воду, воздух или масло, см. T1.2.2.	Изменено, чтобы подходило и под НУ
T.10.1.5	Для систем рулевого управления и подвески допускается использование альтернативных креплений, если может быть показана эквивалентность T10.1.2 и T10.1.3.	Добавлено новое правило по крепежам
T10.2.3	Стопорные кольца в соответствии с DIN 471, DIN 472 или эквивалентным стандартом разрешено использовать как OEM или для фиксации подшипников или пружин, при условии, что они не несут никаких нагрузок при нормальных условиях эксплуатации.	Изменена формулировка для стопорных колец
T11.1.5	[ТОЛЬКО ДЛЯ CV] Максимально допустимое напряжение для внутренних сигналов управления малой мощностью контроллера двигателя/инверторов составляет 75 В постоянного тока.	Добавлено ограничение напряжения сигнала управления низкой мощностью для НУ
T11.4.7	Кнопки выключения должны быть красного цвета.	Добавлено правило, согласно которому кнопки выключения должны быть красного цвета
T11.5.4	Устройство должно быть жестко закреплено и установлено на автомобиль согласно спецификации производителя. Должна быть обеспечена возможность демонтажа устройства для проверки его работоспособности путем встряхивания.	Уточнена формулировка крепления инерционного выключателя

Продолжение таблицы 1

Пункт	Изменение в регламенте	Суть изменения
Т.11.7.7	<p>Аккумуляторные батареи на основе лития, отличные от литий-железо-фосфата (LiFePO₄), и все аккумуляторы энергии гибридных систем независимо от химического типа:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Должны иметь огнестойкий корпус, см. Т1.2.1. • Должны включать защиту от перегрузки по току, которая срабатывает при максимальном указанном токе разряда элементов или ниже. • Должны включать защиту от перегрева не менее 30% элементов, соответствующую EV5.8.4, которая срабатывает, когда какой-либо элемент выходит за пределы допустимого диапазона температур согласно паспорту производителя, но не более 60 °С, на время более 1 секунды и отключает батарею. • Должны включать защиту по напряжению всех ячеек, которая срабатывает, когда какая-либо ячейка выходит за пределы допустимого диапазона напряжения согласно паспорту производителя более чем на 500 мс и отключает батарею. • Должна быть обеспечена возможность отображения всех напряжений элементов и измеренных температур, например, через подключение ноутбука. • Должны соответствовать EV5.8.11. • Сигналы, необходимые для выполнения этих требований, являются SCS (критическими сигналами системы), см. Т11.9. 	<p>Правило применяется для всех HSC, независимо от типа химии</p>
Т11.8.5	<p>В качестве APPS необходимо использовать как минимум два отдельных датчика. Датчики могут иметь общий корпус.</p>	<p>Изменены требования для APPS</p>
Т11.9.3	<p>Если сбой сигнала такой, что его можно исправить, например, из-за избыточности или значений наихудшего сценария, безопасное состояние должно быть введено, как только произойдет дополнительный неустранимый отказ.</p>	<p>Выделено в отдельное правило</p>
Т12.2.1	<p>Гибридные автомобили с двигателем внутреннего сгорания должны обозначаться дополнительной маркировкой рядом с тремя номерами с помощью заглавных римских букв «НУ» без засечек высотой не менее 75 мм белого цвета на красном фоне.</p>	<p>Добавлены требования к идентификации гибридного автомобиля</p>
Т13.2.2	<p>Расположение домкрата(ов) должно быть безопасным.</p>	<p>Изменена формулировка расположения домкратов</p>

Продолжение таблицы 1

Пункт	Изменение в регламенте	Суть изменения
T13.2.3	В поднятом положении: <ul style="list-style-type: none"> • Болид должен иметь адекватную опору и быть в устойчивом положении. • Пилот должен иметь возможность безопасно сесть в кокпит и покинуть его. • Домкрат(ы) не должен(ы) выходить за пределы проекционной поверхности автомобиля. 	Изменены требования к размеру домкратов
T.13.3.2	Хорошо сидящий шлем с закрытым визором, соответствующий одному из следующих сертификатов и имеющий следующую маркировку: <ul style="list-style-type: none"> • Snell K2015, K2020, M2015, M2020, SA2020, EA2016 или новее • 31.1/2015, 31.1/2020, 41.1/2015, 41.1 /2020 или новее • FIA 8860-2010, FIA 8860-2018, FIA 8859-2015 или новее. 	Удалены стандарты, срок действия которых истекает после 31.12.2023
T13.3.3	Если используется передняя система фиксации пилота (FHR, HANS), она должна быть сертифицирована по одному из следующих стандартов и иметь соответствующую маркировку: <ul style="list-style-type: none"> • FIA 8858-2010 • FIA 8860-2004 • SFI 38.1 	Добавлены стандарты для передней системы фиксации пилота
T13.3.10	Огнестойкая экипировка не должна быть старше 10 лет и узнаваема, поскольку на ней нет голограммы FIA.	Дополнительные возможности использования огнестойкой экипировки
T13.3.12	Если на экипировке есть нашивка, команда должна быть в состоянии продемонстрировать, что экипировка по-прежнему соответствует требованиям T13.3. Для этого, помимо прочего, необходимо, чтобы только внешняя сторона была перфорирована. Официальные лица оставляют за собой право конфисковать всю экипировку, которая не прошла проверку на соответствие, до конца соревнований.	Пояснение касательно нашивок на экипировке пилота
T13.3.13	Некоторые (но не все) одобренные огнестойкие материалы: Nomex, Aramid, Belcotex, Indura.	Обновлено использование огнестойких материалов в экипировке пилота
T14.2.3	[ТОЛЬКО ДЛЯ CV] Крепление регистратора данных должно быть опломбировано во время технической инспекции.	Добавлено новое требование относительно установки регистратора данных для CV

Продолжение таблицы 1

Пункт	Изменение в регламенте	Суть изменения
T14.9.2	Статус автономной системы должен быть определен согласно блок-схеме на рисунке 17.	Добавлена дополнительная логика для перехода от AS Finished к AS Emergency
T14.10.3	По крайней мере один индикатор статуса автономной системы ASSI должен быть виден с любого угла автомобиля с точки на высоте 1,60 м по вертикали от уровня земли и в пределах 3 м по горизонтальному радиусу от вершины главной дуги.	Прописаны требования к видимости индикатора статуса автономной системы
T14.10.4	Каждый индикатор статуса автономной системы ASSI должен соответствовать требованиям согласно T11.10.	ASSI определен как индикатор состояния системы для уточнения требований
T14.11.3	Должна быть возможность выбора прохождения любой «миссии» (динамической дисциплины) без использования внешнего устройства.	Добавлено новое требование относительно выбора миссии
T15.1.2	Все части ASB должны находиться внутри зоны защиты от опрокидывания, см. T1.1.16.	Уточнено, где разрешено располагать части ASB
T15.4.2	Среднее замедление должно быть более 10 м/с^2 в условиях сухой трассы.	Повышены требования к производительности EBS

Таким образом, при проектировании системы рулевого управления стоит учитывать пункты регламента, которые накладывают ограничения на данную систему.

2.3 Анализ решений инженерных команд

С целью обеспечить выбор оптимальных решений при конструировании органов управления для гоночного болида Scorpion, был рассмотрен ряд решений зарубежных инженерных команд, которые также принимают участие в проекте Formula Student в своих университетах.

Командой из Технического университета ПЕТРОНАС отмечается, что при проектировании блока педалей эффективность и результативность

системы в основном зависят от таких параметров, как ход педали, отношение плеч приложения нагрузки и прилагаемая сила. Важно знать, что значения параметров во время гоночного заезда будут отличаться от значений, полученных путем теоретических вычислений.

Опыт проведения испытаний автомобиля, описываемого в отчете, показал, что отношение плеч приложения нагрузки педалей и прилагаемое усилие являются приоритетными инженерными проблемами. Это объясняется тем, что водитель не может эффективно управлять автомобилем, если отношение плеч приложения нагрузки выходит за пределы идеального диапазона, а прилагаемое усилие слишком велико.

В конструкции автомобиля UTP FSAE были выявлены некоторые проблемы, касающиеся массы и стоимости всей машины. Согласно Шиллеру, общий вес болида должен быть менее 500 фунтов (226,8 кг), чтобы автомобиль мог хотя бы отдаленно считаться конкурентоспособным в соревновании. После расчетов распределяемый вес для педального узла составил всего 5 фунтов (2,27 кг). Поэтому целью команды было разработать легкий и экономичный педальный узел для автомобиля класса FSAE.

