

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 рулевого узла в соответствии с техническим регламентом
Formula Student

Обучающийся

И.А. Земнухов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.Г. Доронкин

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

Тольятти 2023

Аннотация

В бакалаврской работе представлен процесс разработки рулевого узла для гоночного болида класса Formula Student. Модель болида 2023 года разрабатывается в рамках проекта «Формула Студент ТГУ» и требует проработки концепта рулевого управления в соответствии с изменениями в регламенте проекта.

В ходе исследовательской части проанализирована специфика инженерного проекта FSAE, в рамках которого проходит разработка автомобиля «формульного» класса, выявлены ключевые особенности и характеристики рулевого узла гоночного болида в сравнении с рулевым управлением гражданского автомобиля. Кроме того, произведен анализ конструкций рулевых систем, предложенных зарубежными студенческими командами, на предмет выявления положительных и отрицательных сторон различных инженерных решений. В связи с этим сформулированы цели, которые должны быть достигнуты в ходе проектирования рулевой системы нового болида.

На основании ограничений регламента проекта FSAE и с учетом имеющегося состава пилотов предложена модель рулевого узла для гоночного автомобиля.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки в размере 44 страниц, содержащей 2 таблицы и 17 рисунков, а также графической части, содержащей 6 листов.

Содержание

Введение.....	4
1 Состояние вопроса	5
1.1 Описание международного проекта FSAE.....	5
1.2 Рулевая система гоночного автомобиля: конструкция и особенности ..	10
2 Анализ конструкторских решений, применяемых при разработке рулевой системы командами FSAE.....	14
2.1 Анализ решений зарубежных команд.....	14
2.2 Определение целей при проектировании рулевого узла	25
3 Проектирование рулевой системы болида G5	28
3.1 Анализ исходных данных.....	28
3.2 Проектирование рулевой системы	33
Заключение	41
Список используемой литературы и используемых источников.....	42

Введение

Международный проект FSAE был создан Обществом автомобильных инженеров 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 является разработка системы рулевого управления болида класса 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:

1. Описать специфику FSAE как международного студенческого проекта.
2. Выявить и описать основные понятия, связанные с рулевым узлом.
3. Провести анализ конструкторских решений рулевого управления зарубежных команд, принимающих участие в соревнованиях FSAE.
4. На основе проведенного анализа определить цели, требования и ограничения при разработке рулевого узла болида.
5. Проанализировать исходные данные: компоновку болида и ограничения регламента.
6. Произвести расчет и спроектировать рулевую систему для гоночного болида класса FSAE.

Результатом работы является проект рулевой системы для гоночного болида G5.

1 Состояние вопроса

1.1 Описание международного проекта FSAE

Formula SAE (Общество автомобильных инженеров) представляет собой соревнования в области автомобильного конструирования, в которых принимают участие обучающиеся университетов по всему миру. Проект предназначен для студентов-инженеров, перед которыми ставится цель придумать, спроектировать, изготовить, сконструировать, протестировать и продать прототип гоночного автомобиля.

Пример внешнего вида автомобиля «формульного класса» представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Модель автомобиля класса FS

Соревнования Formula SAE дают студентам возможность применить свои теоретические знания в реальных ситуациях, получить практический

опыт и в то же время получить оценку своей работы от ведущих экспертов автомобильной отрасли. Данный проект готовит студента к решению настоящей, чаще всего междисциплинарной, проблемы открытого типа.

Как показывает практика, в ходе обучения большинство студентов не сталкивается с необходимостью решения открытой задачи, т.е. такой задачи, в которой нет единственного правильного ответа. Это приводит к тому, что, когда обучающиеся не могут найти ответ в соответствующей литературе или открытых источниках сети Интернет, они прекращают попытки решения проблемы. На этом этапе крайне важна активная наставническая роль консультанта студенческой команды. Так называемые «faculty advisors» принимают участие в структурировании проекта для команды, каждого технического отдела и каждого студента в отдельности.

Общество автомобильных инженеров (SAE) спонсирует серию университетских соревнований, связанных с конструированием, в которые входят Aero Design, Formula SAE, Formula Student, Mini Baja и др.

По утверждению SAE, подобные соревнования среди студентов университетов приносят методы нестандартного обучения, предлагая учащимся спроектировать, построить и проверить характеристики реального автомобиля в конкурентной среде.

Первое соревнование Formula SAE было проведено в 1981 году в Техасском университете в Остине, на тот момент участие приняли четыре автомобиля. На сегодняшний день в соревнованиях Formula SAE участвуют около 100 высших инженерных школ из США, Канады, Южной Америки, Великобритании и Японии. Соревнования проводятся в середине мая возле Pontiac Silver Dome в Оберн-Хиллз, штат Мичиган. Главными спонсорами конкурса выступают Daimler-Chrysler, Ford и General Motors.

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.

На соревнованиях в некоторых странах предполагается, что каждая студенческая команда должна спроектировать свою машину, исходя из того, что производственная корпорация наняла их для разработки и производства гоночных автомобилей ограниченного производства (1000 единиц в год), предназначенных для непрофессиональных автогонщиков.

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.

В течение трех дней автомобили оцениваются в различных дисциплинах: оценка конструкции и проверка безопасности, оценка технико-экономического обоснования проекта болида и его ходовые характеристики на трассе.

Участие во всех испытаниях во время соревнований может принести до 1000 баллов, и команда, набравшая наибольшее количество очков по итогам дисциплин, считается победителем.

Статические испытания проводятся в первый день соревнований и включают «Защиту конструкции» (150 баллов), «Отчет о стоимости производства» (100 баллов) и «Презентацию бизнес-плана» (75 баллов). Второй день соревнований включает в себя такие динамические соревнования, такие как «Скид-пад» (50 очков), «Ускорение» (75 очков) и «Автокросс» (150 очков). Последний день соревнований посвящен гонке на выносливость и оценке экономичности расхода топлива или расхода электроэнергии для болидов с электрической силовой установкой (400 очков).

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.

Роль консультантов команды четко прописана в регламенте проекта. Правила гласят, что аспекты проектирования должны полностью оставаться за студентами. Консультант не должен принимать конструкторские решения, за исключением случаев, когда он накладывает вето на какое-то решение, которое, по его мнению, поставит под угрозу безопасность студентов.

Команды среднего размера обычно состоят из 15–30 студентов. Для команд любых размеров крайне важна преемственность – она обеспечивает ситуацию, при которой каждый год обеспечивается конкурентоспособность команды.

Непрерывность передачи знаний обеспечивает наличие полной и широкой базы, передающейся от одних участников проекта другим из года в год.

Чаще всего гоночная команда состоит из инженеров-механиков и двух-трех инженеров-электриков. Наличие последних считается очень важным для

обеспечения запуска автомобиля. Кроме того, большинство команд насчитывает как минимум одного инженера-технолога, который занимается производственными аспектами, связанными с отчетом о себестоимости прототипа, а также презентацией бизнес-плана по производству и сбыту автомобилей. Также многими студенческими коллективами отмечается необходимость наличия хотя бы одного специалиста по менеджменту, который будет заниматься аспектами маркетинга и продаж, а также взаимодействовать со спонсорами команды.

В начале каждого учебного года команда разделяется на группы или «отделы». Чаще всего различают следующие отделы, которые носят названия по той системе, проектированием которой в каждом из них занимаются: рама, подвеска, двигатель, трансмиссия, рулевое управление, тормоза, шины и колеса, кузов, эргономика/интерьер и безопасность, производство и электрика. В середине года определяется группа, которая будет работать над составлением отчета о стоимости производства, и группа, которая будет заниматься подготовкой бизнес-презентации. В конце весны или начале лета назначается группа динамического тестирования.

