

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 рулевой системы прототипа спортивного болида Formula Student

Обучающийся

С.Р. Амосов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.Г. Доронкин

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

Тольятти 2023

## Аннотация

В бакалаврской работе рассмотрены вопросы разработки рулевого управления автомобиля на примере рулевого узла 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 рулевой системы болида G5, а именно: облегчение рулевого управления, уменьшение радиуса поворота.

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

В заключительном разделе работы произведен подбор оборудования, представлен расчет себестоимости компонентов разработанной рулевой системы.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки в размере 46 страниц, содержащей 3 таблицы, 27 рисунков и графической части, содержащей 6 листов.

## Содержание

Введение .....	4
1 Состояние вопроса .....	5
1.1 Описание международного проекта FSAE .....	5
1.2 Рулевая система автомобиля .....	8
2 Анализ конструкторских решений, применяемых при разработке рулевой системы командами FSAE .....	11
2.1 Анализ решений зарубежных команд .....	11
2.2 Анализ конструкций, разработанных в рамках проекта «Формула Студент ТГУ» .....	21
3 Проектирование рулевой системы болида G5 .....	26
3.1 Анализ исходных данных .....	26
3.2 Проектирование рулевой системы .....	32
4 Калькуляция себестоимости изготовления узла .....	40
Заключение .....	43
Список используемой литературы и используемых источников .....	44

## Введение

В рамках проекта Formula Student, который реализуется в ТГУ с 2007 года, студенческой команде необходимо спроектировать и изготовить гоночный автомобиль для участия в спортивных заездах на соревнованиях.

Целью данной работы является разработка системы рулевого управления болида класса Formula Student, соответствующей регламенту соревнований FS-Rules и отвечающую выбранному концепту нового автомобиля студенческой инженерной команды Тольяттинского государственного университета.

В связи с этим был определен ряд задач:

- описать специфику международного проекта FSAE,
- охарактеризовать базовые понятия, связанные с рулевой системой автомобиля,
- провести анализ систем рулевого управления зарубежных команд, являющихся участниками проекта Formula Student,
- провести анализ систем рулевого управления, которые были разработаны для предыдущих моделей болидов в рамках проекта «Формула Студент ТГУ»,
- проанализировать исходные данные,
- провести расчеты и спроектировать рулевую систему для гоночного болида класса Formula Student 2023 года.

В рамках данной выпускной квалификационной работы был проанализирован ряд существующих конструкций рулевых систем, описаны основные методы проектирования данного узла с учетом поставленных задач по улучшению управляемости в ходе соревнований.

Результатом работы является разработанная рулевая система, концепт которой может быть реализован на гоночном болиде класса FS.

## **1 Состояние вопроса**

### **1.1 Описание международного проекта FSAE**

Проект Formula SAE (сокр. FSAE) представляет собой международный студенческий проект, направленный на разработку прототипа гоночного автомобиля класса Formula Student. Работа в проекте построена таким образом, что в течение года группой студентов университета производится проектирование, сборка и испытания болида, которые заканчиваются участием в инженерно-гоночных соревнованиях Formula Student [7].

Данный проект берет свое начало в 1978 году, когда Обществом автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers, SAE) были организованы и проведены первые соревнования, которые носили на тот момент название «SAE Mini Indy» и проводились на базе Хьюстонского университета. С развитием проекта к нему начали примыкать другие образовательные учреждения, также был значительно дополнен регламент и расширена география проведения соревнований. На данный момент инженерно-спортивное мероприятие Formula Student (FS) ежегодно проводится в таких странах, как Германия, Австрия, Венгрия, Италия, Россия и т.д. Особой популярностью проект пользуется среди университетов технической и инженерной направленности [6].

В России также представлен ряд команд, принимающих участие в Formula Student на постоянной основе. К ним относятся студенческие коллективы из Москвы (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Санкт-Петербурга (Санкт-Петербургский Политех), Белгорода (БГТУ им. В. Г. Шухова), Екатеринбурга (УрГУПС), Череповца (ЧГУ), Уфы (УГАТУ). В городе Тольятти на базе Тольяттинского государственного университета представлена команда Togliatti Racing Team, которая была основана в ВУЗе в 2008 году и до сих пор продолжает свою деятельность.

К участию в Formula SAE допускаются студенты бакалавриата различных направлений подготовки, что связано с тем, что в рамках проекта перед участниками стоит задача не только создать прототип гоночного болида, но и самостоятельно найти подходящие источники финансирования, рассчитать себестоимость изготовления автомобиля, грамотно представить проект потенциальным инвесторам и т.п. Именно поэтому в инженерные команды традиционно входят обучающиеся таких образовательных программ, как машиностроение, электроэнергетика и электротехника, экономика, менеджмент.

Проект направлен на выработку как профессиональных компетенций будущих инженеров, так и универсальных компетенций, таких как умение работать в команде, способность управлять проектом на разных этапах его развития, находить решения с помощью критического анализа и системного подхода. Поскольку правилами запрещается непосредственное участие преподавательского состава, то проектирование и сборка болида, а также организация команды во многом ложатся именно на студентов.

Согласно правилам участия в соревнованиях, разработка автомобиля должна производиться в полном соответствии с техническим регламентом FSAE Rules [18], опубликованном на официальном сайте немецких организаторов. Регламент охватывает ряд административных вопросов (связанных, например, с подачей документов и дедлайнами), а также устанавливает ограничения и предписания, которым необходимо следовать при создании гоночного прототипа.

В зависимости от класса автомобиля к его конструкции могут предъявляться разные требования. В Formula Student выделяют следующие три класса: CV (Combustion Vehicle – болид с двигателем внутреннего сгорания), EV (Electric Vehicle – болид с электрической силовой установкой), DV (Driverless Vehicle – болид-беспилотник). В связи со всемирным трендом декарбонизации и электрификации транспорта в последнее время

организаторами соревнований во многих странах все чаще отдается предпочтение классу электроболидов.

Соревнования FS принято делить на три основных этапа: техническая инспекция, гоночные заезды и статические испытания. Техническая инспекция является подготовительным этапом, в ходе которого проверяется соответствие узлов и деталей представленного на соревнованиях автомобиля требованиям регламента. Строгое соблюдение мер предосторожности связано со спецификой участников мероприятия Formula Student, то есть студентов, которые не являются профессиональными пилотами гоночной техники или профессиональными инженерами.

В случае если болид успешно прошел инспекцию, включающую механическую инспекцию, тесты на шум и торможение, опрокидывание и взвешивание, он может быть допущен до участия в гонках. Во время соревнований предусмотрено проведение ряда динамических дисциплин, каждая из которых направлена на проверку различных характеристик машины: скорости, управляемости, маневренности [15].

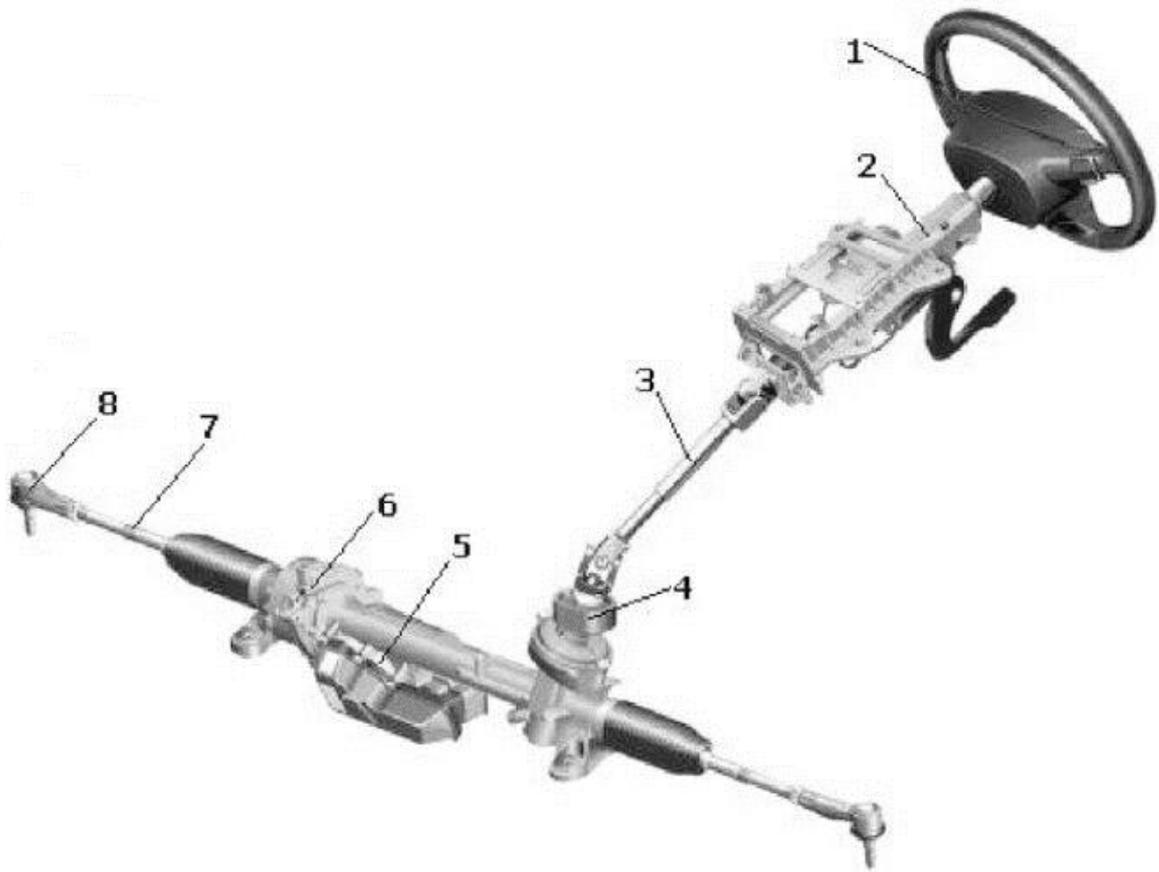
Наконец, в ходе статических дисциплин студенческая команда защищает свои конструкторские решения перед судьями, которыми выступают ведущие специалисты крупных автопромышленных компаний. Кроме того, студенты обязаны предоставить бизнес-план по сбыту созданного прототипа на рынке, а также защитить отчет с технико-экономическим обоснованием проекта в рамках дисциплин «Презентация бизнес-плана» и «Отчет о стоимости производства» соответственно.