В отчете команды делается акцент на том, что эффективность педального узла также зависит от «формы и контактной поверхности самой педали. Анализ соответствующей литературы показывает, что педаль должна иметь изогнутую форму, поскольку для того, чтобы вытащить трос газа во время ускорения, педаль акселератора необходимо надавить на определенный угол.

Педаль автомобиля UTP FSAE была спроектирована только с использованием тяг. Такой тип конструкции обеспечивает меньшую площадь контактной поверхности для распределения силы (нагрузки), исходящей от стопы пилота. Как следствие, это позволит ноге водителя проскальзывать под педалью. Площадь контакта педали, к которой ступня прикладывает усилие, считается оптимальной для периодического использования, если ее длина и ширина составляют 80 на 90 мм» [1].

По данным, собранным для разработки системы эргономики автомобиля, максимальная длина стопы среднего пилота команды составляет 272 мм и потому была установлена как максимальная высота накладки педали. Эти данные были использованы для правильного определения высоты контактной поверхности.

В одном из отчетов показана сконструированная педаль газа, для которой использовался кусок стальной трубки диаметром 16 мм, согнутой в форме педали акселератора. Педаль показана на рисунке 6 ниже.

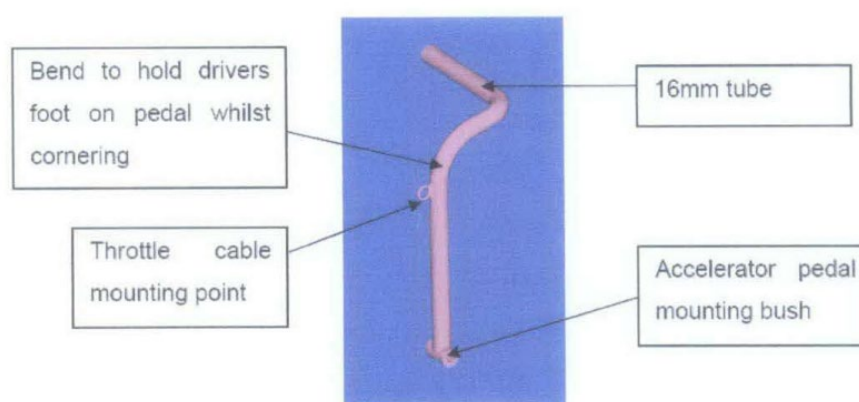


Рисунок 6 – Пример конструкции педали

Шарнир педали представляет собой кусок стального стержня толщиной 16 мм с просверленным отверстием диаметром 8 мм, которого достаточно, поскольку шарнир будет вращаться с низкой скоростью. Педаль имеет небольшой изгиб в вертикальной части, чтобы нога водителя не соскальзывала с педали при повороте.

Ряд команд указывают на проблему включения сцепления в педальный узел или перенесения его на рычаг переключения передач. В большинстве спортивных автомобилей принимается решение переключить управление сцеплением на рычаг переключения передач.

Так, например, в InterContinental C Kart «рычаг сцепления установлен на рулевом валу, повторяющем профиль рулевого колеса. Работа рычага

сцепления осуществляется путем потягивания рычага в сторону рулевого колеса левой рукой» [1].

Автомобили Champ-Car относятся к высшему классу коммерчески доступных автомобилей класса «формулы». Однако используемая компоновка кабины у них такая же, как и у более бюджетных автомобилей. В автомобиле Champ работа сцепления осуществляется движением левой ноги на ножной педали.

В Формуле-1 в последние годы управление сцеплением перешло от ножного управления к ручному с развитием электронных систем управления. В настоящее время сцепление установлено на задней части руля и также имеет электронное управление [16].

Если же говорить о болидах класса FSAE, мнения о положении сцепления расходятся. С одной стороны, отмечается, что сцепление должно находиться на переключателе, чтобы уменьшить сложность педального узла и предоставить больше места для расположения педалей. Возможное расположение сцепления показано на рисунке 7.

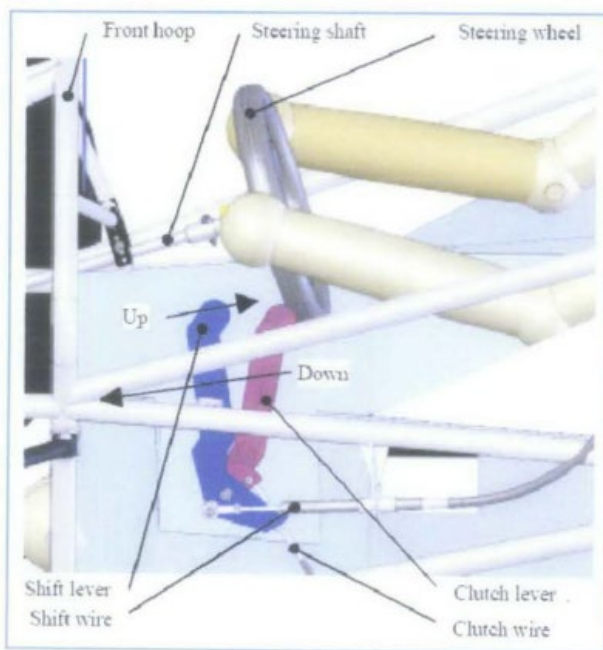


Рисунок 7 – Расположение сцепления

Для сцепления на рычаге переключения передач на автомобиле FSAE должна быть установлена легкая, небольшого размера и качественная трансмиссия, и многие команды используют встроенные трансмиссии спортивных мотоциклов.

В таком случае водители должны управлять трансмиссией вручную. В связи с ограничениями, наложенными правилами FSAE, быстрые и точные действия трудновыполнимы, поскольку при ускорении, замедлении и прохождении поворотов происходит большое ускорение.

Чтобы сделать работу водителя проще, командой была разработана операционная система полуавтоматической трансмиссии. Для управления механической коробкой передач использовались механические системы со звеньями и проводами. Переключатели, установленные вокруг системы, управляли переключением передач с помощью двигателей постоянного тока, и у водителей не было необходимости отпускать руки для выполнения необходимых операций.

Команда Monash Formula SAE в своем отчете заявляет, что недостаточно иметь только два положения регулировки, при которых педальный блок физически отвинчивается и перемещается. Поэтому они предлагают новое решение, используя направляющую LM76. Это позволяет водителю изменять положение блока педалей в одно из шести положений с шагом 0,7 дюйма.

Команда из Махараштры, Индия, особое внимание уделяет выбору рулевого механизма: широко используются два основных типа рулевого механизма – геометрия Аккермана и геометрия анти-Аккермана.

В геометрии рулевого управления Аккермана внешний угол блокировки больше, чем внутренний угол колеса, а внешнее колесо покрывает большее расстояние. Во втором случае ситуация противоположная. Обе геометрии имеют свое значение, но геометрия Аккермана широко используется из-за различных факторов, таких как:

- простота конструкции,
- возможность внесения изменений,
- простота изготовления,
- снижение трения и усилия на рулевом управлении по сравнению с автомобилем с анти-Аккерманом,
- повышенная стабильность.

По этим причинам командой выбрано рулевое управление типа Аккерман.

Для доказательства оптимальности используемой конструкции используются оба разрешенных проектом FSAE метода – программное обеспечение (Solidworks) и аналитический метод.

На рисунках 8-10 показана работа команды по выбору геометрии рулевого управления.

