

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)

13.04.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Проектирование и эксплуатация силовых установок для автомобилей специального назначения

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Кинематическая оптимизация подвески гоночного болида»

Обучающийся

Д. А. Перминов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

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

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

Тольятти 2025

Содержание

Введение	3
1 Состояние вопроса	5
1.1 Требования регламента соревнований «Формула Студент» к конструкции подвески гоночного болида.....	5
1.2 Сравнительный анализ конструкций подвески гоночных болидов класса «Формула Студент» зарубежных команд	8
2 Теоретические факторы, учитываемые при проектировании подвески автомобиля.....	19
3 Исследование влияния упругих характеристик подвески на управляемость гоночного болида	42
3.1 Упругие характеристики подвески автомобиля	42
3.2 Влияние жесткости подвески на управляемость болида	44
4 Оптимизация подвески гоночного болида.....	49
4.1 Описание ПО «АДАМС»	49
4.2 Оптимизация кинематических характеристик гоночного болида Scorpion G5	56
5 Сравнение характеристик гоночных болидов путем симуляции динамических и кинематических характеристик	65
Заключение	79
Список используемых источников.....	80

Введение

Проект «Формула Студент» представляет собой важный шаг в подготовке инженерных кадров, отвечающий современным требованиям рынка труда и образовательным стандартам. В условиях стремительного развития технологий и постоянного обновления знаний, необходимого для успешной профессиональной деятельности, данный проект акцентирует внимание на практической подготовке студентов, что является ключевым аспектом в инженерном образовании.

Актуальность проекта заключается в его способности интегрировать теоретические знания с практическими навыками. Участие студентов в проекте позволяет им не только углубить свои знания в области инженерии, но и развить критически важные компетенции, такие как командная работа, управление проектами и решение нестандартных задач. Эти навыки становятся все более востребованными на рынке труда, где работодатели ищут специалистов, способных адаптироваться к быстро меняющимся условиям и эффективно работать в команде.

Кроме того, «Формула Студент» способствует развитию инновационного мышления у будущих инженеров. Проект предоставляет студентам возможность работать над реальными задачами и проектами, что стимулирует их к поиску нестандартных решений и внедрению новых идей. Это особенно важно в контексте глобальных вызовов, таких как устойчивое развитие и цифровизация, где требуется креативный подход к решению сложных проблем.

Также стоит отметить, что проект «Формула Студент» способствует укреплению связей между образовательными учреждениями и промышленностью. Партнерство с компаниями позволяет студентам получать актуальную информацию о потребностях рынка труда и трендах в инженерной сфере. Это взаимодействие помогает формировать учебные

программы, которые соответствуют требованиям работодателей и обеспечивают выпускников необходимыми знаниями и навыками.

В заключение проект «Формула Студент» является актуальным инструментом подготовки высококвалифицированных инженерных кадров. Он не только улучшает качество образования, но и способствует формированию профессионалов, готовых к вызовам современного мира. Интеграция теории с практикой, развитие инновационного мышления и укрепление связей с промышленностью делают этот проект важным элементом системы подготовки инженеров нового поколения.

Цель этой работы заключается в модернизации кинематических параметров передней и задней подвески болида класса «Формула Студент» с точки зрения кинематики и податливости, а также с точки зрения управляемости и стабилизации на базе конструкции подвески предыдущего сезона. В рамках данной работы были сформулированы следующие задачи:

- провести подробный анализ регламента соревнований «Формула Студент» и выделить те требования, которые относятся именно к подвеске болида;
- проанализировать конструкции передних и задних подвесок других команд «Формула Студент»;
- провести сбор и анализ теоретических сведений, влияющих на управляемость гоночного болида;
- изучить и провести обзор на ПО АДАМС;
- рассчитать и установить оптимальные кинематические параметры гоночного болида;
- практическое применение.

1 Состояние вопроса

1.1 Требования регламента соревнований «Формула Студент» к конструкции подвески гоночного болида

Регламент проекта «Формула Студент» представляет собой документ, который определяет основные цели, задачи, правила и процедуры, связанные с реализацией данного образовательного проекта. Он служит важным инструментом для организации работы участников, а также для обеспечения прозрачности и последовательности в проведении мероприятий.

Основная цель регламента заключается в создании четкой структуры взаимодействия между всеми участниками проекта, включая студентов, преподавателей и представителей промышленности. В документе подробно описываются задачи проекта, которые направлены на развитие практических навыков студентов, их вовлечение в реальные инженерные проекты и формирование у них компетенций, необходимых для успешной профессиональной деятельности.

Регламент содержит информацию о критериях участия в проекте, включая требования к студентам и командам, а также описание этапов реализации проекта. В нем прописаны сроки выполнения различных задач и мероприятий, что позволяет участникам планировать свою работу и эффективно распределять время. Также регламент включает правила оценки результатов работы команд, что обеспечивает объективность и справедливость в процессе подведения итогов.

Кроме того, в регламенте могут быть указаны условия сотрудничества с промышленными партнерами, включая возможности стажировок и практик для студентов. Это создает дополнительные стимулы для участников проекта и способствует их профессиональному росту.

Важной частью регламента является описание механизмов обратной связи и поддержки участников. Это позволяет студентам получать

консультации от преподавателей и экспертов отрасли, а также делиться опытом друг с другом.

Таким образом, регламент проекта «Формула Студент» является ключевым документом, который обеспечивает организацию работы всех участников проекта. Он помогает создать условия для эффективного обучения и развития студентов как будущих инженеров, способствуя их подготовке к вызовам современного рынка труда.

В разделе 2.3 прописаны основные принципы и требования к конструкции подвески болида. Например, может указываться, что подвеска должна обеспечивать стабильность и управляемость автомобиля на различных типах трасс. Также могут быть указаны ограничения по весу и материалам, из которых может быть изготовлена подвеска.

В разделе 2.4 детализированы требования к материалам, используемым в конструкции подвески. Например, может быть указано, что все компоненты должны быть изготовлены из легких и прочных материалов, таких как алюминий или углеродное волокно.

В разделе 2.5 содержатся требования к геометрии подвески, такие как углы наклона колес, высота дорожного просвета и другие параметры, влияющие на поведение автомобиля на трассе. Могут быть указаны допустимые диапазоны значений для этих параметров с целью обеспечения оптимальной производительности болида.

В разделе 2.6 требования к системам регулировки подвески, таким как возможность изменения жесткости амортизаторов или высоты дорожного просвета во время соревнований. Может также указываться необходимость наличия определенных механизмов для быстрой настройки подвески в зависимости от условий гонки.

«В разделе 2.3 описаны правила касательно самой системы подвески. Данный раздел ограничивает минимальный ход подвески болида с пилотом в 50 мм, но в любом случае минимальное сжатие должно составлять минимум 25 мм. Также минимальный дорожный просвет гоночного автомобиля не

может быть меньше 30 мм. Кроме того, для быстрого прохождения технической инспекции, а также для легкого отслеживания неисправностей системы подвески был введен пункт касательно видимости всех креплений подвески болида.

Раздел 2.4 уведомляет о необходимости использовать контрящие приспособления на автомобилях с конструкцией «моногойка». Кроме того, для стандартного принципа крепления колеса к ступице разрешается использовать исключительно крепеж, изготовленный из стали» [26].

«В разделе 2.5 сказано, что команда должна иметь два типа шин: сухие и дождевые (для езды по мокрой поверхности). Кроме того, нельзя использовать шины от разных производителей (а также с различным составом резины) на одной оси. Также для безопасности были введены правила относительно износа протектора, он не может быть меньше 2,4 мм, а также относительно самих канавок протектора. Для получения честных результатов на соревнованиях регламент запрещает использование специальных составов и приспособлений для увеличения сцепления с дорогой.

Рулевая система также должна быть спроектирована по правилам.

Т 2.6.1 Системы рулевого управления, использующие тросы или ремни для приведения в действие, запрещены. Это не относится к автономным приводам рулевого управления.

Т 2.6.2 Рулевое колесо должно напрямую механически приводить в действие передние колеса.

Т 2.6.3 Система рулевого управления должна иметь надежные ограничители поворота, предотвращающие блокировку рулевых тяг. Стопоры должны быть размещены на рейке и должны препятствовать контакту шин и дисков с другими деталями. Управление рулевым управлением должно быть возможно во время стоянки.

Т 2.6.4 Допустимый свободный ход системы рулевого управления ограничивается общим значением 7° , измеренным на рулевом колесе.

Т 2.6.5 Рулевое колесо должно крепиться к колонке быстроразъемным соединением. Водитель должен иметь возможность управлять быстроразъемным соединением, находясь в обычном положении вождения в перчатках.

Раздел 2.8 также регулирует безопасность. Наименьшая колея гоночного автомобиля не может отличаться от большей колеи больше чем на 25 процентов» [5].

1.2 Сравнительный анализ конструкций подвески гоночных болидов класса «Формула Студент» зарубежных команд

Проведение сравнения конструкций конкурентов является важным этапом в процессе проектирования, особенно в высококонкурентных отраслях, таких как автомобилестроение, электроника и другие технологии. Это позволяет не только выявить сильные и слабые стороны существующих решений, но и определить направления для улучшения собственного продукта.

Во-первых, анализ конструкций конкурентов помогает понять текущие тенденции на рынке и предпочтения потребителей. Изучая успешные модели и их характеристики, проектировщики могут адаптировать свои разработки к требованиям целевой аудитории, что увеличивает шансы на успешный выход продукта на рынок.

Во-вторых, сравнение конструкций позволяет выявить инновационные решения и технологии, которые могут быть применены в собственных проектах. Это может касаться как материалов, так и методов производства или дизайна. Использование передовых технологий может значительно повысить конкурентоспособность нового продукта.

Кроме того, анализ конкурентов помогает избежать повторения ошибок, допущенных другими компаниями. Понимание причин неудач определенных моделей или решений позволяет проектировщикам заранее

учитывать возможные риски и разрабатывать более надежные и эффективные конструкции.

Также важно отметить, что сравнение конструкций способствует оптимизации затрат на разработку. Понимание того, какие элементы конструкции являются наиболее эффективными с точки зрения стоимости и производительности, позволяет сократить время и ресурсы на создание нового продукта.

На рисунке 1 представлена конструкция передней подвески одной из команд.



Рисунок 1 – Конструкция передней подвески с системой pull-rod

На рисунке 1 представлена конструкция передней подвески с системой pull-rod. В данном случае при движении колеса вверх, при возникновении вертикальной нагрузки, сила передается от шины на кулак подвески, после чего переходит большая часть силы на верхний рычаг подвески через пул род

на коромысло подвески, а уже через плечо коромысла передается на амортизатор.

В данной конструкции хотелось бы отметить, что передаточное число, а именно коэффициент, описывающий отношение перемещения колеса к перемещению штока амортизатора примерно равно 0.9. Кроме того, хотелось бы отметить, что данное передаточное отношение не реализуется в полной мере по геометрическим соображениям, можно заметить, что тянущая тяга пуш род образует тупой угол с коромыслом, передающим усилие на амортизатор, а это означает, что часть усилия, приходящего на коромысло будет передаваться не на амортизатор, а на коромысло, причем усилие будет вырывающим.

Также хотелось бы заметить конструкцию поворотного кулака. Он выполнен из алюминия, что позволяет снизить вес неподрессоренной массы и улучшить стабильность контакта колеса с дорогой, и более того, можно заметить, что рулевая сошка демонтируемая, а значит команда может заменять данную часть рулевого кулака, тем самым изменяя процент Аккермана, а также углы поворота управляемых колес.

«На рисунке 2 представлена конструкция передней подвески с системой push-rod. В данном случае при движении колеса вверх, при возникновении вертикальной нагрузки, сила передается от шины на кулак подвески, после чего переходит большая часть силы на нижний рычаг подвески через пуш род на коромысло подвески, а уже через плечо коромысла передается на амортизатор» [6].

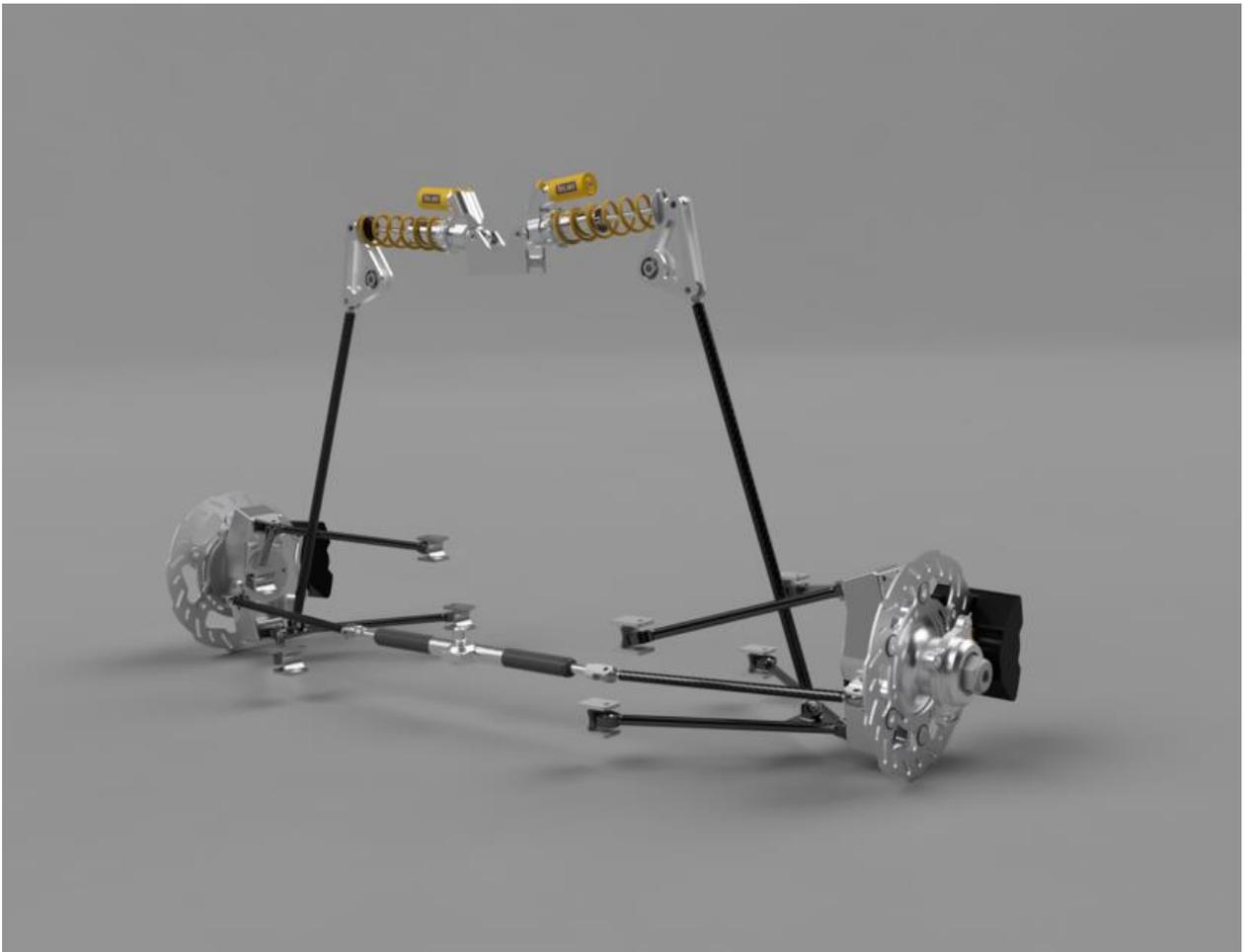


Рисунок 2 – Конструкция передней подвески с системой push-rod

На рисунке 2 можно увидеть схему передней подвески с системой push-rod. Можно увидеть, что команда использует алюминиевые фрезерованные кулаки подвески для уменьшения неподрессоренной массы, а также фрезерованные алюминиевые ступицы и перфорированные тормозные диски, что в совокупности дает неплохое снижение массы на каждое из колес. Можно увидеть, что геометрия передней подвески спроектирована таким образом, чтобы максимально повисить центр крена автомобиля и снизить перераспределение массы при возникновении бокового ускорения. Хотелось бы отметить достаточно длинную толкающую тягу пуш род, это является не очень хорошим решением за счет того, что может возникать податливость конструкции, и для того, чтобы уменьшить данный эффект тяга должна

иметь либо большой момент инерции сечения трубы, чтобы иметь достаточное сопротивление изгибу, либо тяга должна быть короче.

На рисунке 3 можно увидеть схему передней подвески с толкающей тягой push rod, однако в данном случае тяга крепится не к нижнему рычагу подвески, а к верхнему.

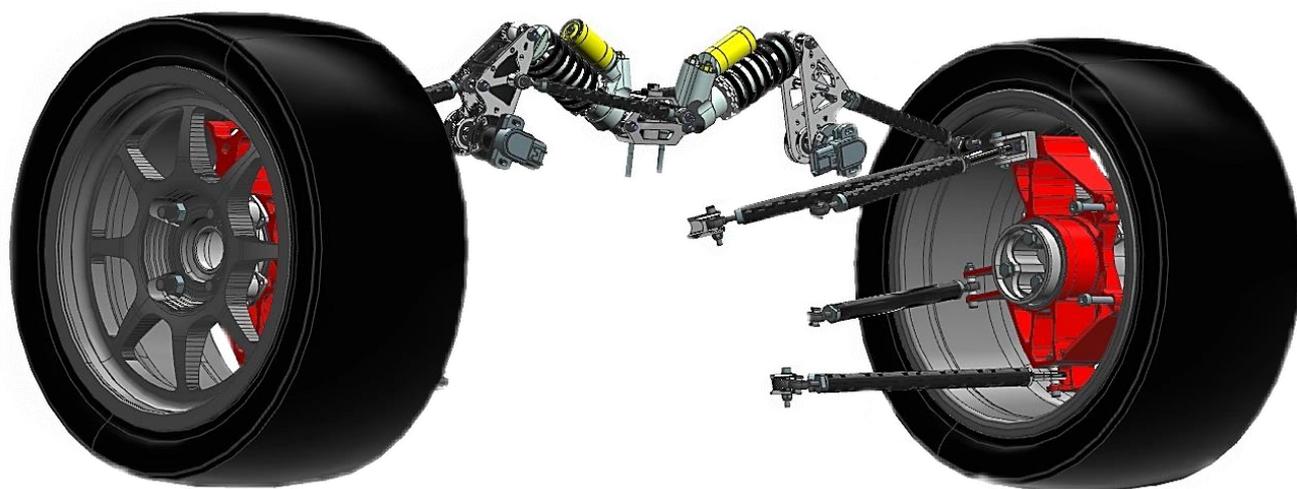


Рисунок 3 – Конструкция передней подвески с системой push-rod на верхний рычаг

Так же, как и на предыдущих примерах можно наблюдать фрезерованные алюминиевые кулаки подвески без возможности заменять рулевую сошку. Также можно увидеть, что фиксация рычагов подвески производится за счет присоединяемых скоб, также данная конструкция используется для регулировки развала передней подвески путем размещения проставочных пластин между кулаком и скобой. Также, что касается конструкции хотелось бы отметить, что все рычаги и тяги изготовлены из углеродного волокна для увеличения прочности и снижения массы. Также можно заметить довольно необычную конструкцию и компоновку стабилизатора поперечной устойчивости. Кроме того, можно увидеть, что команда установили датчики угла установки коромысла подвески для мониторинга положения колес в динамике. Что касается конструкторских

решений, то можно наблюдать несколько спорных моментов, таких как короткая тяга схождения, которая явно короче рычагов подвески, что может привести к очень нестабильному динамическому схождению, а также расположение и кинематическая схема толкающей тяги пуш род, которая явно при кинематическом перемещении имеет минимальное воздействие на коромысло подвески, что приводит к малому диапазону работы амортизатора.

На 4 рисунке можно увидеть интересное решение разделения кинематических перемещений на вертикальные и креновые. Можно увидеть, что один из амортизаторов работает при одноименном ходе подвески, а второй амортизатор работает только при разноименном ходе подвески, когда появляется крен.

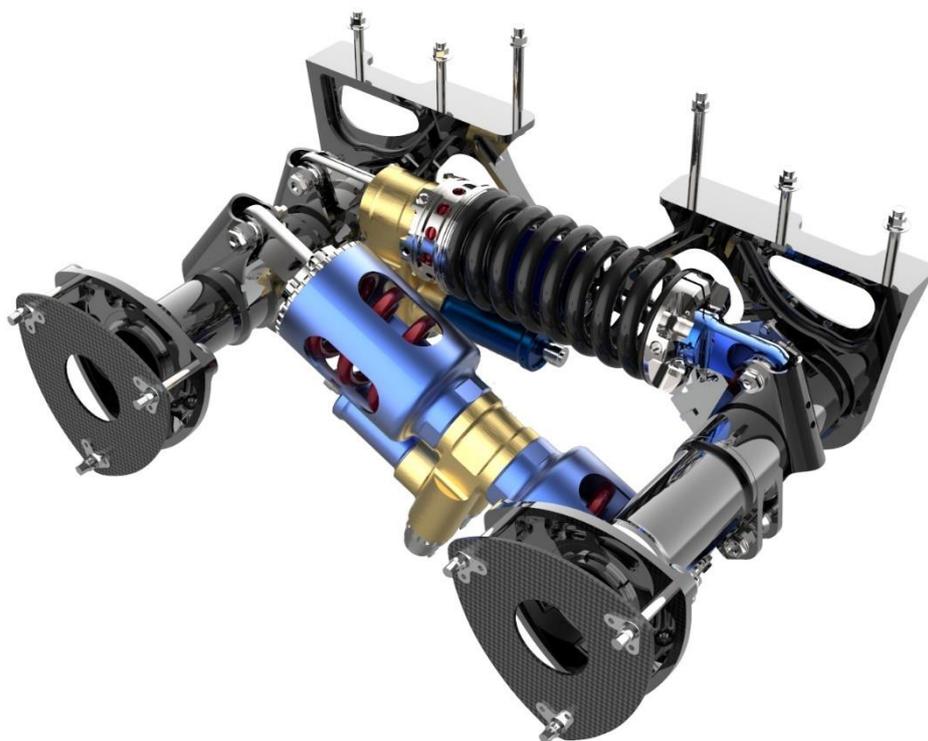


Рисунок 4 – Система подвески с разделением кинематического воздействия

Плюсом данной конструкции можно назвать возможность очень тонкой настройки подвески для каждого из видов нагрузки, возникающих в

динамике. Это позволяет путем регулировки амортизаторов, а также путем подбора пружин, проводить огромное количество настроек подвески. Минусом данной конструкции является сложность кинематической схемы, сложность реализации, а также масса конструкции.

На рисунке 5 можно увидеть систему передней подвески с моноамортизатором, а именно систему, использующую только один амортизатор на оба колеса.

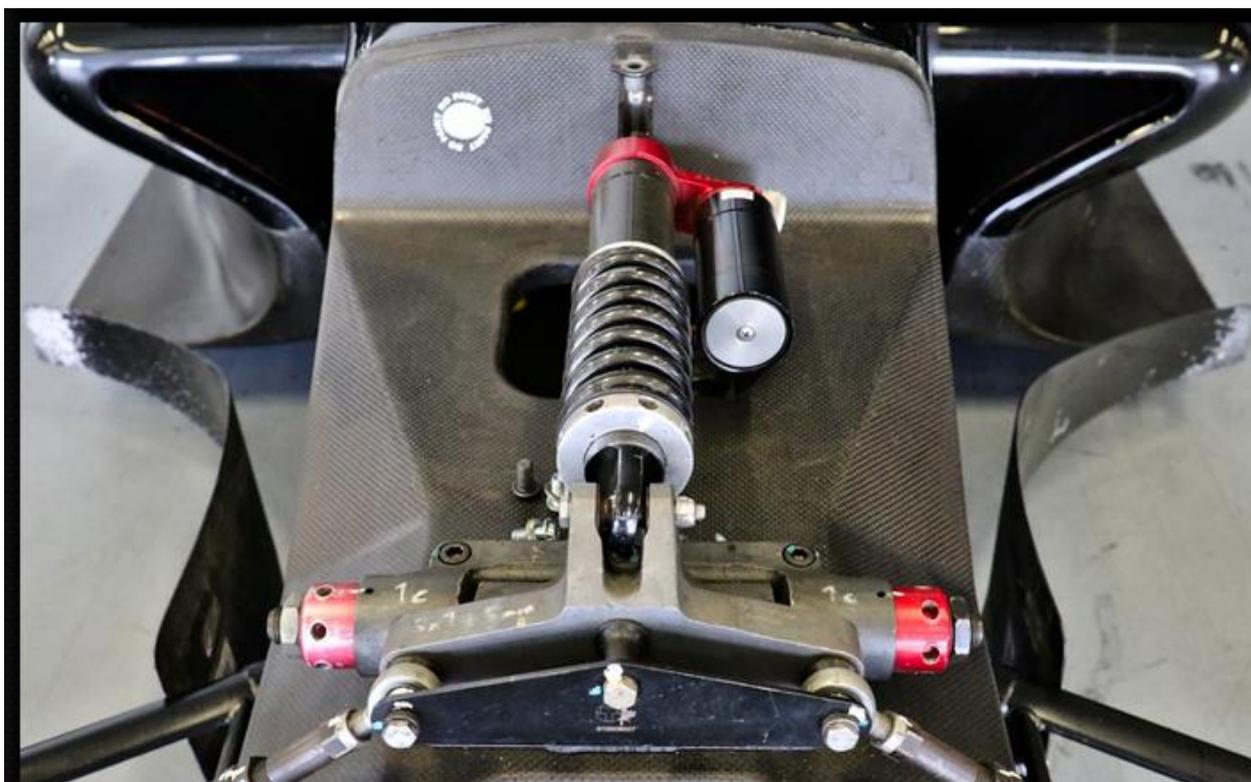


Рисунок 5 – Передняя подвеска с моноамортизатором

«Преимущества данного решения – значительное снижение веса, за счет исключения второй амортизаторной стойки, а также за счет исключения связующих компонентов подвески и сокращение стоимости оборудования подвески. Из основных недостатков можно выделить недостаточную жесткость подвески при крене и во время работы подвески в вертикальном направлении. Помимо этого, при данной схеме амортизатор работает только при одноименном ходе колес, но практически не задействован во время

прохождения поворота. Также достаточно сложно производить настройку подвески с данной компоновкой» [4].