В зависимости от количества набранных очков студенческий инженерный коллектив может попасть в международный рейтинг команд [18].

Таким образом, проект Formula SAE направлен на всестороннюю выработку компетенций у обучающихся высших учебных заведений с целью обеспечить автопромышленное производство региона квалифицированными кадрами уже на выходе из университета.

## 1.2 Рулевая система автомобиля

Рулевая система автомобиля представляет собой совокупность механизмов, обеспечивающих движение по заданной водителем траектории. Рулевое управление включает рулевое колесо, рулевой механизм и рулевой привод. Устройство системы показано на рисунке 1.



1 – рулевое колесо; 2 – рулевая колонка; 3 – карданный вал; 4 – датчик крутящего момента; 5 – усилитель; 6 – рулевой механизм; 7 – рулевые тяги; 8 – шаровые наконечники.

Рисунок 1 – Устройство рулевой системы

В гоночном автомобиле рулевая система должна выполнять те же функции, что и в гражданском автомобиле, с разницей только в нагрузках. Во

время движения гоночный автомобиль достигает больших скоростей, из-за чего нагрузки на узлы автомобиля являются повышенными. Таким образом, рулевая система в гоночном автомобиле должна быть рассчитана правильно и должна соответствовать всем нагрузкам. Кроме того, необходимо правильно рассчитать геометрию рулевой системы, а также усилие на рулевом колесе. Под геометрией понимается трапеция рулевого управления, а также угол Аккермана. Правильно настроенная геометрия подвески позволяет обеспечить:

- движение автомобиля в повороте без проскальзывания передней оси;
- движение автомобиля по правильно заданной траектории;
- достигать заложенного в конструкцию минимального радиуса разворота;
- предотвращать чрезмерную или недостаточную поворачиваемость;
- предотвращать критический угол между тягой и опорным элементом.

Кроме того, работа пилота во время гонки должна быть минимальной. Если пилот начинает уставать, его эффективность теряется, соответственно, автомобиль в связке с пилотом показывает не лучшие результаты. Поэтому важно учитывать все факторы проектирования рулевой системы.

Основной принцип работы рулевой системы заключается в том, что крутящий момент с рулевого колеса передается на карданный вал (промежуточный вал), далее момент передается на входной вал рулевого механизма, после чего приводится в движение рейка, которая, в свою очередь, толкает или тянет рулевые тяги. Не редко рулевые системы оснащаются усилителем рулевого управления, однако, регламент соревнований «Формула Студент» запрещает использование усилителей рулевого управления в любом виде.

Таким образом, рулевая система в гоночном автомобиле является одной из ключевых систем, которая влияет на эффективность гоночного автомобиля в целом. Правильно спроектированная и настроенная рулевая система может в несколько раз улучшить показатели на гоночном треке.

Выводы по разделу

Описана специфика международного проекта «Формула Студент», в котором принимают участие студенты инженерных и других направлений подготовки в ряде крупных технических университетов по всему миру. Приведено описание рулевой системы автомобиля, в том числе описание рулевого узла гоночного автомобиля, показано их сходство и различие. Дана характеристика правильно настроенной геометрии подвески как одного из ключевых факторов, которые имеют влияние на общую управляемость автомобиля и конструкцию рулевого узла.

## **2 Анализ конструкторских решений, применяемых при разработке рулевой системы командами FSAE**

### **2.1 Анализ решений зарубежных команд**

Для того чтобы обеспечить выбор оптимальной конструкции рулевого управления для гоночного болида Scorpion G4, был рассмотрен ряд решений зарубежных инженерных команд, которые также принимают участие в проекте Formula Student в своих университетах.

В 2006 году команда UCD FSAE Калифорнийского университета в Дейвисе представила следующий концепт рулевой системы (рисунок 2):



Рисунок 2 – 3д-модель рулевой системы UCD FSAE

Система рулевого управления, разработанная командой для нового автомобиля, представляет собой реечную конструкцию. В инженерном отчете команды отмечается, что такая система является «более дорогой и

сложной в изготовлении по сравнению с некоторыми другими конструкциями, однако она обеспечивает наибольшую точность управления и компактность» [16].

Кроме того, при создании автомобиля ставилась цель обеспечить быстрое ускорение и хорошую реакцию болида во время захода на поворот. Согласно отчету, определяющими факторами при проектировании системы рулевого управления стали небольшой вес и правильная геометрия подвески, а также рамки предоставленного команде бюджета. Второстепенными факторами инженеры команды называют технологичность, эргономику, низкий люфт и ограничения, накладываемые геометрией шасси [16].

Система рулевого управления гоночного болида UCD FSAE включает три основные подсистемы: рулевой вал, рулевую рейку и рулевые тяги. Рулевой вал соединяет рулевое колесо с входным валом рулевой рейки и изготовлен из стальной трубы 4130. Ключевое кольцо keyed collar с установочными винтами надежно соединяет два компонента, позволяя при этом снимать их при необходимости обслуживания.

На рисунке 3 ниже показана конструкция рулевой рейки. Разборный корпус содержит зубчатые рейки и шестерни [8], которые размещаются относительно друг друга с помощью ряда роликовых шарикоподшипников и бронзовых втулок. Рейка крепится к шасси автомобиля с помощью двух алюминиевых опор, расположенных на концах корпуса рейки.

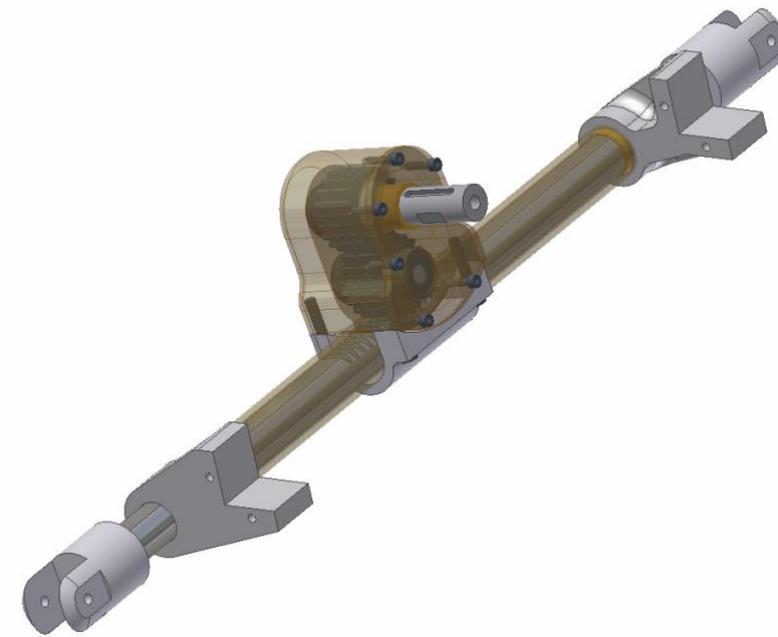


Рисунок 3 – Рулевая рейка болида UCD FSAE

Рулевые тяги отвечают за соединение рулевой рейки с передними стойками. Это соединение передает входные усилия от рулевой рейки к рулевым рычагам и вызывает вращение колес вокруг своей оси поворота. Рулевые тяги изготовлены из стальных труб 4130 и имеют резьбовые заглушки, приваренные к концам для сферических концов тяг, в которые ввинчивается резьба. Концы тяг закреплены контргайками, чтобы предотвратить нежелательную регулировку длины, которая может привести к неправильному выравниванию колес.

Несмотря на то, что данная система рулевого управления представляется довольно стандартной, можно отметить несколько особенностей. Конструкция с двумя шестернями позволяет размещать корпус шестерни (рисунок 4) над центральной линией рейки. Дополнительный зазор для ног пилота, вызванный перемещением корпуса над стойкой обеспечивает лучшую эргономичность и позволяет легче сесть в автомобиль или покинуть его.

Кроме того, расположение конструкции с двумя шестернями позволяет установить прямой рулевой вал без использования гибких шарниров. Как отмечает команда, «в предыдущих автомобилях гибкие шарниры рулевого вала всегда были источником люфта в системе рулевого управления» [16]. Благодаря отказу от этих шарниров была достигнута большая точность рулевой системы.

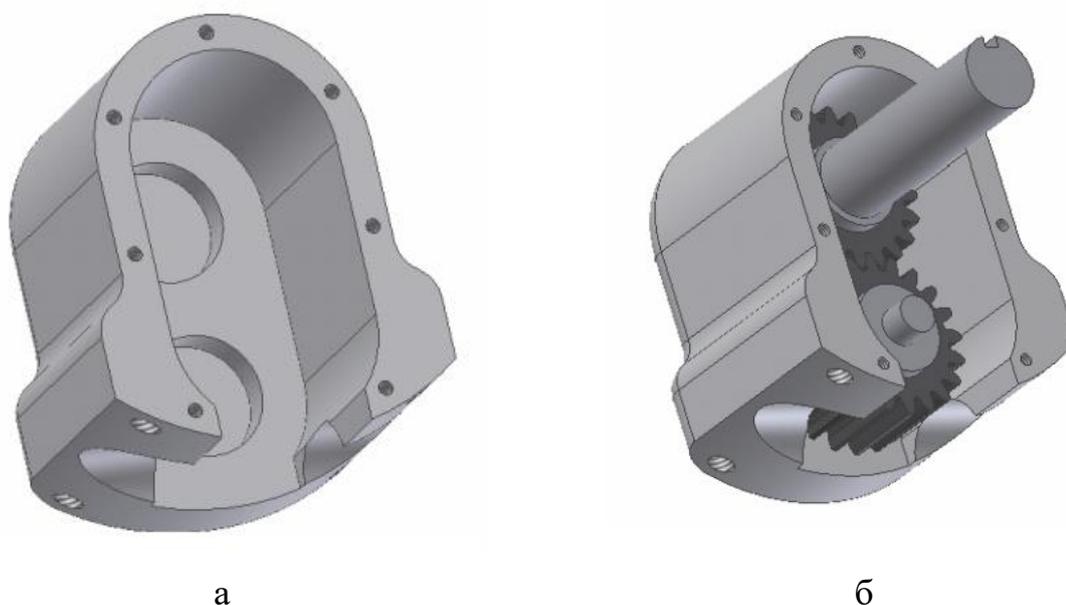


Рисунок 4 – Корпус зубчатой передачи: а – модель корпуса, б – корпус с шестернями

Одним из важных элементов данной конструкции можно назвать цельную зубчатую рейку, соединяющую вместе две рулевые тяги. Вместо квадратных реечных шестерен было решено использовать круглую шестерню с зубьями только в средней части. Две бронзовые втулки надежно фиксируют шестерню и воспринимают неосевые нагрузки, передаваемые на нее [2].