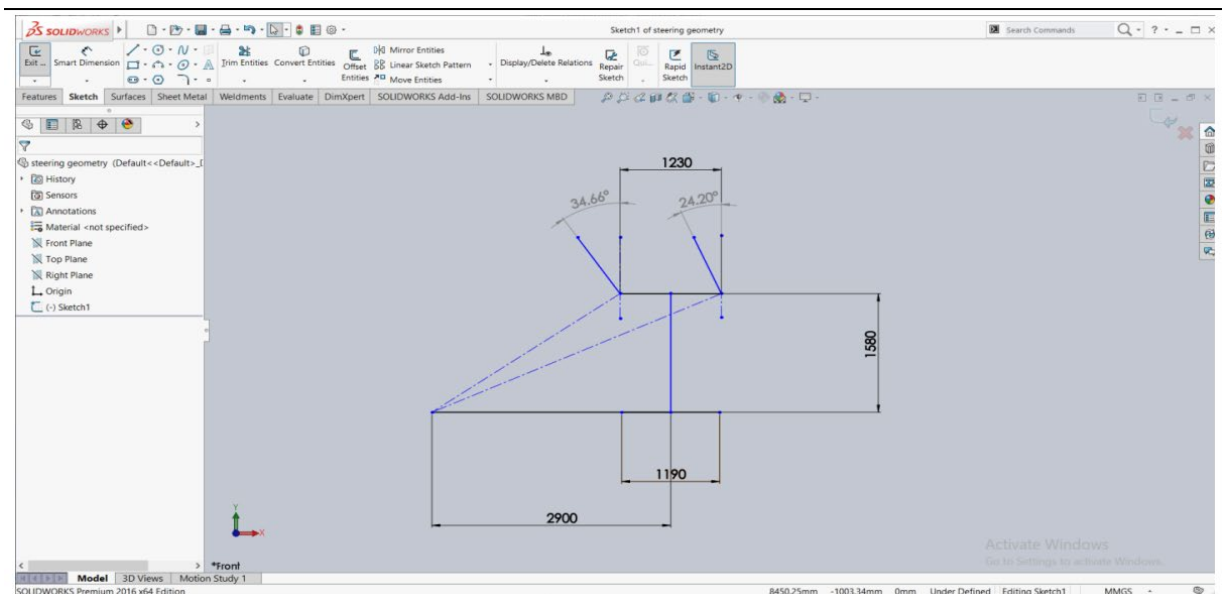


Рисунок 8 – Определение основных параметров

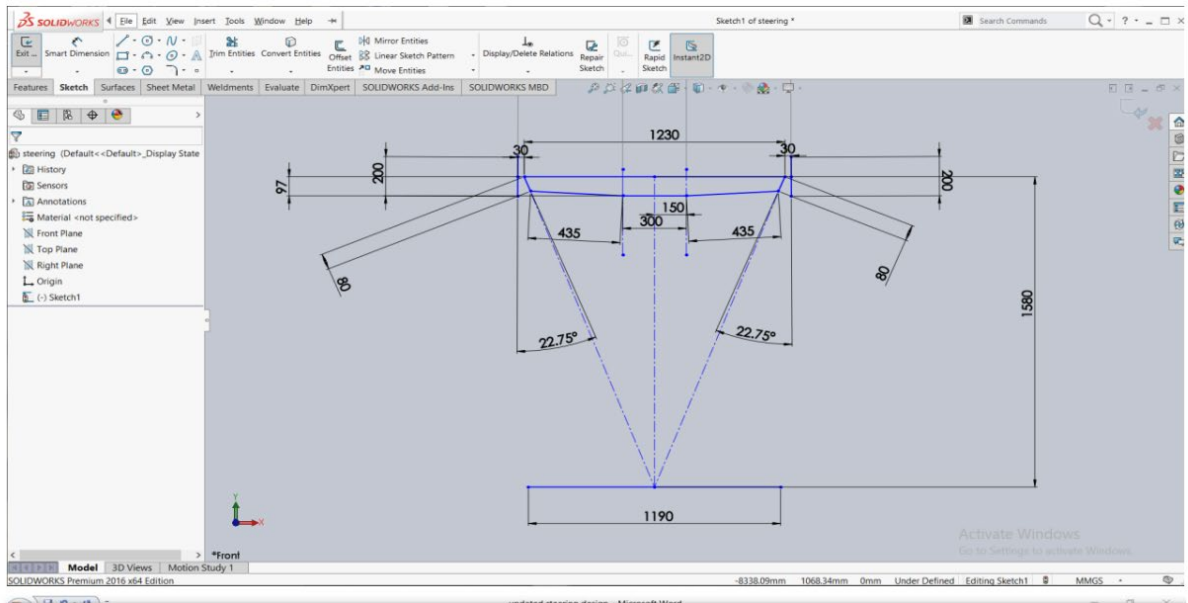


Рисунок 9 – Включение в модель основных углов

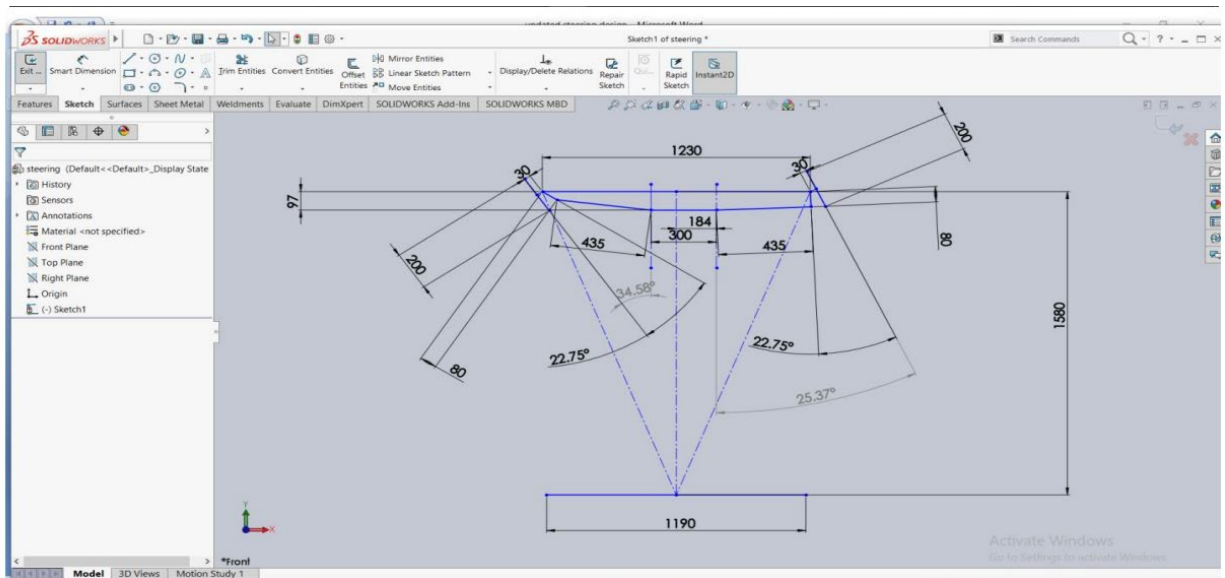


Рисунок 10 – Финальная модель в Solidworks

Как видно на изображениях выше, сначала были окончательно определены углы блокировки, радиус поворота, колесная база, ширина колеи. Следующим этапом являлось проектирование реечного механизма, отвечающего основным требованиям, установленным студенческой инженерной командой [19].

Сначала была взята допустимая ширина колеи и колесная база в соответствии со сводом правил, затем были внесены изменения таким образом, чтобы они соответствовали концепту автомобиля. В отчете команды отмечается, что данные аспекты взаимосвязаны друг с другом, изменение одних параметров влияет на другие.

Анализ вариантов, которые подходят под выбранную конструкцию автомобиля, а также возможности для программного расчета, позволили прийти к окончательным результатам.

Перед этим было выполнено несколько итераций, после чего команда приступила к проектированию реечной передачи. Также учитываются поперечные и продольные переносы веса, однако они в основном относятся к динамике автомобиля [18].

Есть множество факторов, на которые команда обращает внимание, например, С-фактор, количество зубьев для реечной передачи, длина рулевого рычага, рулевые наконечники, рулевая колонка, а также рулевое колесо должны быть расположены таким образом, чтобы водителю было удобно садиться и выходить из автомобиля из-за ограниченного пространства в кабине.

Отмечается, что одной из целей, которые преследовала команда, являлось обеспечение комфорта вождения болида, т.е. такой ситуации, при которой водитель не должен утомляться. Этому способствует эргономичность конструкции и механизм, который обеспечивает приложение как можно меньшего количества усилий со стороны пилота [10].

Для программного метода окончательно были определены следующие параметры:

- углы блокировки: I 34,66/o 24,20 (фактические), I 34,58/o 25,37 (в Solidworks),
- общая разница с фактическим значением: 0,08/1,17,
- колесная база: 1580 мм,
- ширина передней колеи: 1230 мм,

- ширина задней колеи: 1190 мм,
- длина рулевых тяг: 435 мм,
- длина рулевого рычага: 80 мм,
- расстояние между передней осью и стойкой: 97 мм,
- желаемый ход стойки: 34 мм,
- передаточное число рулевого управления: 5,20:1,
- минимальный радиус поворота: 2900 мм,
- угол Аккермана: 22,75.

Данные значения были перепроверены с учетом аналитических расчетов.