Количество отделов во многом зависит от размера команды. Когда команда небольшая, следует говорить о группе специалистов широкого профиля, в противном случае студенты могут проводить исследования углубленного технического анализа.

Каждому студенту предоставляется возможность выбрать сферу своих интересов. Следует, однако, учитывать, что это не всегда возможно в силу того, что много людей могут быть заинтересованы в участии в определенном отделе. Студенты, которым не предоставилась возможность сделать выбор в начале года, т.е. во время присоединения к проекту, могут быть позже переведены в другой отдел.

В некоторых командах практикуется такой подход, при котором ни один участник не остается в одной и той же группе на протяжении всего

учебного года. Это позволяет посмотреть на процесс разработки и производства с позиции разных специалистов.

В целом можно сказать, что студенты распределяются по отделам исходя из потребностей команды на данный момент времени. Кроме этого, учитываются возможности, интересы и занятость каждого отдельно взятого студента.

1.2 Рулевая система гоночного автомобиля: конструкция и особенности

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

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.

За последнее время были проведены многочисленные исследования метода проектирования системы рулевого управления транспортных средств [13]. 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.

Была предложена разработка метода рулевого механизма с помощью двух эвристических методов оптимизации, а именно алгоритма искусственной иммунной системы (AIS) и генетического алгоритма (GA). Результаты показали, что алгоритм AIS может генерировать функцию, наиболее близкую к желаемой. GA может генерировать функцию, наиболее близкую к желаемой функции, с наименьшей ошибкой [15].

На сегодняшний день существует лишь несколько работ, в которых при проектировании системы рулевого управления учитывается большой угол

бокового скольжения шин. Однако учет угла бокового скольжения шин может улучшить способность гоночного автомобиля проходить повороты.

Как показано на рисунке 2, система рулевого управления гоночного автомобиля состоит из рулевого колеса, рулевой оси, универсального шарнира, реечного рулевого механизма, рулевой тяги и т.д.

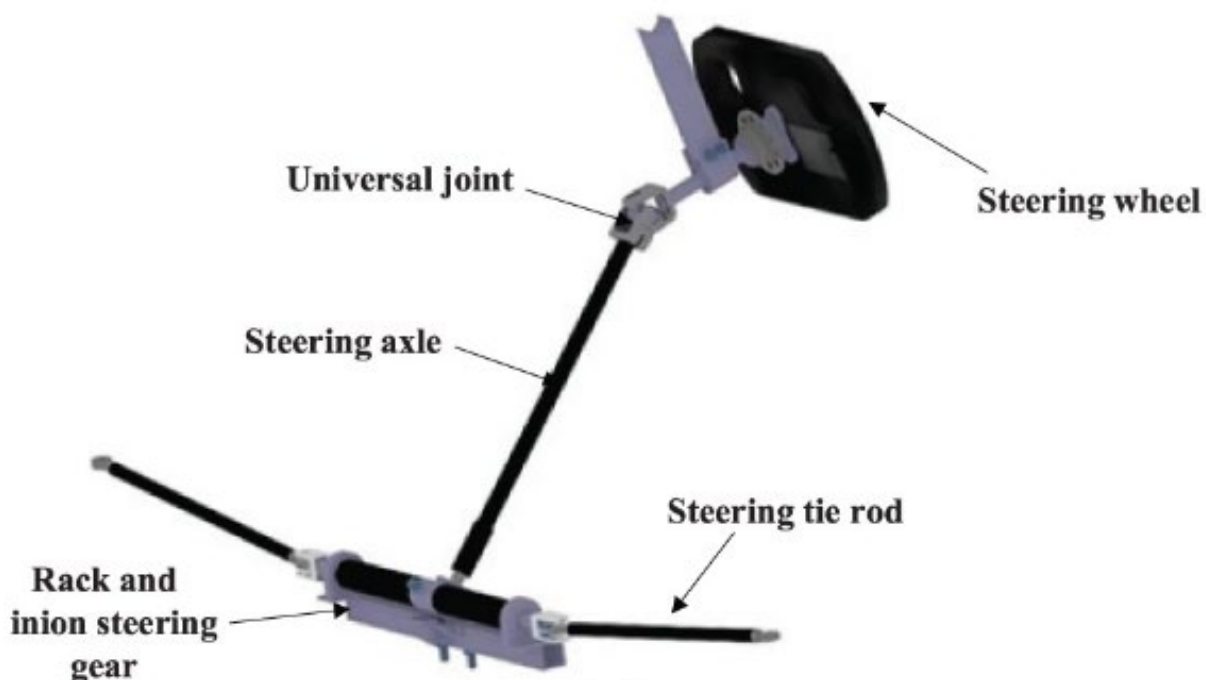


Рисунок 2 – Устройство рулевой системы

Структура системы рулевого управления гоночного автомобиля (т.е. положение и размер соответствующих компонентов) напрямую определяет соотношение углов поворота между внутренними и внешними колесами [12]. Эту взаимосвязь можно описать с помощью модели рулевого механизма, как показано на рисунке 3.

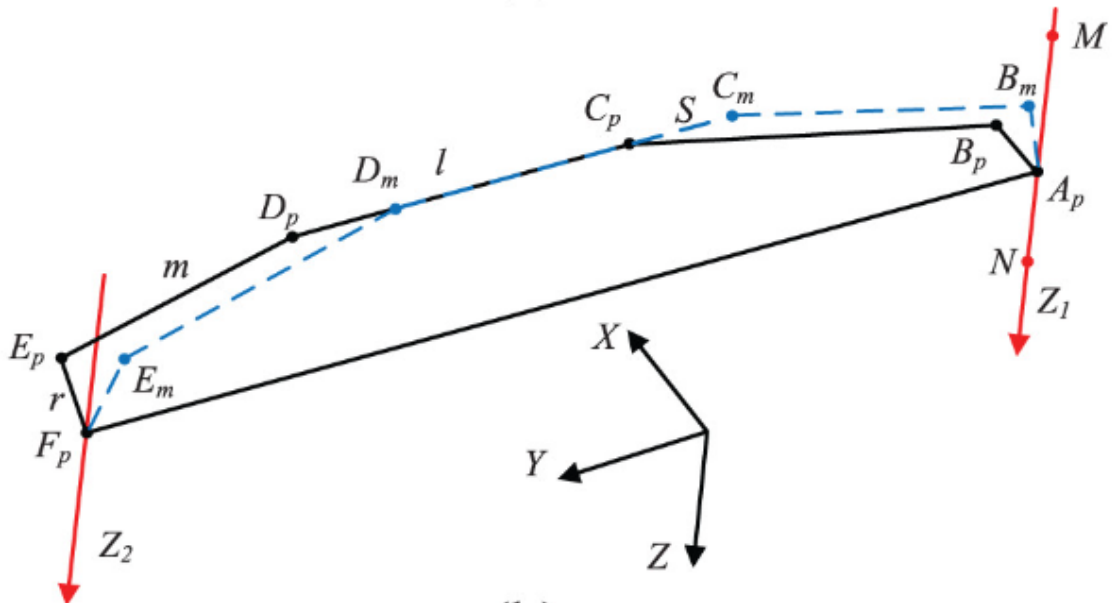


Рисунок 3 – Модель рулевого механизма

Ось X указывает направление движения транспортного средства, ось Z указывает вертикально вниз, ось Y , перпендикулярная плоскости XOZ , указывает влево [11].

Выводы по разделу. Были описаны особенности международного междисциплинарного проекта FSAE, в рамках которого перед студенческой инженерной командой ставится задача с нуля разработать, собрать и протестировать гоночный автомобиль. Была рассмотрена специфика рулевого узла как одного из ключевых узлов, обеспечивающих взаимодействие между пилотом и гоночным автомобилем.