На 6 рисунке можно увидеть конструкцию задней подвески с системой пуш род, а также с верхним расположением стабилизатора поперечной устойчивости и активной аэродинамикой

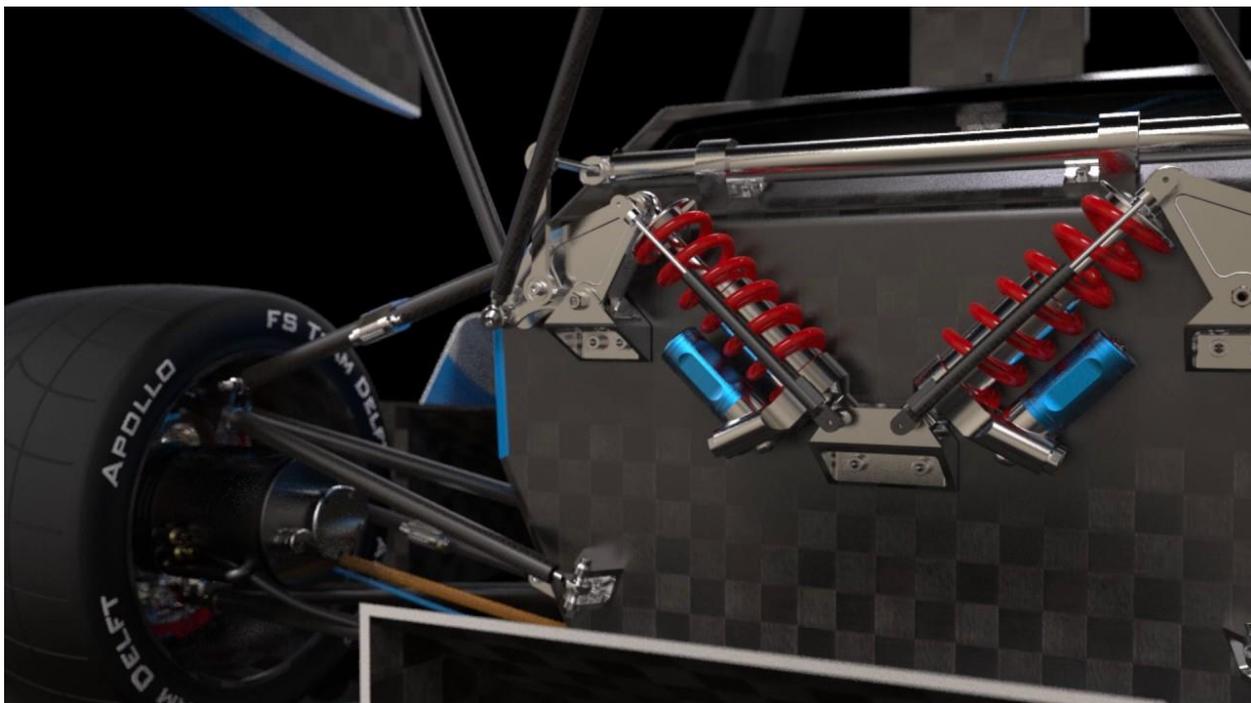


Рисунок 6 – Задняя подвеска с высоким центром крена и активной аэродинамикой

Из конструкции можно отметить такие моменты как:

- карбоновые кулаки подвески с использованием технологии мотор-колесо;
- антикреновая геометрия рычагов подвески;
- регулируемая толкающая тяга пуш род для регулировки клиренса задней подвески;
- использование 8-дюймовых колес для облегчения неподрессоренной массы;

– активная аэродинамика, регулируемая в зависимости от хода подвески.

Хотелось бы отметить, что стабилизатор поперечной устойчивости можно было бы разместить внизу для того, чтобы опустить центр тяжести, однако замечание не является критичным за счет того, что масса конструкции стабилизатора составляет незначительную часть от массы автомобиля.

На рисунке 7 можно увидеть интересную конструкцию задней подвески одной из команд «Формула Студент».

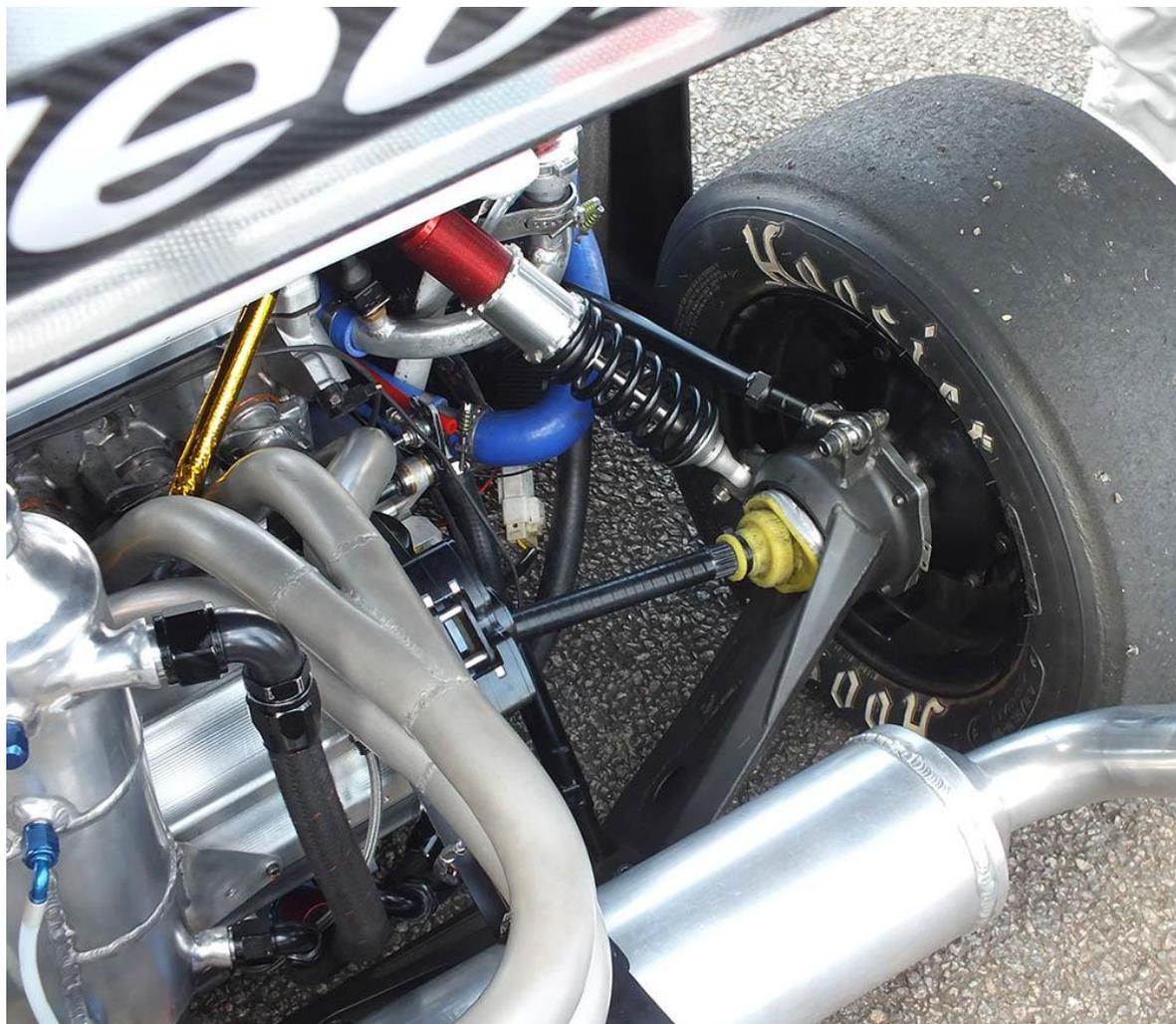


Рисунок 7 – Задняя подвеска команды, участвующей в соревнованиях «Формула Студент»

На рисунке 8 можно заметить, что команда не использует не стандартную двухрычажную подвеску. В данном случае кулак подвески играет роль одновременно и верхнего и нижнего рычага, тяга схождения играет роль реактивной тяги, а амортизатор крепится непосредственно к кулаку подвески. Это достаточно редкая конструкция в рамках соревнований «Формула Студент», однако не запрещенная регламентом соревнований.

Из негативных моментов хотелось бы отметить, что при такой конструкции рычаг, который является частью кулака, имеет жесткую фиксацию без шарниров, что ограничивает степени свободы при кинематическом перемещении колеса. В таком случае скорее всего команда может иметь большие отклонения по динамическому развалу, однако не исключено, что команда просчитала динамический развал, и проблем с этим у команды не возникает.

На рисунке 8 изображена классическая схема задней подвески с двухрычажной компоновкой, а также толкающей тягой пуш род, приходящей к кулаку подвески.

У данной конструкции подвески присутствует большое количество недостатков, таких как:

- стальной сварной кулак подвески в сочетании с узкими стальными колесными дисками, а также в сочетании с тяжелыми гражданскими шинами с низким коэффициентом сцепления, для реализации сцепления которых необходимо будет иметь хорошую прижимную аэродинамическую силу;
- короткие рычаги подвески, что в свою очередь увеличивает отклонения по динамическому развалу;
- большое передаточное отношение для передачи усилия на стойку амортизатора, что в свою очередь делает подвеску очень мягкой;

Однако стоит заметить несколько интересных решений, применяемых в данной конструкции, а именно регулировка развала за счет шарнира, установленного на нижнем рычаге подвески, а также стоит отметить, что за

счет такой конструкции команда ограничила изменение схождения при вертикальном ходе колеса за счет верхнего рычага подвески.



Рисунок 8 – Задняя подвеска команды FSAE

Выводы по разделу

В данном разделе мы провели подробный анализ основного регламента соревнований «Формула Студент» на предмет требований, относящихся непосредственно к подвеске болида, а также провели подробный сравнительный анализ существующих конструкций коночных болидов класса «Формула Студент».

2 Теоретические факторы, учитываемые при проектировании подвески автомобиля

Грамотно спроектированная подвеска и кинематическая схема автомобиля играют ключевую роль в обеспечении его безопасности, управляемости и комфорта. Подвеска отвечает за связь между кузовом автомобиля и колесами, а также за поглощение ударов от неровностей дороги. Правильная настройка подвески позволяет минимизировать колебания кузова, что способствует улучшению сцепления колес с дорогой и повышает устойчивость автомобиля на различных типах покрытия.

Кинематическая схема автомобиля определяет, как различные элементы подвески взаимодействуют друг с другом и с кузовом. Это влияет на характеристики движения, такие как угол наклона колес при поворотах, изменение высоты кузова при загрузке и динамику поведения автомобиля в различных условиях. Хорошо спроектированная кинематическая схема позволяет добиться оптимального распределения нагрузок на колеса, что в свою очередь улучшает управляемость и снижает износ шин [21].

Кроме того, качественная подвеска способствует повышению комфорта пассажиров, так как эффективно гасит вибрации и удары. Это особенно важно для автомобилей, предназначенных для длительных поездок или использования в сложных дорожных условиях. В итоге, грамотное проектирование подвески и кинематической схемы не только улучшает эксплуатационные характеристики автомобиля, но и повышает его надежность и долговечность, что является важным аспектом для любого автопроизводителя.

Anti-dive и anti-squat геометрия подвески гоночного автомобиля играют критически важную роль в управляемости, стабильности и общей производительности машины на трассе. Эти концепции относятся к тому, как подвеска реагирует на нагрузки, возникающие при торможении и ускорении, что особенно актуально в условиях высоких скоростей и резких маневров.

Anti-dive геометрия предназначена для минимизации наклона передней части автомобиля вниз при торможении. Когда гонщик резко тормозит, центры масс автомобиля смещаются вперед, что может привести к избыточному наклону передней оси. Это не только ухудшает сцепление передних колес с дорогой, но и может вызвать потерю контроля над автомобилем. Правильная настройка anti-dive позволяет сохранить более стабильное положение кузова, улучшая сцепление и управляемость, что особенно важно на поворотах и при резком торможении.

С другой стороны, anti-squat геометрия отвечает за предотвращение наклона задней части автомобиля вверх при ускорении. Когда гонщик нажимает на педаль акселератора, задняя ось может подниматься из-за перераспределения веса, что может привести к потере сцепления задних колес с дорогой. Это явление может вызвать недостаточную поворачиваемость и даже срыв задней оси. Эффективная настройка anti-squat помогает поддерживать оптимальное распределение веса между осями, обеспечивая лучшее сцепление и стабильность при разгоне.

Вместе эти два аспекта геометрии подвески способствуют улучшению общей динамики автомобиля. Они позволяют гонщику более точно контролировать поведение машины в различных условиях, что критически важно для достижения высоких результатов на трассе. Кроме того, правильная настройка этих параметров помогает снизить износ шин и других компонентов подвески, увеличивая срок службы автомобиля и снижая затраты на его обслуживание. В итоге влияние anti-dive и anti-squat геометрии в подвеске гоночного автомобиля невозможно переоценить – они являются основными факторами, определяющими как скорость, так и безопасность на треке.

«Если мы говорим о геометрии передней подвески продольного действия, то речь идет о геометрии anti-dive (анти-клевок). Необходимо представить схематично автомобиль сбоку, как это сделано на рисунке 9.

На изображении можно увидеть, что если мы соединим точки

крепления рычагов подвески и продлим эти воображаемые линии до тех пор пока они не пересекутся, назовем это точкой А, затем проведем еще одну воображаемую линию соединяющую точку пятна контакта переднего колеса и точку В (высота центра масс автомобиля указанная на расстоянии колесной базы умноженной на процентное соотношение тормозного баланса автомобиля), то мы получим точку С (точка на линии от точки пятна контакта до точки В), которая располагается ровно под точкой А. Именно процентное отношение высот точки А и точки С показывает нам процент анти-клевкового эффекта» [2].

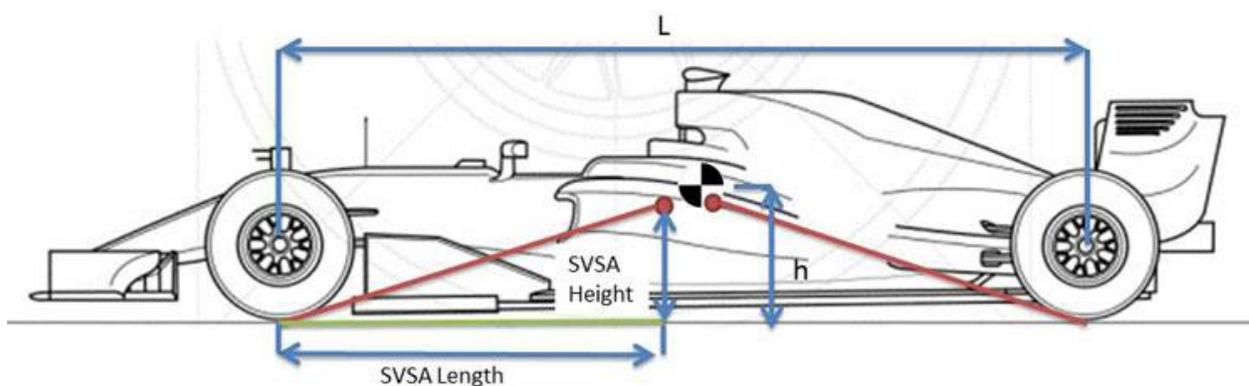


Рисунок 9 – Геометрия, препятствующая продольному крену автомобиля

«Формула анти-клевкового эффекта имеет вид:

$$\%Anti - Dive = A/C \cdot 100\%, \quad (1)$$

где: %Anti-Dive – анти-клевковый эффект в процентном соотношении;

A – высота точки пересечения линий, проведенных через точки крепления рычагов подвески, м;

C – высота точки расположенной ровно под или над точкой A , и размещенной на линии, проходящей от точки пятна контакта колеса с дорогой до точки B , м» [25].

Anti-dive геометрия подвески автомобиля определяет, как кузов реагирует на нагрузки при торможении, и может быть выражена в процентах, отражающих степень уменьшения наклона передней части автомобиля. Влияние различных значений anti-dive – 100%, более 100% и менее 100% – существенно различается и оказывает значительное влияние на управляемость и стабильность автомобиля.

Когда значение anti-dive составляет 100%, это означает, что наклон кузова при торможении полностью компенсируется. В этом случае автомобиль сохраняет стабильное положение, что позволяет передним колесам поддерживать максимальное сцепление с дорогой. Это особенно важно для гоночных автомобилей, где точность управления и предсказуемость поведения машины критически важны. При таком значении водителю легче контролировать автомобиль в условиях резкого торможения и маневрирования.

Если значение anti-dive превышает 100%, это может привести к избыточной жесткости передней подвески. В результате передняя часть автомобиля будет наклоняться вниз слишком сильно, что может вызвать потерю сцепления передних колес с дорогой. Это состояние может привести к ухудшению управляемости, особенно на поворотах, где требуется высокая степень контроля. Водитель может столкнуться с проблемами при входе в повороты или при резком торможении, что увеличивает риск потери контроля над автомобилем.

С другой стороны, если значение anti-dive составляет менее 100%, это означает, что кузов автомобиля будет наклоняться вперед при торможении. В

этом случае передние колеса могут терять сцепление с дорогой из-за перераспределения веса, что приводит к недостаточной поворачиваемости и снижению общей стабильности автомобиля. Это состояние может быть особенно опасным на высоких скоростях или в условиях агрессивного вождения, когда точность управления имеет решающее значение.

Таким образом, правильная настройка anti-dive геометрии является важным аспектом проектирования подвески гоночного автомобиля. Оптимальное значение позволяет достичь баланса между стабильностью и управляемостью, что критически важно для достижения высоких результатов на трассе.

Формула эффекта анти-приседания записывается таким образом:

$$\%Anti - Squat = A/C \cdot 100\%, \quad (2)$$

где: %Anti-Squat – эффект анти-приседания в процентном соотношении;

A – высота точки пересечения линий, проведенных через точки крепления рычагов подвески, м;

C – высота точки расположенной ровно под или над точкой A, и размещенной на линии 100 % анти-приседания, м.

Anti-squat геометрия подвески автомобиля определяет, как кузов реагирует на нагрузки при ускорении, и может быть выражена в процентах, отражающих степень уменьшения наклона задней части автомобиля. Влияние различных значений anti-squat – 100%, более 100% и менее 100% – существенно различается и оказывает значительное влияние на управляемость, сцепление и общую динамику автомобиля.

Когда значение anti-squat составляет 100%, это означает, что наклон задней части автомобиля при ускорении полностью компенсируется. В этом случае автомобиль сохраняет стабильное положение, что позволяет задним колесам поддерживать максимальное сцепление с дорогой. Это особенно

важно для гоночных автомобилей, где точность управления и предсказуемость поведения машины критически важны. При таком значении водителю легче контролировать автомобиль при резком разгоне, что способствует лучшему ускорению и стабильности на трассе.

Если значение anti-squat превышает 100%, это может привести к избыточной жесткости задней подвески. В результате задняя часть автомобиля будет подниматься слишком сильно при ускорении, что может вызвать потерю сцепления задних колес с дорогой. Это состояние может привести к недостаточной поворачиваемости и даже к срыву задней оси, особенно в условиях агрессивного вождения или на скользкой дороге. Водитель может столкнуться с проблемами при разгоне из поворотов или при резком старте, что увеличивает риск потери контроля над автомобилем.

С другой стороны, если значение anti-squat составляет менее 100%, это означает, что кузов автомобиля будет наклоняться назад при ускорении. В этом случае передние колеса могут терять сцепление с дорогой из-за перераспределения веса вперед, что приводит к ухудшению управляемости и снижению общей стабильности автомобиля. Это состояние может быть особенно опасным на высоких скоростях или в условиях агрессивного вождения, когда требуется высокая степень контроля.

Таким образом, правильная настройка anti-squat геометрии является важным аспектом проектирования подвески гоночного автомобиля. Оптимальное значение позволяет достичь баланса между стабильностью и управляемостью, что критически важно для достижения высоких результатов на трассе.

По аналогии с передней подвеской в случае, если мы увеличиваем сопротивление продольному крену не за счет упругих и демпфирующих элементов, то больше нагрузки будет приходиться именно на шины в точке пятна контакта, за счет чего может увеличиваться износ дорогостоящих гоночных шин.

«Следующий аспект, влияющий на поведение автомобиля на дороге

это центр поперечного крена автомобиля. Центр крена существует и для передней оси автомобиля, и для задней оси автомобиля. По своей сути центр крена является точкой относительно которой автомобиль кренился, а расстояние от центра крена до центра тяжести автомобиля является плечом приложения нагрузки при возникновении бокового ускорения. На рисунке 10 и 11 можно увидеть передний и задний центр крена автомобиля» [20].