- колесная база = 1580 мм (1,58 м),
- передаточное число рулевого управления = 5:1,
- средняя скорость поворота = 36,
- ширина гусеницы, длина передней оси (BD) = 1230 мм,
- длина задней оси (EC) = 1190 мм.

Выводы по разделу

Описана специфика инженерного проекта для студентов Formula SAE, проанализированы пункты технического регламента, которые накладывают ограничения на систему эргономики автомобиля, проведен сравнительный анализ конструкторских решений, предлагаемых зарубежными инженерными командами.

3 Проектирование органов управления болида G5

3.1 Проектирование рулевой системы

«Базовая конфигурация всей системы рулевого управления основана на геометрических расчетах угла Аккермана. Геометрия Аккермана представляет собой графическое представление системы рулевого управления» [1] (рисунок 11).

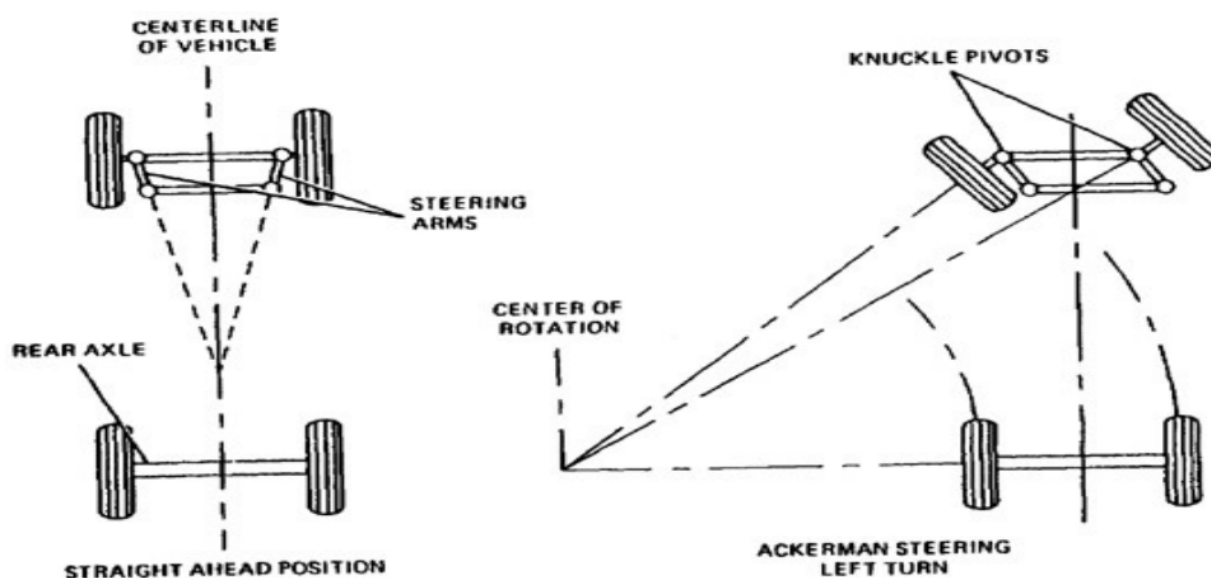


Рисунок 11 – Рулевое управление

«В рамках спортивно-гоночных соревнований Formula Student следует говорить о том, что скорость, с которой каждое колесо будет поворачиваться относительно друг друга, напрямую связана с тем, насколько автомобиль будет поворачиваться – как при малых, так и при высоких боковых ускорениях [8]. Это наиболее заметно при низком поперечном ускорении болида, когда углы увода и перенос веса незначительны, поскольку в этом состоянии идеальной была бы конфигурация pure Ackermann steering configuration.

Другими словами, внутреннее колесо в этом случае будет поворачиваться с меньшим радиусом, чем внешнее колесо» [7], как показано на рисунке 12:

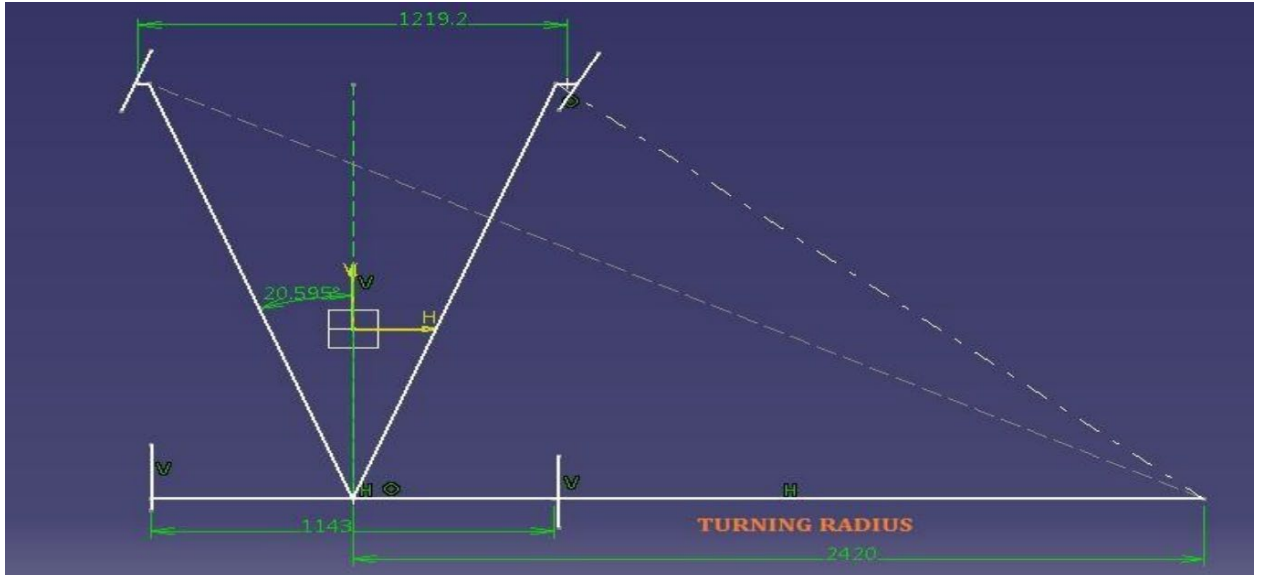


Рисунок 12 – Определение угла Аккермана при повороте

«Эту геометрию можно легко определить, если известны такие параметры, как колесная база, положение шкворня и плечо момента. Как видно на рисунке, прямая должна быть проведена при нейтральном повороте к центру задней колесной базы от каждого шкворня на указанной высоте.

Точка захвата рулевой тяги должна располагаться на этой линии в точке, находящейся на расстоянии длины плеча момента от шкворня» [14]. В данном случае Аккерман будет равен 100% (рисунок 13).

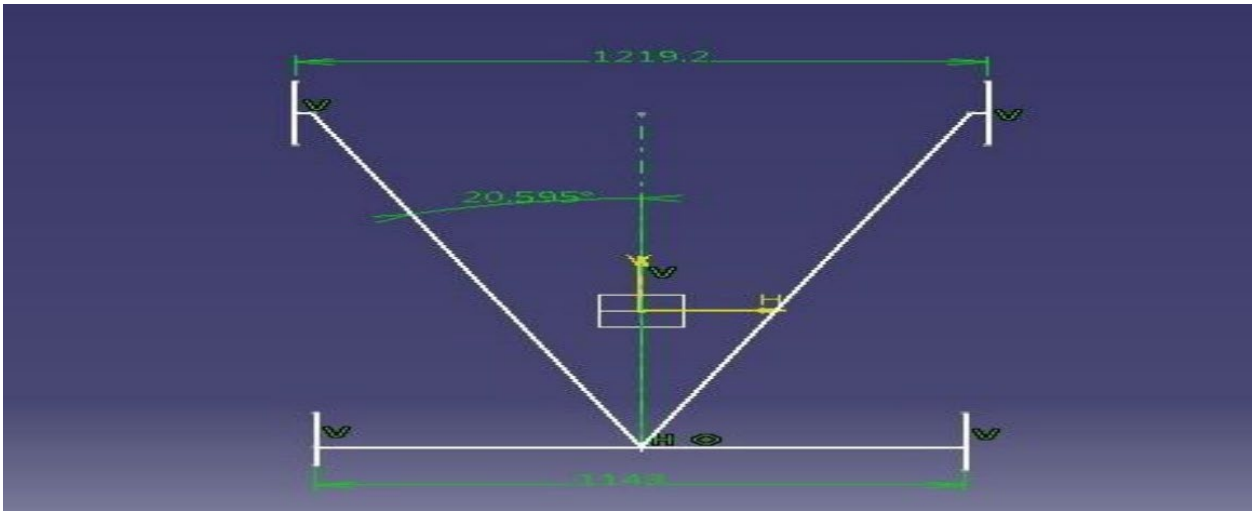


Рисунок 13 – Определение угла Аккермана в статичном положении

«Итак, основная задача производимого расчета заключается в том, чтобы получить значение усилия на рулевом колесе при повороте рулевого колеса на месте. Это позволит понять необходимость дальнейшей оптимизации конструкции и кинематики рулевого управления» [4].