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 G5, был рассмотрен ряд решений зарубежных инженерных команд, которые принимают участие в проекте Formula Student в своих университетах» [1].

1. 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, однако 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 (в данном случае команда прибегает к использованию пакета Solidworks) и аналитический метод.

На рисунках 4-6 показана работа команды по выбору геометрии рулевого управления.

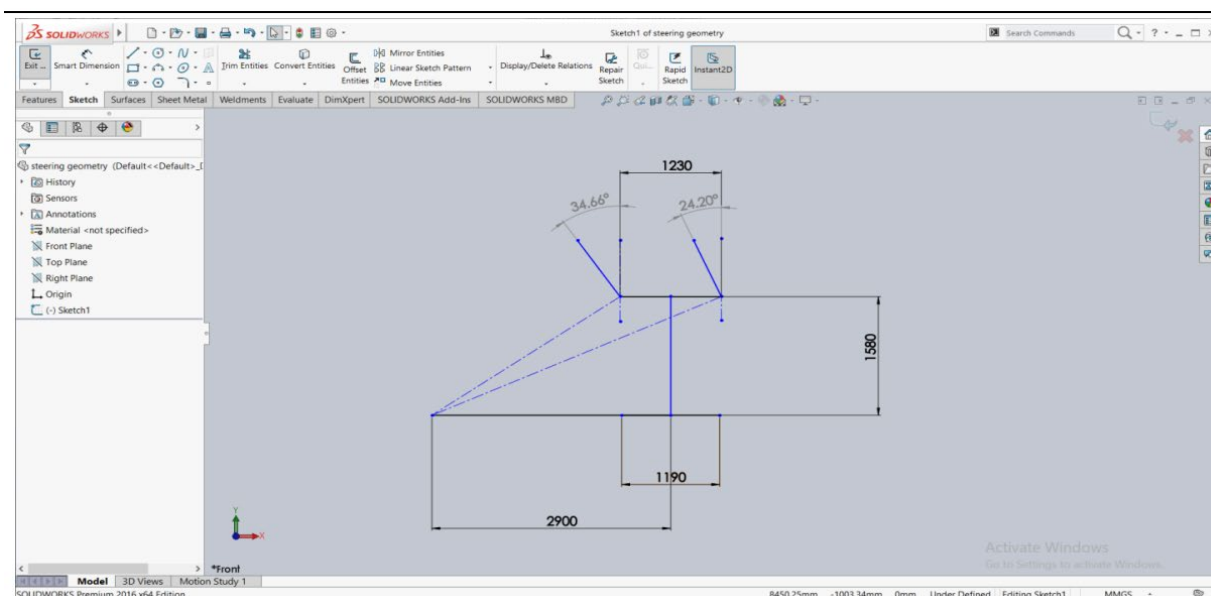


Рисунок 4 – Определение основных параметров

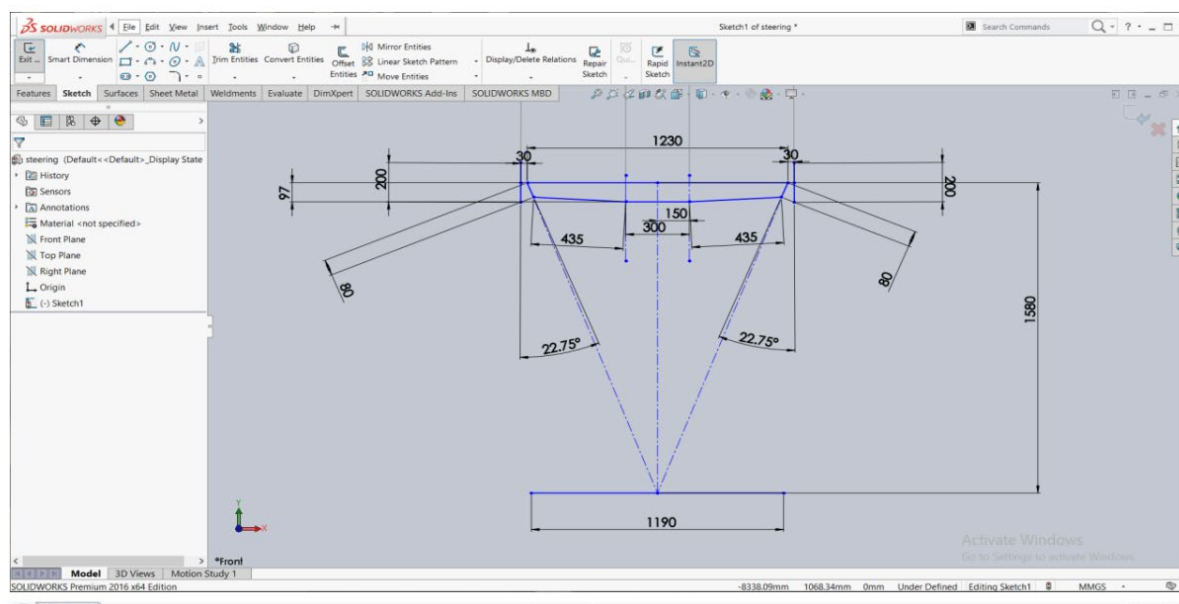


Рисунок 5 – Включение в модель основных углов

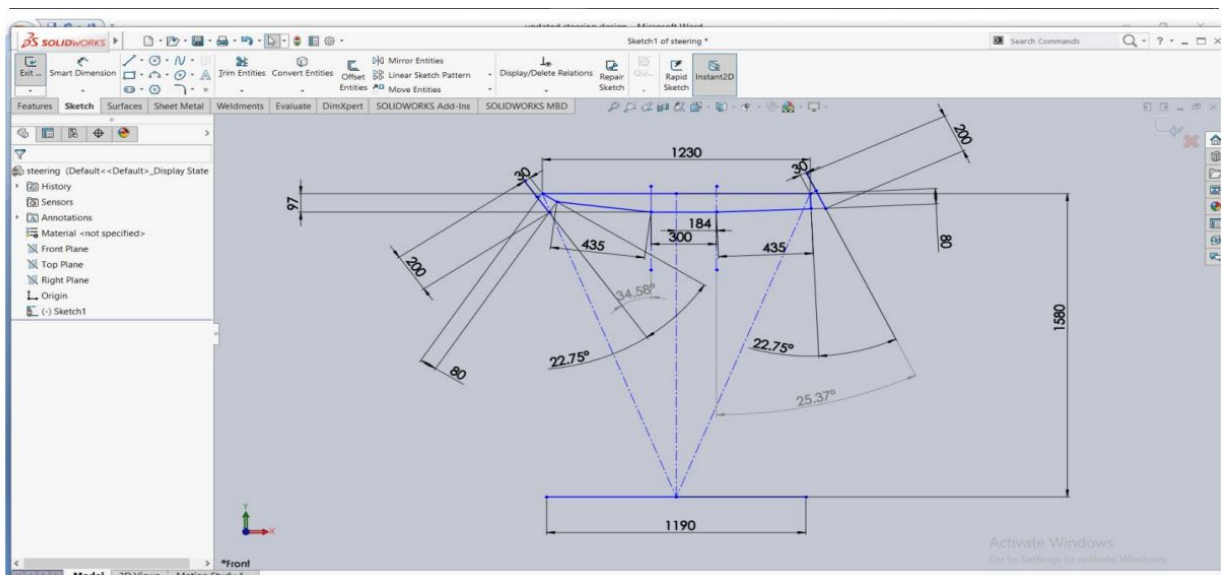


Рисунок 6 – Финальная модель в Solidworks

Как можно видеть на изображениях, 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 [9].