Из-за отсутствия на рынке подходящих аналогов зубчатая рейка была изготовлена на заказ с использованием процесса электроэрозионной обработки с ЧПУ. Преимуществом в данном случае является то, что качество обработки поверхности в процессе электроэрозионной обработки

превосходит процесс изготовления зубчатых колес в производственных масштабах.

Еще одной особенностью выбранной рулевой системы является способ соединения корпуса стойки с шасси. Вместо конструкции с одним креплением в центре корпуса стойки используются два внешних крепления, расположенных на концах корпуса стойки. В таком случае отклонение из-за нагрузок на рулевое управление практически исключается, что снижает податливость рулевого управления и повышает управляемость автомобиля.

Недостатком конструкции, однако, является соединение между корпусом шестерни и его крышкой, которая крепится с помощью только монтажных болтов. Это приводит к тому, что нагрузки воспринимаются исключительно болтами, а не материалом корпуса.

Командой Team Vegadooth Racing из Технологического университета KLE была разработана следующая модель рулевого управления (рисунок 5):



Рисунок 5 – 3д-модель рулевой системы в сборе

В автомобиле KLE Tech представлена кастомизированная конструкция поворотного кулака с рулевой рейкой и корпусом зубчатой передачи. Колесо направляется при сборке рулевой рейки и кулака, который команда условно делит «на четыре квадранта» [20]. В итоговой конструкции гоночного болида

класса Formula Student центр тяжести будет расположен низко, что является важным фактором, который следует соблюдать при проектировании гоночного автотранспорта [20]. Верхние квадранты кулаков не были взяты в расчет, поскольку рычаги, соединения тяг и рулевая рейка должны были быть расположены выше, что поднимало центр тяжести.

В случае использования переднего нижнего квадранта это изменило бы геометрию на систему Anti-Ackermann, что привело бы к удлинению рулевого вала и, как следствие, к увеличению общего веса всей системы. В своем инженерном отчете студенческая команда приходит к выводу, что «использование заднего нижнего квадранта, напротив, позволило бы сделать сборку более компактной и легкой» [20].

При проектировании рулевого управления учитывались следующие данные, показанные на рисунке 6:

FRONT SUSPENSION - STEERING TRAVEL						
TYPE 15 Double Wishbone, Rocker arm 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)
-50.00	35.53	-28.63	-0.57	-1.02	-47.53	2489.05
-45.00	30.77	-25.73	-0.97	-1.23	-44.72	2891.06
-40.00	26.53	-22.86	-1.26	-1.41	-42.66	3368.81
-35.00	22.65	-20.00	-1.47	-1.56	-41.10	3960.69
-30.00	19.01	-17.17	-1.63	-1.68	-39.92	4727.79
-25.00	15.56	-14.33	-1.76	-1.78	-39.02	5778.34
-20.00	12.26	-11.50	-1.85	-1.86	-38.35	7327.57
-15.00	9.08	-8.66	-1.92	-1.92	-37.87	9876.51
-10.00	5.98	-5.80	-1.96	-1.97	-37.55	14927.20
-5.00	2.96	-2.92	-1.99	-1.99	-37.37	29988.13
0.00	0.00	0.00	-2.00	-2.00	-37.31	0.00
5.00	-2.92	2.96	-1.99	-1.99	-37.37	29988.13
10.00	-5.80	5.98	-1.97	-1.96	-37.55	14927.20
15.00	-8.66	9.08	-1.92	-1.92	-37.87	9876.51
20.00	-11.50	12.26	-1.86	-1.85	-38.35	7327.57
25.00	-14.33	15.56	-1.78	-1.76	-39.02	5778.34
30.00	-17.17	19.01	-1.68	-1.63	-39.92	4727.79
35.00	-20.00	22.65	-1.56	-1.47	-41.10	3960.69
40.00	-22.86	26.53	-1.41	-1.26	-42.66	3368.81
45.00	-25.73	30.77	-1.23	-0.97	-44.72	2891.06
50.00	-28.63	35.53	-1.02	-0.57	-47.53	2489.05

Рисунок 6 – Данные геометрии подвески

Интересна выбранная командой форма руля, которая наглядно показана на рисунке 7 в ходе проведения анализа рулевого колеса на деформацию:

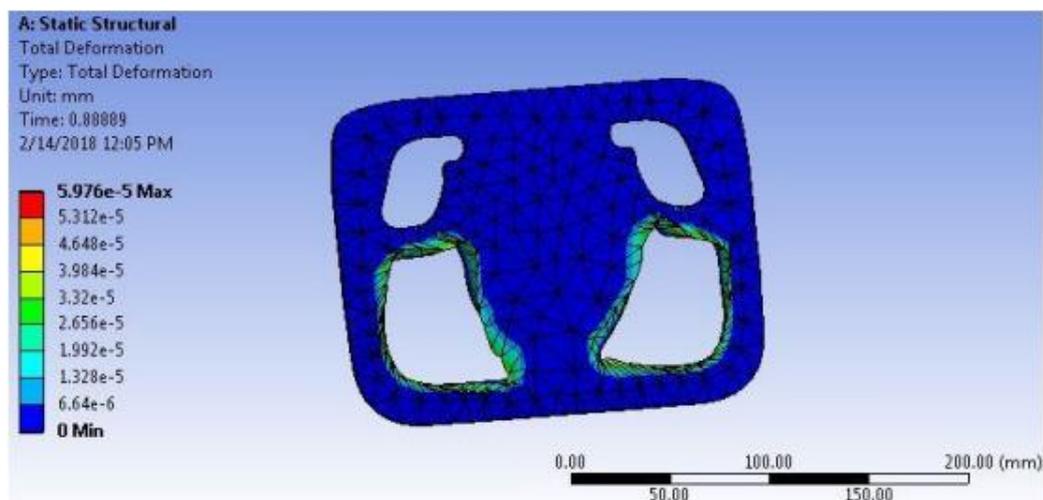


Рисунок 7 – Анализ деформации рулевого колеса

Размер рулевого колеса – 215 мм х 165 мм, материал – алюминиевый сплав.

Командой JCU Motorsports предложена конструкция рулевой системы, как показано на рисунке 8:



Рисунок 8 – 3д-модель системы рулевого управления JCU Motorsports

Для команды «тенденции при проектировании рулевых систем под соревнования Formula Student долгое время остаются неизменными» [19]. Все конструкции имеют реечный механизм со сложной компоновкой из-за его высокой точности. У большинства из перечисленных конструкций тяга расположена на одной линии с зубчатой рейкой.

В новом автомобиле 2020 года были устранены проблемы с рулевым управлением, которые были выявлены на предыдущем прототипе. При разработке инженеры руководствовались такими принципами как:

- сведение к минимуму общего усилия на рулевом колесе;
- пространство для водителя и система рулевого управления должны быть эргономичными – обеспечение удобства пилота болида;
- уменьшение нагрузки на опоры и втулки;
- улучшенный Аккерман;
- плавность хода и маневренность.

Были предложены три варианта конструкции рулевого колеса с реечным соединением. В первом случае (рисунок 9) в системе полностью отсутствует карданный шарнир с целью прямой передачи энергии. Однако рулевая система с большим углом наклона будет невыгодна в плане эргономики, а также будет причиной неудобства при вождении.

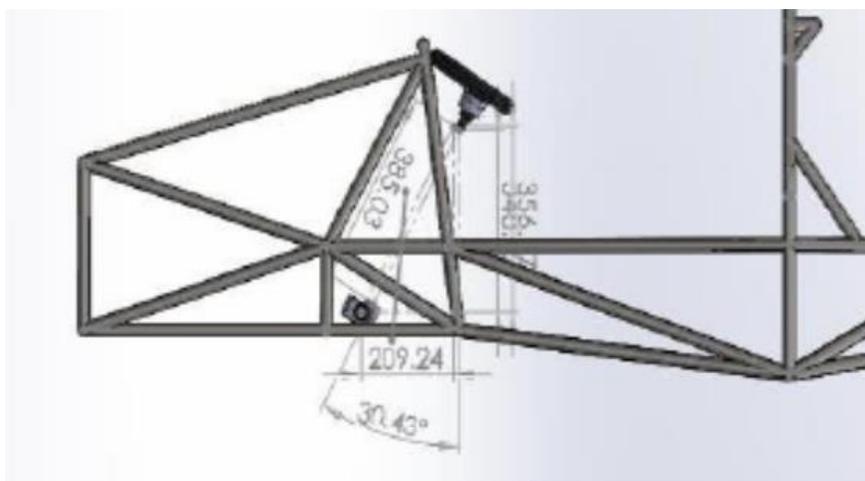


Рисунок 9 – Вариант рулевой системы без карданного шарнира

Второй вариант конструкции, представленный на рисунке 10, включает один карданный шарнир, что сделано для улучшения управления под большим углом [1]. Узел расположен таким образом, чтобы длина двух валов была почти одинаковой для лучшего распределения сил.



Рисунок 10 – Вариант рулевой системы с карданным шарниром

Наконец, третья конструкция, предложенная командой JCU Motorsports, предполагает наличие двух карданных шарниров в системе рулевого управления (рисунок 11).