Далее обозначены все входные параметры:

- колесная база: 1550 мм,
- ширина 1200/1150 мм,
- тип шин: 18x6.5 R13, 18x6.5 R13,
- давление в шинах: 80 кПа,
- максимальная нагрузка на переднюю ось: 106 кг.

Некоторые из параметров, таких как колесная база, жестко регламентированы правилами инженерного проекта FSAE. Так, например, колесная база не может быть менее 1525 мм.

В таблице 2 представлены параметры, которые необходимо учитывать при проектировании. К таким параметрам относятся минимальный диаметр поворота, тип усилителя, тип рулевого механизма, ход стойки в мм, диаметр стойки и др.

Таблица 2 – Основные параметры, влияющие на рулевую систему

Наименование	Параметр	Значение
Параметры системы рулевого управления в целом	Минимальный диаметр поворота (м)	Менее 3 м
	Тип усилителя	Нет усилителя
Рулевой механизм	Тип	Реечный тип
	Ход стойки (мм)	70
	Диаметр стойки (мм)	20
	Передаточное отношение (мм/град)	4,21
Рулевая трапеция	Длина рулевой трапеции (мм)	63
	Угол основания трапеции (°)	100,005
Колесо	Максимальный угол внешнего колеса (°)	32,5
	Максимальный угол внутреннего колеса (°)	24

Была выбрана рулевая рейка, как показано на рисунке 14.

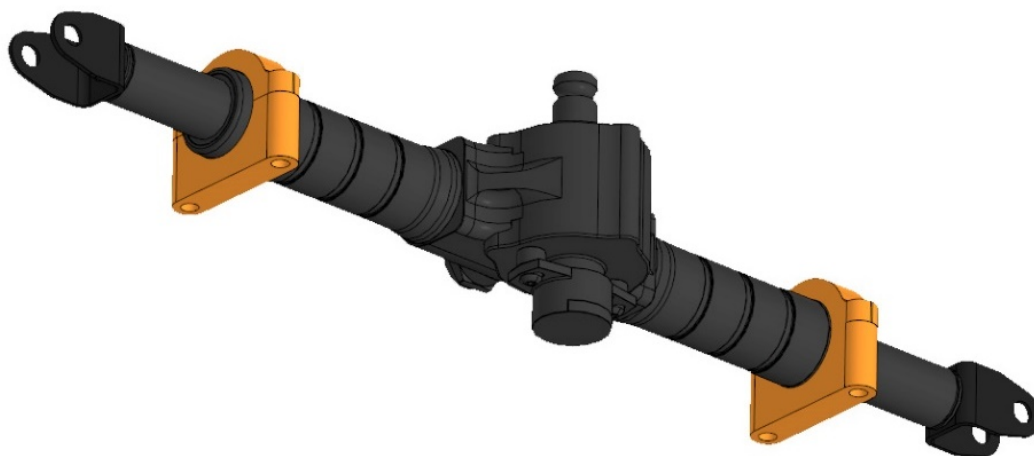


Рисунок 14 – Рулевая рейка

«Теоретический расчет диаметра поворота

Максимальный угол поворота внешнего колеса $\alpha_1 = 24^\circ$; максимальный угол внутреннего колеса $\beta = 32,5^\circ$. Углы α_1 и β показаны на рисунке 15» [5].

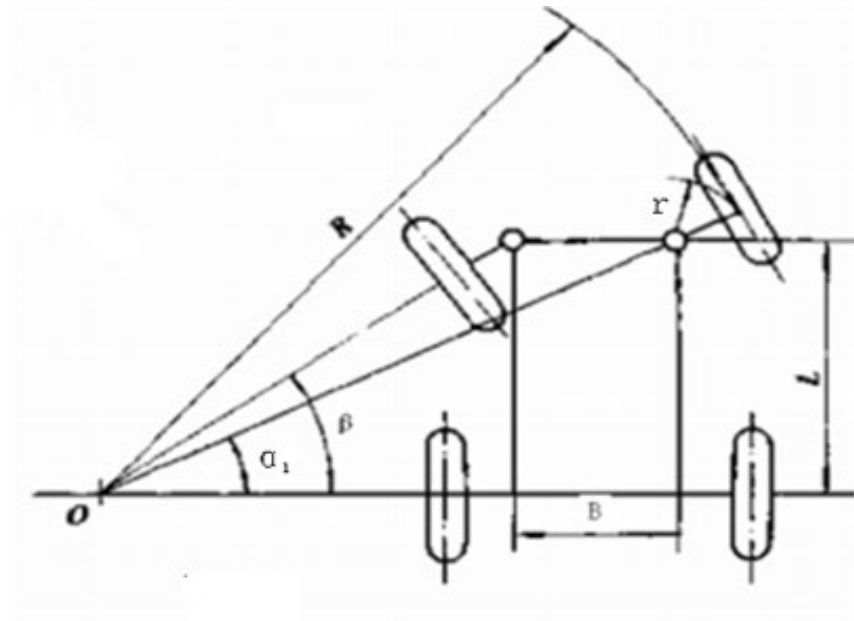


Рисунок 15 – Углы поворота внешнего и внутреннего колеса

«Минимальный радиус поворота, соответствующий максимальному углу поворота внешнего колеса, был рассчитан по формуле (1):

$$D_1 = \frac{L}{\sin \alpha_1} = 2980 \text{ мм} \quad (1)$$

Минимальный радиус поворота, соответствующий максимальному углу поворота внутреннего колеса, был рассчитан по формуле (2):

$$D_2 = \sqrt{\left(\frac{L}{\tan \beta} + B\right)^2 + L^2} = 6160 \text{ мм} \quad (2)$$

где L – колесная база, $L = 1550$ мм;

B – расстояние между осями двух шкворней и пересечением земли, $B = 1088$ мм.

Определение геометрии Аккермана

Чтобы соответствовать геометрии Аккермана, при использовании рулевого управления передними колесами должно выполняться следующее соотношение, рассчитанное по формуле (3):

$$\cot \alpha_1 - \cot \beta = \frac{B}{L} \quad (3)$$

где α_1 – внешний угол рулевого колеса;

β – внутренний угол рулевого колеса;

Коэффициент угла поворота рулевого колеса по Аккерману представляет собой отношение фактической разницы углов поворота рулевого колеса к теоретической разнице углов поворота рулевого колеса» [11] (рисунок 16).

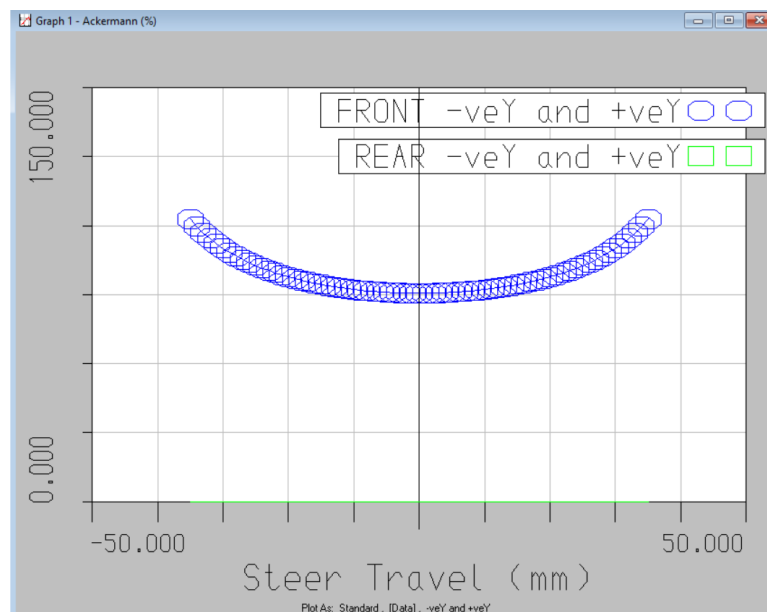


Рисунок 16 – Зависимость угла Аккермана от хода рейки

«Из приведенного выше рисунка можно сделать следующий вывод:

Когда внутренний угол колеса составляет 20° , угловой коэффициент Аккермана = 85%.