Сначала была взята допустимая ширина колеи и колесная база в соответствии со сводом правил проекта FSAE (технический регламент на сайте немецких организаторов), затем были внесены изменения таким образом, чтобы они соответствовали концепту автомобиля. В отчете команды отмечается, что все 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, затем команда приступила к проектированию реечной передачи. В данном случае учитываются поперечные и продольные переносы веса, которые в основном относятся к динамике автомобиля.

Выделяется множество факторов, на которые команда обращает внимание, таких как С-фактор, количество зубьев 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/о 24,20 (фактические), I 34,58/о 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 колеи, длина передней оси: 1230 мм,
- длина задней оси: 1190 мм.

2. Команда из Вашингтонского университета в Сент-Луисе в своем отчете обращает внимание на важность расположения рулевой рейки, поскольку оно оказывает большое влияние на поворотные характеристики шин.

Выбранное размещение рейки работает с геометрией рулевого рычага, чтобы определить конкретную настройку Аккермана. С точки зрения компоновки в колесо с помощью Pro-Ackermann наиболее выгодно разместить рулевую рейку за осевой линией переднего колеса. Это позволяет расположить внешнюю рулевую тягу вдали от каких-либо деталей внутри колеса за счет перемещения точки рулевой тяги внутрь, что улучшает компоновку, обеспечивая зазор между рулевой тягой и вращающимся колесом.

Силы, действующие на систему рулевого управления, не пренебрежимо малы и могут вызвать податливость системы, что приводит к ухудшению взаимодействия пилота с дорогой и непредсказуемой нагрузке на компоненты. Один из самых простых способов противодействовать этим силам – установить рулевую рейку в правильных местах.

Рулевая рейка воспринимает силы из двух источников: от водителя и от колес. Поэтому система крепления рейки должна обеспечивать необходимые силы реакции для противодействия этим силам. Поворачивая колесо, водитель передает крутящий момент на рейку через шестерню. Если предположить, что рейка и шестерня зафиксированы на месте и вращаются, крутящий момент попытается повернуть корпус рулевой рейки. Следовательно, система крепления должна обеспечивать противодействие крутящему моменту.

В конструкции болида команды Вашингтонского университета 2019 года точки крепления рейки расположены как можно дальше от шестерни, что сводит к минимуму силу, приложенную к каждой точке крепления. Преимущество наличия двух точек крепления заключается в том, что они создают парный момент, который передает только вращающую силу корпусу стойки без перемещения. Если бы точки крепления стойки располагались близко к центру вращения, то на концах стойки было бы значительное смещение.

Когда на стойку действует сила со стороны шин через рулевые тяги, силы распределяются примерно вдоль стойки. Большая часть этой осевой силы передается через корпус стойки на противоположное колесо, а небольшие неосевые силы воздействуют на конец стойки.

Благодаря тому, что крепления расположены близко к концам рулевой рейки, они находятся в правильном месте и напрямую противодействуют любой из этих небольших сил. Если бы тяги были размещены с большим смещением относительно стойки, необходимо было бы учитывать составляющие силы в радиальном направлении стойки.

Общий ход шестерни и передаточное число рейки. Эти параметры задаются имеющимися рулевыми рейками и определяют, какое усилие и вращение водитель должен приложить к рулевому колесу, чтобы повернуть передние колеса.

При заданном рулевом рычаге и заданном повороте рулевого колеса величина поворота управляемого колеса определяется ходом рейки от заданного поворота рулевого колеса. Величина хода рейки зависит от диаметра шестерни реечной системы: большая шестерня будет означать больший ход рейки для данного вращения. Однако покупные рулевые рейки выпускаются только с ограниченным диаметром шестерни.

На рисунке 7 ниже представлено изображение рулевой колонки, используемой командой:

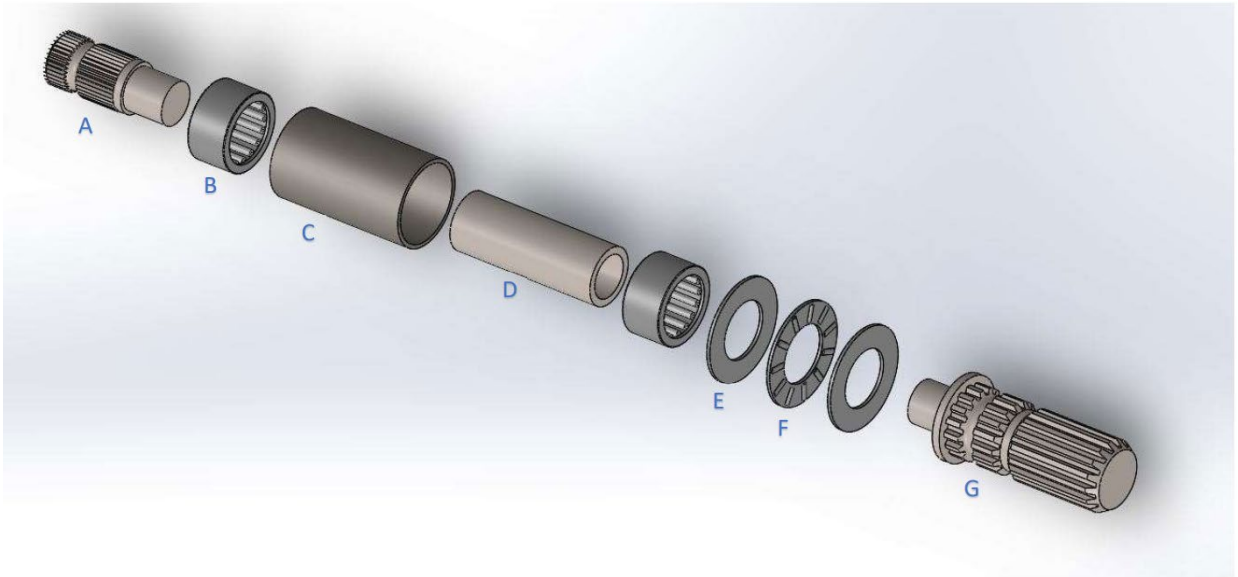


Рисунок 7 – Рулевая колонка

На рисунке 8 показан вид в разрезе верхней части рулевой колонки.