Кроме того, изначально предполагалось расположение рулевой рейки таким образом, чтобы рулевые тяги проходили на одной линии с реечной передачей рулевой рейки к стойкам. Однако, поскольку рычаги болида также крепятся к стойке, это может привести к столкновению, особенно на неровной местности. Таким образом, рулевая рейка была вынесена дальше вперед вдоль нижней части рамы автомобиля.

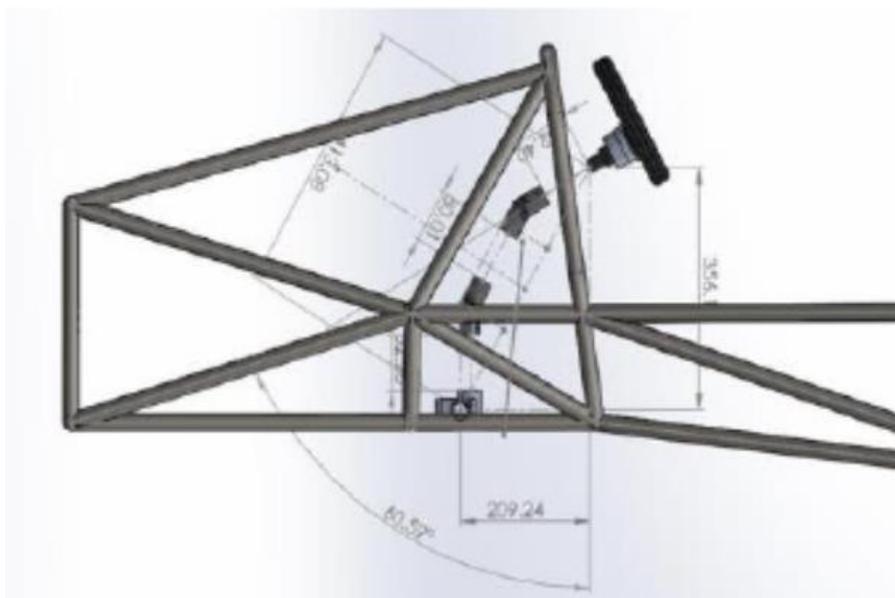


Рисунок 11 – Вариант рулевой системы с двумя карданными шарнирами

Окончательный вариант концепта рулевого управления можно разделить на три части, что типично для большинства транспортных средств картингового вида:

- рулевая колонка в сборе;
- рулевая рейка в сборе;
- рулевые тяги.

Вместе эти узлы образуют общую систему рулевого управления гоночного болида.

Конструкция включает в себя стандартный универсальный шарнир, реечную и штифтовую систему рулевого управления, в которой вращательные силы превращаются в прямолинейное движение от шестерни и рейки. Затем эти усилия передаются от рулевых тяг к стойкам колес, где начинается поворот. Рулевая колонка шлицевым соединением крепится к стойке, которая находится под углом  $21,6^\circ$ . Вилка на обоих концах соединяет рулевые тяги через 10-миллиметровые концы стержней.

К факторам, влияющим на эргономику, можно отнести:

- расстояние между ногами пилота и основанием рамы = 54,710 мм;

- угол поворота рулевого колеса =  $16^\circ$ ;
- зазор карданного шарнира = 335,8 мм;
- зазор опоры стойки = 368,7 мм.

Также одной из задач при проектировании была задача оставить угол карданного шарнира равным  $34,5^\circ$ , так как дальнейшее ограничение угла потребовало бы смещения рейки дальше вперед в раме. Это уменьшило бы пространство, отведенное для педального узла автомобиля [9].

Как видно из проведенного анализа, ключевыми факторами при разработке рулевых систем у зарубежных команд являются эргономичность [10], уменьшение усилия на руле, обеспечение плавности поворотов. Также во всех случаях учитывалась итоговая себестоимость узла.

## **2.2 Анализ конструкций, разработанных в рамках проекта «Формула Студент ТГУ»**

В проекте могут разрабатываться гоночные автомобили как с двигателем внутреннего сгорания (класс CV), так и с электрической силовой установкой (класс EV). Основные положения технического регламента, которые относятся к процессу разработки системы рулевого управления, являются одинаковыми для обоих классов.

В качестве примера будут рассмотрены два автомобиля, созданные на базе Тольяттинского государственного университета в 2018 и 2021 годах, один из которых относится к классу бензиновых болидов, второй – к классу электрических.

После проведенного анализа «недостатков и характеристик работы рулевого узла 2017 года командой было принято решение разработать новую рулевую систему с проработанной системой регулирования поворотных тяг, а также устойчивой, компактной и более легкой конструкцией крепления.

Старая рулевая система была выполнена с самостоятельно изготовленным редуктором. Поворачивать руль было намного тяжелее из-за

неправильного подбора передаточного числа в редукторе. Плюсом использования такой компоновки, однако, являлось то, что руль находился под углом 90 градусов, то есть не выходил за пределы передней дуги автомобиля и не находился дальше нее более чем на 250 мм.

Новая рулевая система была выполнена из трех отдельных элементов без рулевого редуктора. В связи с отсутствием в конструкции редуктора вес узла был снижен на 1 кг, наклон рейки в 80 градусов позволил уменьшить наклон карданных соединений» [10].

Сборка элементов рулевого узла выполнялась согласно компоновке, представленной на рисунке 12.

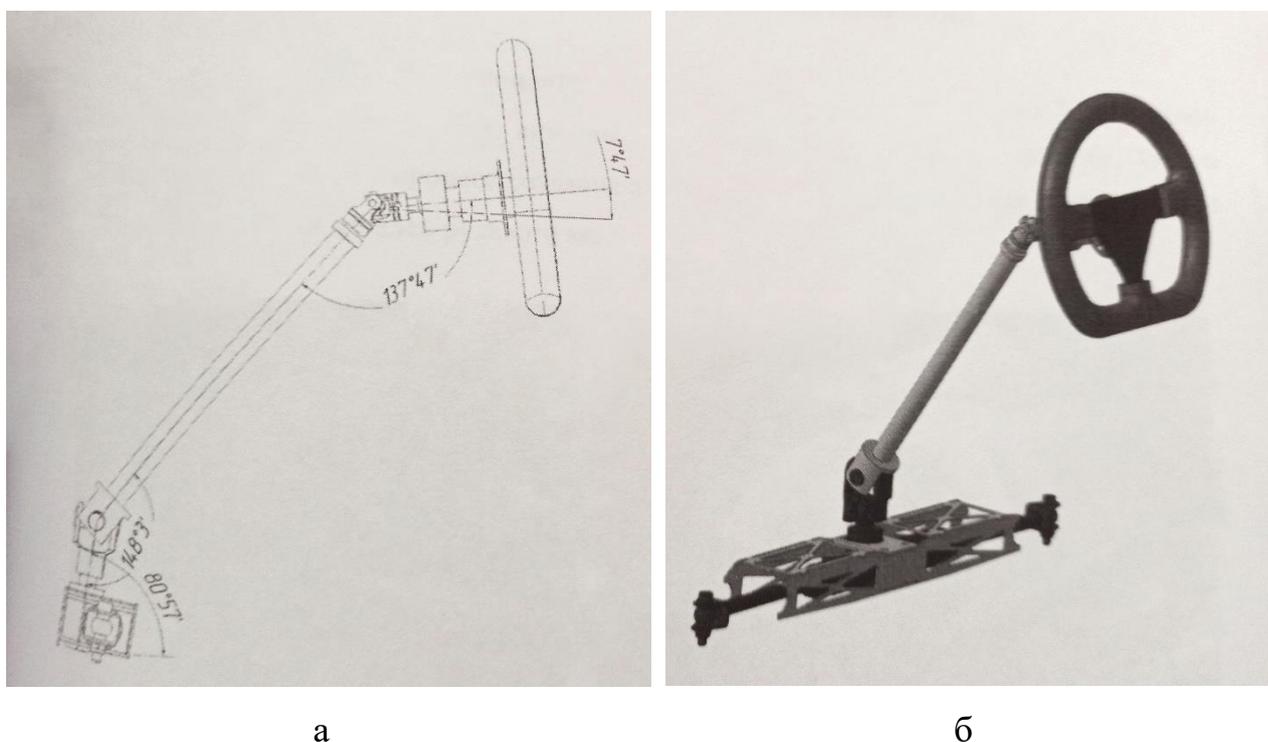


Рисунок 12 – Рулевой узел в сборе: а – схема компоновки, б – 3д-модель рулевого узла

Для защиты рулевой рейки была создана ферма, изготовленная с помощью технологии лазерной резки. Также при изготовлении элементов руля была использована 3д-печать [11].

В 2021 году в рамках проекта «Формула Студент ТГУ» был разработан первый для тольяттинской команды гоночный болид с электрической силовой установкой, показанный на рисунке 13.

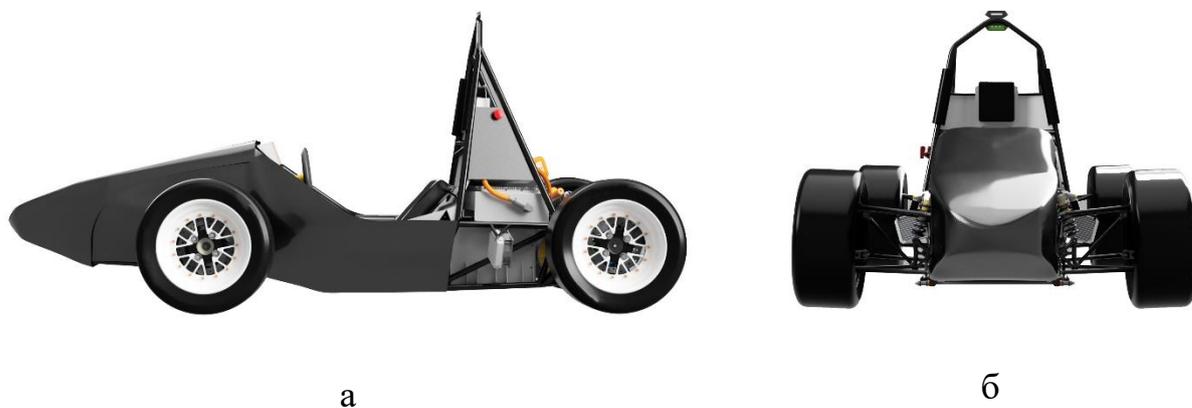


Рисунок 13 – Концепт гоночного электроболида 2021 года: а – вид сбоку; б – вид спереди

Было спроектировано и изготовлено рулевое колесо, близкое по форме к округлому (рисунок 14). Основная часть руля была изготовлена из карбоновых материалов с накладками по периметру рулевого колеса, отпечатанными на 3д-принтере.