Скорость поворота Аккермана при максимальном угле поворота внутреннего колеса = 102%.

Момент сопротивления руля при повороте автомобиля на месте

Сила рук водителя, действующая на рулевое колесо во время рулевого управления, связана с моментом сопротивления рулевому управлению, возникающим при вращении рулевого колеса на земле. Факторы, влияющие на момент сопротивления рулевому управлению, включают нагрузку на управляемую ось, коэффициент трения скольжения между шиной и землей и давление в шине.

Эмпирическая формула (4) рассчитывается следующим образом» [6]:

$$M_r = f \sqrt{\frac{G_1^3}{P}}, \quad (4)$$

где M_r – момент сопротивления рулевого управления на месте на асфальтовом или бетонном покрытии, Н·мм;

f – коэффициент трения скольжения между шиной и землей,
 $f = 2$;

G_1 – нагрузка на управляемую ось (максимально допустимая нагрузка на переднюю ось), 106 кг;

P – давление в шинах, 80 кПа,

$$M = 7716 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

«Максимальное усилие на рейке рулевого механизма

Максимальное усилие рулевой рейки можно рассчитать по максимальному моменту сопротивления рулевого управления на месте, которое должна преодолеть система рулевого управления. Формула расчета (5) может быть получена с учетом включенного угла рулевой тяги:

$$F = 1,8 \times M_r \times \cos \gamma / (L_1 \times \sin \beta_1) \quad (5)$$

где L_1 – длина рулевой трапеции, 63 мм;

γ – угол между рулевой тягой и рейкой 164° ;

β_1 – угол между трапециевидным рычагом и рулевой тягой 113° .

$$F = 194.7 \text{ N}$$

Таким образом, было рассчитано усилие на рулевом колесе автомобиля, необходимое для того, чтобы сдвинуть колеса в поворот.

3.2 Проектирование педального узла

Педальный узел автомобиля является одним из важнейших органов управления. Он представляет особую важность для гоночного автомобиля, в котором требуется, чтобы данный узел был максимально удобен и давал максимальную обратную связь пилоту. Данный элемент автомобиля должен соответствовать эргономическим критериям для обеспечения удобного управления, а также отвечать всем требованиям безопасности соответствующих автомобильных соревнований. Кроме того, для гоночного автомобиля данный узел должен быть максимально облегчен, поскольку для гоночного автомобиля также важно иметь низкую поддрессоренную и неподдрессоренную массу.

На рисунке 17 изображен педальный узел гоночного болида Формула Студент.

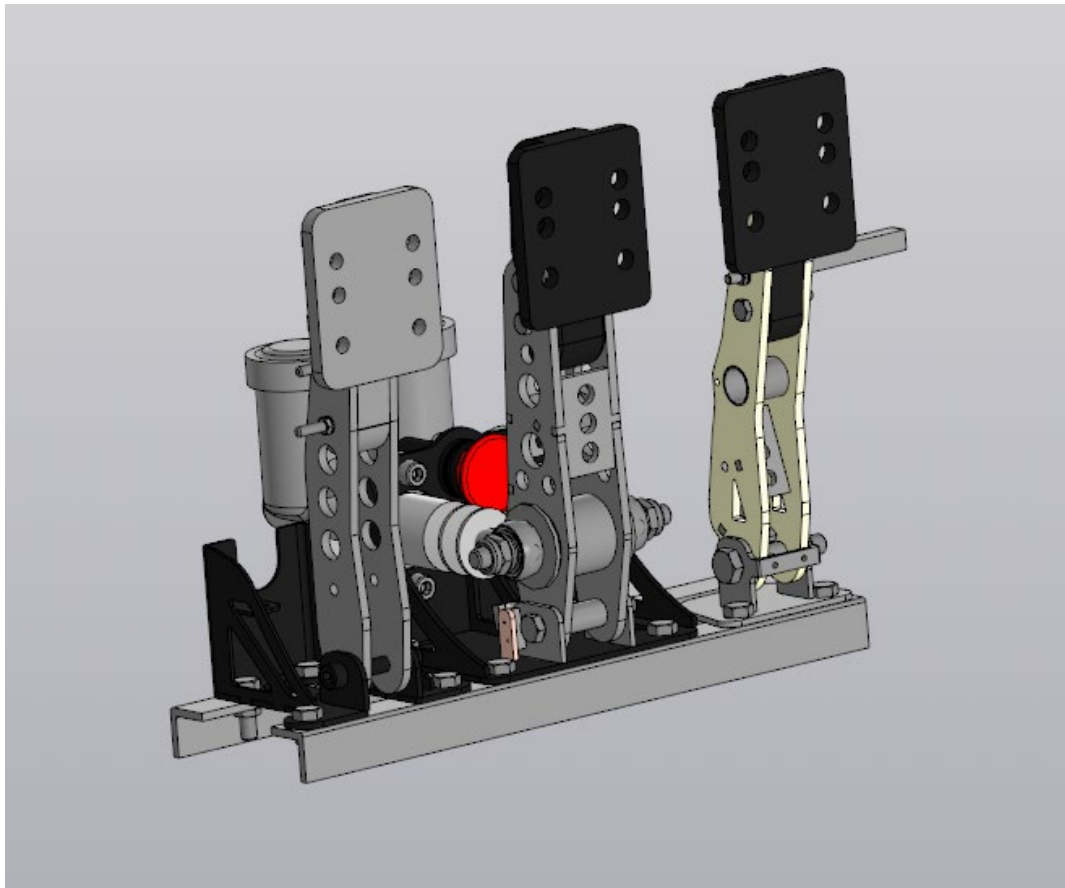


Рисунок 17 – Педальный узел гоночного болида

Перед началом проектирования педального узла необходимо определить основные требования к данной конструкции, которые определяются регламентом соревнований Формула Студент.

На данный момент в регламенте соревнований есть только требования, предъявляемые к тормозной педали, а именно: педаль и ее крепление должны быть рассчитаны на то, чтобы выдерживать усилие, равное в 2 кН, без каких-либо повреждений. Данное требование может быть проверено путем нажатия на педаль с максимальной силой. Тормозная педаль тормоза должна быть изготовлена из стали или алюминия.

После того как требования были выявлены, определяются целевые показатели для проектирования тормозной педали. Для этого проводится анализ недостатков предыдущей конструкции.

Педальные узлы предыдущих болидов, изображенные на рисунке 18, имели ряд недостатков.

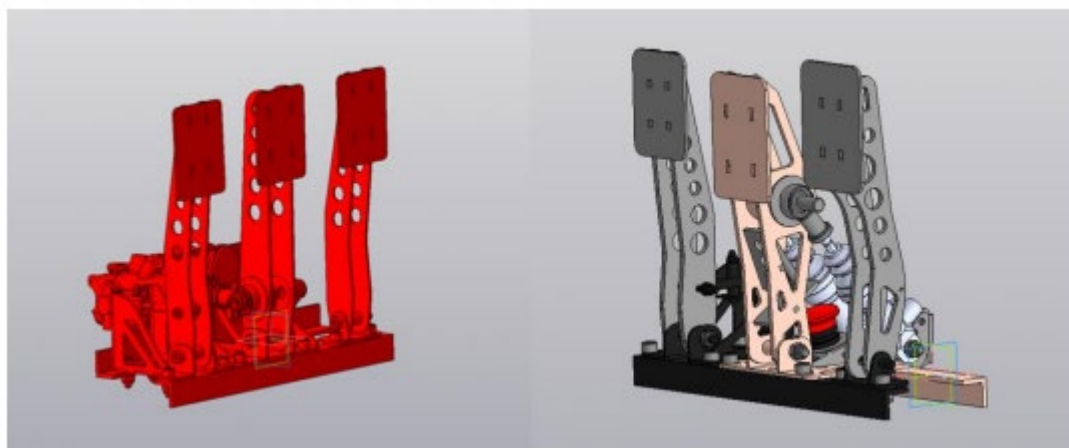


Рисунок 18 – Педальные узлы предыдущих моделей

Во-первых, педальный узел имел большой вес за счет стальной педали тормоза, а также крупногабаритных тормозных цилиндров. Во-вторых, отмечалась малая прочность пластиковых частей педалей, отпечатанных на 3Д-принтере из АБС пластика

Кроме того, были выявлены проблемы с компоновкой тормозной педали из-за большой длины тормозных цилиндров, которые заходили в зону, ограниченную регламентом соревнований.