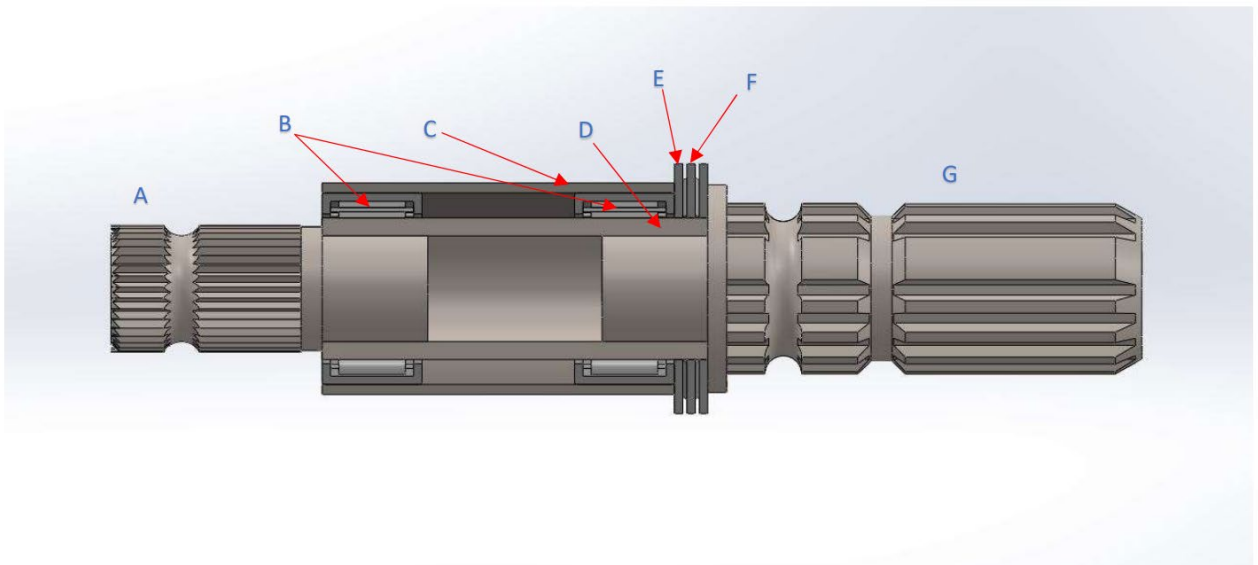


Рисунок 8 – Вид в разрезе верхней части рулевой колонки

3. Инженерная команда из университета Тринити пишет в своем отчете о выборе максимальной номинальной нагрузки, осевой нагрузки и внеосевой нагрузки.

Испытание максимальной номинальной нагрузки в нормальных условиях вождения встречается редко, за исключением случаев столкновения передних колес. «Максимальная номинальная нагрузка соответствует максимальной силе, которой может противостоять водитель небольшого болида «формульного» класса, прежде чем руль вырвется из его рук.

При проектировании соответствующих компонентов рулевого управления производитель предусматривает максимальную номинальную нагрузку в 6670 Н. Рекомендуемая максимальная эксплуатационная нагрузка составляет 1780 Н.

При установке была предпринята попытка минимизировать внеосевую нагрузку» [2]. Рулевые рычаги были установлены перед осевой линией колесной базы под углом 3,6 градуса, что привело к обеспечению минимальной внеосевой нагрузки.

Рулевая рейка работает по принципу поворота рулевого колеса по часовой стрелке [6], имеет межосевую длину 11,4 дюйма, скорость рейки 3,46 дюйма/об. и весит 1,3 фунта.

Реечный узел может выдерживать максимальную осевую нагрузку в 6670 Н, что соответствует весу автомобиля менее 900 фунтов и приемлемо для текущей оценки веса автомобиля в 400 фунтов.

На рисунке 9 представлена рулевая рейка команды.

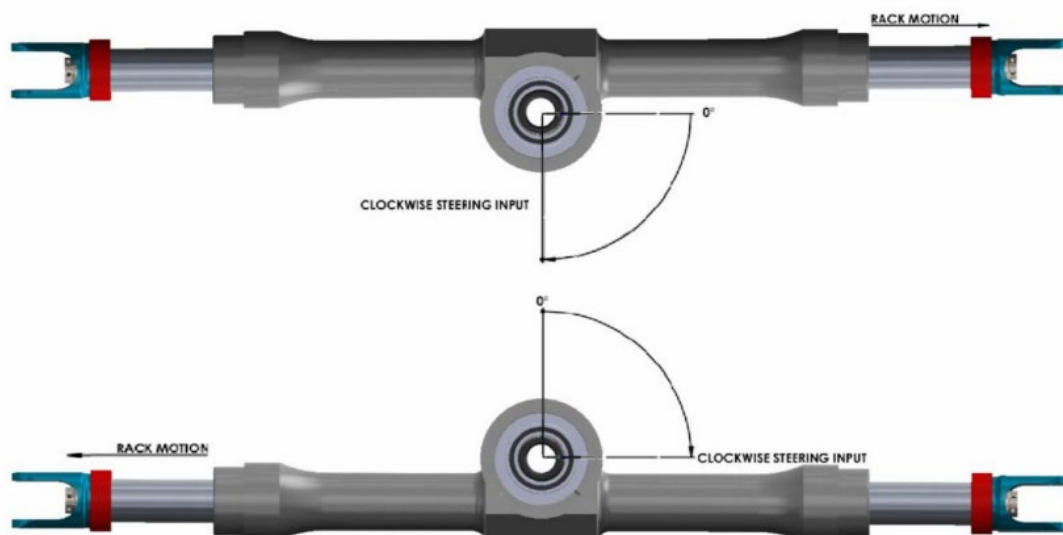


Рисунок 9 – Направление движения реечного механизма

Рекомендуемый максимальный угол установки рулевой тяги составляет 10 градусов. Линейное перемещение рейки постоянно и пропорционально входному углу поворотного рулевого управления. Угол поворота рулевого колеса находится в диапазоне от -130° до 130° . Соединения вилки с рулевыми тягами совместимы со стандартными сферическими наконечниками тяг. Вал рулевого управления крепится к валу-шестерне с помощью муфты вала, расположенной над валом-шестерней. Муфта крепится к валу-шестерне с помощью стального пружинного штифта диаметром $\frac{1}{8}$ дюйма, а затем соединяется с валом рулевого управления.

Проектирование и изготовление стоек. Рулевая рейка крепится к шасси автомобиля с помощью двух алюминиевых креплений, расположенных на обоих концах стойки, а затем прикрепляется к стальному полу автомобиля толщиной $\frac{1}{8}$ дюйма. Установленные детали расположены на дальних концах корпуса шестерни для максимального сопротивления отклонению, что обеспечивает передачу крутящего момента от конической шестерни и рейки.

Чтобы крепежные детали могли противостоять напряжению сдвига, для фиксации сборки использовались крепежные детали SAE Grade 8.

Конструкция для установки в стойку крепится к стенке пола автомобиля с помощью болта с частичной резьбой 1/4"-28 x 3" с шестигранной головкой с соответствующими шайбами и гайками, затянутыми до рекомендованных значений. Болты плотно закрепляют две детали вокруг стойки, ограничивая ее диапазон движения.

На рисунке 10 представлен технический чертеж стоечной опоры.

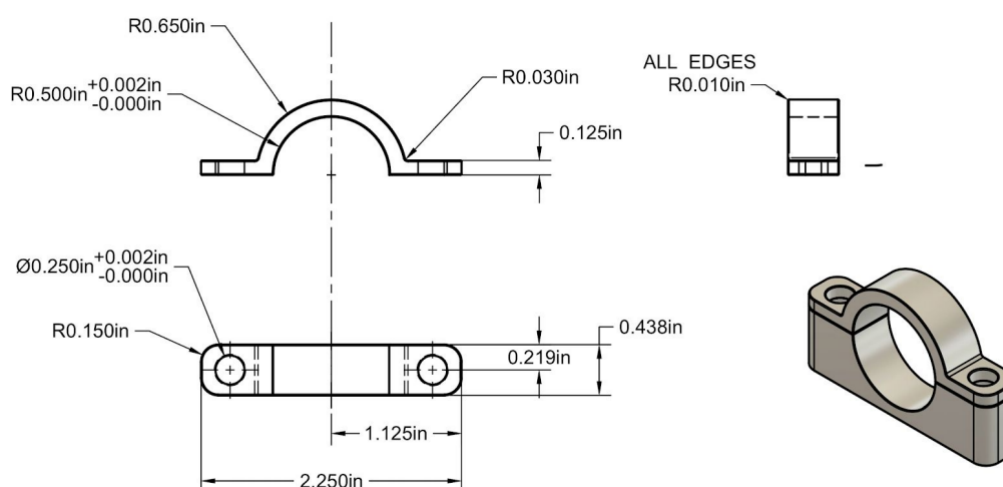


Рисунок 10 – Технический чертеж стоечной опоры

На рисунке 11 ниже показано, как выбранное командой решение было реализовано в созданной опоре.