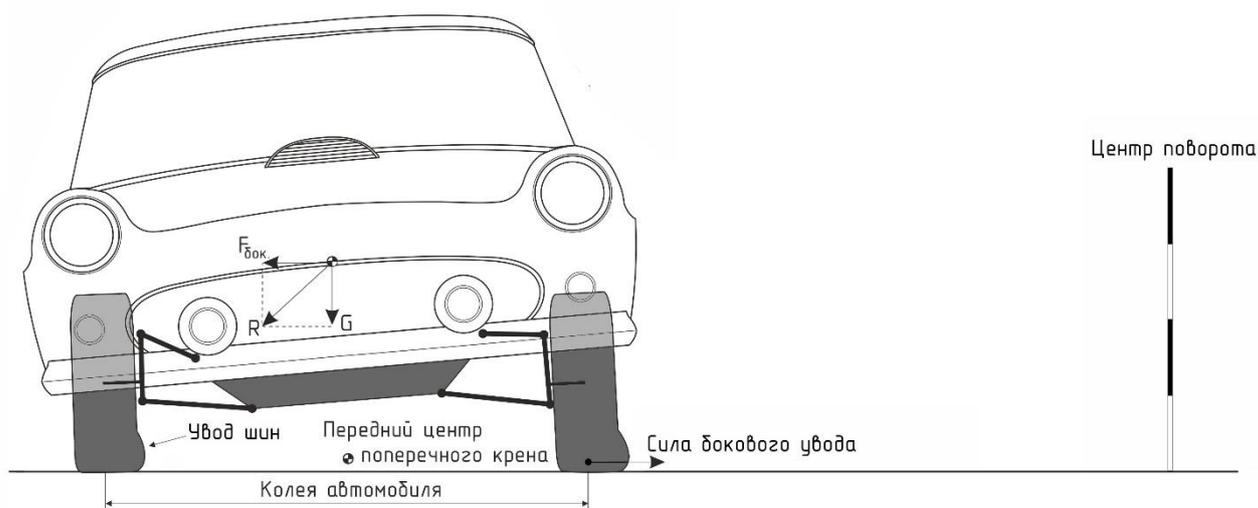


Рисунок 10 – Передний центр поперечного крена

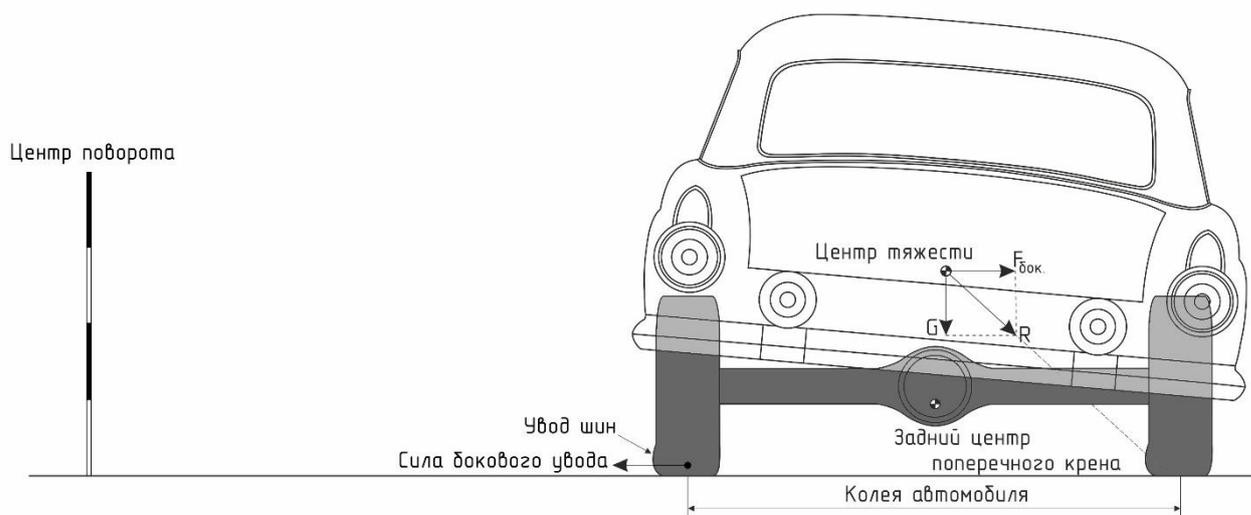


Рисунок 11 – Задний центр поперечного крена

«Соединив точку переднего и точку заднего центра крена линией, мы получим ось крена. Если мы проведем вертикальную линию от центра масс автомобиля до оси крена, то получим точку относительно которой кренится кузов автомобиля при появлении бокового ускорения.

Можно сделать вывод, что исходя из того, что расстояние от оси крена до центра масс автомобиля является плечом приложения нагрузки на подвеску во время крена, то если расстояние от оси крена до центра масс будет равно нулю, то автомобиль вовсе не будет крениться. Это действительно так, однако автомобиль будет похожим на повозку или тележку без какой-либо подвески. Когда это происходит, нагрузка на внутреннее колесо смещается на внешнее колесо во время поворота, что облегчает потерю сцепления, а центробежная сила непосредственно воздействует на внешнее колесо, увеличивая степень деформации шины. Другими словами, за счет уменьшения эффективной площади контакта уменьшается и адгезия.

Передний и задний центр крена отличается по высоте, для более загруженной оси центр крена должен быть выше, чем для разгруженной оси. Таким образом, для заднемоторного автомобиля центр крена на задней оси будет пропорционально выше, чем на передней оси.

В основном, для болидов «Формула Студент» применяется анти-креновая геометрия, и чаще всего встречаются автомобили с положительным центром крена и для передней оси, и для задней оси. Однако из-за того, что центр масс у автомобилей такого класса расположен достаточно низко, то высота центров крена от земли чаще всего в диапазоне от 10 до 80 мм» [9].

Поворотный кулак автомобиля – это ключевой элемент подвески, который соединяет колесо с остальной частью подвески и обеспечивает возможность поворота колеса вокруг вертикальной оси. Он играет важную роль в управляемости автомобиля, так как именно через кулак передается управление от рулевого механизма на колеса. Основная функция поворотного кулака заключается в обеспечении вращения колеса при

повороте, а также в поддержании правильного угла наклона колеса относительно дороги, что критически важно для сцепления и стабильности.

Геометрические параметры поворотного кулака имеют значительное влияние на управляемость автомобиля. К основным параметрам можно отнести угол развала, угол схождения, высоту центра вращения и радиус поворота. Угол развала определяет наклон колес относительно вертикали и влияет на распределение нагрузки на шины при поворотах. Правильный угол развала способствует равномерному износу шин и улучшает сцепление, особенно в поворотах. Если угол развала слишком велик или мал, это может привести к ухудшению управляемости и снижению сцепления.

Угол схождения – это угол между направлениями колес относительно друг друга. Он влияет на стабильность автомобиля при движении по прямой и в поворотах. Неправильный угол схождения может вызвать неравномерный износ шин и ухудшение управляемости, что особенно заметно при высоких скоростях или резких маневрах.

Высота центра вращения (или точки поворота) также является важным параметром. Она определяет, как подвеска будет реагировать на нагрузки при торможении и ускорении. Если центр вращения расположен слишком высоко или низко, это может привести к нежелательным эффектам, таким как избыточная или недостаточная жесткость кузова при маневрировании. Оптимальная высота центра вращения помогает поддерживать баланс между стабильностью и маневренностью.

Радиус поворота кулака влияет на радиус поворота автомобиля в целом. Большой радиус позволяет автомобилю легче проходить повороты, но может снизить маневренность на малых скоростях. Напротив, меньший радиус улучшает маневренность, но может привести к большему усилию на руле и ухудшению устойчивости на высоких скоростях.

Таким образом, правильная настройка геометрических параметров поворотного кулака является критически важной для достижения оптимальной управляемости автомобиля. Эти параметры влияют не только

на сцепление с дорогой и устойчивость при движении, но также определяют комфорт водителя и пассажиров во время поездки. В результате тщательная проработка этих аспектов позволяет создать автомобиль с предсказуемым поведением на дороге, что особенно важно как для обычных автомобилей, так и для гоночных машин, где каждая деталь имеет значение для достижения высоких результатов.

«Рассмотрим подробнее такие геометрические параметры поворотного кулака как угол поперечного наклона шкворня, угол продольного наклона шкворня (кастер), геометрию Аккермана. А также рассмотрим настраиваемые параметры, такие как угол схождения и развала.

Угол поперечного наклона шкворня, также известный как угол наклона оси поворотного кулака, играет важную роль в управляемости автомобиля. Этот угол определяет, как колесо взаимодействует с дорогой при поворотах и как оно реагирует на нагрузки. Правильный угол поперечного наклона шкворня способствует улучшению сцепления колес с дорогой, что в свою очередь повышает стабильность и управляемость автомобиля.

Когда угол поперечного наклона шкворня оптимален, это позволяет колесам сохранять правильное положение относительно дороги во время маневров.

Это важно для обеспечения равномерного распределения нагрузки на шины, что способствует лучшему сцеплению и уменьшает риск скольжения. Если же угол наклона слишком велик или мал, это может привести к ухудшению управляемости: автомобиль может стать менее предсказуемым в поворотах, а также увеличивается вероятность неравномерного износа шин.

Плечо обкатки – это расстояние от точки контакта шины с дорогой до оси поворота колеса. Этот параметр также существенно влияет на поведение автомобиля. Чем больше плечо обкатки, тем больше момент силы передается на подвеску при маневрировании. Это может привести к улучшению сцепления и устойчивости автомобиля в поворотах, так как увеличивается сила, действующая на шину в момент ее контакта с дорогой» [22].

Однако слишком большое плечо обкатки может вызвать

нежелательные эффекты, такие как увеличение усилия на руле и ухудшение маневренности автомобиля. Водителю может быть сложнее управлять автомобилем на малых скоростях или при резких маневрах. Кроме того, увеличение плеча обкатки может привести к большему износу компонентов подвески из-за увеличенных нагрузок.

Таким образом, правильная настройка угла поперечного наклона шкворня и плеча обкатки является критически важной для достижения оптимальной управляемости автомобиля. Эти параметры влияют не только на сцепление с дорогой и устойчивость при движении, но также определяют комфорт водителя и пассажиров во время поездки. Тщательная проработка этих аспектов позволяет создать автомобиль с предсказуемым поведением на дороге, что особенно важно как для обычных автомобилей, так и для спортивных машин, где каждая деталь имеет значение для достижения высоких результатов.

На рисунке 12 можно увидеть возможные настройки плеча обкатки автомобиля.

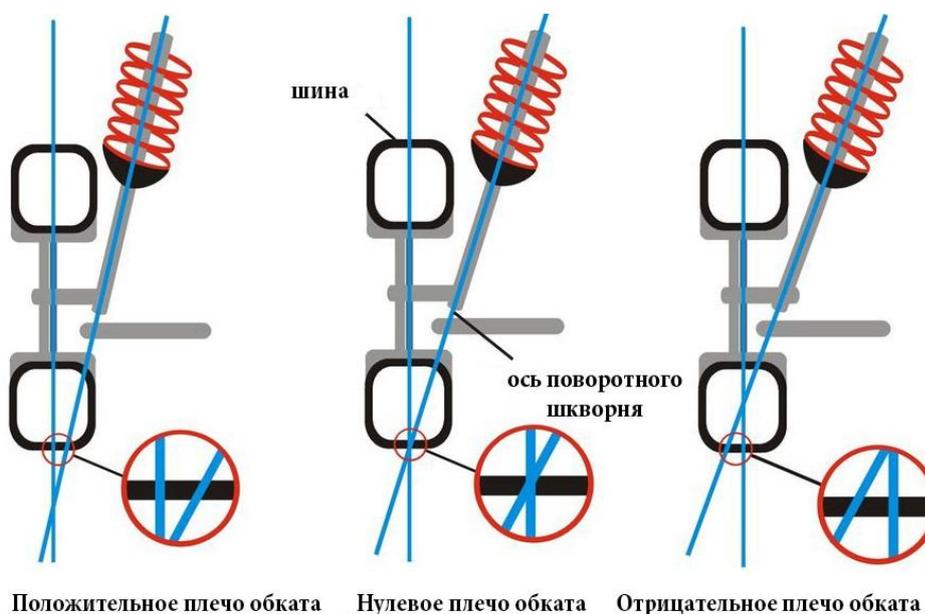


Рисунок 12 – Настройки плеча обкатки автомобиля

Нулевое плечо обкатки означает, что ось поворота колеса совпадает с

точкой контакта шины с дорогой. В этом случае автомобиль будет иметь нейтральные характеристики управляемости. Это состояние обеспечивает хорошую стабильность и предсказуемость поведения автомобиля как в прямолинейном движении, так и в поворотах. Однако нулевое плечо обкатки может привести к недостаточной реакции на рулевое управление, особенно при высоких скоростях, так как момент силы, действующий на колесо, минимален. В результате водитель может не чувствовать достаточной обратной связи от автомобиля.

Положительное плечо обкатки возникает, когда ось поворота колеса расположена впереди точки контакта шины с дорогой. «Это состояние обычно приводит к улучшению сцепления и устойчивости автомобиля в поворотах. Положительное плечо обкатки создает дополнительный момент силы, который помогает колесам оставаться в контакте с дорогой при маневрировании. Это может быть особенно полезно для спортивных автомобилей или автомобилей, предназначенных для агрессивного вождения» [11]. Однако слишком большое положительное плечо может привести к увеличению усилия на руле и ухудшению маневренности на малых скоростях, что делает автомобиль менее удобным для городских условий.

Отрицательное плечо обкатки возникает, когда ось поворота колеса расположена позади точки контакта шины с дорогой. Это состояние может привести к снижению сцепления и ухудшению устойчивости автомобиля при поворотах. Отрицательное плечо обкатки создает момент силы, который может вызывать нежелательные эффекты, такие как избыточная поворачиваемость или недостаточная предсказуемость поведения автомобиля в маневрах. Водитель может столкнуться с трудностями при управлении автомобилем на высоких скоростях или в условиях резких маневров.

Таким образом, выбор между нулевым, положительным и отрицательным плечом обкатки зависит от целей эксплуатации автомобиля и

предпочтений водителя. Правильная настройка этого параметра позволяет достичь оптимального баланса между стабильностью и маневренностью, что критически важно для обеспечения безопасного и комфортного вождения как на обычных дорогах, так и на гоночных трассах.

«Положительное плечо обкатки часто применяется для заднеприводных автомобилей, так как такая настройка помогает пилоту сохранять прямолинейное движение даже при отпущенном рулевом колесе. Часто такая настройка применяется на спортивных автомобилях. Однако присутствуют свои минусы, такие как неравномерный износ дорогостоящих гоночных шин, а также часто пилоты жалуются на сильный противодействующий момент на рулевом колесе, что препятствовало равномерному прохождению поворотов. Кроме того, сильно положительное плечо обкатки может привести к чрезвычайно тяжелому рулевому колесу, что абсолютно не допустимо в спорте, пилот будет сильно уставать, а результаты на трассе ухудшаться. Большое положительное плечо обкатки применялось только в старинные времена, когда автомобили имели очень узкие колеса с минимальным пятном контакта шины с дорожным покрытием.

Отрицательное плечо обкатки – самое распространенное решение в автомобилестроении за последнее время, так как такая настройка является наиболее стабильной и безопасной для пилота, чем любая другая настройка. Дело в том, что настройка с отрицательным плечом обкатки позволяет сгенерировать определенные усилия, которые уменьшат любую непреднамеренную водителем тенденцию к изменению направления движения, которая в случае с положительной настройкой может иметь место быть» [13].

Угол кастера – это один из ключевых параметров геометрии подвески автомобиля, который определяет угол наклона оси поворота колеса относительно вертикали в профильном виде. Он измеряется в градусах и влияет на множество аспектов управляемости и стабильности автомобиля.

Основная функция угла кастера заключается в обеспечении устойчивости автомобиля на прямых участках дороги и при поворотах. При положительном угле кастера передние колеса наклонены назад от вертикали, что создает эффект самовыравнивания. Это означает, что при движении вперед колеса стремятся вернуться в нейтральное положение после поворота, что способствует более стабильному поведению автомобиля на дороге.

Угол кастера также влияет на усилие, необходимое для управления автомобилем. При большом угле кастера рулевое управление становится более "тяжелым", но это обеспечивает лучшую обратную связь от дороги и повышает точность управления. В то же время слишком большой угол может привести к ухудшению маневренности, особенно на малых скоростях.

Кроме того, угол кастера влияет на износ шин. Правильно настроенный угол способствует равномерному распределению нагрузки на шины, что увеличивает их срок службы и улучшает сцепление с дорогой. Важно отметить, что оптимальные значения угла кастера могут варьироваться в зависимости от типа автомобиля и его назначения – спортивные автомобили требуют одного подхода, тогда как внедорожники могут иметь другие предпочтения.

Таким образом, угол кастера является важным элементом настройки подвески автомобиля, который напрямую влияет на его управляемость, стабильность и комфорт при движении. Правильная настройка этого параметра позволяет достичь баланса между маневренностью и устойчивостью, что критически важно для безопасности и удовольствия от вождения. Существует три настройки угла кастера в автомобиле, эти три настройки показаны на рисунке 13.



Рисунок 13 – Положительный, отрицательный и вертикальный углы кастера

Угол кастера может быть положительным, отрицательным или нулевым, и каждая из этих конфигураций имеет свои преимущества и недостатки, которые влияют на управляемость автомобиля.

Положительный кастер – это наиболее распространенная конфигурация, при которой ось поворота колеса наклонена назад от вертикали. Основное преимущество положительного кастера заключается в том, что он обеспечивает отличную устойчивость на высоких скоростях и способствует самовыравниванию колес после поворота. Это делает управление автомобилем более предсказуемым и комфортным, особенно на прямых участках дороги. Однако недостатком является то, что при малых скоростях, например, при маневрировании на парковке, управление может стать более тяжелым и требовать больших усилий от водителя.

Отрицательный кастер – это ситуация, когда ось поворота колеса наклонена вперед от вертикали. Такой угол редко используется в современных автомобилях, но может встречаться в некоторых специализированных транспортных средствах. Преимущества отрицательного кастера включают улучшенную маневренность на малых скоростях, что делает его полезным для автомобилей, которым требуется

высокая маневренность в ограниченных пространствах. Однако недостатком является ухудшение устойчивости на высоких скоростях и снижение обратной связи от дороги, что может привести к менее предсказуемому поведению автомобиля.

Нулевой кастер – это ситуация, когда ось поворота колеса находится строго вертикально. Эта конфигурация также встречается редко и обычно используется в специфических случаях. Преимущества нулевого кастера заключаются в том, что он обеспечивает нейтральное управление без значительных усилий со стороны водителя как на малых, так и на высоких скоростях. Однако недостатком является отсутствие эффекта самовыравнивания колес после поворота, что может привести к менее стабильному поведению автомобиля при движении по прямой.

В целом выбор угла кастера зависит от назначения автомобиля и предпочтений водителя. Положительный кастер обеспечивает хорошую стабильность и комфорт при движении на высоких скоростях, отрицательный – улучшает маневренность на малых скоростях, а нулевой кастер предлагает нейтральные характеристики управления. Правильная настройка угла кастера играет важную роль в обеспечении безопасности и удовольствия от вождения.

Далее рассмотрим геометрию Аккермана, которая имеет большое влияние на управляемость автомобиля. На рисунке 14 показаны три различные настройки геометрии Аккермана.

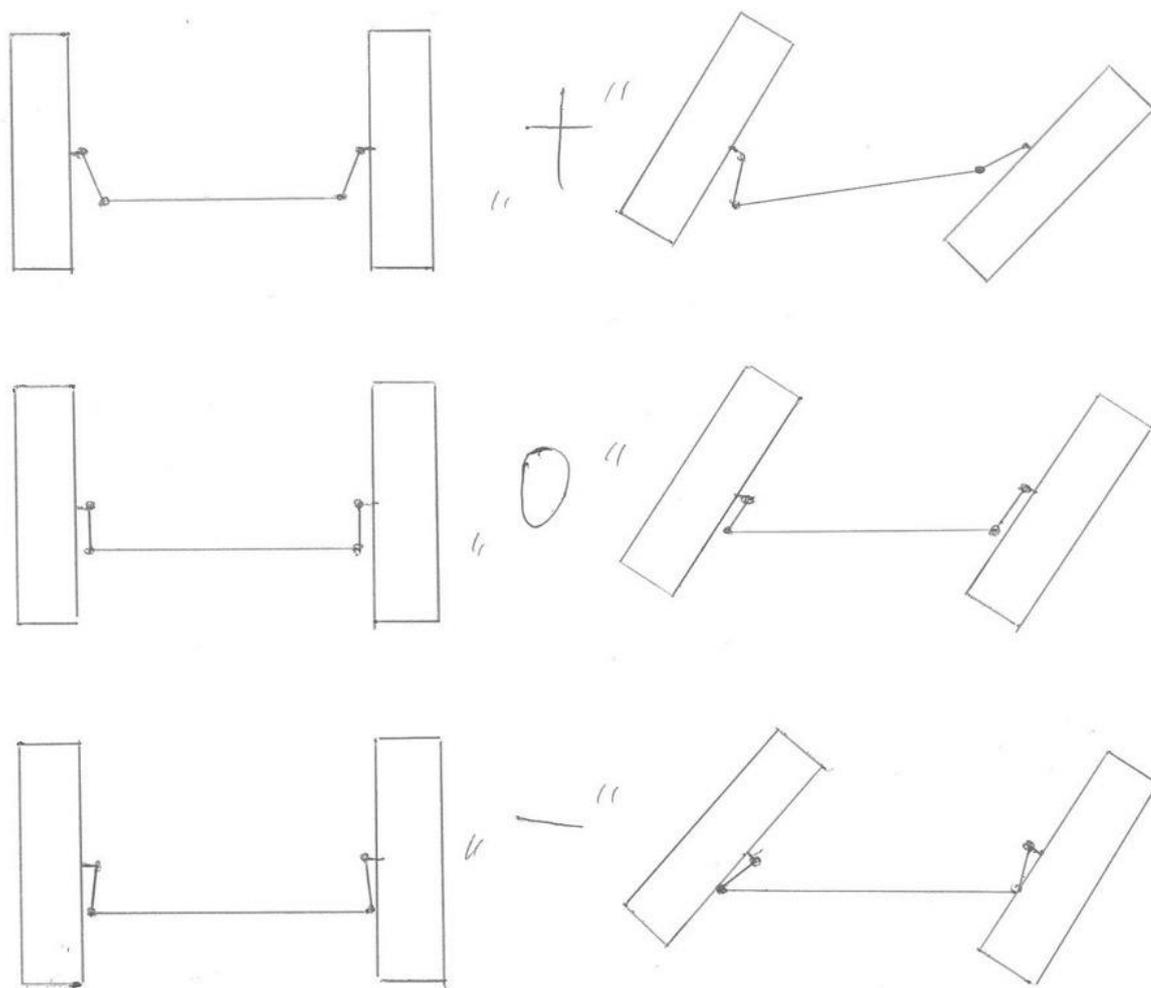


Рисунок 14 – Геометрия Аккермана

«Геометрия Аккермана – это принцип, который используется в конструкции рулевых систем автомобилей для обеспечения оптимального поворота колес при маневрировании. Основная идея заключается в том, что при повороте автомобиля внутренние и внешние колеса должны вращаться под разными углами, чтобы избежать скольжения и обеспечить эффективное сцепление с дорогой. Это достигается благодаря тому, что оси поворота колес расположены так, что линии, проведенные через точки касания колес с дорогой, пересекаются в одной точке, которая находится на продолжении оси задних колес» [27].

Преимущества геометрии Аккермана проявляются в улучшении

управляемости автомобиля. При правильной настройке рулевой системы внутреннее колесо поворачивает под большим углом, чем внешнее, что позволяет автомобилю более эффективно проходить повороты. Это снижает износ шин и улучшает сцепление с дорогой, так как колеса не скользят по поверхности во время маневра. В результате водитель получает более предсказуемое и стабильное поведение автомобиля на поворотах.

Однако недостатки могут возникнуть при неправильной настройке геометрии Аккермана. Если угол поворота колес не соответствует принципам Аккермана, это может привести к ухудшению управляемости и увеличению износа шин. Например, если внутреннее колесо не поворачивает достаточно сильно по сравнению с внешним, это может вызвать скольжение и потерю сцепления с дорогой. В то же время слишком сильный угол поворота внешнего колеса может привести к нестабильности автомобиля.

Кроме того, геометрия Аккермана также влияет на маневренность автомобиля на малых скоростях. В автомобилях с хорошей настройкой этой геометрии управление становится более легким и предсказуемым при парковке или в узких пространствах. Это особенно важно для городских автомобилей и легковых машин.

В заключение геометрия Аккермана играет ключевую роль в управляемости автомобиля, обеспечивая оптимальное взаимодействие между передними колесами при поворотах. Правильная настройка этой системы способствует улучшению сцепления с дорогой, снижению износа шин и повышению общей стабильности автомобиля во время движения.

Помимо неизменяемой геометрии подвески, необходимо также рассмотреть регулируемые углы подвески, а именно такие статические углы, как развал и схождение

Угол развала – это один из важных параметров геометрии подвески автомобиля, который определяет наклон колес относительно вертикали в профильном виде. Угол развала может быть положительным (колеса наклонены наружу от автомобиля) или отрицательным (колеса наклонены

внутри). Этот угол оказывает значительное влияние на управляемость, сцепление с дорогой и износ шин.

Положительный угол развала часто используется в спортивных автомобилях и внедорожниках. Он способствует увеличению площади контакта шины с дорогой при поворотах, что улучшает сцепление и стабильность. Это особенно важно при высоких скоростях и в условиях агрессивного вождения, когда боковые силы могут быть значительными. Однако слишком большой положительный угол развала может привести к неравномерному износу шин, так как внешние края будут подвергаться большему давлению.

Отрицательный угол развала, напротив, часто применяется в легковых автомобилях и некоторых спортивных моделях. Он помогает улучшить управляемость на прямых участках дороги и обеспечивает более предсказуемое поведение автомобиля при маневрировании. При отрицательном угле развала колеса наклонены внутрь, что позволяет шинам лучше справляться с боковыми силами во время поворотов. Однако слишком большой отрицательный угол может привести к снижению сцепления на прямых участках дороги и увеличению износа внутренней части шин.

Оптимальный угол развала зависит от типа автомобиля и его назначения. Например, для городских автомобилей важнее обеспечить комфортное вождение и равномерный износ шин, тогда как для спортивных автомобилей приоритетом является высокая управляемость и сцепление на поворотах. Важно также учитывать, что изменения угла развала могут влиять на другие параметры подвески, такие как угол схождения и кастер, что требует комплексного подхода к настройке.