Рисунок 14 – Рулевое колесо с клавишей

Ввиду специфики конструкции электроболида было принято решение дополнительно разработать клавишу для обеспечения торможения автомобиля. Клавиша изготовлена с применением аддитивных технологий из пластика для 3д-печати и крепится непосредственно к рулевому колесу.

Для того чтобы система рулевого управления соответствовала пункту регламента проекта Formula Student, касающемуся возможности пилота быстро покинуть автомобиль, к основе руля с задней стороны крепится быстросъемная муфта. В данном случае была выбрана быстросъемная муфта компании Spragco, командой самостоятельно изготовлена втулка из стального прутка 25 мм для крепления муфты.

Внешний вид рулевого колеса, установленного на болид, продемонстрирован на рисунке 15 ниже.



Рисунок 15 – Рулевое колесо, установленное на автомобиль

Выбранный вариант расположения руля обеспечивает достаточную эргономичность конструкции и позволяет сидящему в кабине автомобиля пилоту видеть дисплей, беспрепятственно нажимать на кнопки, расположенные на приборной панели. При посадке пилота и его

взаимодействии с рулевой системой обеспечивается обзорный угол в 94 градуса, что видно из рисунка 16.



Рисунок 16 – Посадка пилота при взаимодействии с рулевой системой

Помимо этого, рулевое колесо расположено таким образом, что при использовании клавиши торможения пилот не задевает рукой карбоновую приборную панель.

#### Выводы по разделу

Были проанализированы три варианта конструкций рулевого управления, предложенных в разные года зарубежными командами, принимающими участие в проекте Formula SAE. Подробно рассмотрены рулевые узлы, которые ранее проектировались командой Togliatti Racing Team, в том числе проанализирована конструкция рулевого колеса с клавишей для болида с электрической силовой установкой.

## **3 Проектирование рулевой системы болида G5**

### **3.1 Анализ исходных данных**

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

- определение концепта автомобиля и его основных технических параметров,
- настройка геометрии,
- валидация геометрии,
- проектирование рулевой 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. Так, среди прочих в регламенте представлен подраздел T 2.7 Steering, в котором указаны требования, предъявляемые к рулевой системе болида:

T 2.7.1 Запрещены системы рулевого управления, для приведения в действие которых используются тросы или ремни. Данное правило не распространяется на автономный привод рулевого управления.

T 2.7.2 «Рулевое колесо должно непосредственно механически приводить в действие передние колеса.

T 2.7.3 Система рулевого управления должна иметь ограничители поворота, которые предотвращают блокировку рулевых тяг. Стопоры должны быть размещены на стойке и должны препятствовать контакту шин и дисков с другими деталями [3]. Приведение в действие рулевого управления должно быть возможно во время того, как автомобиль не движется.

Т 2.7.4 Допустимый свободный ход системы рулевого управления ограничивается в общей сложности  $7^\circ$ , измеренными на рулевом колесе.

Т 2.7.5 Рулевое колесо должно крепиться к рулевой колонке быстроразъемным соединением. У водителя должна быть возможность снять быстроразъемное соединение, находясь в обычном положении при вождении и в перчатках.

Т 2.7.6 Рулевое колесо должно быть расположено не более чем на 250 мм от передней дуги. Это расстояние измеряется по горизонтали по осевой линии автомобиля от задней поверхности передней дуги до самой передней поверхности рулевого колеса [12] при любом положении рулевого управления.

Т 2.7.7 Рулевое колесо должно иметь непрерывный периметр, близкий по форме к круглому или почти овальному. Профиль внешнего периметра может иметь несколько прямых участков, но не должен иметь вогнутых участков» [17].

Т 2.7.8 В любом угловом положении верхняя часть рулевого колеса не должна быть выше самой верхней поверхности передней дуги (рисунок 17).

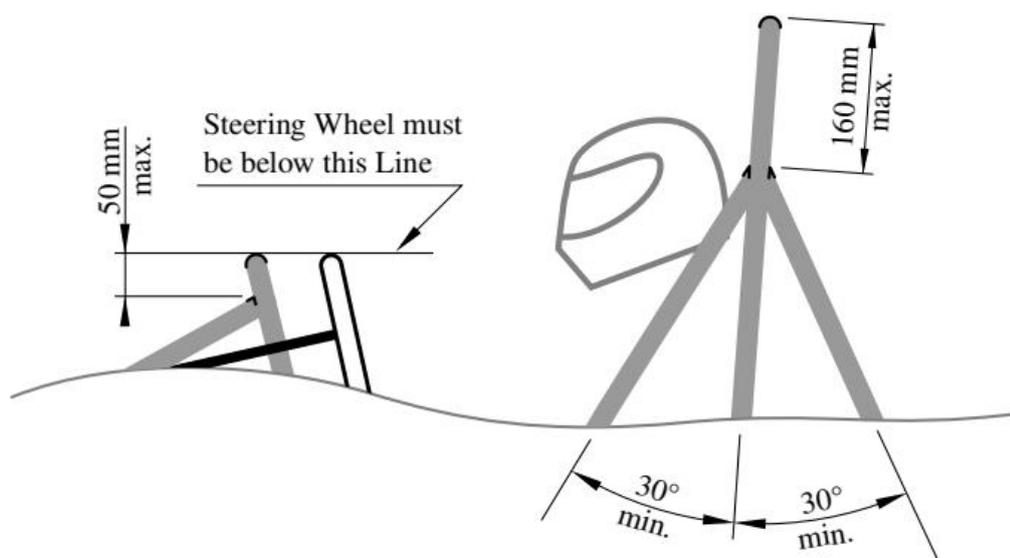


Рисунок 17 – Положение рулевого колеса в соответствии с регламентом

Т 2.7.9 Рулевая рейка должна быть механически прикреплена к основной конструкции (шасси).

Т 2.7.10 Соединения между всеми элементами крепления рулевого колеса к рулевой рейке должны быть механическими и видимыми при техническом осмотре. Клеевые соединения допускаются в соответствии с пунктом правил Т 3.2.8.

Т 2.7.11 «Допускается рулевое управление задними колесами с электрическим приводом, если механические упоры ограничивают диапазон углового перемещения задних колес максимум до  $6^\circ$ . Это должно быть продемонстрировано водителем в транспортном средстве, и команда должна предоставить оборудование для проверки диапазона угла поворота рулевого колеса при техническом осмотре.

Кроме того, согласно пункту Т 4.2.2, «рулевое колесо и любые накладки, которые можно снять без использования инструментов, когда водитель находится в кокпите, должны быть съемными» [17].

Рулевая колонка должна проходить через обозначенную область на шаблоне во время проверки кокпита на вместимость и соответствие регламенту (рисунок 18).

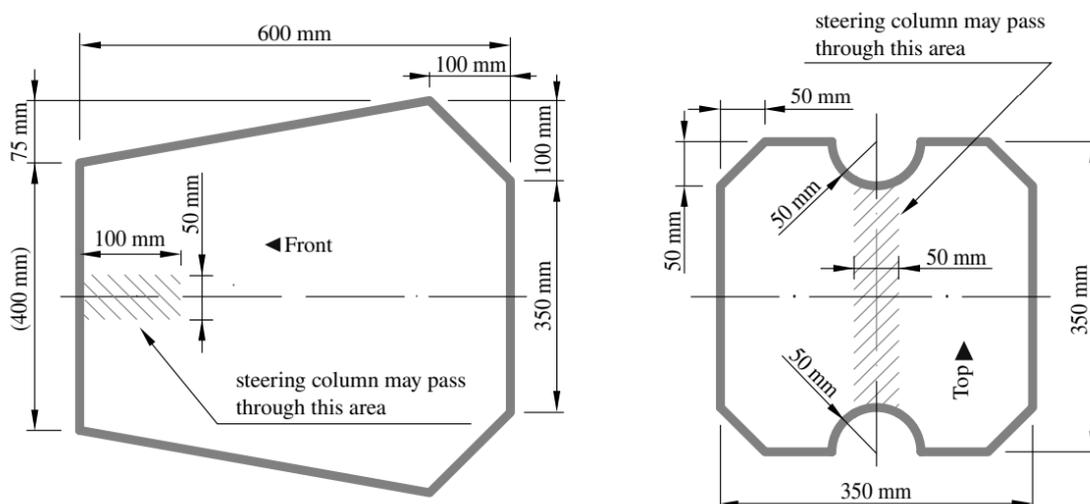


Рисунок 18 – Шаблон с указанием места расположения рулевой колонки

Представленные выше пункты регламента обязательно к соблюдению при проектировании болида класса FS. Остальные параметры могут задаваться студенческим инженерным коллективом по своему усмотрению, в зависимости от тех задач или проблем, которые они хотят решить при разработке автомобиля. К наиболее часто встречающимся задачам при проектировании рулевой системы для гоночных болидов можно отнести следующее [19]:

- сведение к минимуму общего усилия, прилагаемого пилотом на рулевом колесе,
- улучшение эргономики кокпита и рулевого управления,
- уменьшение нагрузки на крепления и связанные с ними втулки,
- достижение лучшей управляемости с помощью настройки угла Аккермана,
- обеспечение хорошей маневренности.

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.

Другим важным аспектом при разработке гоночного автомобиля в целом и его рулевой системы в частности является специфика тех заездов и трасс, которые будет проходить болид во время динамических испытаний. Необходимо понимать, что ключевой целью во время эксплуатации автомобиля будет являться не комфорт водителя или плавность поворотов, а прохождение конкретного отрезка трассы за наименьшее время. Это во многом отличает подход к проектированию рулевого узла в рамках данной работы от разработки рулевого управления для гражданских автомобилей.