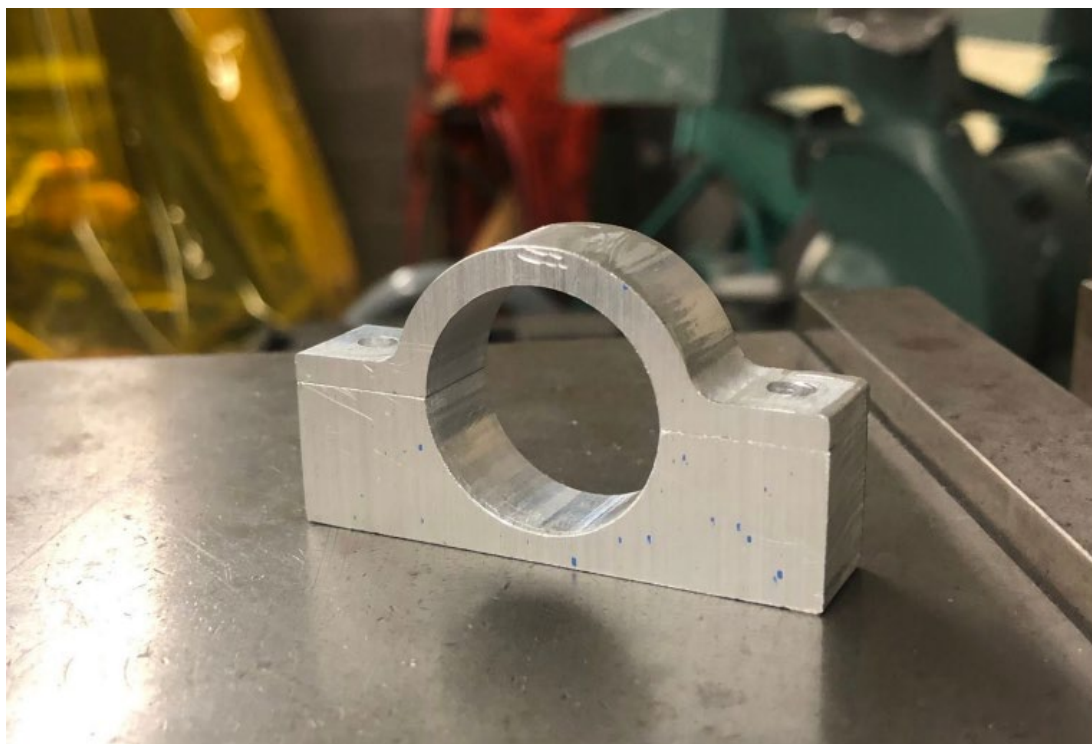


Рисунок 11 – Сборная опора стойки из алюминия 6061

В ходе проводимых командой испытаний измеряется параметр, называемый свободным ходом системы рулевого управления, который определяется как максимальное угловое смещение рулевого колеса в ответ на действия водителя при зафиксированных в положении двух передних колесах.

«В идеальном сценарии две передние шины автомобиля мгновенно поворачивались бы в ответ на угловое движение рулевого колеса по команде пилота, что приводило бы к нулевому свободному люфту в системе. В действительности, однако, из-за несовершенства сборки элементов системы рулевое колесо будет испытывать некоторое свободное движение, прежде чем передние колеса начнут поворачиваться в ответ на действия пилота.

Одной из ключевых задач команды было обеспечение соответствия всем правилам, изложенным в регламенте FSAE, который требует, чтобы свободный ход системы рулевого управления составлял не более семи градусов для системы рулевого управления.

Цель проводимого теста – оценить свободный ход системы рулевого управления и убедиться, что он не превышает максимум в семь градусов, требуемый сводом правил FSAE. Свободный ход системы является важным параметром при оценке способности автомобиля безопасно проходить крутые повороты в динамических испытаниях Autocross и Skidpad. Чем меньше свободный ход системы, тем больше контроля у пилота при прохождении поворота» [3] и тем выше вероятность того, что автомобиль пройдет поворот безопасно и без проблем.

4. Команда UCD Formula SAE указывает не только на положительные стороны, но и на слабые аспекты конструкции, которые были обнаружены при изготовлении и сборке.

Одним из этих недостатков является место соединения корпуса шестерни и крышки корпуса шестерни. Крышка крепится на корпусе шестерни только с помощью крепежных болтов. В такой конструкции нагрузки воспринимаются исключительно болтами, а не материалом корпуса. Чтобы устранить этот недостаток, в корпусе шестерни предлагается обработать фланец, чтобы точно расположить крышку шестерни.

Другим возможным изменением конструкции может быть использование алюминиевой реечной передачи. Стальная реечная передача выбрана для предотвращения истирания и обеспечения длительного срока службы, однако это приводит к увеличению общего веса стойки. Для достижения желаемых характеристик алюминиевой реечной передачи потребуются дополнительные исследования возможных видов обработки поверхности алюминия.

2.2 Определение целей при проектировании рулевого узла

Цели и ограничения системы управления автомобилем можно разделить на три категории:

- определяемые конструкцией,

- определяемые пилотом,
- определяемые компоновкой.

Многие цели основаны на оптимизации и выборе оптимального дизайна. Так, например, правила FSAE действуют как строгие ограничения проектирования. Цели, основанные на конструкции автомобиля, являются отправной точкой для процесса проектирования и могут быть отредактированы позже в соответствии с ограничениями, налагаемыми пожеланиями пилотов, а также целями и ограничениями компоновки.

Наиболее важные цели, определенные при проектировании, заключаются в следующем:

- легко совершать повороты с внешним радиусом 4,5 метра;
- устранение проскальзывания шин на поворотах на низких скоростях;
- размещение всех компонентов в положениях, обеспечивающих наименьшее отклонение и нагрузку на деталь.

К целям при проектировании, зависящим от пилотов, относятся те, которые являются прямым результатом обратной связи с водителями автомобиля [7]. Если сосредоточить внимание на создании управляемого болида, это значит, что водителю необходимо всегда чувствовать уверенность в автомобиле и его управляемости, а это напрямую связано с конструкцией рулевого управления.

Большая часть информации по связи с дорогой поступает к пилоту посредством сил, действующих на рулевое колесо, поэтому путь силы между колесами и рулем должен быть достаточным, чтобы любое внешнее вмешательство было ограничено.

Ниже приведены некоторые цели и ограничения, определенные водителем:

- рулевое колесо должно иметь угол 110° в каждую сторону, чтобы гарантировать максимальный поворот колеса, при этом водитель не отрывает рук от руля;

- усилие, необходимое для рулевого управления, должно быть таким, чтобы пилот мог проехать гонку на выносливость без потери скорости прохождения круга;
- рулевая колонка должна иметь два универсальных шарнира для обеспечения постоянной обратной связи с дорогой;
- рулевая рейка должна быть установлена на концах, чтобы уменьшить податливость системы.

Последним ограничивающим фактором для процесса проектирования является компоновка. Например, меньший размер колеса существенно повлияет на все, что будет размещено внутри колеса, особенно на адаптер рулевого рычага. Эти ограничения будут окончательной проверкой всех конструкций и деталей [8].

Выводы по разделу. Была проанализирована специфика органов рулевого управления, предложенных зарубежными командами, принимающими участие в FSAE. Исходя из опыта этих команд предложены цели и ограничения относительно рулевого узла, который должен быть спроектирован в рамках проекта «Формула Студент ТГУ».