В заключение угол развала является критически важным элементом настройки подвески автомобиля, который влияет на его управляемость, сцепление с дорогой и износ шин. Правильная настройка этого параметра позволяет достичь баланса между стабильностью на прямых участках дороги и маневренностью в поворотах, что критически важно для безопасности и

комфорта водителя.

На рисунке 15 можно увидеть три различные настройки угла развала для автомобилей.

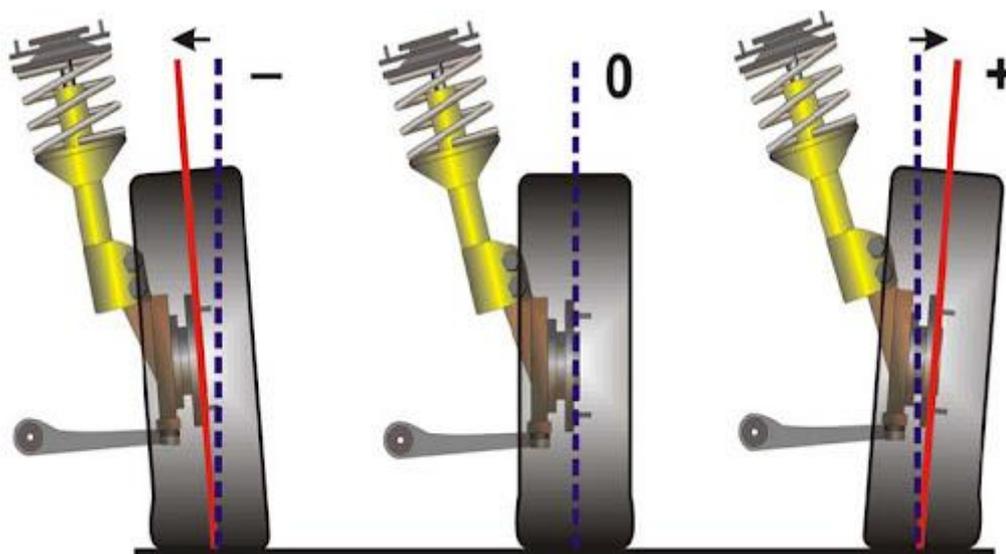


Рисунок 15 – Три настройки угла развала

Угол развала автомобиля может быть нулевым, положительным или отрицательным, и каждая из этих конфигураций имеет свои преимущества и недостатки, которые влияют на управляемость, сцепление с дорогой и износ шин.

Нулевой угол развала означает, что колеса расположены вертикально относительно дороги. Это положение обеспечивает равномерное распределение нагрузки на шины, что способствует их равномерному износу. Нулевой угол развала обычно используется в легковых автомобилях, так как он обеспечивает хороший баланс между комфортом и управляемостью. Однако при этом могут возникнуть ограничения в сцеплении при поворотах, особенно на высоких скоростях, так как шины не имеют дополнительного наклона для увеличения площади контакта с дорогой.

Положительный угол развала характеризуется тем, что верхняя часть колеса наклонена наружу от автомобиля. Это может улучшить сцепление при

поворотах, так как увеличивается площадь контакта шины с дорогой. Положительный угол развала часто используется в спортивных автомобилях и внедорожниках для повышения устойчивости на сложных участках. Однако его недостатком является неравномерный износ шин – внешние края будут подвергаться большему давлению, что может привести к более быстрому износу и необходимости более частой замены шин.

Отрицательный угол развала, при котором верхняя часть колеса наклонена внутрь автомобиля, часто применяется в спортивных автомобилях для улучшения управляемости и сцепления на поворотах. Этот угол позволяет колесам лучше справляться с боковыми силами во время маневрирования, что делает автомобиль более предсказуемым и стабильным в поворотах. Однако отрицательный угол развала также имеет свои недостатки: он может привести к снижению сцепления на прямых участках дороги и неравномерному износу внутренней части шин.

Нулевой угол обеспечивает комфорт и равномерный износ шин, положительный угол улучшает сцепление при поворотах, но может привести к неравномерному износу, а отрицательный угол повышает управляемость в поворотах, но может негативно сказаться на сцеплении на прямых участках. Правильная настройка угла развала является важной частью оптимизации характеристик автомобиля для достижения баланса между стабильностью и маневренностью.

Рассмотрим еще один статический угол подвески под названием схождение. На рисунке 16 можно увидеть два типа настройки угла схождения на автомобилях.

Угол схождения – это один из ключевых параметров геометрии подвески автомобиля, который определяет угол между передними колесами в горизонтальной плоскости. Угол схождения может быть положительным (колеса наклонены друг к другу в передней части) или отрицательным (колеса наклонены друг от друга). Этот угол оказывает значительное влияние на управляемость, устойчивость и износ шин.

Положительный угол схождения, при котором передние колеса направлены немного друг к другу, способствует улучшению стабильности автомобиля на прямых участках дороги. Это помогает предотвратить колебания и обеспечивает более предсказуемое поведение автомобиля при движении. Однако слишком большой положительный угол может привести к ухудшению управляемости в поворотах, так как колеса будут иметь ограниченную способность адаптироваться к боковым силам. Кроме того, это может вызвать неравномерный износ шин, особенно на внешних краях

«Отрицательный угол схождения, при котором передние колеса наклонены друг от друга, часто используется в спортивных автомобилях для повышения маневренности и улучшения управляемости в поворотах. Такой угол позволяет колесам лучше справляться с боковыми силами, что делает автомобиль более отзывчивым и стабильным при маневрировании. Однако слишком большой отрицательный угол может привести к снижению устойчивости на прямых участках дороги и увеличению износа внутренней части шин.

Оптимальный угол схождения зависит от типа автомобиля и его назначения. Для легковых автомобилей важнее обеспечить комфортное вождение и равномерный износ шин, тогда как для спортивных автомобилей приоритетом является высокая управляемость и сцепление на поворотах.

Угол схождения является важным элементом настройки подвески автомобиля, который влияет на его управляемость, устойчивость и износ шин. Правильная настройка этого параметра позволяет достичь баланса между стабильностью на прямых участках дороги и маневренностью в поворотах, что критически важно для безопасности и комфорта водителя» [17].



Рисунок 16 – Настройка углов схождения автомобиля

Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены и описаны основные теоретические аспекты кинематики и геометрии передней и задней подвески, влияющие на управляемость автомобиля. Кроме того, описан процесс проведения анализа сцепных характеристик гоночной шины, изученной на испытательном стенде для определения коэффициента сцепления шин с дорожным покрытием.

3 Исследование влияния упругих характеристик подвески на управляемость гоночного болида

3.1 Упругие характеристики подвески автомобиля

Упругие характеристики подвески автомобиля играют ключевую роль в его поведении на дороге, обеспечивая баланс между комфортом и управляемостью. Подвеска состоит из различных элементов, таких как пружины, амортизаторы и рычаги, которые работают вместе для поглощения ударов от неровностей дороги и поддержания контакта колес с поверхностью.

Основные упругие характеристики включают жесткость пружин и амортизаторов. Жесткость пружин определяет, насколько сильно они сжимаются под нагрузкой. Высокая жесткость пружин обеспечивает лучшую управляемость автомобиля на высоких скоростях и в поворотах, так как минимизирует крен кузова. Однако такая жесткость может привести к снижению комфорта при движении по неровным дорогам, так как удары от ям и выбоин будут передаваться на кузов.

Амортизаторы, в свою очередь, контролируют скорость сжатия и расширения пружин. Они предотвращают "скачки" кузова после прохождения неровностей и помогают поддерживать стабильность автомобиля. Если амортизаторы слишком жесткие, это может привести к потере сцепления колес с дорогой, а если слишком мягкие – к раскачиванию кузова и ухудшению управляемости.

Кроме того, упругие характеристики подвески влияют на распределение веса автомобиля при маневрах. При резком повороте или торможении вес смещается на передние или задние колеса, что может изменить сцепление с дорогой. Правильно настроенная подвеска помогает обеспечить равномерное распределение нагрузки и улучшает устойчивость автомобиля.

Таким образом, упругие характеристики подвески являются важным фактором, определяющим не только комфорт водителя и пассажиров, но и безопасность движения. Оптимальный баланс между жесткостью пружин и работой амортизаторов позволяет достичь высокой управляемости без значительного ущерба для комфорта. На рисунке 17 можно увидеть абстрактный график упругой характеристики.

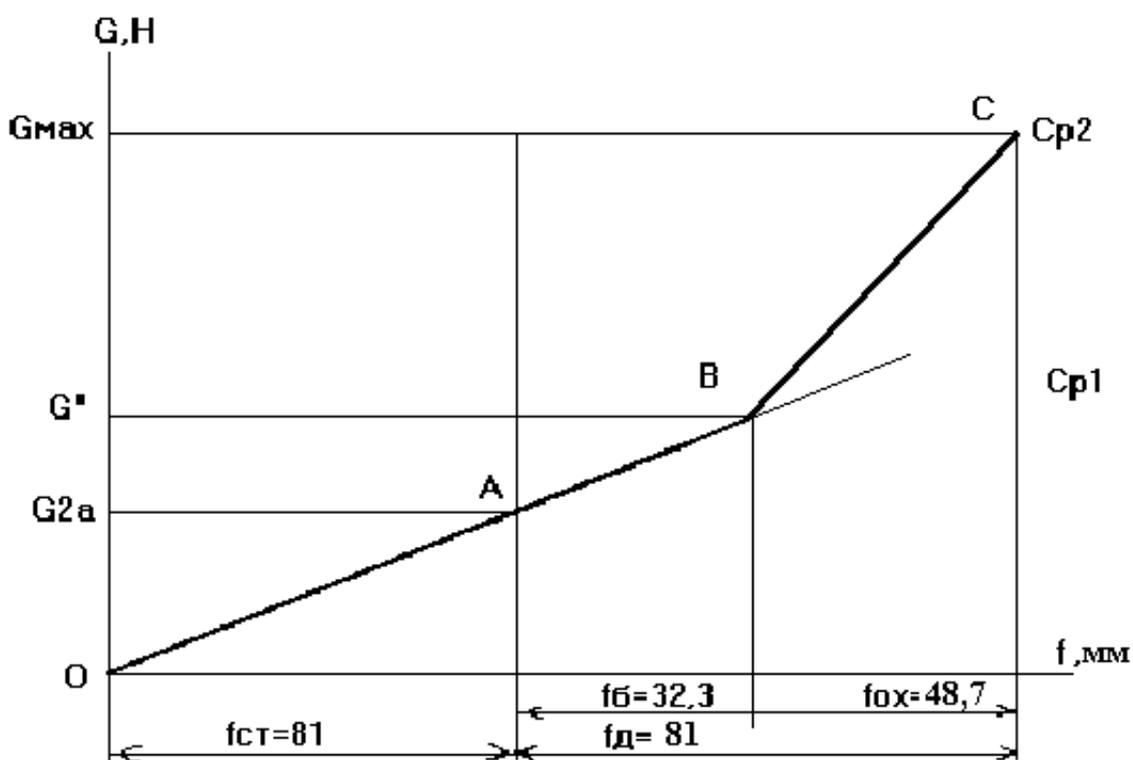


Рисунок 17 – Условный график упругой характеристики подвески

«Статическое сжатие подвески – величина сжатия подвески под собственным весом автомобиля, что является клиренсом транспортного средства и образует дорожный просвет, однако включая массу пилота, пассажиров и багажа тоже будет являться статическим сжатием для загруженного автомобиля. Для типичного гражданского автомобиля статическое сжатие подвески варьируется от 50 до 70 мм. Если же рассматривать спортивные автомобили с более жесткой подвеской, то

значение снижается до 30 или 50 мм. Для болидов класса Формула статическое сжатие может варьироваться в пределах от 15 до 35 мм.

Динамическое сжатие – сжатие подвески, которое происходит под воздействием динамических нагрузок при движении автомобиля. Обычно равен полному ходу подвески от статического положения до ограничителя хода подвески (чаще всего упругий буфер отбоя). В основном полный ход достигается при наезде на неровность. В основном максимальный ход подвески при проектировании ограничивается конструкцией кузова, а также предназначением подвески. Например, современный городской кроссовер имеет статическое сжатие от 50 до 70 мм, и динамическое сжатие до отбоя – от 60 до 100 мм. Если же рассматривать спортивный болид класса «Формула Студент», то в соответствии с пунктом регламента соревнований T2.3.1, минимальный ход подвески должен быть не менее 50 мм (в сумме для сжатия и отбоя). Таким образом оптимальный полный ход подвески для автомобилей «Формула Студент» является от 50 до 60 мм» [15].

3.2 Влияние жесткости подвески на управляемость болида

Жесткость подвески автомобиля оказывает значительное влияние на его управляемость, определяя, как машина реагирует на различные дорожные условия и маневры. Жесткая подвеска, как правило, обеспечивает более точное и отзывчивое управление, что особенно важно при высоких скоростях и в поворотах. В таких условиях жесткая подвеска минимизирует крен кузова, позволяя колесам оставаться в контакте с дорогой и обеспечивая лучшее сцепление. Это позволяет водителю более уверенно входить в повороты и быстро реагировать на изменения дорожной ситуации.

Однако высокая жесткость подвески может привести к снижению комфорта при движении по неровным дорогам. Удары от ям и выбоин будут передаваться на кузов автомобиля, что может вызывать дискомфорт для водителя и пассажиров. В результате, хотя жесткая подвеска улучшает

управляемость, она может негативно сказаться на общем впечатлении от поездки.

С другой стороны, мягкая подвеска обеспечивает больший комфорт за счет лучшего поглощения неровностей дороги. Однако такая настройка может привести к увеличению крена кузова в поворотах и замедлению реакции автомобиля на действия водителя. Это может сделать управление менее предсказуемым и снизить уверенность водителя при маневрировании.

Таким образом, выбор жесткости подвески является компромиссом между комфортом и управляемостью. Автомобили с жесткой подвеской лучше подходят для спортивного вождения и активных маневров, тогда как мягкие настройки предпочтительнее для городских условий и длительных поездок, где важен комфорт. Правильная настройка жесткости подвески позволяет достичь оптимального баланса между этими двумя аспектами, что является ключевым для обеспечения безопасного и приятного вождения.

«На рисунке 18 наглядно видно отрыв заднего внутреннего (по отношению к повороту) колеса от дорожного полотна. Это гоночный автомобиль класса WTCC – серия кольцевых гонок на кузовных автомобилях. Такая ситуация часто возникает во время гонки, так как у этих автомобилей очень жесткая подвеска с очень малыми ходами (ход сжатия больше хода отбоя), чтобы сцепление колёс в повороте было максимальным. Поэтому при прохождении поворотов вместе с торможением, когда распределение веса достигает максимума на переднем внешнем колесе, а на заднем внутреннем вес стремится к нулю, колесо может оторваться от земли» [12].



Рисунок 18 – Болид WTCC

«Для регулировки и настройки жесткости можно применять разные способы:

- изменение жесткости упругого элемента;
- изменение жесткости амортизаторов с помощью регулировки скорости отбоя и сжатия;
- использование стабилизатора поперечной устойчивости.

Рассмотрим по порядку эти три способа регулировки жесткости.

На этапе проектирования подбирается жесткость упругих элементов в зависимости от необходимого хода подвески, высоты центра масс автомобиля, высоты центра крена передней и задней оси, распределения масс между передней и задней осью автомобиля. Для этого рассчитываются критические дорожные ситуации, например при торможении, разгоне, скоростном повороте, прохождении резкой шпильки. При этом подвеска должна быть подобрана таким образом, чтобы при любой из рассчитанных ситуаций подвеска не достигала своего максимального хода и при этом не была чересчур жесткой, иначе вся нагрузка будет приходиться на шины, что приведет к быстрому их износу, а также уменьшению сцепления в повороте. Конечно, на этапе проектирования важно задать необходимые параметры

пружин, однако на этапе тестирования пружины могут быть заменены в зависимости от субъективных отзывов пилотов. Так было на болиде Scorpion G2, когда задняя подвеска оказалось слишком жесткой, и статический прогиб подвески составлял всего 15 мм вместо положенных 25 мм.

Для болидов «Формула Студент» принято использовать пружины с линейной характеристикой жесткости, как и на других гоночных автомобилях» [18].

«Рассмотрим пример на базе заднеприводного болида «Формула Студент». Например, если пилот жалуется на недостаточную поворачиваемость болида, в таком случае можно урегулировать проблему за счет настроек амортизаторов. При недостаточной поворачиваемости мы имеем чрезмерное сцепление для задней оси и недостаточное сцепление передней оси. В данной ситуации можно уменьшить сцепление задней оси в повороте за счет увеличения медленного сжатия и уменьшения медленного отбоя, а также увеличить сцепление передней оси за счет уменьшения медленного сжатия и увеличения медленного отбоя.

Применение стабилизатора распространено на автомобилях для дорог общего пользования. Стабилизатор работает во время кренов автомобиля, противодействуя им. При этом его роль при одновременном сжатии обоих колес на одной оси сводится к нулю. В большинстве своем стабилизаторы представляют собой торсионы, крепящиеся непосредственно к кулакам подвески, так как прогиб подвески там максимальный. В спортивных автомобилях его роль очень важна, так как стабилизатор позволяет «прижимать» внешнее колесо к дорожному полотну, тем самым увеличивая сцепления колеса с дорогой, а значит скорость прохождения поворота.

Например, на автомобилях для дрифта делают очень жесткую заднюю подвеску, так как важна стабильность задней оси и минимальные ее крены, и достаточно мягкую переднюю подвеску для того, чтобы передние колеса всегда были в контакте с асфальтом и имели максимум сцепления. При этом жесткая задняя подвеска не дает автомобилю сильно крениться, что

положительно сказывается на движении в скольжении.

Рассмотрим случаи, когда нужна настройка жесткости подвески. Если пилот жалуется на слишком большие крены автомобиля в повороте, стоит сделать подвеску жестче и установить стабилизатор поперечной устойчивости» [29].

«Недостаточная или избыточная поворачиваемость может так же являться следствием неправильной настройки жесткости подвески. Избыточная жесткость подвески может привести к недостатку или отсутствию кренов автомобиля, что негативно скажется на управляемости, так как распределение веса будет неэффективным и шины автомобиля будут использованы неэффективно. Слишком мягкая подвеска, наоборот, приведет к избыточным кренам, что вызовет слишком сильное перераспределение веса и дисбаланс веса на колесах. Например, на болиде Black Bullet после первых соревнований был применен стабилизатор поперечной устойчивости для задней оси, так как задняя подвеска автомобиля была слишком мягкой и во время прохождения дисциплины Skid-Pad заднее внутреннее колесо автомобиля слишком сильно разгружалось, что приводило к пробуксовке этого колеса и снижению темпа на круге. Болид Scorpion G2 имел слишком жесткую подвеску и недостаточную поворачиваемость. Установка пружин с меньшим коэффициентом жесткости позволило исправить эту ситуацию» [23].

Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены основные теоретические аспекты в проектировании подвески, влияющие на поведение автомобиля во время выполнения маневром. Также были рассмотрены упругие и жесткостные характеристики подвески, и как они влияют на управляемость.

4 Оптимизация подвески гоночного болида

4.1 Описание ПО «АДАМС»

Программа ADAMS Car представляет собой мощный инструмент для моделирования и анализа динамики автомобилей, который широко используется в проектировании подвески. Она позволяет создавать детализированные виртуальные модели подвесочных систем, учитывающие все ключевые компоненты, такие как рычаги, пружины, амортизаторы, стабилизаторы и крепления.

С помощью ADAMS Car инженеры могут проводить комплексные многотельные динамические расчёты, что даёт возможность оценить поведение подвески в различных условиях движения и нагрузках без необходимости физического прототипирования. Программа позволяет анализировать такие важные параметры, как перемещения и деформации элементов подвески, распределение сил и моментов, а также взаимодействие колес с дорогой. Это помогает оптимизировать упругие характеристики и геометрию подвески для достижения желаемого баланса между комфортом и управляемостью.

Кроме того, ADAMS Car поддерживает моделирование различных дорожных условий и маневров, а именно от плавных поворотов до экстремальных ситуаций, что позволяет выявлять потенциальные проблемы с устойчивостью и безопасностью автомобиля на ранних этапах проектирования. Интеграция с другими инженерными программами и возможность автоматизации процессов оптимизации делают ADAMS Car незаменимым инструментом для разработки современных подвесочных систем, позволяя значительно сократить время и затраты на испытания и повысить качество конечного продукта.

Программа ADAMS Car предоставляет широкие возможности для проектирования и анализа различных типов подвесок автомобилей, позволяя

моделировать как простые, так и сложные конструкции с высокой степенью детализации. В частности, с её помощью можно рассчитывать классические типы подвесок – например, независимую подвеску с рычажной или пружинной схемой, многорычажные системы, подвески МакФерсон, а также торсионные и зависимые мосты. Благодаря гибкости моделирования в ADAMS Car возможно создавать уникальные конфигурации подвески с учётом специфических требований к автомобилю, включая спортивные и внедорожные модели.

Что касается видов симуляций, ADAMS Car позволяет проводить широкий спектр динамических анализов. Среди них – статический расчёт упругих характеристик подвески и распределения нагрузок на элементы системы при различных положениях кузова и колес. Программа поддерживает динамическое моделирование поведения подвески при движении автомобиля по неровной дороге, включая имитацию воздействия выбоин, колеиности и других дорожных дефектов. Также возможны симуляции маневров – таких как резкие повороты, перестроения, торможение и ускорение – что позволяет оценить устойчивость автомобиля, крен кузова, работу стабилизаторов поперечной устойчивости и сцепление колес с дорогой.

ADAMS Car предоставляет инструменты для анализа вибраций и колебаний подвески в различных режимах движения, что важно для повышения комфорта и безопасности. Кроме того, программа позволяет проводить многокритериальную оптимизацию параметров подвески – например, подбор жёсткости пружин и амортизаторов для достижения баланса между управляемостью и плавностью хода. Важной функцией является возможность интеграции с системами управления автомобилем (например, ABS или системами активной подвески), что расширяет возможности моделирования современных высокотехнологичных автомобилей.

ADAMS Car является универсальным инструментом для комплексного проектирования подвесочных систем: от создания базовой кинематической схемы до проведения сложных динамических испытаний в виртуальной среде, что значительно сокращает время разработки и повышает качество конечного продукта.

На рисунке 19 можно увидеть пример подвески в программе АДАМС.