Итак, в ходе соревнований Formula Student представленные транспортные средства проходят испытания в ходе следующих динамических дисциплин:

«Восьмерка». Трек для прохождения данной дисциплины состоит из двух кругов, образующих цифру «восемь» (рисунок 19). Пилоту необходимо

последовательно обогнуть каждый круг по два раза, при этом судьями учитывается время второго прохождения круга. В данной дисциплине оценивается способность автомобиля проходить поворот на высокой скорости.

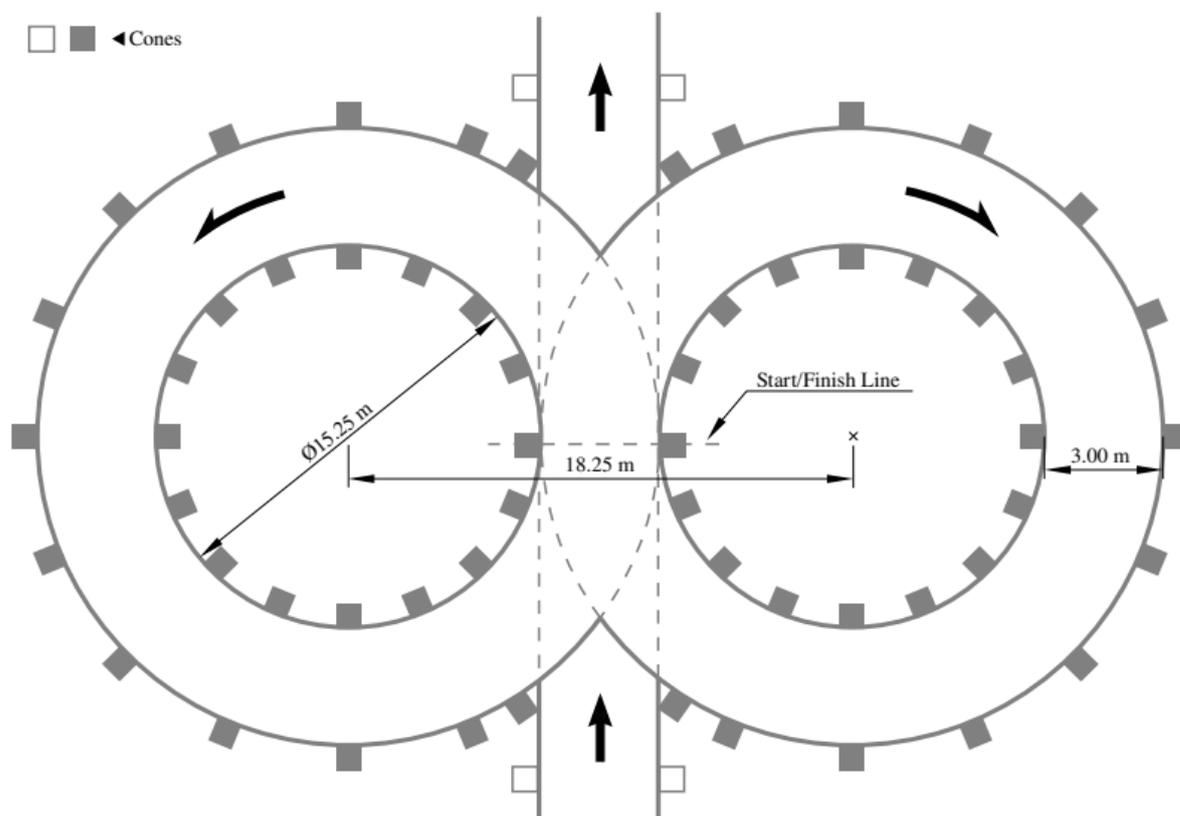


Рисунок 19 – Трасса для прохождения дисциплины «Восьмерка»

Ускорение. «Задачей пилота является как можно быстрее пройти расстояние длиной 75 метров по прямой. При прохождении дисциплины оцениваются скоростные характеристики болида и умение пилота поймать нужный момент сцепления колес с дорогой.

Автокросс. Трек для автокросса включает как прямые участки, так и различные повороты, «шпильки». В ходе дисциплины проверяется маневренность и скорость машины.

Гонка на выносливость. Данная дисциплина является одной из самых значимых на соревнованиях Formula Student, поскольку направлена на проверку такого важного показателя как надежность конструкции построенного командой болида. Общая длительность гонки составляет 22 км, при этом каждый круг приблизительно равен 1 км. В отличие от остальных динамических дисциплин, на прохождение гонки на выносливость дается только одна попытка, на середине гонки пилоты меняются» [13].

Трасса для динамических испытаний автомобиля показана на рисунке 20 ниже.

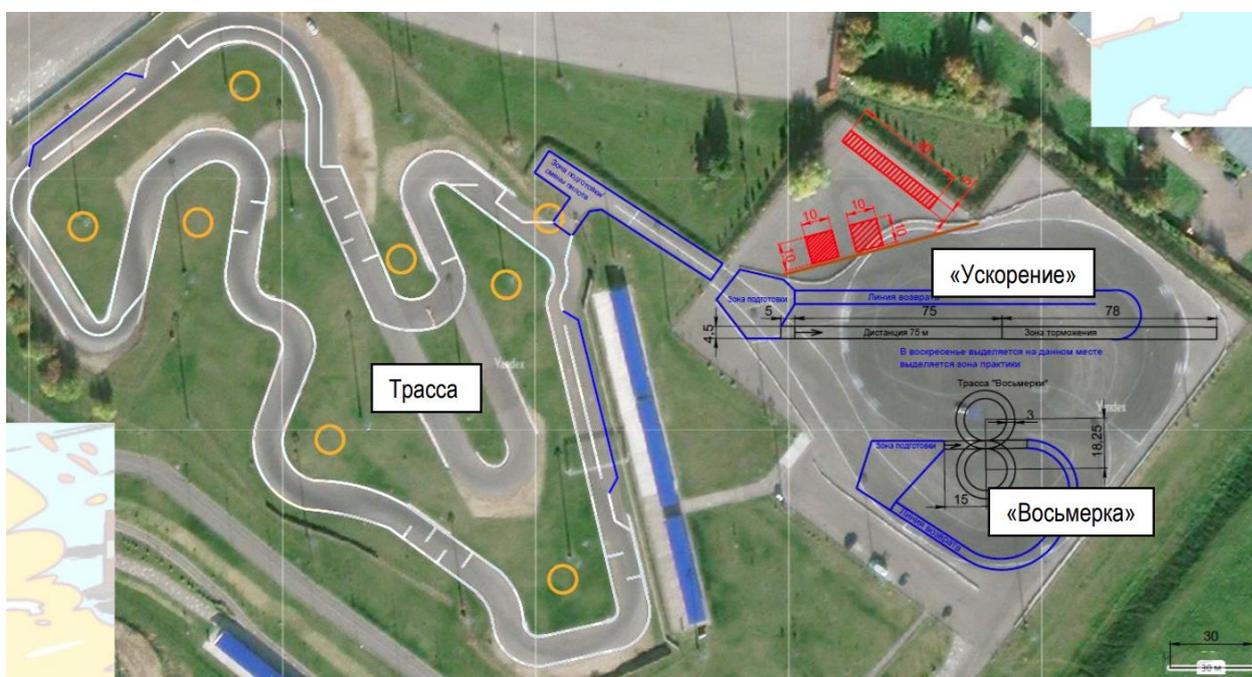


Рисунок 20 – Расположение трассы для динамических испытаний

Таким образом, при проектировании системы рулевого управления стоит учитывать пункты регламента, которые накладывают ограничения на данную систему, а также ставить цели исходя из типа трасс, которые автомобиль будет проходить во время соревнований. Как видно из приведенных примеров, гоночные трассы на студенческих соревнованиях Formula Student включают достаточно большое количество поворотов без

длинных прямых участков. Это обеспечивает лучшую безопасность участников заездов за счет того, что у них нет возможности взять большой разгон. Кроме того, такие трассы предполагают, что быстрота их прохождения будет напрямую зависеть от маневренности и управляемости гоночного автомобиля, то есть от того, насколько грамотно спроектирована система рулевого управления.

### 3.2 Проектирование рулевой системы

Базовая конфигурация всей системы рулевого управления основана на геометрических расчетах угла Аккермана. Геометрия Аккермана представляет собой графическое представление системы рулевого управления (рисунок 21).

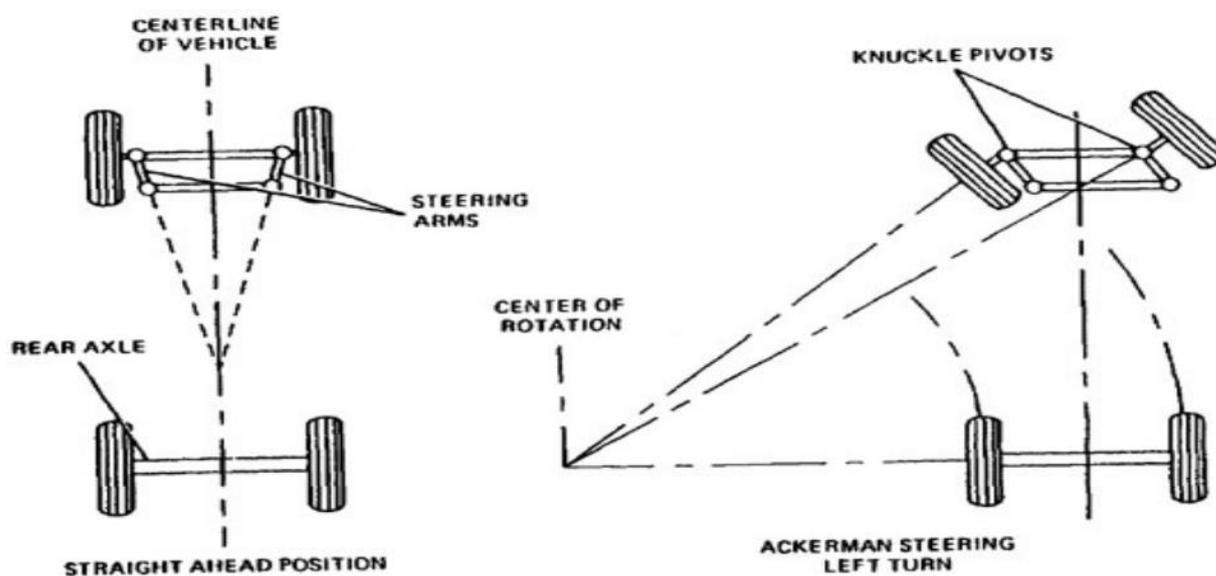


Рисунок 21 – Рулевое управление

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 [4]. 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, как показано на рисунке 22:

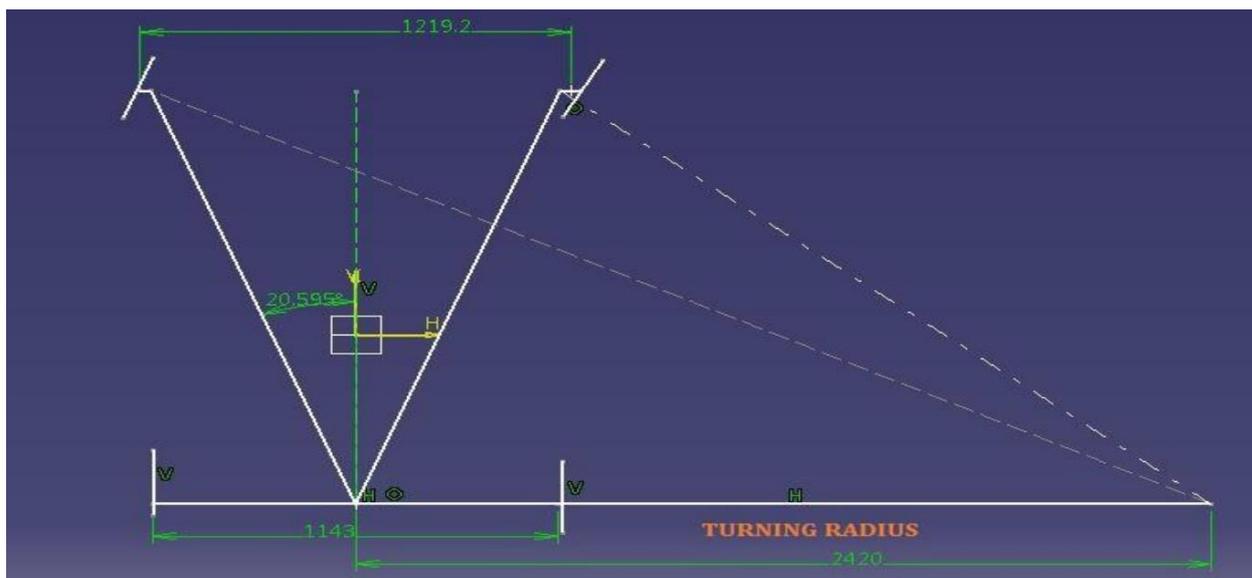


Рисунок 22 – Определение угла Аккермана при повороте

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 23).

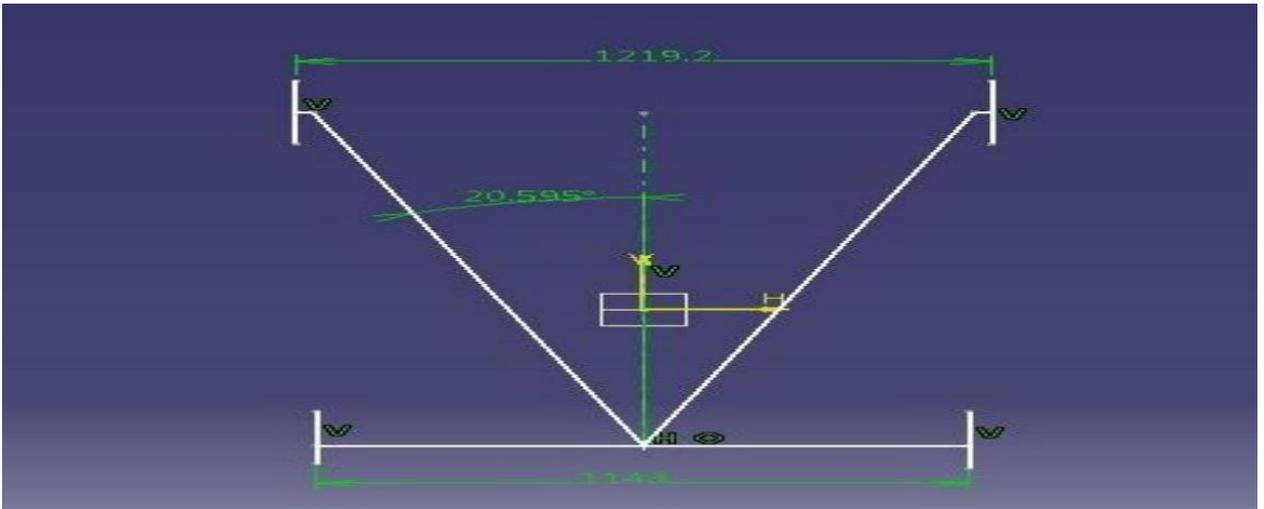


Рисунок 23 – Определение угла Аккермана в статичном положении

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.

В таблице 1 обозначены все входные параметры:

Таблица 1 – Основные параметры автомобиля

Наименование		Значение
Колесная база	мм	1550
Ширина	мм	1200/1150
Тип шин	–	18x6.5 R13, 18x6.5 R13
Давление в шинах	кПа	80
Максимальная нагрузка на переднюю ось	кг	106

Далее в таблице 2 представлены ключевые параметры, которые необходимо знать для проектирования системы рулевого управления.

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 24.

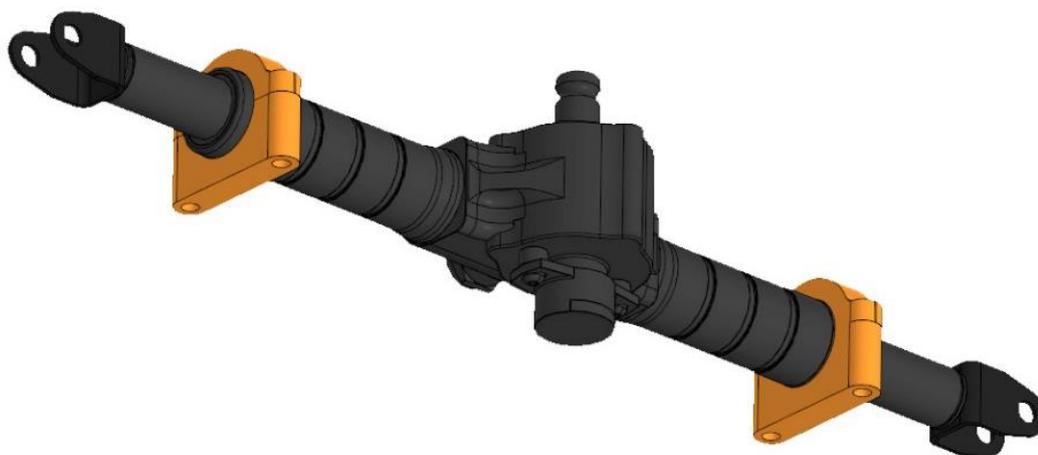


Рисунок 24 – Рулевая рейка

Теоретический расчет диаметра поворота

Максимальный угол поворота внешнего колеса  $\alpha_1 = 24^\circ$ ; максимальный угол внутреннего колеса  $\beta = 32,5^\circ$ . Углы  $\alpha_1$  и  $\beta$  показаны на рисунке 25.

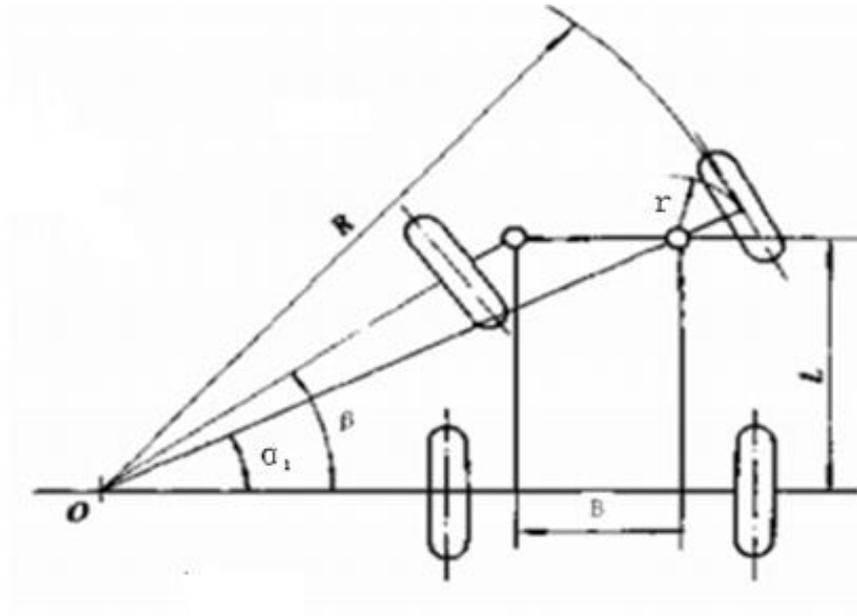


Рисунок 25 – Углы поворота внешнего и внутреннего колеса

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  $\alpha_1$  – внешний угол рулевого колеса;

$\beta$  – 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 (рисунок 26).