3 Проектирование рулевой системы болида G5

3.1 Анализ исходных данных

Первый этап связан с определением исходных данных, которые, в свою очередь, тесно связаны с ограничениями, накладываемыми на конструкцию автомобиля регламентом проекта 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 кузова
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
Т13.2.3	<p>В поднятом положении:</p> <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
Т.13.3.2	<p>Хорошо сидящий шлем с закрытым визором, соответствующий одному из следующих сертификатов и имеющий следующую маркировку:</p> <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
Т13.3.3	<p>Если используется передняя система фиксации пилота (FHR, HANS), она должна быть сертифицирована по одному из следующих стандартов и иметь соответствующую маркировку:</p> <ul style="list-style-type: none"> • FIA 8858-2010 • FIA 8860-2004 • SFI 38.1 	Добавлены стандарты для передней системы фиксации пилота
Т13.3.10	<p>Огнестойкая экипировка не должна быть старше 10 лет и узнаваема, поскольку на ней нет голограммы FIA.</p>	Дополнительные возможности использования огнестойкой экипировки
Т13.3.12	<p>Если на экипировке есть нашивка, команда должна быть в состоянии продемонстрировать, что экипировка по-прежнему соответствует требованиям Т13.3. 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.</p>	Пояснение касательно нашивок на экипировке пилота
Т13.3.13	<p>Некоторые (но не все) одобренные огнестойкие материалы: Nomex, Aramid, Belcotex, Indura.</p>	Обновлено использование огнестойких материалов в экипировке пилота
Т14.2.3	<p>[ТОЛЬКО ДЛЯ CV] Крепление регистратора данных должно быть опломбировано во время технической инспекции.</p>	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.

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» [1] (рисунок 12).

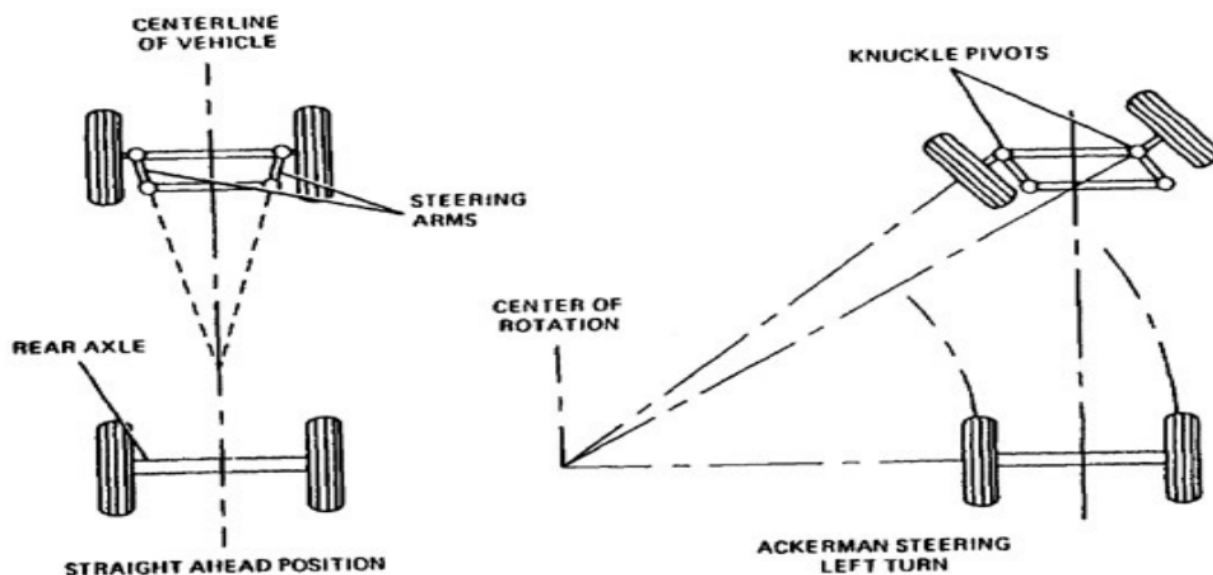


Рисунок 12 – Рулевое управление

«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 [19].

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» [20], как показано на рисунке 13:

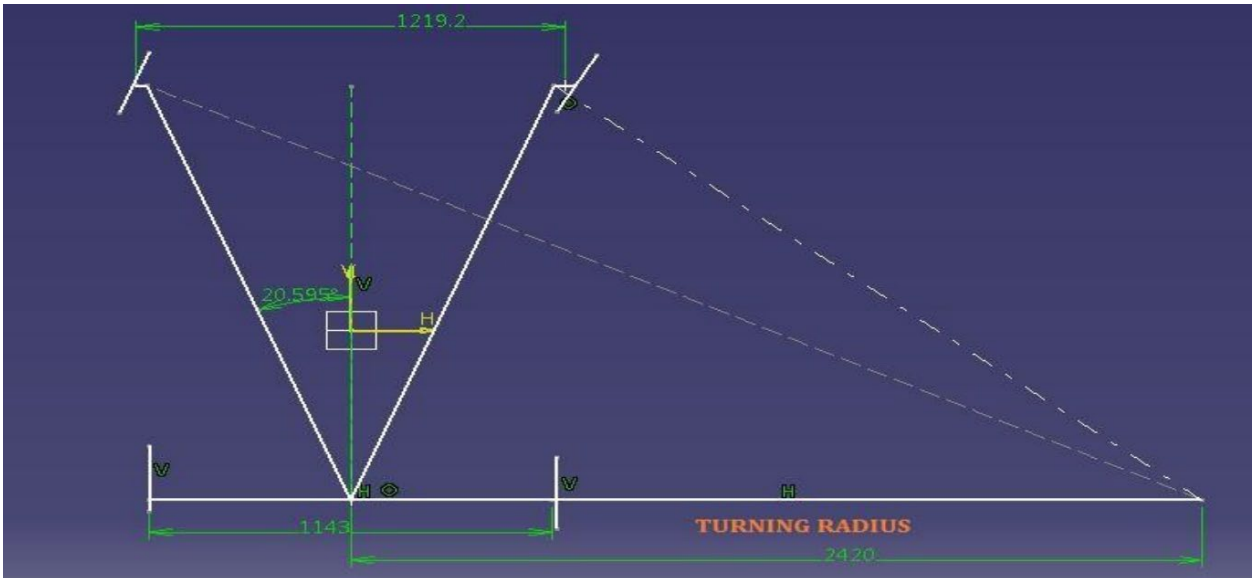


Рисунок 13 – Определение угла Аккермана при повороте

«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 14).

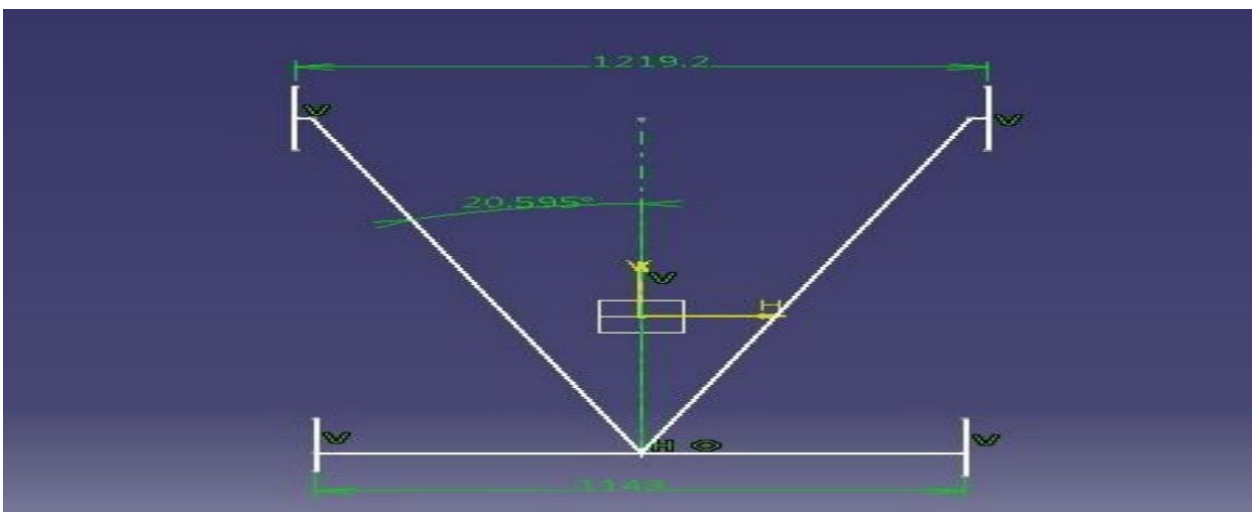


Рисунок 14 – Определение угла Аккермана в статичном положении

«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» [18].