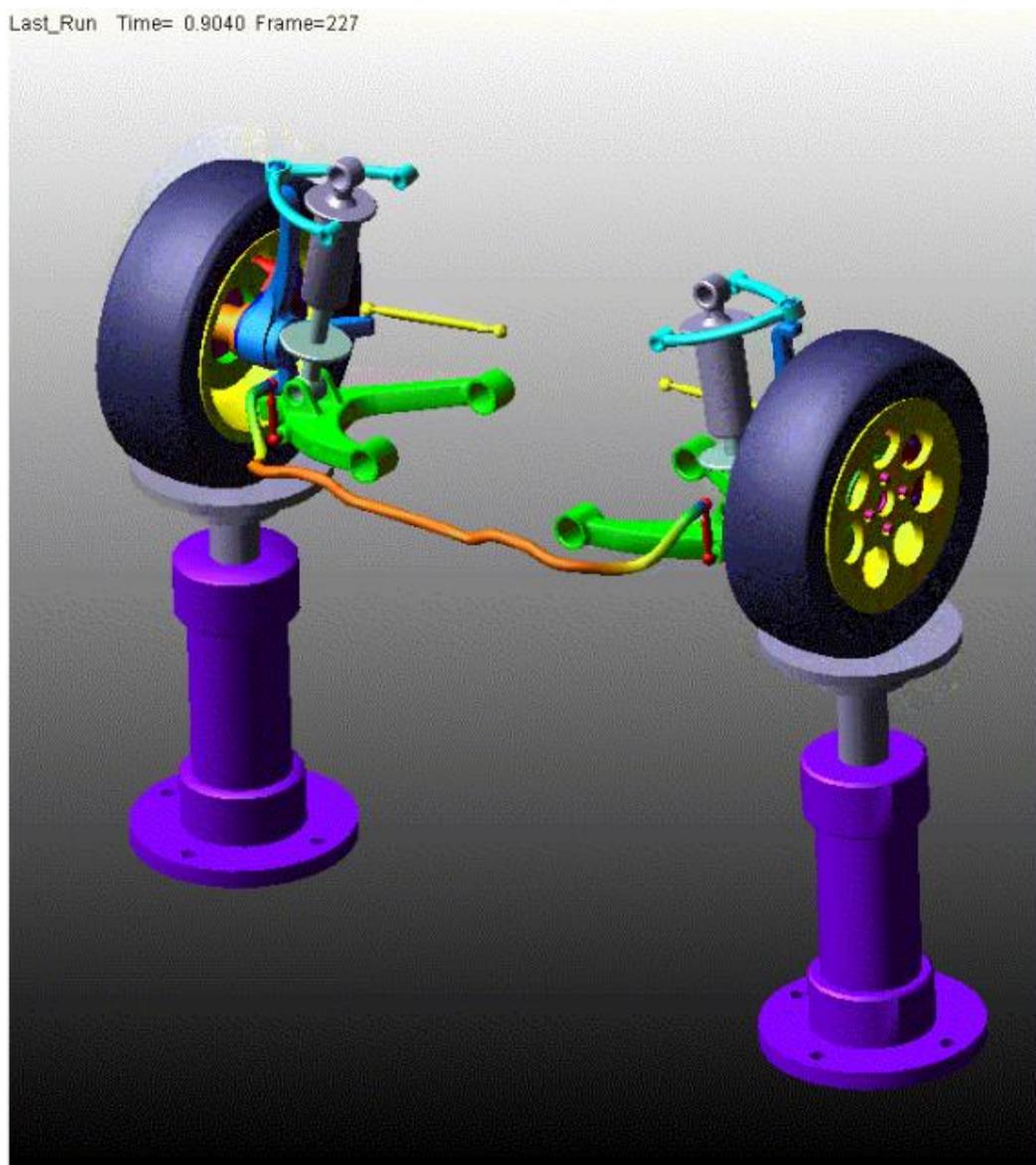


Рисунок 19 – Пример сборки передней подвески в программе АДАМС

В ADAMS Car работа с Template Builder является ключевым этапом при создании и настройке моделей подвески, позволяя значительно упростить и ускорить процесс проектирования за счёт использования готовых шаблонов и модулей. Template Builder представляет собой инструмент для создания, редактирования и управления шаблонами компонентов и сборок, которые можно многократно использовать в различных проектах. В рамках проектирования подвески с помощью Template Builder пользователь может создавать типовые элементы – такие как рычаги, пружины, амортизаторы, шарниры и крепления – задавая их геометрию, кинематические связи и физические свойства. Эти элементы затем объединяются в более сложные сборки, формируя полноценную модель подвесочной системы.

«Процесс создания сборок подвески в ADAMS Car начинается с выбора или создания необходимых компонентов в Template Builder. После определения параметров каждого элемента (например, длины рычагов, характеристик упругих элементов, ограничений движения) компоненты собираются в единую кинематическую цепь с помощью интерфейса программы. При этом можно задавать различные типы соединений – шарниры, втулки, пружинные крепления – а также определять точки крепления к кузову автомобиля и колесам. Благодаря модульной структуре шаблонов становится возможным быстро изменять конфигурацию подвески или заменять отдельные элементы без необходимости создавать модель заново» [24].

«После того, как все подсистемы будут готовы, необходимо установить координаты каждой из основных точек подвески, которые будут задавать кинематические параметры подвески болида. Точками задаются все узлы фиксации элементов подвески к кузову или пространственной раме автомобиля. Когда точки расставлены, необходимо также задать характеристику кинематики того или иного узла, определяющую ограничения, а также направления движения элементов.

На рисунке 20 можно увидеть пример таблицы со всеми точками подвески гоночного болида, и с координатами каждой из точек. Каждую из ЭТИХ точек есть возможность изменить в любое время, что дает возможность быстрой оптимизации подвески» [19].

Hardpoint Modification Table

Assembly Subsystem FULL_front_suspension_G4

	loc_x	loc_y	loc_z	remarks
fsae_front_arb.ground.hpl_arb_bend	98.0	-291.0	-141.0	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_BC_axis	-51.35	-238.87	82.18	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_BC_center	-52.35	-238.87	82.18	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_damper_inboard	-64.95	-229.1	330.28	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_damper_outboard	-39.66	-335.62	173.7	(none)
fsae_front_arb.ground.hpl_drop_link	-30.0	-281.0	76.0	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_lca_front	-127.0	-230.0	-98.2	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_lca_outer	-2.6	-586.0	-98.2	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_lca_rear	150.0	-245.0	-98.2	(none)
fsae_front_arb.ground.hpl_leaf_link	-41.0	-293.0	-141.0	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_prod_inboard	-38.47	-332.62	140.16	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_prod_outboard	0.55	-505.13	-71.19	(none)
fsae_steering_good_rul.ground.hpl_rack_house_mount	-22.0	-180.0	-50.0	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_ride_height	-766.0	-219.1	116.65	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_tierod_inner	-22.0	-220.0	-50.0	(none)
fsae_steering_good_rul.ground.hpl_tierod_inner	-22.0	-220.0	-50.0	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_tierod_outer	65.0	-525.0	-33.0	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_uca_front	-127.0	-260.0	60.0	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_uca_outer	6.6	-569.0	114.0	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_uca_rear	151.0	-274.0	75.0	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hpl_wheel_center	0.0	-600.0	0.0	(none)
fsae_front_arb.ground.hps_arb_center	98.0	0.0	-141.0	(none)
fsae_front_suspeee33.ground.hps_camber_adj_orient	-2.6	0.0	-98.2	(none)
testrig.ground.hps_global_part_reference	0.0	0.0	0.0	(none)
fsae_steering_good_rul.ground.hps_intermediate_shaft_forward	25.0	0.0	100.0	(none)
fsae_steering_good_rul.ground.hps_intermediate_shaft_rearward	200.0	0.0	200.0	(none)
fsae_steering_good_rul.ground.hps_pinion_pivot	-22.0	0.0	-50.0	(none)

Рисунок 20 – Кинематические точки передней подвески болида

После формирования сборки подвески следующим этапом является проведение симуляций. Для этого в ADAMS Car настраиваются сценарии движения автомобиля: выбираются дорожные условия (например, ровная дорога, неровности, колея), типы маневров (повороты, торможение, ускорение) и параметры нагрузки (масса автомобиля, распределение веса). Программа позволяет запускать как статические расчёты для оценки равновесных положений и нагрузок на элементы подвески, так и динамические симуляции с учётом временных изменений параметров движения. В процессе моделирования можно отслеживать перемещения

деталей подвески, силы в соединениях, крен кузова и другие важные характеристики.

«Помимо статических параметров, также, необходимо проанализировать изменения и интенсивность изменений статических углов подвески при ее работе в реальных условиях. Это дает понять, как будет вести себя автомобиль при прохождении гоночной трассы. При проведении К&С-анализа, также, не стоит забывать о проверке податливостей (compliances) элементов и точек крепления подвески автомобиля. Потому как податливости тоже влияют на работу подвески и, например, даже при условии, что податливость каждого элемента по отдельности является минимальной, то при сложении суммы податливости всех элементов подвески, может получиться внушительное отклонение углов подвески от спроектированных.

В основном, самые необходимые симуляции, которые необходимо провести и проанализировать в рамках К&С-расчета, это:

- симуляция одноименного хода подвески,
- симуляция разноименного хода подвески (крен),
- симуляция сил, возникающих при торможении,
- симуляция сил, возникающих при разгоне,
- симуляция боковых сил при одноименном ходе подвески,
- симуляция боковых сил при разноименном ходе подвески,
- симуляция закручивающих сил при одноименном сжатии подвески,
- симуляция закручивающих сил при разноименном сжатии подвески,
- симуляция вращения рулевого колеса.

Для того, чтобы провести симуляции необходимо для каждой отдельной ввести определенные входные данные, такие как ход подвески, количество циклов, время симуляции, силы, ход рулевой рейки и так далее» [14].

На рисунке 21 можно увидеть одну из симуляций максимального поворота рулевого колеса.

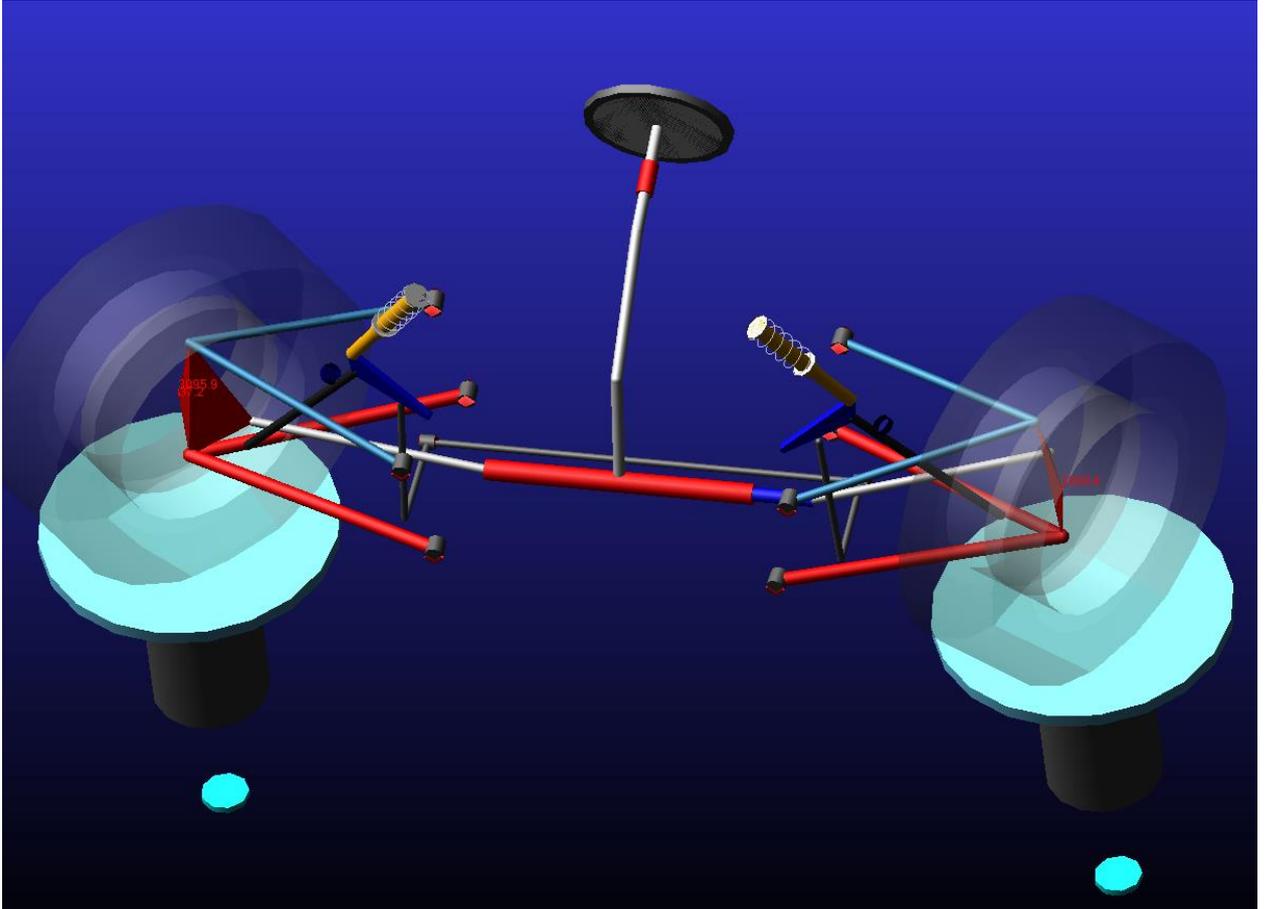


Рисунок 21 – Симуляция максимального поворота рулевого колеса

Результаты симуляций визуализируются в виде графиков, анимаций и отчётов, что облегчает анализ поведения подвесочной системы и выявление потенциальных проблем. При необходимости параметры компонентов можно оперативно корректировать через Template Builder и повторно запускать расчёты для оптимизации конструкции. Таким образом, интеграция Template Builder с инструментами моделирования и анализа в ADAMS Car обеспечивает эффективный цикл проектирования подвесок от создания компонентов до комплексной оценки их работы в реальных условиях эксплуатации.

На рисунке 22 можно увидеть симуляцию прохождения одного из испытаний соревнований Formula Student, под названием SkidPad (восьмерка).

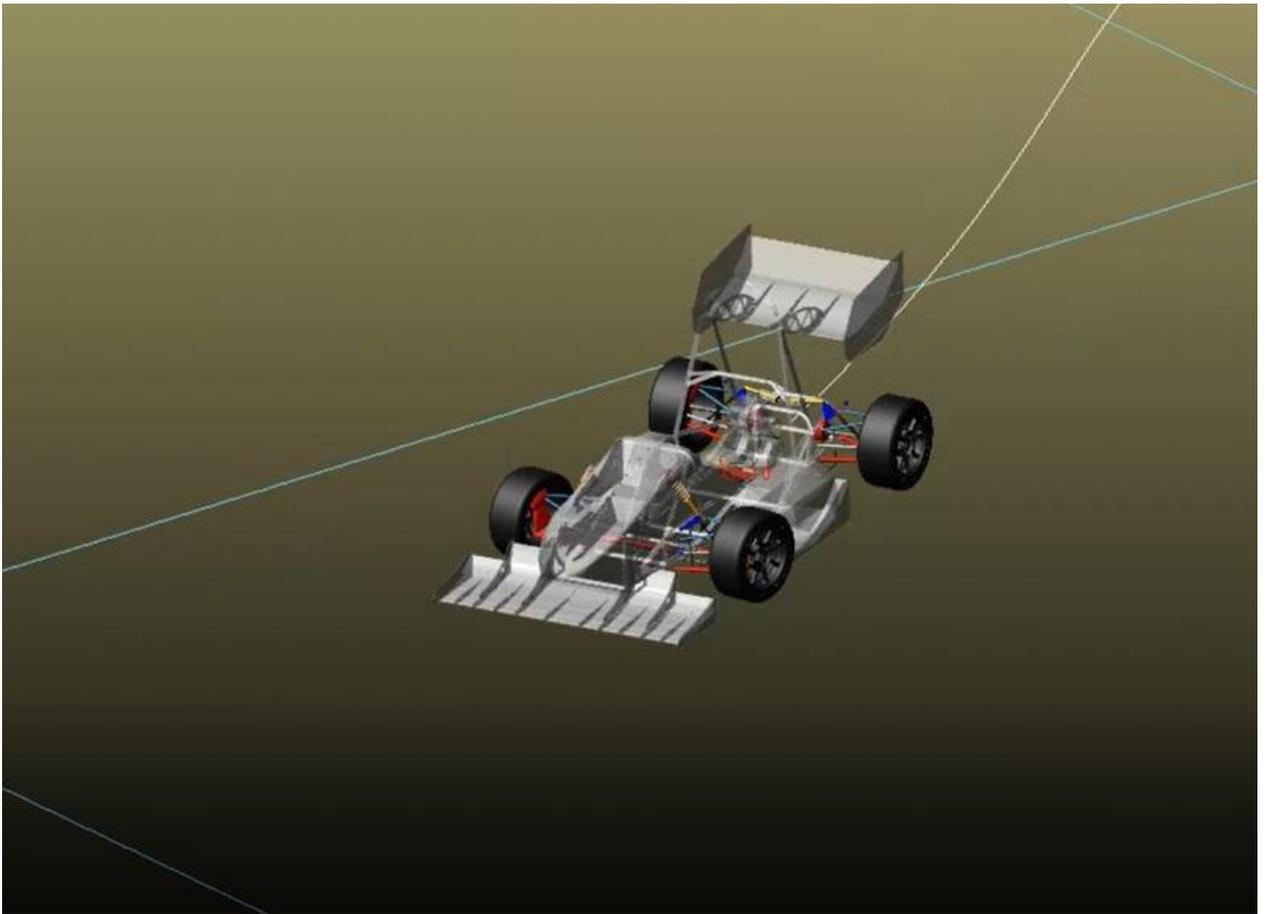


Рисунок 22 – Симуляция прохождения гоночного испытания Восьмерка

4.2 Оптимизация кинематических характеристик гоночного болида Scorpion G5

Определение всех входных данных перед началом проектирования или оптимизации конструкций и компонентов автомобиля является фундаментальным этапом, который оказывает существенное влияние на весь процесс разработки и конечный результат. Этот этап включает сбор, анализ и систематизацию информации о различных аспектах, таких как эксплуатационные условия, требования к безопасности, технические ограничения, нормативные стандарты, технологические возможности и экономические параметры. Точное понимание всех входных данных позволяет создать четкую основу для дальнейших расчетов, моделирования и

принятия решений, что значительно повышает качество и эффективность проектируемого продукта.

Во-первых, правильное определение входных данных обеспечивает учет реальных условий эксплуатации автомобиля. Это включает в себя параметры дорожных условий (качество покрытия, климатические условия), типы нагрузок (динамические, статические), а также особенности использования (городское движение, внедорожье, спортивные режимы). Знание этих факторов позволяет инженерам выбрать подходящие материалы и конструкции, которые смогут выдержать реальные нагрузки без излишних запасов прочности или чрезмерного удорожания.

Во-вторых, сбор информации о требованиях к безопасности и нормативных стандартах является обязательным для соответствия автомобилю международным и национальным требованиям. Это включает в себя стандарты по краш-стойкости, экологической безопасности (выбросам вредных веществ), уровню шума и вибраций. Наличие полной информации о нормативных ограничениях помогает избежать ошибок на поздних стадиях разработки и снизить риск штрафных санкций или необходимости дорогостоящих доработок.

В-третьих, определение технологических возможностей и ограничений производства играет важную роль в формировании реалистичных решений. Например, знание доступных методов обработки материалов, технологий сварки или сборки позволяет выбрать оптимальные конструкции с учетом производственных затрат и сроков реализации. Это способствует созданию конструкций, которые не только отвечают техническим требованиям, но и легко внедряются в производство.

Кроме того, важно учитывать экономические параметры – стоимость материалов и технологий, расходы на разработку и сертификацию. Полное понимание этих аспектов помогает сбалансировать технические характеристики с бюджетными ограничениями и рыночными требованиями.

В результате проектирование становится более целенаправленным и экономически оправданным.

Еще одним важным аспектом является анализ взаимодействия различных систем автомобиля – силовой установки, системы подвески, тормозной системы, электроники – что требует сбора данных о их характеристиках и взаимосвязях. Это позволяет избежать конфликтов между системами на этапе проектирования и обеспечить их гармоничную работу.

Наконец, систематический сбор всех входных данных способствует более точному моделированию поведения конструкции под различными условиями эксплуатации с помощью компьютерного анализа (FEA – конечные элементы анализа, CFD – гидродинамическое моделирование). Это уменьшает необходимость проведения дорогостоящих физических прототипов на ранних стадиях разработки и ускоряет процесс вывода продукта на рынок.

Определение всех входных данных перед проектированием или оптимизацией конструкций автомобиля является ключевым фактором успеха проекта. Оно обеспечивает полноту информации для принятия обоснованных решений, снижает риски ошибок и недочетов на поздних этапах разработки, способствует созданию безопасных, надежных и конкурентоспособных автомобилей с оптимальными характеристиками по массе, стоимости и эксплуатационным показателям. В итоге это ведет к повышению качества продукции, сокращению сроков вывода новых моделей на рынок и снижению общих затрат на разработку.

За исходные данные в нашем случае необходимо брать такие документы и аспекты, как:

- основной регламент соревнований, который содержит технические требования к автомобилю;
- концепция будущего болида, разработанная командой во время плановых совещаний;

– конструкции зарубежных команд, технологии, которые используют команды из других стран;

– гоночный болид предыдущего года, построенный командой, со всеми его преимуществами и недостатками.

Более того, одним из главных факторов является так же экономическая составляющая проекта, поэтому необходимо было использовать максимум имеющихся деталей, таких как рейка рулевая, амортизационные стойки с пружинами.

«Таким образом, на базе основного регламента соревнований Formula Student были определены параметры, строго проверяемые во время технической инспекции соревнований:

– колесная база гоночного болида должна быть не менее 1525 мм;

– колея гоночного болида может быть какой угодно, однако правило гласит, что разница ширины колеи передней и задней оси не должна превышать 25 % от ширины наибольшей;

– клиренс (дорожный просвет) автомобиля в нижней точке рамы или композитного монокока должен быть не менее 30 мм с самым тяжелым пилотом, размещенным в кокпите;

– ход передней и задней подвесок должен быть не менее 50 мм в сумме при отбое и сжатии.

С учетом требований регламента и предыдущих конструкций, по компоновочным соображениям колесная база была увеличена на 20 мм. На предыдущем болиде колесная база составляла 1530 мм – стала 1550 мм для размещения нового мотора и трансмиссии. Передняя колея осталась прежней 1200 мм из соображений транспортировки. Кроме того, на базе опыта прошлых лет, данная ширина передней колеи устойчиво держит автомобиль от опрокидывания и дает достаточную маневренность. Что касается задней колеи, то ширина была уменьшена на 20 мм. Если ранее она составляла 1170 мм, то теперь стала 1150 мм – для прохождения поворотов по более узкому радиусу» [16].

Мы приняли решение провести замену пружин, несмотря на то что необходимо экономит денежные средства, по причине того, что во время расчета было обнаружено рассогласование работы передней и задней подвески.

«Был проведен расчет собственных частот колебаний передней и задней подвески, который показал неправильную работу подвески предыдущего болида. Замене пружин также поспособствовало снижение массы текущего автомобиля на 30 кг по отношению к гоночному болиду прошлого сезона, а также распределение масс на новом болиде было изменено на соотношение 45/55 %, вместо 40/60 %.

Для нового болида были подобраны новые пружины с разной жесткостью для передней и задней оси. Частота собственных колебаний передней оси составляет 2,94 Гц при подрессоренной массе передней оси 45 % и жесткости пружин 43 Н/мм, а частота собственных колебаний задней оси составляет 3,16 Гц при подрессоренной массе 55 % и жесткости пружин 63 Н/мм. При таком наборе пружин частота колебаний задней оси на 7 % больше, чем частота колебаний передней оси, что является нормой для гоночных автомобилей, а любые другие необходимые настройки могут быть проведены на этапе тестирования автомобиля за счет регулировки амортизаторов по четырем критериям» [1].

«Далее для того, чтобы оптимизировать систему подвески и рулевую систему гоночного автомобиля на базе предыдущей конструкции, задаются основные цели оптимизации, определенные на базе субъективной оценки пилотов предыдущего сезона. Основные цели для нового болида в большинстве своем были связаны с улучшением показателей управляемости, облегчением работы пилота, а именно снижением стабилизационного момента при поворотах, что также связано с управляемостью.

Цели при разработке и оптимизации конструкции гоночного болида G5:

- облегчение работы пилота (снижение сил, прикладываемых к

рулевому колесу);

– уменьшение радиуса поворота болида (исправить недостаточную поворачиваемость);

– уменьшение крена шасси и увеличение пятен контакта колес с дорожным покрытием (отрегулировать статический развал передней и задней оси), и как следствие, увеличение максимально допустимого бокового ускорения при прохождении поворотов (исправить недостаточную поворачиваемость).

Все основные параметры подвески, а также используемые компоненты были определены (кроме колесных дисков), поэтому любые оптимизации и модификации остается проводить только за счет кинематических характеристик передней и задней подвески. Проведенные оптимизационные работы можно увидеть в таблице 1» [8].

Таблица 1 – Оптимизированные параметры относительно болидов предыдущего поколения

Характеристика	Масса, кг	Кастер, град	Шкворень, град	Центр крена (перед/зад), мм	Аккерман, %	Развал(перед/зад), град
G3	210	4.1	14.5	-35/-50	45	-2.5/-1.5
G4	200	3.2	10.6	50/70	90	-2/-1
G5	190	2.7	8.8	20/35	75	-1.5/-1

На рисунке 23 можно увидеть графические показатели различных гоночных шин, а именно зависимость углов увода шин от вертикальной нагрузки, возникающей во время прохождения поворота из-за перераспределения массы автомобиля.