Из-за компоновочных ограничений педали были расположены слишком близко друг к другу, из-за чего часто пилот мог нажать две педали одновременно.

После выявления недостатков предыдущих конструкций, определяются критерии, по которым будет производиться проектирование педального узла:

- снижение веса педального узла,
- увеличение прочности педального узла для повышения безопасности,
- снижение занимаемого места в кокпите пилота,

– улучшение эргономических показателей.

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

Для выбора материала для нажимной пластиковой клавиши необходимо провести анализ различных пластиковых материалов, так как АБС пластик больше не может быть использован в производстве педалей по причине плохой надежности, примером чему служит сломанная педаль сцепления предыдущего автомобиля на рисунке 19.



Рисунок 19 – Сломанная педаль сцепления из АБС пластика

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

После того, как материалы были определены, необходимо подобрать компоненты и передаточное число тормозной педали. В качестве тормозных цилиндров был выбран наиболее компактный вариант со встроенными тормозными бачками Wilwood Gs Compact (рисунок 20).



Рисунок 20 – Тормозной цилиндр Wilwood Gs Compact

Главным преимуществом данных тормозных цилиндров является их относительно маленькая длина, а также удобство замены тормозной жидкости за счет встроенных бачков. Тормозные цилиндры были выбраны с площадью поперечного сечения цилиндра 0,625 дюйма, что является оптимальным вариантом в соотношении давление тормозной системы – ход штока.

Далее определяется передаточное число тормозной педали для получения необходимого баланса усилия нажатия на педаль – ход педали. Так как слишком большое усилие нажатия на педаль плохо сказывается на торможении, а также слишком длинный или слишком короткий ход тормозной педали плохо сказывается на чувствительности педали тормоза,

был выбран оптимальный баланс передачи усилия с нажимной клавиши педали на главные тормозные цилиндры – 0.8.

Это означает, что при нажатии пилотом на клавишу с усилием в 2000 Н, усилие, создаваемое на штоке цилиндров, будет равняться 8000 Н. Данное передаточное число тормозной педали обеспечивает необходимый ход тормозной педали в 60 мм в верхней точке педали.

На рисунке 21 изображена схема усилий тормозной педали.

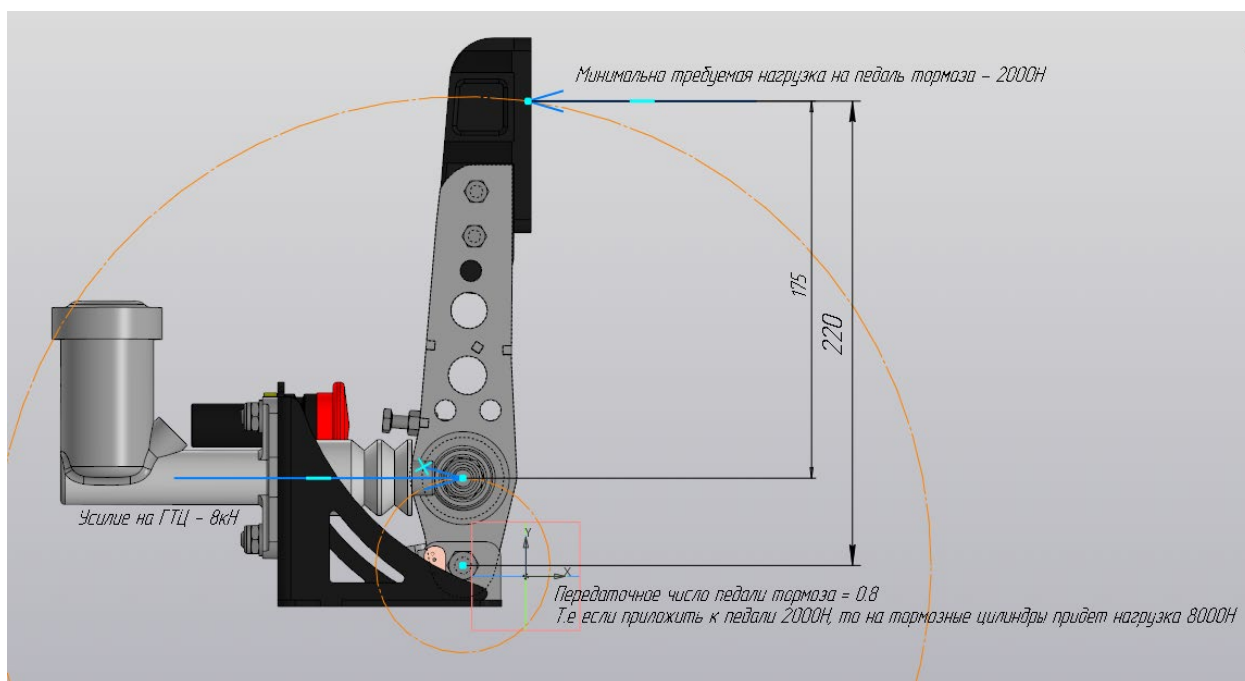


Рисунок 21 – Схема усилий тормозной педали

Далее проводится прочностной анализ спроектированной конструкции по ряду критериев. Так, первым из них выступает максимальное напряжение, которое не должно превышать предел текучести материалов (рисунок 22).

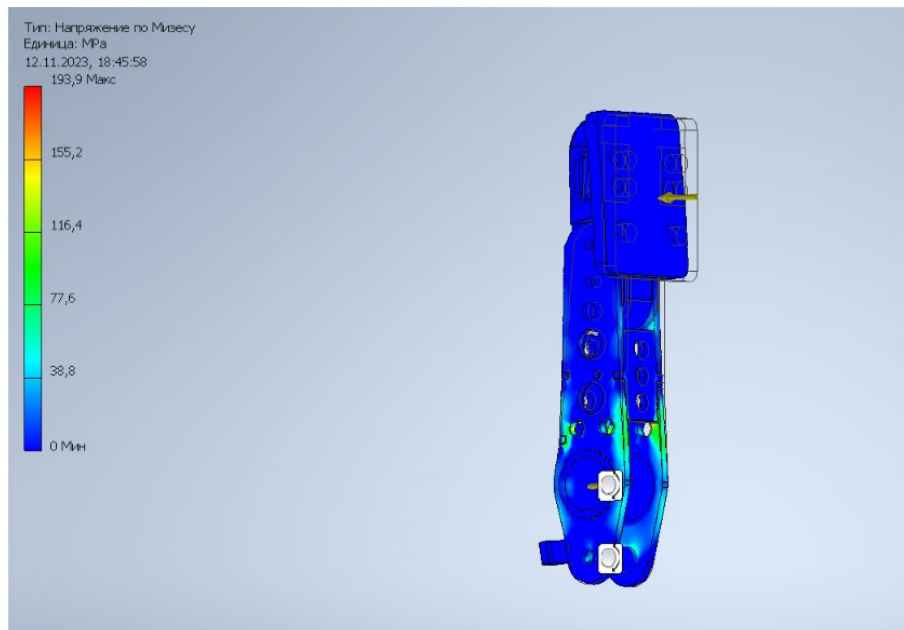


Рисунок 22 – Анализ напряжений тормозной педали. Напряжения не превышают предел текучести материала АМГ6

Другим важным критерием является максимальное смещение. Смещение в пределах 1,5 мм является допустимым (рисунок 23).

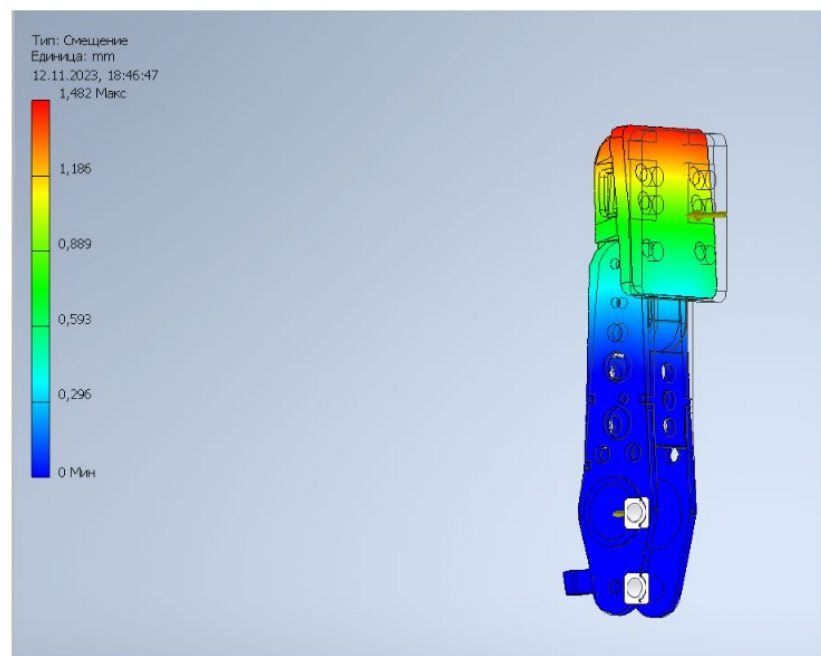


Рисунок 23 – Анализ максимального смещения тормозной педали. Смещение не превышает 1,5 мм

Коэффициент запаса прочности не должен быть ниже 1 (рисунок 24).