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.

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 15.

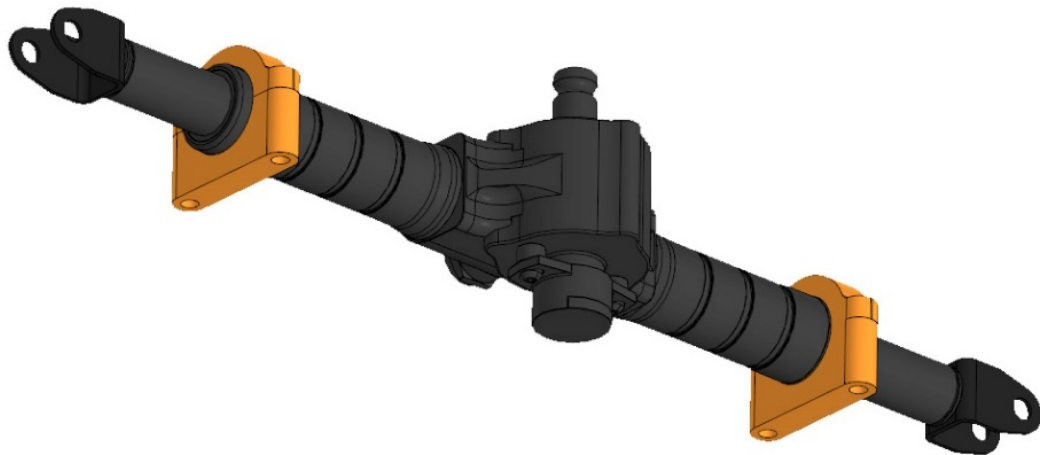


Рисунок 15 – Рулевая рейка

«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 16» [5].

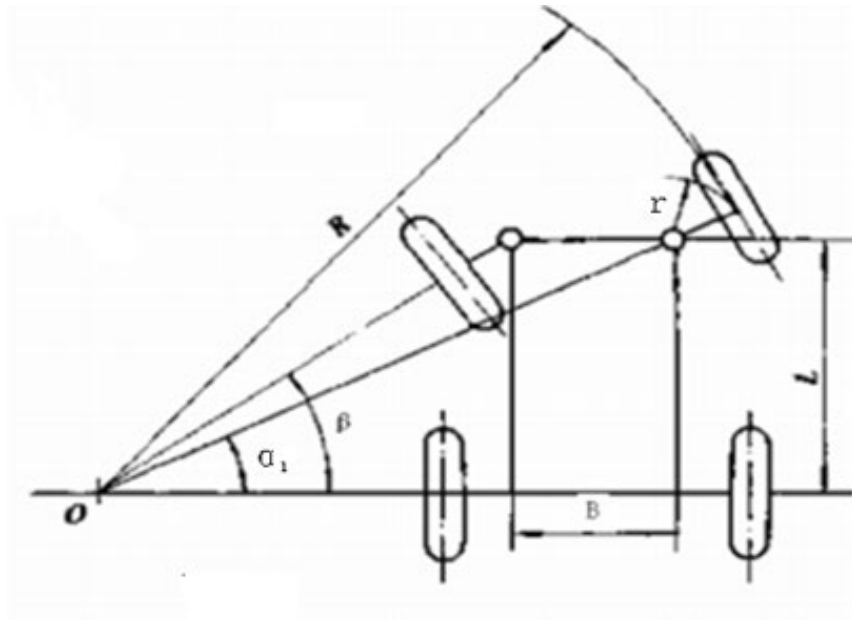


Рисунок 16 – Углы поворота внешнего и внутреннего колеса

«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» [4] (рисунок 17).

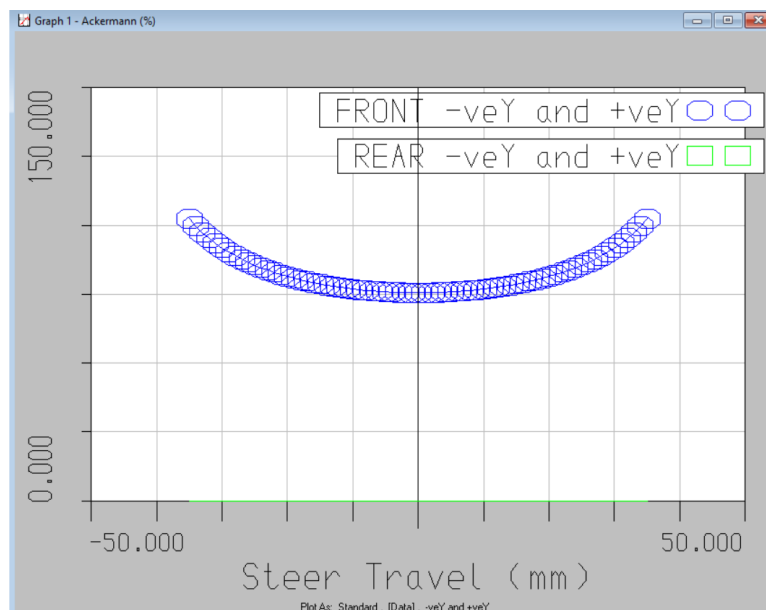


Рисунок 17 – Зависимость угла Аккермана от хода рейки

«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» [17]:

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

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° .

$$F = 194.7 \text{ Н}$$

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, а также основные параметры автомобиля. Исходя из имеющихся данных, была рассчитана и описана конструкция рулевого управления для гоночного болида G5» [16].

Заключение

Инженерный проект FSAE создавался как способ обеспечить обучающихся технических университетов возможностью апробировать 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 была разработка системы рулевого управления болида класса Formula Student. Для достижения цели были выполнены такие задачи, как описание специфики FSAE как международного студенческого проекта, выявление основных понятий, связанных с рулевым узлом; проведение анализа систем конструкторских решений рулевого управления зарубежных команд, принимающих участие в соревнованиях FSAE.

Были определены цели, требования и ограничения при разработке рулевого узла болида. Так, одной из главных целей при проектировании у многих инженерных команд выступает облегчение рулевого управления путем снижения усилия, которое необходимо приложить пилоту. Кроме того, в ходе работы были проанализированы исходные данные: компоновка болида 2023 года и ограничения регламента, а также произведен расчет рулевого узла для гоночного болида класса FSAE.

Результатом работы является проект рулевой системы для гоночного болида класса FS. В ходе расчетной части была определена геометрия Аккермана, рассчитано максимальное усилие на рейке рулевого механизма, определен момент сопротивления руля при повороте автомобиля на месте, а также произведен расчет диаметра поворота.

Предложенный проект рулевого узла может быть установлен на автомобиле, разработанном в соответствии с регламентом Formula Student.

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).