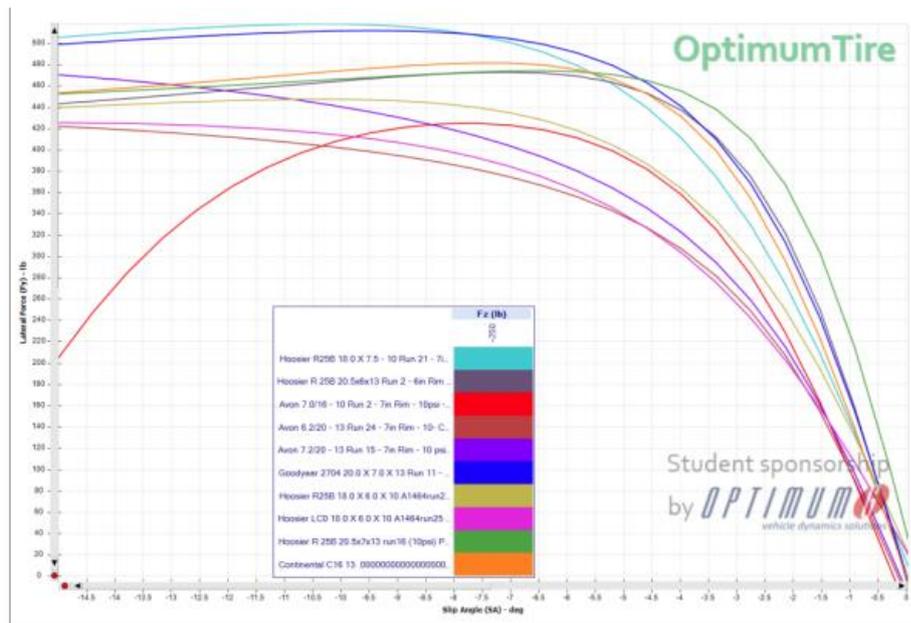


Рисунок 23 – График зависимости углов увода различных шин от вертикальной нагрузки из OptimumTire

«При движении в повороте за счет геометрии Аккермана создается разница углов поворота управляемых колес передней оси автомобиля. Это необходимо, чтобы каждое из колес ехало по отдельной траектории, так как внутреннее и внешнее к повороту колесо за одно и то же время проходят разные дистанции из-за разницы отдаления внутренних и внешних колес автомобиля от центра окружности поворота. Разница углов поворота управляемых колес передней оси автомобиля позволяет исключить волочение колес при движении и обеспечить необходимое сцепление и распределение температуры шин. На задней оси данную функцию выполняет дифференциал, он позволяет задним колесам вращаться независимо друг от друга, а значит они могут двигаться по разным траекториям.

Чтобы получить необходимые углы поворота управляемых колес, сначала рисуется схема автомобиля, движущегося по кругу определенного диаметра. Далее проводится прямая линия, которая является продолжением задней оси и заканчивается в центре окружности, по которой едет автомобиль. На построенной схеме необходимо из центра окружности провести две линии, приходящих в точку пятна контакта внешнего переднего

и внутреннего переднего колеса. Из точек пятна контакта образуются перпендикуляры, которые создают необходимый угол поворота колес относительно номинального положения колес на передней оси. Полученные углы внутреннего и внешнего к повороту колеса являются необходимыми углами поворота колес для получения нейтральной управляемости» [3].

«Однако, не все так просто, и такой вариант работает только при условии, что автомобиль стоит на месте и не имеет бокового ускорения. При появлении бокового ускорения за счет появления поперечных сил в точках пятна контакта колес автомобиля образуются углы увода, которые препятствуют точному прохождению круга, появляется недостаточная поворачиваемость, при появлении которой о стабильном и быстром прохождении круга можно забыть, пилоту постоянно придется подруливать, из-за чего он потеряет время.

Для того, чтобы применить данные с рисунка 44 необходимо рассчитать перераспределение масс на каждое из колес, потому что угол увода имеет зависимость от вертикальной нагрузки на колесо» [30]. Перераспределение массы автомобиля рассчитывается по формуле:

$$Dy = a \times \frac{M}{T_f} \times \frac{h \times Sr_{front}}{Sr_{front} + Sr_{rear}} + \frac{b}{L} \times C, \quad (5)$$

где: Dy – дистрибуция массы автомобиля по оси Y , кг;

a – боковое ускорение;

M – масса болида, кг;

T_f – ширина колеи на передней оси, м;

h – длина перпендикулярной линии, проведенной от центра масс автомобиля до оси крена, м;

Sr_{front} – жесткость передней оси на крен, Нм/град;

Sr_{rear} – жесткость задней оси на крен, Нм/град;

b – расстояние центра тяжести от задней оси, м;

L – длина колесной базы болида, м;

C – высот центра крена передней оси, м.

«Далее подбираются соответствующие значения углов увода в зависимости от вертикальной нагрузки на каждое колесо. После чего сложив номинальные идеальные углы поворота управляемых колес с полученными углами увода, мы получим необходимые углы, для правильного и стабильного прохождения круга. Чтобы подобрать геометрию Аккермана необходимо составить матрицу углов поворота колес в зависимости от хода рулевой рейки, и таким образом подобрать нужные значения углов» [28].

В ходе работы была смоделирована мультизвенная модель гоночного болида в программе АДАМС. На рисунке 24 можно увидеть модель с обозначением всех связей и кинематических точек.

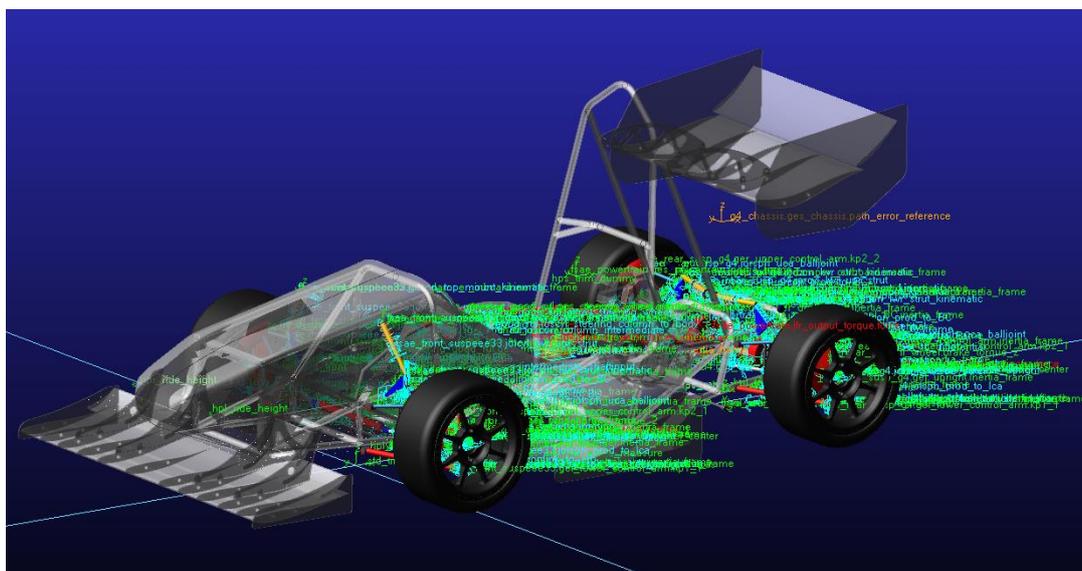


Рисунок 24 – Мультизвенная модель гоночного болида класса «Формула Студент»

Выводы по разделу

В этом разделе был описан инструмент КАЕ моделирования и симуляций АДАМС, описаны его преимущества и возможности. Также были описаны оптимизационные работы для нового болида.

5 Сравнение характеристик гоночных болидов путем симуляции динамических и кинематических характеристик

«При помощи программного обеспечения АДАМС был проведен ряд кинематических и динамических симуляций гоночного автомобиля класса «Формула Студент». Сначала проводились симуляции отдельно для передней и отдельно для задней подвески в статике для получения характеристик и возможностей подвески, после чего были проведены динамические симуляции полной сборки гоночного автомобиля для получения информации о его поведении на гоночном треке.

На рисунках 25–35 можно увидеть графики симуляции передней подвески в статических режимах. Это симуляции на кинематику, для проверки того, как изменяются статические углы подвески при сжатии и обратном ходе подвески. В данном случае были приведены только основные графики, которые действительно могут показать, насколько подвески хорошо спроектирована» [10].

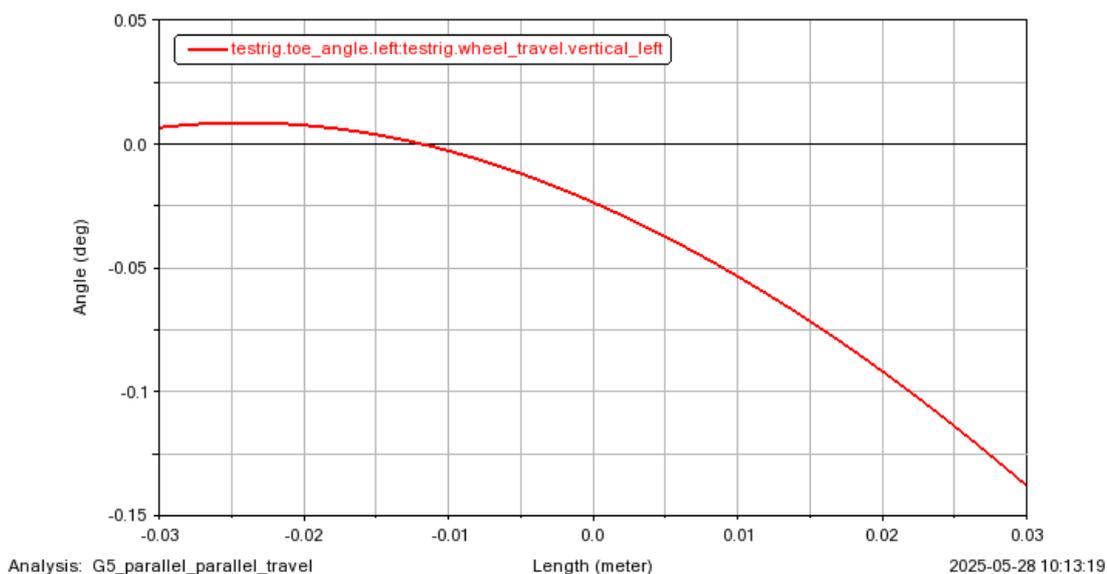


Рисунок 25 – Изменение углов схождения на передней оси при параллельном ходе подвески

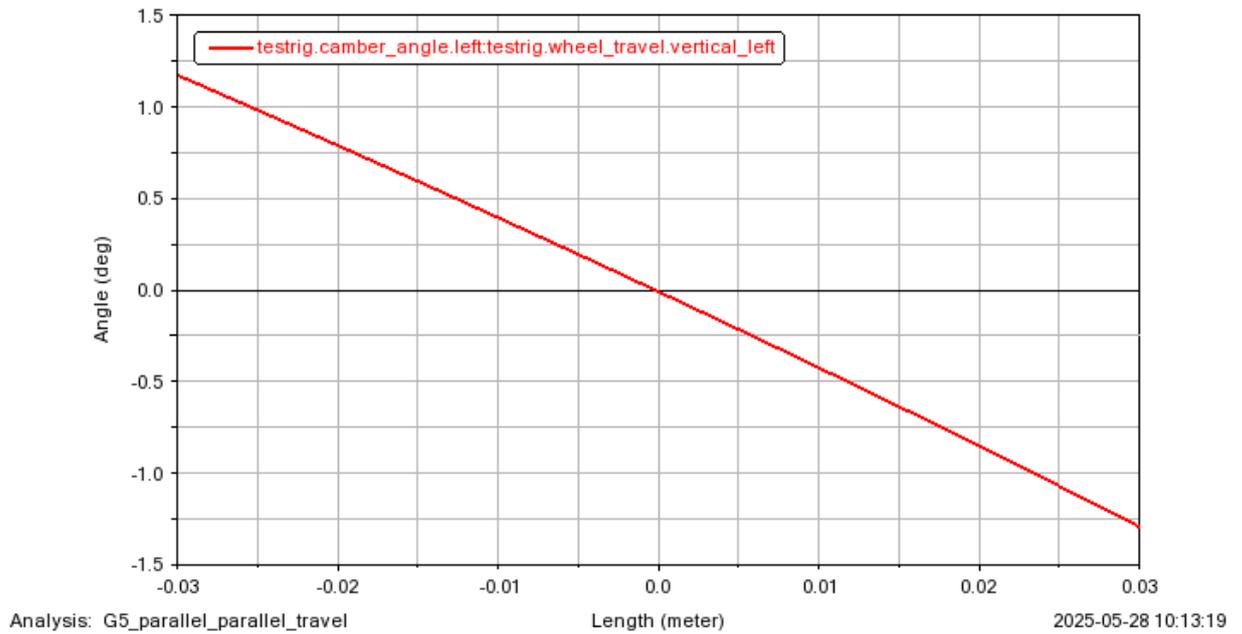


Рисунок 26 – Изменение углов развала на передней оси при параллельном ходе подвески

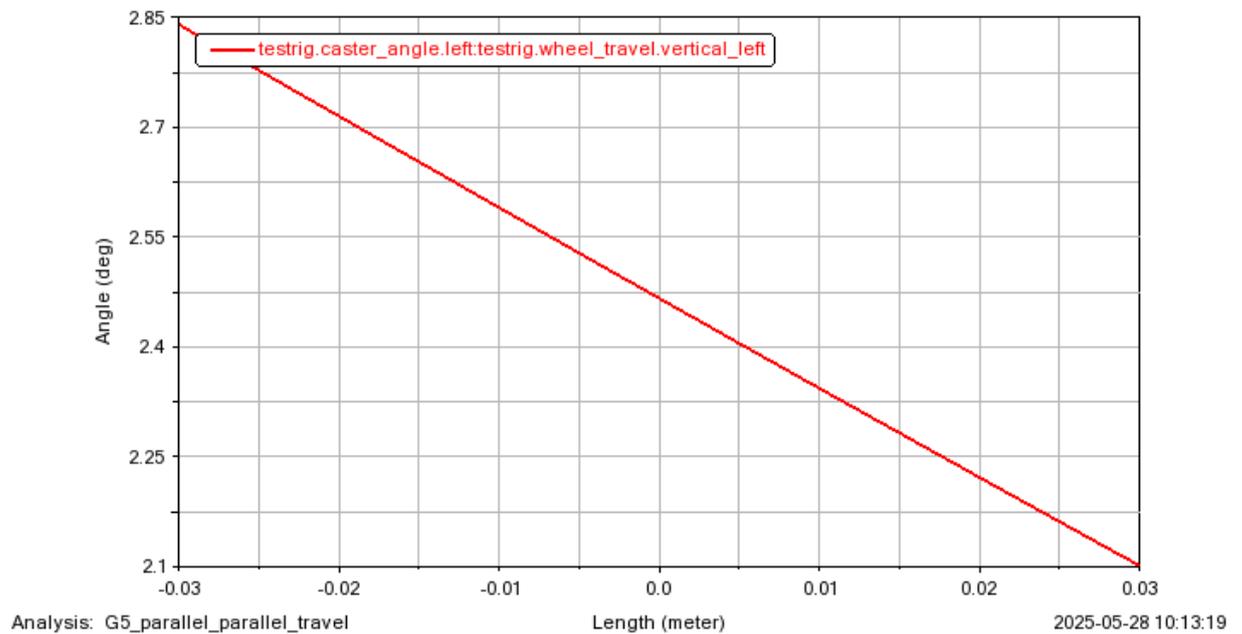


Рисунок 27 – Изменение углов кастера на передней оси при параллельном ходе подвески

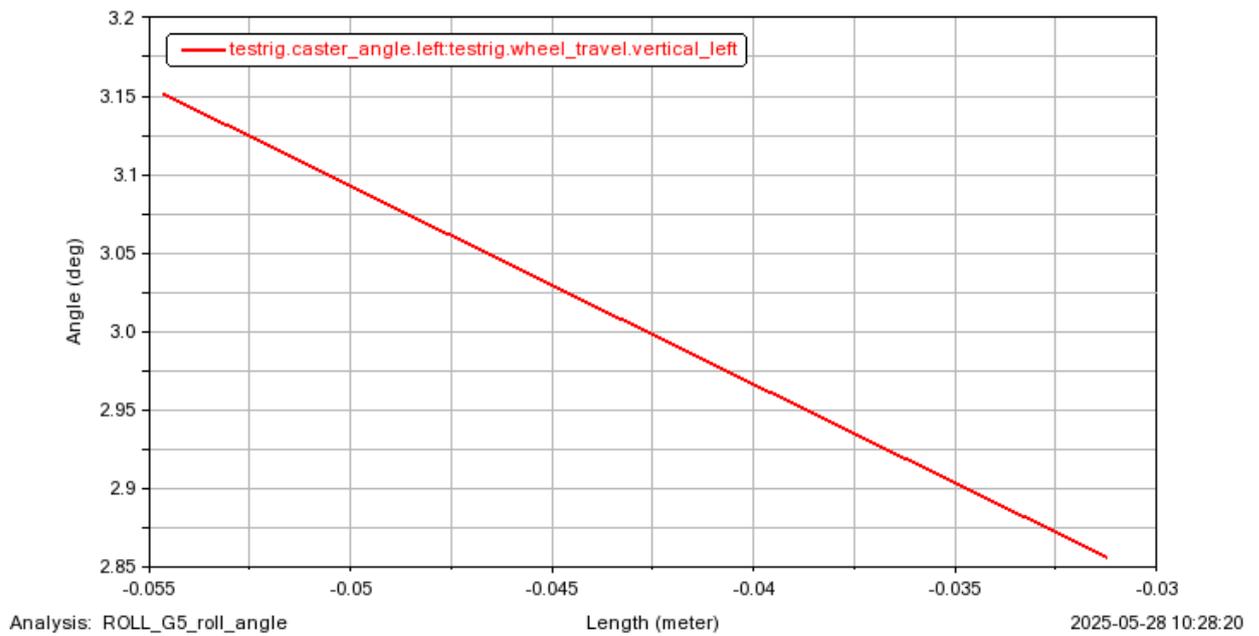


Рисунок 28 – Изменение углов кастера на передней оси при крене кузова

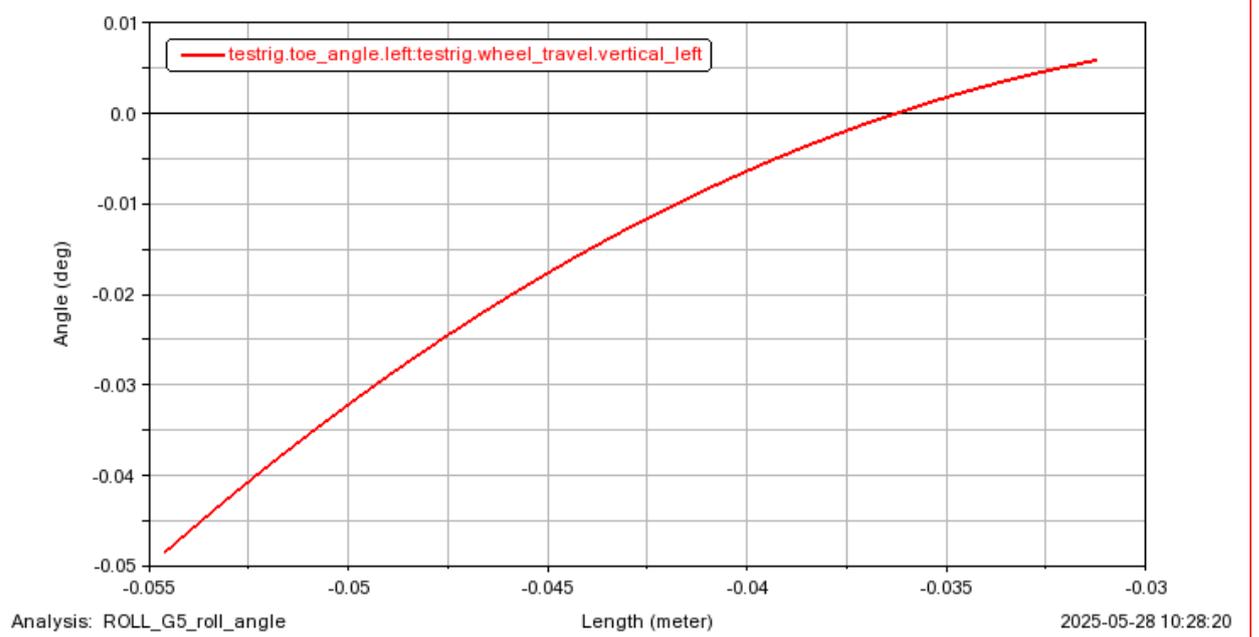


Рисунок 29 – Изменение углов схождения на передней оси при крене кузова

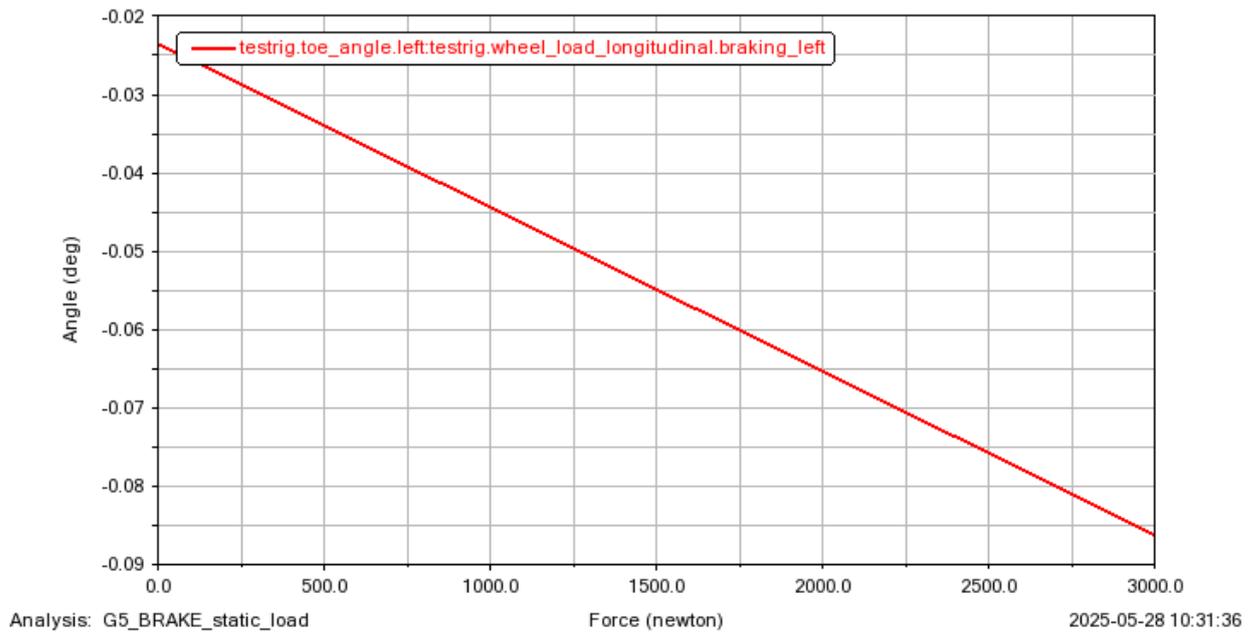


Рисунок 30 – Изменение углов схождения на передней оси при тормозном усилии

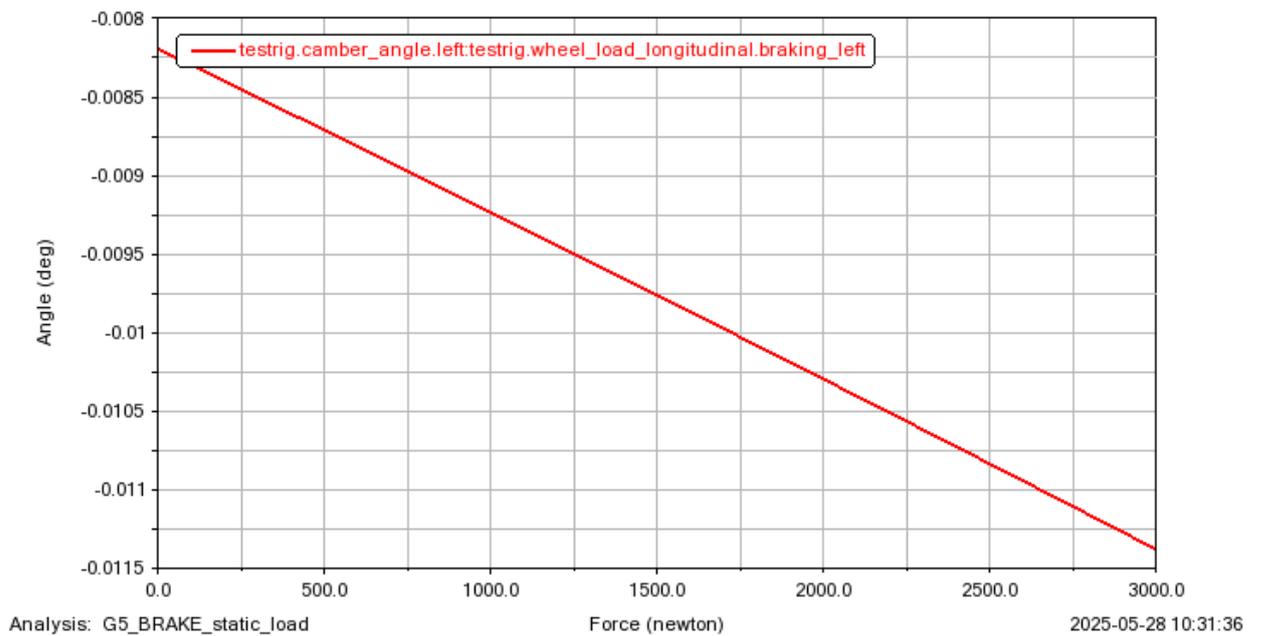


Рисунок 31 – Изменение развала на передней оси при тормозном усилии

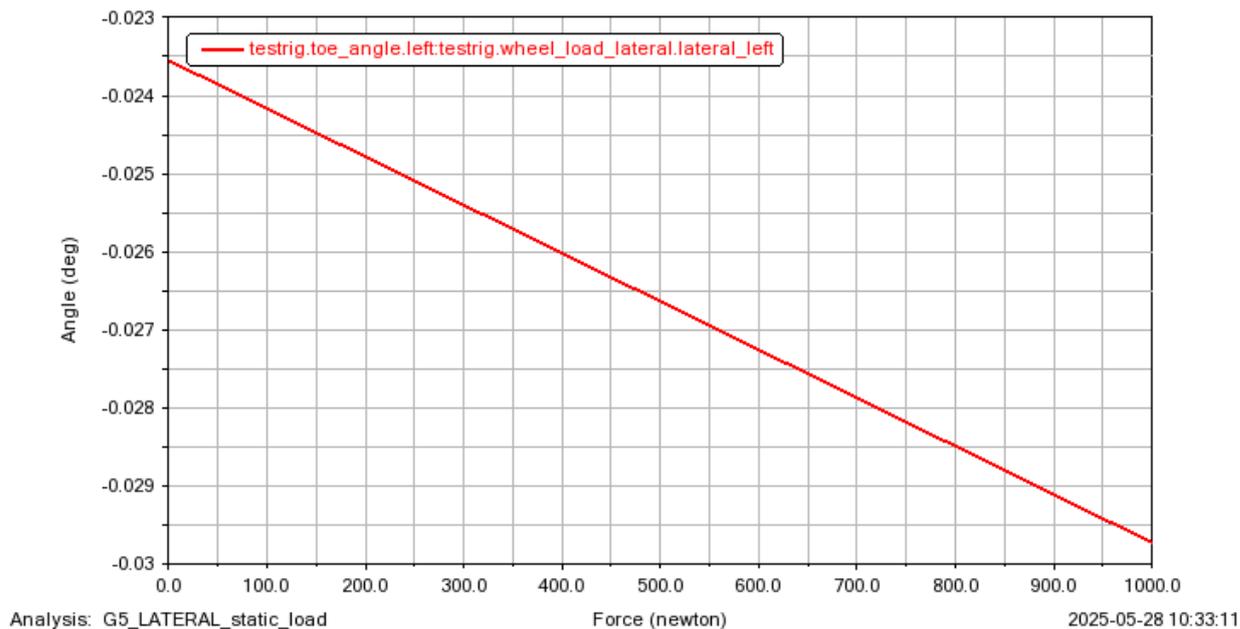


Рисунок 32 – Изменение углов схождения на передней оси при силе, возникающей во время прохождения поворота