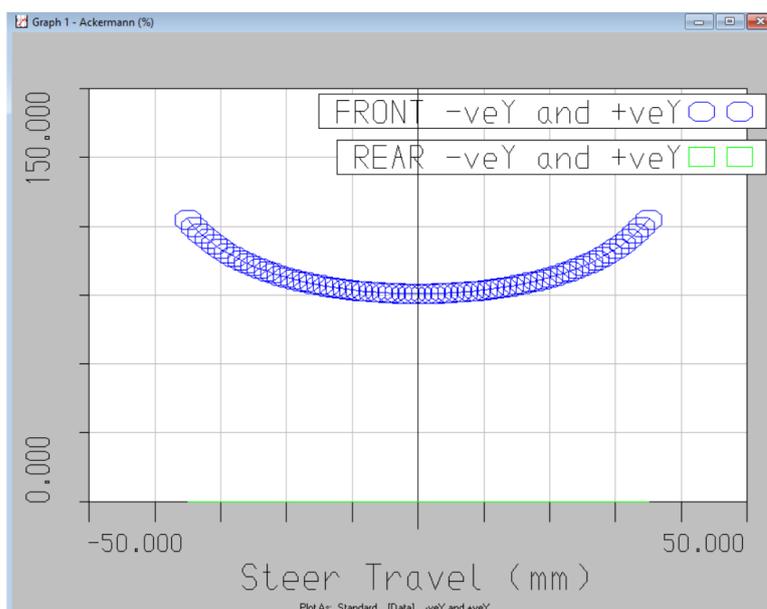


Рисунок 26 – Зависимость угла Аккермана от хода рейки

Из приведенного выше рисунка можно сделать следующий вывод:

Когда внутренний угол колеса составляет  $20^\circ$ , 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:

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

$$M_r = \frac{f \sqrt{\frac{G_1^3}{P}}}{0,5}.$$

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,  $P = 15\,433$  Н·мм.

$$M = 15\,433 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

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:

$$F = 1,8 \times M_r \times \cos \gamma / (L_1 \times \sin \beta_1) = 194,7 \text{ Н} \quad (5)$$

где  $L_1$  – длина рулевой трапеции, 63 мм;

$\gamma$  – угол между рулевой тягой и рейкой  $164^\circ$ ;

$\beta_1$  – угол между трапециевидным рычагом и рулевой тягой  $113^\circ$ .

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

Выводы по разделу

Проанализированы исходные данные для проектирования: ограничения, накладываемые техническим регламентом FS-Rules в последней редакции, конфигурации гоночных треков, на которых автомобиль будет проходить дистанции на время, а также основные параметры автомобиля. Исходя из имеющихся данных, была рассчитана и описана конструкция рулевого управления для гоночного болида G5.

#### 4 Калькуляция себестоимости изготовления узла

Рассчитанная величина затрат изготовления рулевого узла гоночного болида является основой для формирования бюджета затрат проекта. Определение бюджета затрат на изготовление каждой сборки приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Затраты на изготовление рулевого узла

Наименование статьи расходов	Сумма, руб.	%
Рулевая рейка	49042	58,82
Кардан рулевой рейки	618	0,74
Кронштейн рулевой рейки	70	0,08
Рулевой вал	1062	1,27
Переходная втулка рулевого вала	35	0,04
Рулевое колесо	12170	14,60
Обойма подшипников рулевой системы	887	1,06
Переходная втулка рулевого колеса	48	0,06
Кардан	535	0,64
Быстросъемная муфта	17360	20,82
Рулевые тяги	1516	1,82
Кронштейны рулевых тяг	33	0,04
Итого:	83376	100

При расчете себестоимости учитывались расходные материалы, стоимость покупных компонентов, а также затраты на проведение работ исходя из рассчитанного времени на проведение каждой операции.

Таким образом, себестоимость изготовления рулевого узла для автомобильного прототипа составляет 83376 рублей.

Наглядное распределение расходов представлено на рисунке 27 ниже.

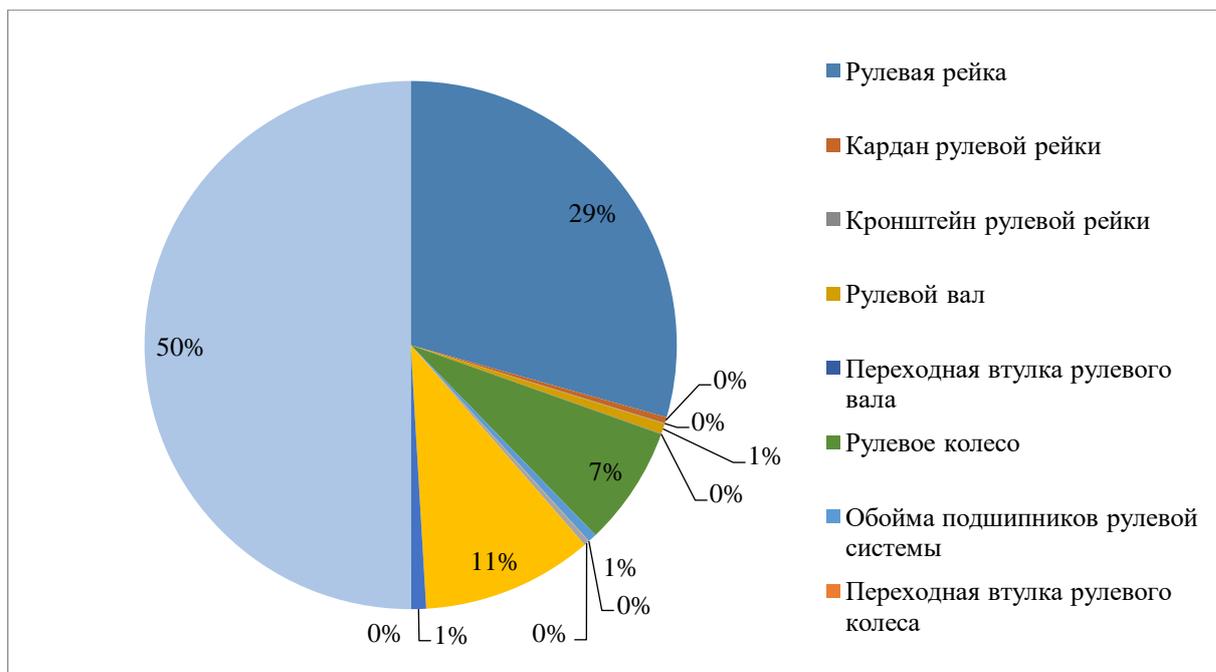


Рисунок 27 – Распределение себестоимости по сборкам

«Расчет амортизационных отчислений для полного восстановления основных фондов производится по нормам амортизации, утвержденным в порядке, установленном действующим законодательством, и определяется в зависимости от стоимости оборудования» [7]. Для проектирования требуется следующее оборудование: компьютер общей стоимостью 60700 рублей. Расчет был выполнен по формуле (6):

$$I_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{ис}}}{T_{\text{г}}} \times \frac{1}{T_{\text{сл}}} \times C_{\text{обор}} \quad (6)$$

где  $T_{\text{ис}}$  – время использования оборудования, дней;

$T_{\text{г}}$  – количество использования в год, дней;

$T_{\text{сл}}$  – срок службы оборудования, лет;

$C_{\text{обор}}$  – стоимость оборудования, руб.

$$I_{\text{ам}} = \frac{54}{365} \times \frac{1}{3} \times 60700 = 2990,43 \text{ руб.}$$

Кроме того, необходимо учитывать «накладные расходы, т.е. другие расходы инженерной команды, не включенные непосредственно в себестоимость рассматриваемого узла: проведение научно-исследовательских работ, электричество, воспроизведение материалов и т.д. Их стоимость определяется по формуле (7)» [11]:

$$Z_{\text{накл}} = \frac{\text{сумма статей расходов}}{5} \times k_{\text{нр}} \quad (7)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 15%.

$$Z_{\text{накл}} = \frac{83376}{5} \times 0,15 = 2501,28 \text{ руб.}$$

Таким образом, величина амортизационных отчислений за время проектирования составит 2990,43 рублей, размер накладных расходов – 2501,28 рублей.

Выводы по разделу

Был произведен расчет себестоимости изготовления рулевого узла для прототипа гоночного автомобиля, т.е. в условиях единичного производства. Представлена калькуляция амортизационных и накладных расходов.

## Заключение

Проект Formula Student входит в число ключевых практикоориентированных проектов, направленных на отработку студентами полученных теоретических знаний в рамках практической работы над реальным прототипом гоночного автомобиля. Разработка болида класса Formula Student предполагает создание общей концепции автомобиля и проектирование отдельных узлов, которые соответствуют целям команды и будут наиболее эффективны в ходе спортивно-гоночных соревнований.

Так, в рамках данной бакалаврской работы была подробно рассмотрена система рулевого управления, которая проектировалась для модели болида 2022 года.

В ходе работы был выполнен ряд задач. Была описана специфика международного проекта FSAE; охарактеризованы базовые понятия, связанные с рулевой системой автомобиля; проведен анализ систем рулевого управления зарубежных команд, являющихся участниками проекта Formula Student; проведен анализ систем рулевого управления, которые были разработаны для предыдущих моделей болидов в рамках проекта «Формула Студент ТГУ»; были проанализированы исходные данные; проведены расчеты и спроектирована рулевая система для гоночного болида класса Formula Student 2023 года.

Итак, при разработке рулевого узла автомобиля необходимо было свести к минимуму общее усилие, прилагаемое пилотом на рулевом колесе. Это требование особенно актуально для такой динамической дисциплины, как гонка на выносливость, в которой усталость пилота может значительно сказаться на результатах заезда. Кроме того, во время проектирования ставилась задача улучшить эргономику кокпита, уменьшить нагрузку на крепления и связанные с ними втулки. Отдельной задачей было достижение лучшей управляемости с помощью настройки угла Аккермана, а также обеспечение хорошей маневренности гоночного 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](https://bradfordwsims.files.wordpress.com/2011/07/eme-185_fsae-steering-system-final-report.pdf) (дата обращения: 25.05.2023).

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](http://www.ijirset.com/upload/2017/tapsa/29_Auto_11_Changed_.pdf) (дата обращения: 15.02.2023).

18. Formula Student Rules 2023. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2023/rules/FS-Rules\\_2023\\_v1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf) (дата обращения: 03.03.2023).

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](https://www.researchgate.net/publication/346119387_STEERING_SYSTEM_DESIGN_OF_THE_SECOND_GENERATION_FORMULA_SAE) (дата обращения: 17.04.2023).

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](https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_9_ISSUE_5/IJMET_09_05_022.pdf) (дата обращения: 03.02.2023).