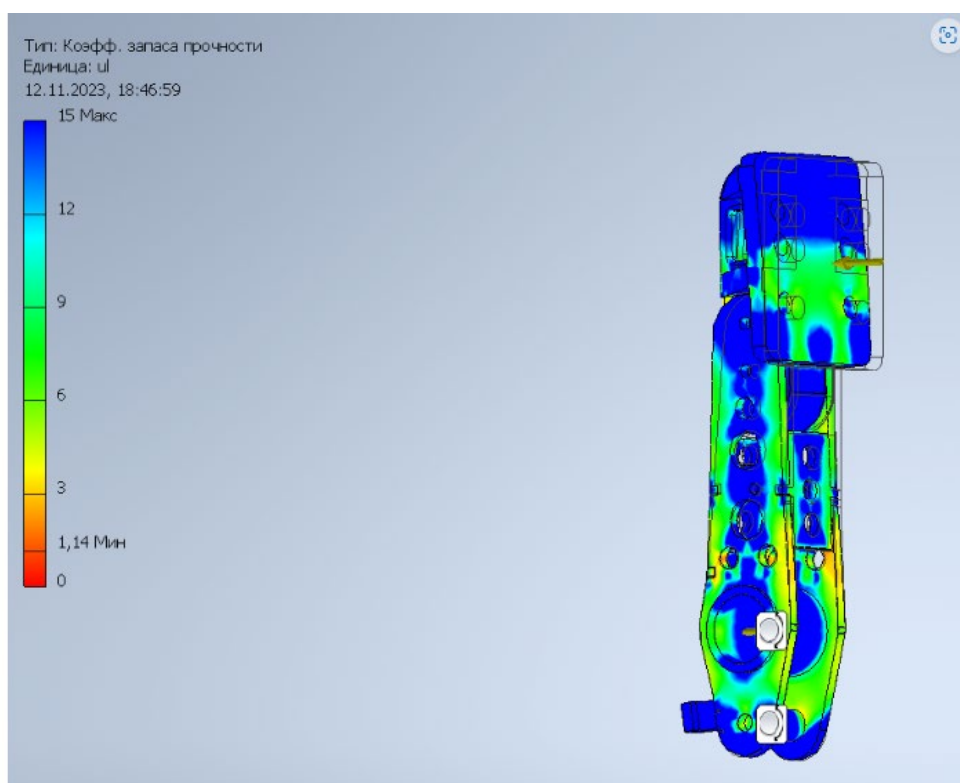


Рисунок 24 – Анализ коэффициента запаса прочности тормозной педали.
Минимальный коэффициент выше 1

Выводы по разделу

Проанализированы исходные данные для проектирования: ограничения, накладываемые техническим регламентом FS-Rules в последней редакции, основные параметры автомобиля. Исходя из имеющихся данных, была рассчитана и описана конструкция рулевого управления и педального узла для гоночного болида G5.

Заключение

Студенческий практикоориентированный проект FS (Formula Student) создавался Обществом автомобильных инженеров SAE как способ обеспечить обучающихся высших учебных заведений возможностью опробовать теоретические знания на практике через конструирование и испытание прототипа гоночного автомобиля.

Ежегодно в проекте принимают участие сотни инженерных студенческих команд из разных стран. В том числе в России проект известен под названием Formula Student Russia. Одноименные соревнования проводятся при поддержке АНО Formula Student Academy.

Целью данной работы выступила разработка рулевой системы и педального узла как основных органов управления болида Formula Student. При выборе целей проектирования были учтены компоновочные решения, принятые при проектировании болида G5, а также требования технического регламента.

В ходе работы была описана специфика FSAE как международного студенческого проекта, выявлены основные понятия, связанные с органами управления автомобилем, проведен анализ конструкторских решений других инженерных команд. На основе проведенного анализа был предложен концепт рулевой системы, а также модель педального узла болида.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Вдовин Д. С., Чичекин И. В., Поздняков Т. Д. Виртуальный стенд для определения нагрузок на рулевое управление автомобиля // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. №8. С. 1–12.
2. Емельянов С. Р. Колебания рулевого управления автомобиля // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2009. №1. С. 24–27.
3. Зарипов Р. Ю., Сембаев Н. С., Машим А. С., Калияшев Б. С., Абильдинов Э. Р. Разработка учебного стенда диагностики рулевого управления и подвески автомобиля // Наука и техника Казахстана. 2022. №1. С. 155–164.
4. Карелина М. Ю., Жигунов И. В. Основные направления оптимизации конструкции механизма рулевого управления автомобиля // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2014. С. 68–73.
5. Кокорев Г. Н., Успенский И. А., Юхин И. А., Афиногенов И. А. Силовые и кинематические зависимости рулевого усилителя // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. №2. С. 297–302.
6. Ладин Р. А., Данилов А. М. Параметры распределения люфта в рулевом управлении автомобиля // Вестник магистратуры. 2013. №12. С. 17–20.
7. Малиновский М. П. Экспериментальное исследование характеристик систем управления транспортных средств: учеб. пособие / М. П. Малиновский; МАДИ. – М., 2011. – 123 с.
8. Мурорг И. А., Терещенко Е. С., Фадеев Д. Ю., Шабалин Д. В. Устранение неисправностей рулевого управления // Транспорт. Транспортные и технологические машины. 2013. №4. С. 25–28.

9. Попов М. Б. Разработка встроенной системы управления цифрового электрогидравлического рулевого привода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. №7. С. 61–68.
10. Свинов В. В. Моделирование динамики рулевого управления // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2008. С. 110–111.
11. Суханов М. Н., Николаев П. П., Газеев Р. А., Резник Е. В., Силкин В. С. Конструктивный анализ усилителей рулевого управления // Научный журнал. 2021. С. 51–52.
12. Терещенко Е. С., Мурорг И. А., Фадеев Д. Ю., Шабалин Д. В. К вопросу о повышении эффективности рулевого управления автомобилей многоцелевого назначения // Омский научный вестник. 2013. №2. С. 120–123.
13. Чебоксаров А. Н. Способ диагностирования рулевого управления автомобилей // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2022. №2. С. 16–22.
14. Чемакина Т. Л., Морева И. Н. Рулевое устройство : учеб. пособие для студентов вузов. Севастополь : СевГУ, 2020. – 51 с.
15. Черненко А. Б., Авсецин А. С., Сысоев М. И., Сысоева М. И. Способы организации рулевого управления транспортно-технологических самоходных машин // Проблемы современной науки и образования. 2019. С. 1–6.
16. Berkowitz J., Dwyer T., McClay J., Reader D., Sims B. Formula SAE Steering System. Final report. 2006. URL: https://bradfordwsims.files.wordpress.com/2011/07/eme-185_fsae-steering-system-final-report.pdf (дата обращения: 17.09.2023).
17. Dinesh B. S., Farug H., Tanmay M. Design & Analysis of Steering System for a Formula Student Car // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2017. pp. 226–235. URL: http://www.ijirset.com/upload/2017/tapsa/29_Auto_11_Changed_.pdf (дата обращения: 23.08.2023).

18. Formula Student Rules 2023. [Электронный ресурс]. URL: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf (дата обращения: 14.10.2023).

19. Majeed M., Wheatley G. Steering system design of the second generation Formula SAE // Mobility & vehicle mechanics. 2020. No. 2. pp. 55-61. URL: https://www.researchgate.net/publication/346119387_STEERING_SYSTEM_DESIGN_OF_THE_SECOND_GENERATION_FORMULA_SAE (дата обращения: 18.11.2023).

20. Naveen J. Design of steering geometry for Formula Student cars // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. pp. 182–192. URL: https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_9_ISSUE_5/IJMET_09_05_022.pdf (дата обращения: 05.09.2023).