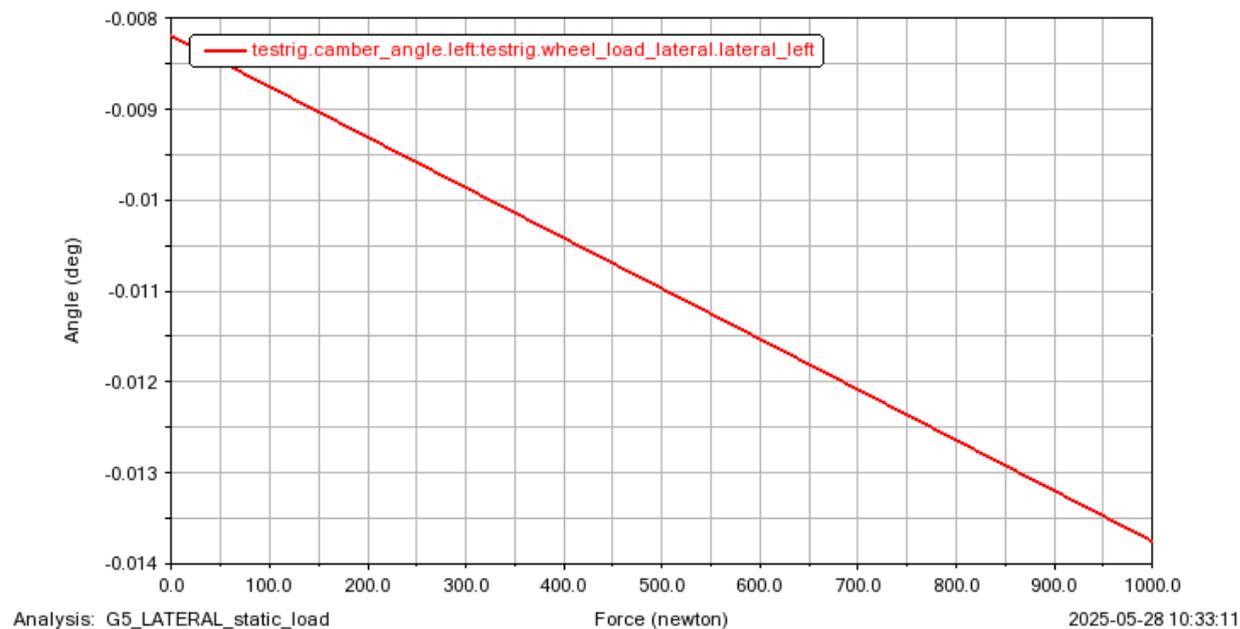


Рисунок 33 – Изменение углов развала на передней оси при силе, возникающей во время прохождения поворота

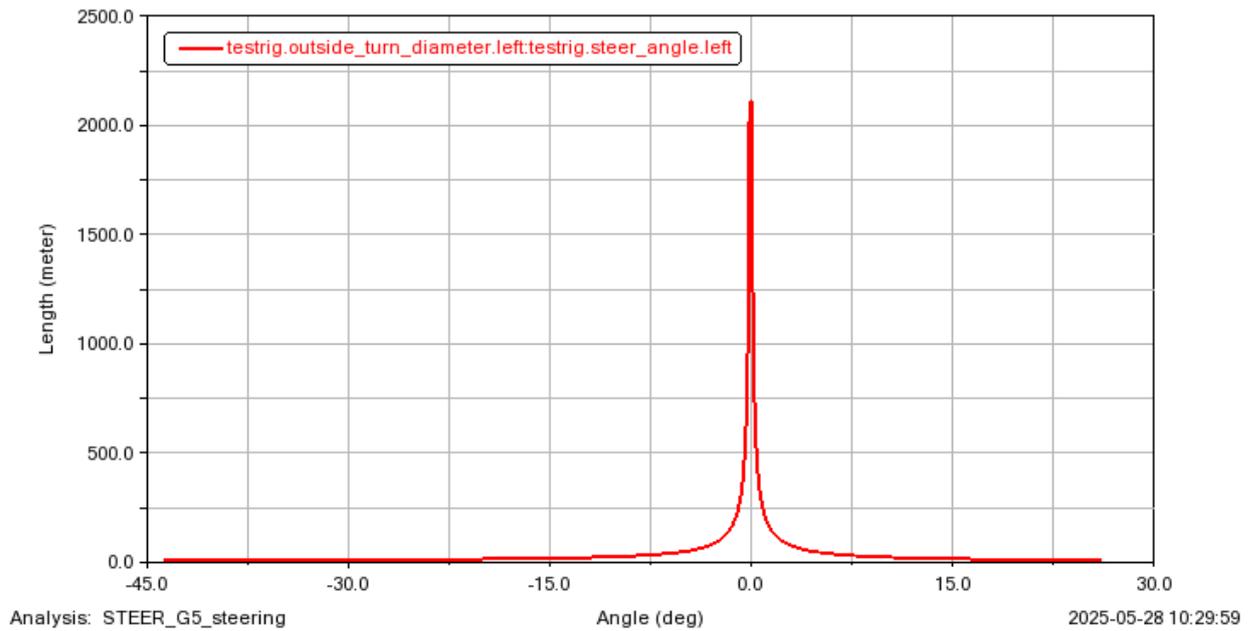


Рисунок 34 – Изменение радиуса разворота при вращении рулевого колеса

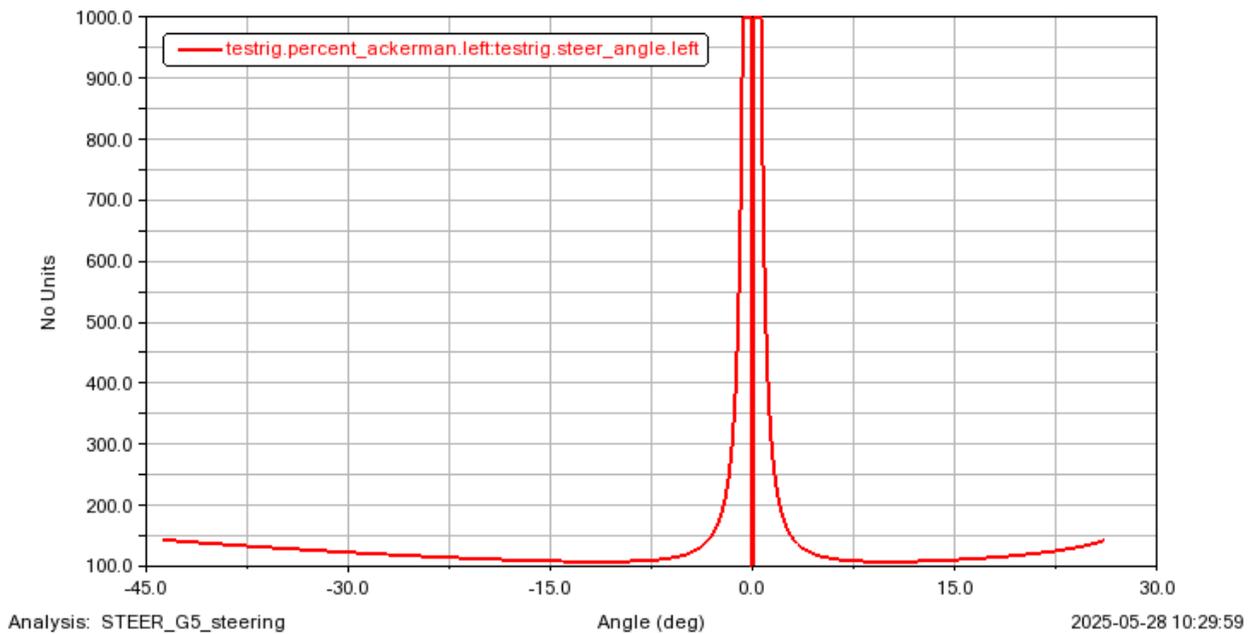


Рисунок 35 – Изменение угла Аккермана при вращении рулевого колеса

Подобные симуляции также проводятся и для задней оси гоночного болида класса «Формула Студент».

На рисунках 36–44 изображены сравнительные графики результатов проведенных симуляций для задней подвески болидов.

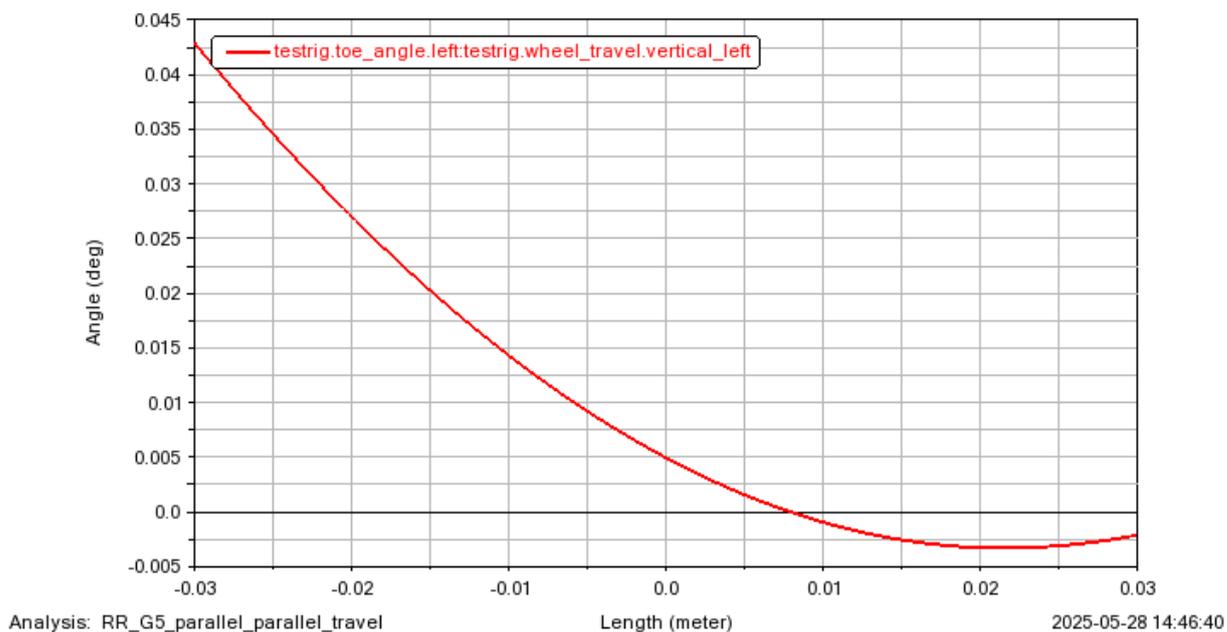


Рисунок 36 – Изменение углов схождения на задней оси при параллельном ходе подвески

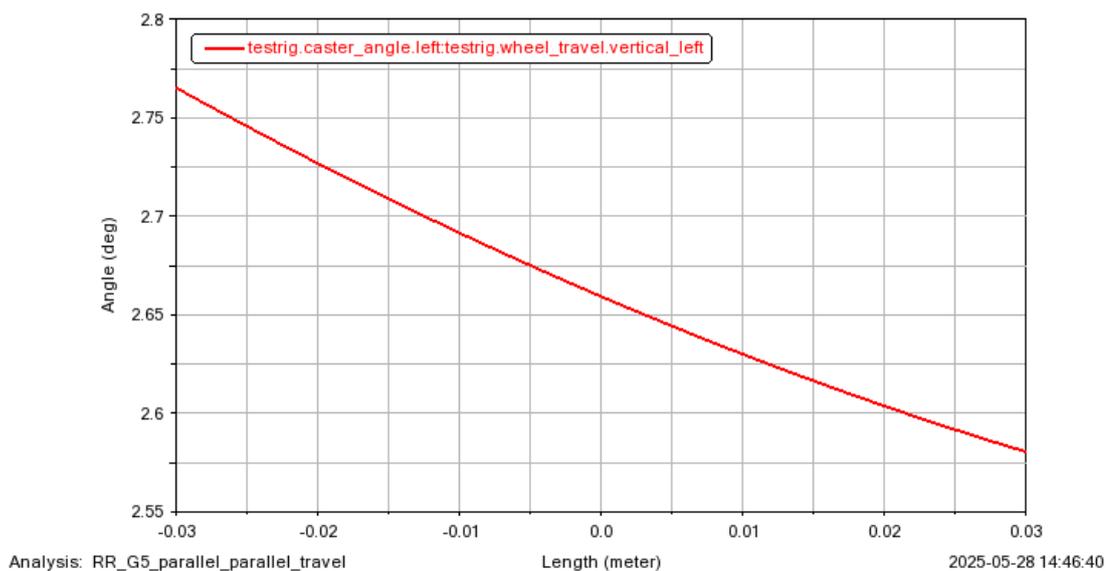


Рисунок 37 – Изменение углов кастера на задней оси при параллельном ходе подвески

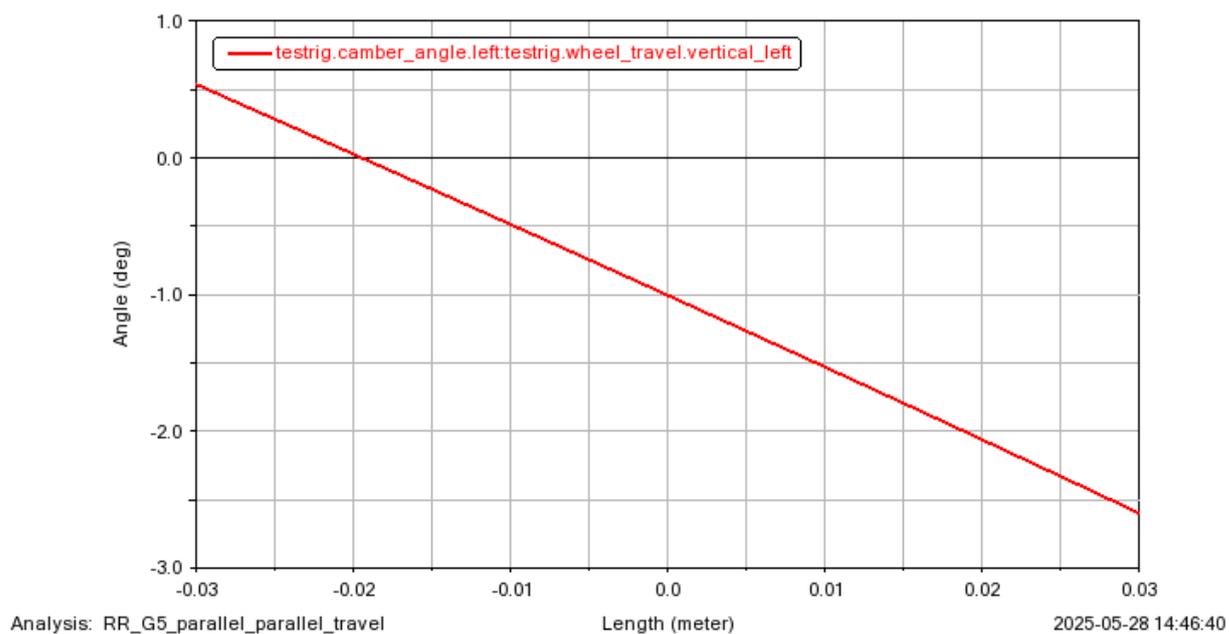


Рисунок 38 – Изменение углов развала на задней оси при параллельном ходе подвески

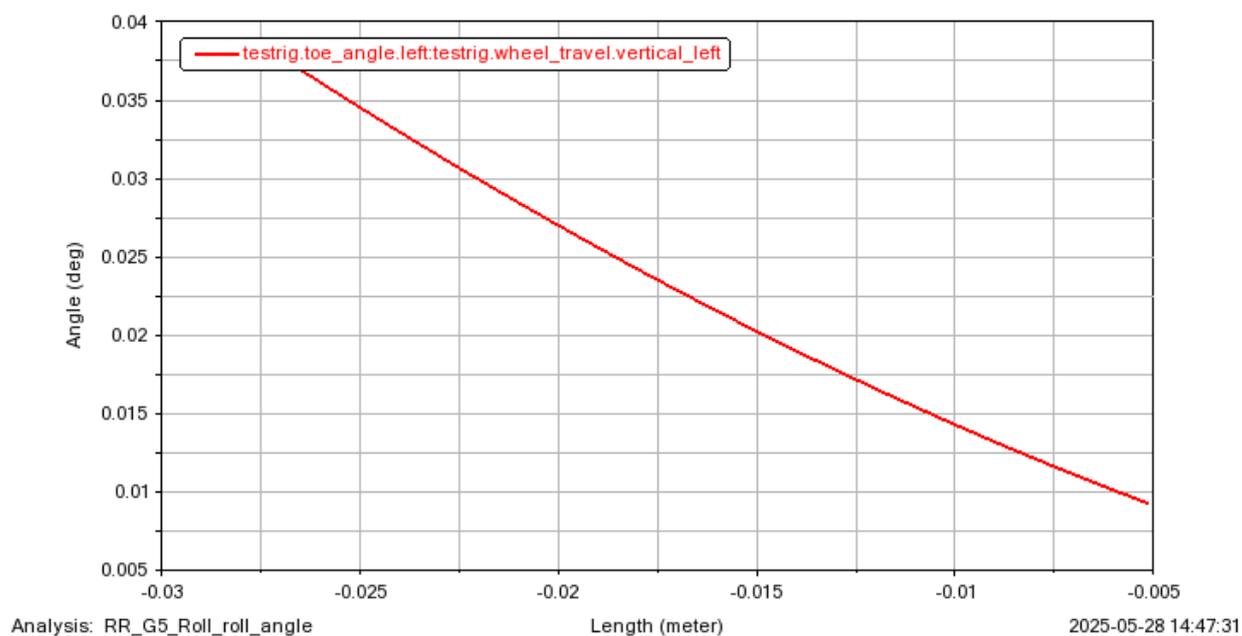


Рисунок 39 – Изменение углов схождения на задней оси при крене кузова

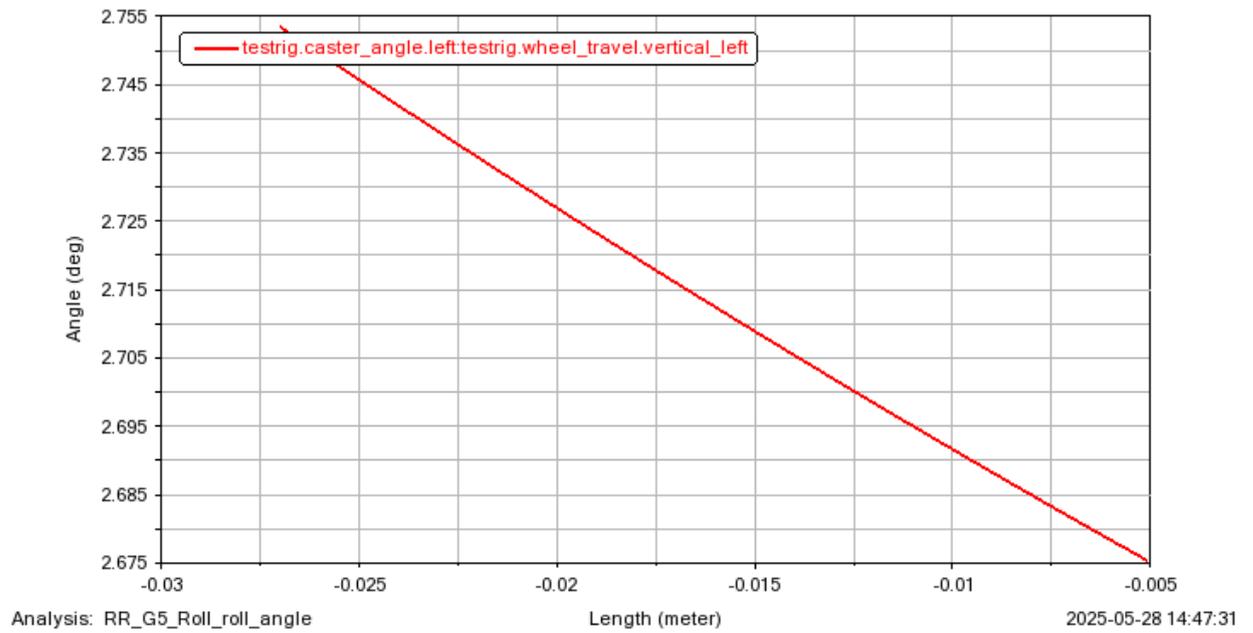


Рисунок 40 – Изменение кастера на задней оси при крене кузова



Рисунок 41 – Изменение схождения на задней оси при тормозном усилии

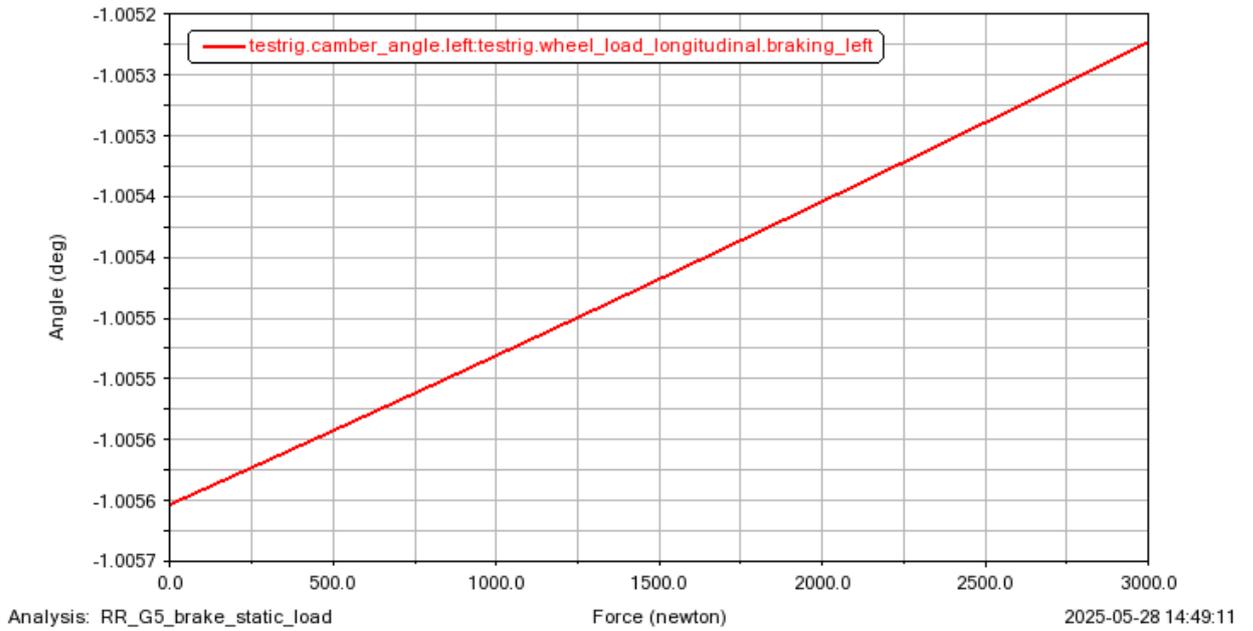


Рисунок 42 – Изменение развала на задней оси при тормозном усилии

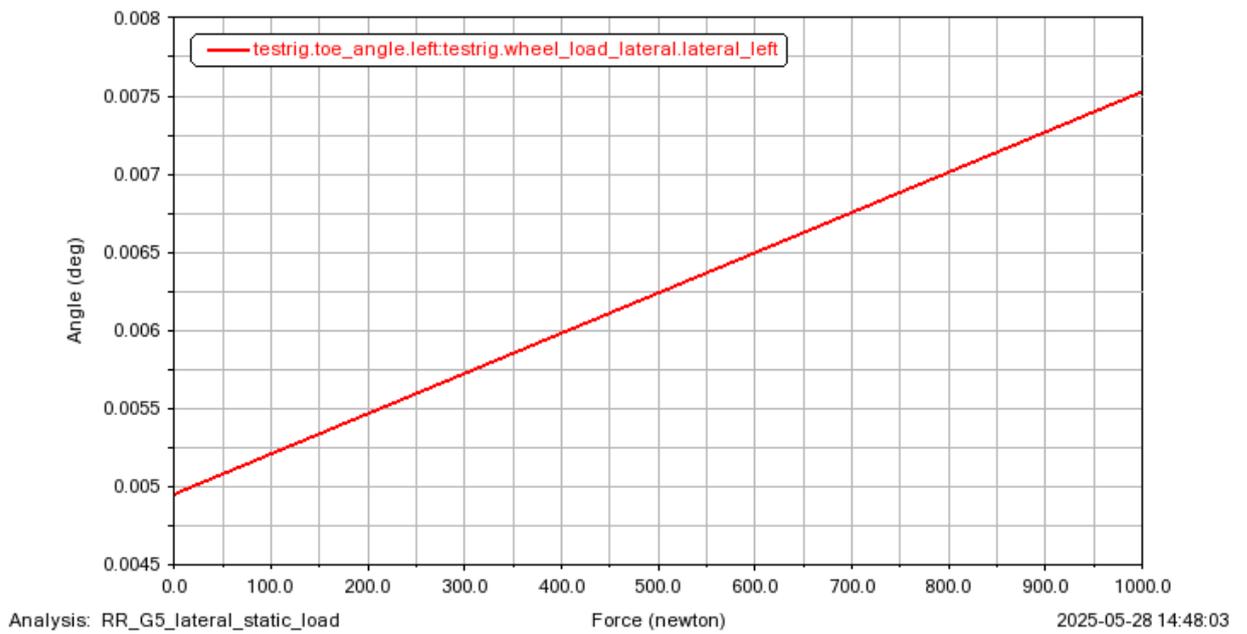


Рисунок 43 – Изменение схождения на задней оси при прохождении поворота

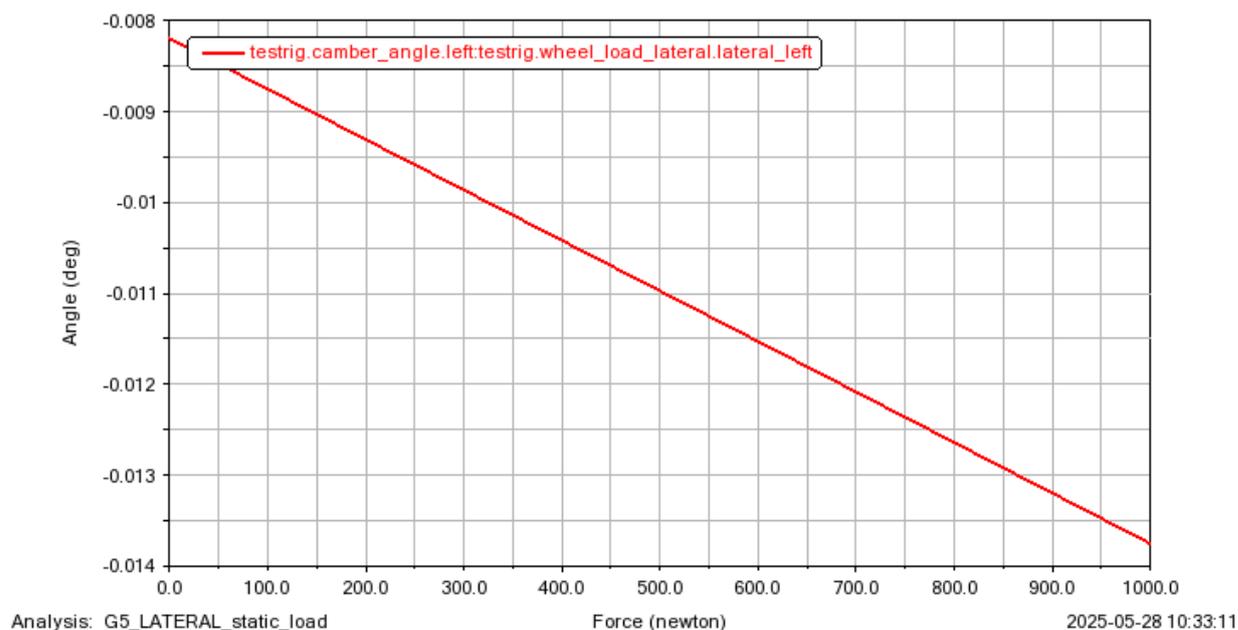


Рисунок 44 – Изменение развала на задней оси при прохождении поворота

«Это были симуляции кинематики подвески гоночного автомобиля, которые необходимы для того, чтобы оценить потенциал и возможности передней и задней подвески гоночного болида. Все это статические симуляции, однако также проводятся и динамические симуляции гоночного автомобиля в сборе, для получения сведений о поведении автомобиля при реальных условиях на гоночном терке.

На рисунках 45–48 показаны графики, полученные при нескольких симуляциях, таких как прохождение восьмерки (SkidPad), торможение в повороте, а также импульсное отклонение рулевого колеса» [7].

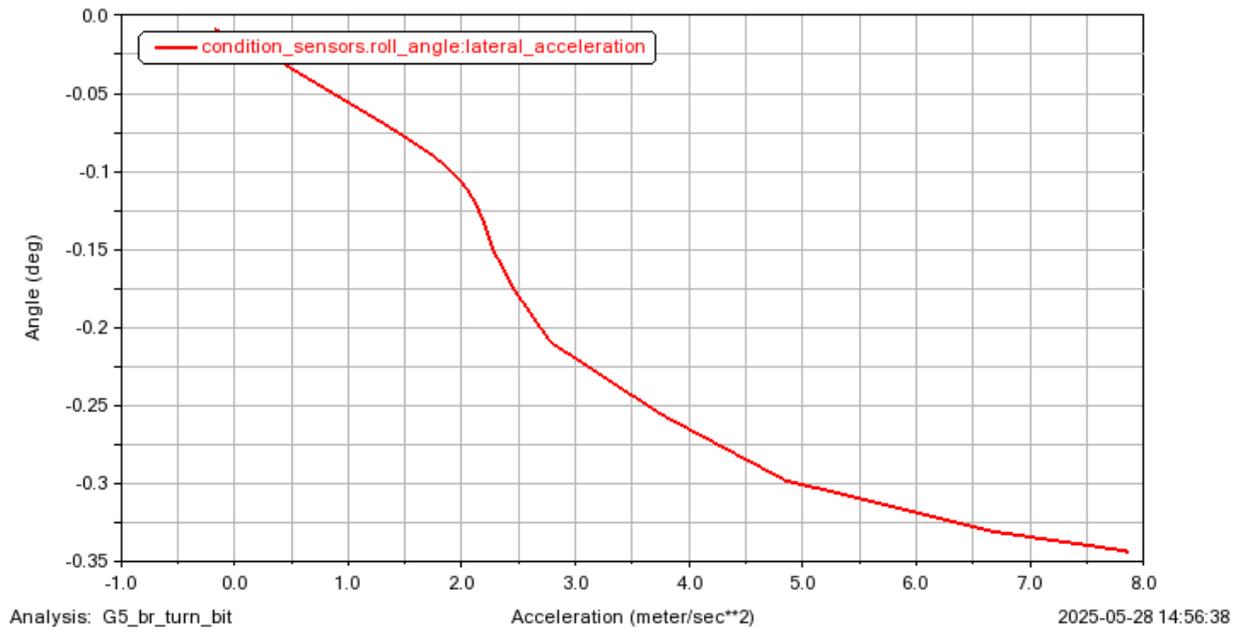


Рисунок 45 – График зависимости продольного крена автомобиля от торможения в повороте

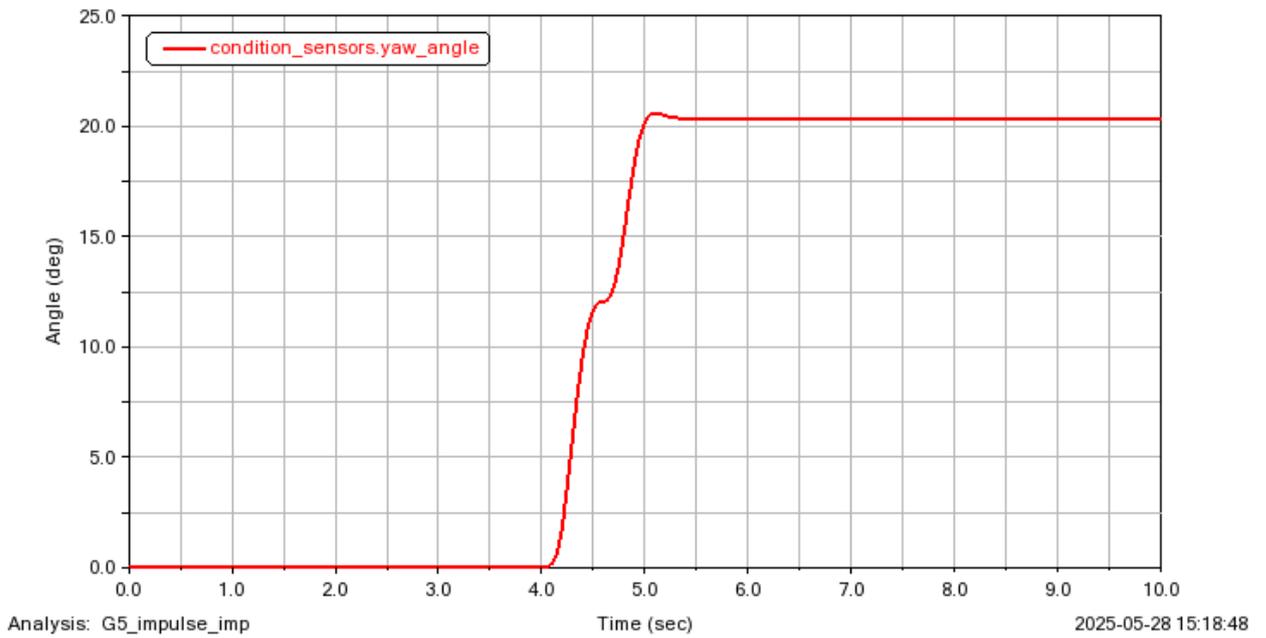


Рисунок 46 – График зависимости угла рыскания от времени при импульсном повороте рулевого колеса

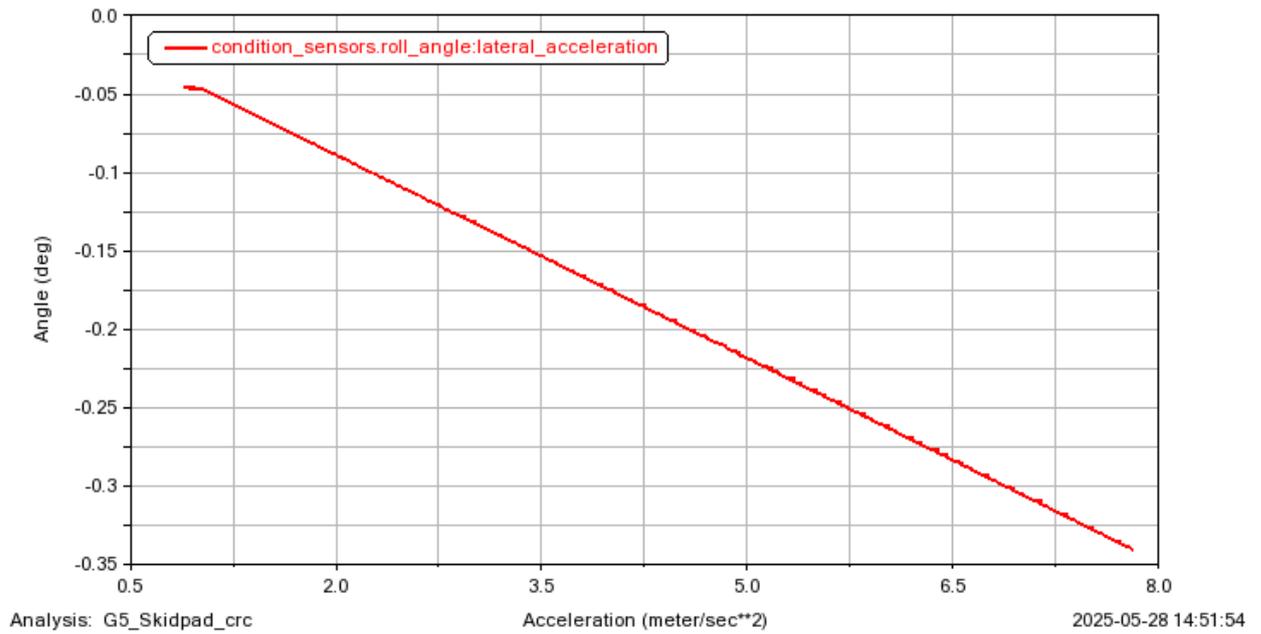


Рисунок 47 – График зависимости бокового крена автомобиля от бокового ускорения

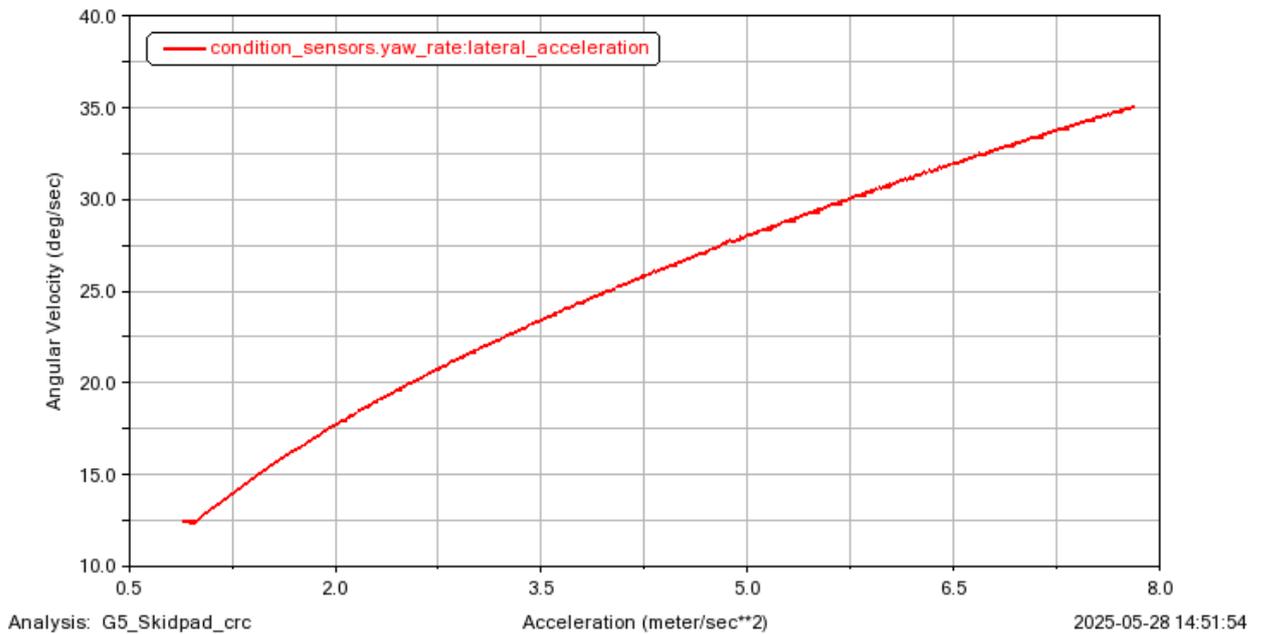


Рисунок 48 – График зависимости угловой скорости автомобиля от бокового ускорения

На рисунке 49 можно увидеть симуляцию наклонного стола, чтобы определить переворачиваемость автомобиля.

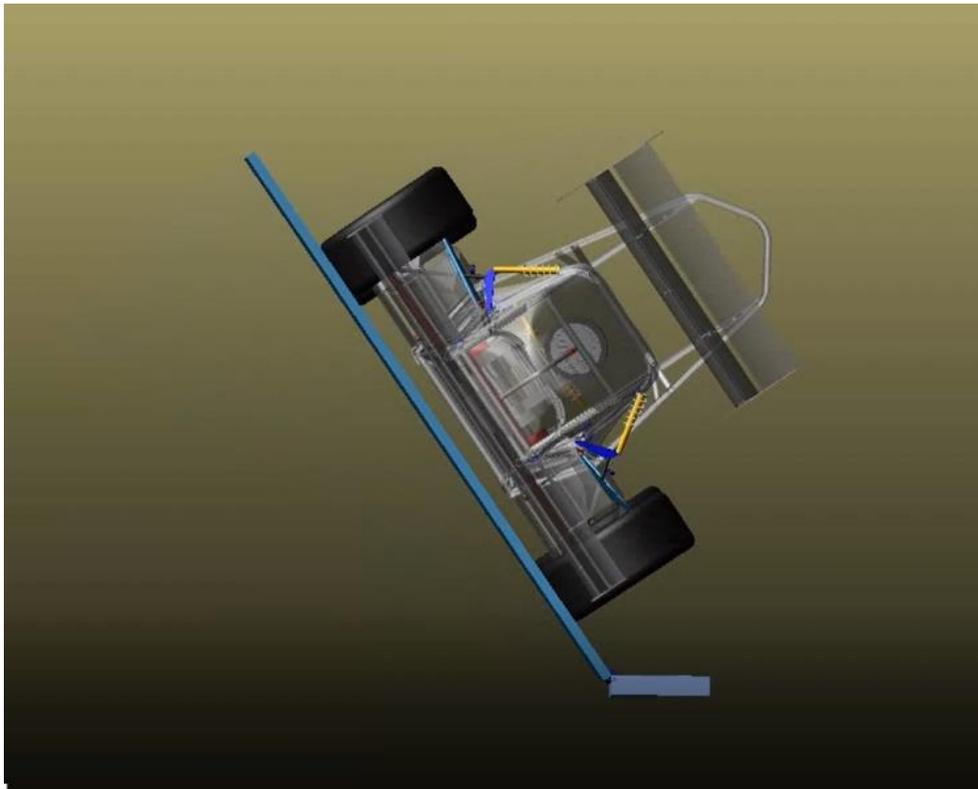


Рисунок 49 – Симуляция наклонного стол (один из этапов технической инспекции)

В заключении можно сказать, что мультизвенная модель смоделирована правильно и полностью функционирует. Также посмотрев на результаты симуляций, можно увидеть очень хорошие показатели кинематических характеристик передней и задней подвески гоночного болида, а также хорошие показатели динамические.

Выводы по разделу

В данном разделе описаны симуляции, проведенные для передней и задней подвески, а также симуляции, проведенные для сборки автомобиля. В данном разделе можно увидеть результаты статических и динамических испытаний. Результаты указывают на то, что оптимизация подвески, привела к улучшению ее характеристик.

Заключение

В ходе диссертации был проведен сравнительный анализ конструкций гоночных болидов класса «Формула Студент» зарубежных команд, участвующих в соревнованиях. Показана актуальность проекта, которая заключается в его способности интегрировать теоретические знания с практическими навыками.

Был рассмотрен основной регламент соревнований для того, чтобы понимать технические требования к гоночному автомобилю, а также были изучены и описаны основные теоретические аспекты, которые важны при проектировании подвески гоночного автомобиля.

Был изучен и описан инструмент для проектирования и симуляции, такой как АДАМС.

В рамках данной работы была разработана концепция гоночного автомобиля класса «Формула Студент», определены исходные данные, и смоделирована полноценная многозвенная модель передней и задней подвески, а также автомобиля в сборе.

Были проведены статические и динамические симуляции для проверки характеристик подвески и болида в движении. Результаты показали значительное улучшение показателей относительно болидов предыдущих поколений, а также в принципе очень хорошие показатели. Описаны симуляции, проведенные для передней и задней подвески, а также симуляции, проведенные для сборки автомобиля. В данном разделе можно увидеть результаты статических и динамических испытаний.

В рамках работы над проектом полученная конструкция была применена на болиде команды Тольяттинского государственного университета G5. Также была проведена субъективная оценка пилотами команды, по итогам которой были получены положительные отзывы об управляемости.

Список используемых источников

1. Антошкина В.А. Проектирование системы подвески гоночного автомобиля Formula Student // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. Механика и машиностроение. 2016. С. 44–47.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т. Т.3. 8-е изд. перераб. и доп. под ред. И.Н. Жестоковой. М. : Машиностроение, 2001. 864 с.
3. Арутюнян Г.А., Евсеев К.Б. Разработка подвески спортивного автомобиля класса «Формула Студент» // Молодежный научно-технический вестник. № 1. 2013. С. 148-154.
4. Вишняков Н.Н., Вахламов А.Н. Автомобиль: Основы конструкции: учеб, для ВУЗов специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» 2-е изд. перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1986, 304 с.
5. Волкова Е.И., Двоеглазова Н.А. Методика расчёта бизнес- презентации в рамках проекта Formula Student // Ежегодный сборник трудов "Студенческие инженерные проекты". 2017. С. 198-204.
6. Волкова Е.И., Шерстобитова О.О. Разработка пространственной рамы для гоночного болида Black Bullet // VII выпуск журнала "Точная наука". 2017. С. 18-20.
7. Горелов В.А., Косицын Б.Б. Разработка комплексной системы управления движением спортивного автомобиля класса «Формула Студент» по заданной трассе // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. С. 45–55.
8. Дьяков И.Ф., Оптимальный выбор подвески транспортных средств // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований. Механика и машиностроение. 2020. С. 148–154.
9. Дэс Хаммилл. Подвеска и тормоза: как построить и модифицировать спортивный автомобиль // пер. с англ. М. : Легион-Автодата, 2005. 96 с.

10. Кисуленко Б.В. Краткий автомобильный справочник. М. : Автополисплюс, 2005. 560 с.
11. Лукин П.П. Конструирование и расчёт автомобиля. М. : Машиностроение, 1984. 376 с.
12. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2003. 782 с.
13. Маталин А. А. Технология машиностроения: учеб. для студ. вузов, обуч. по спец. 151001 напр. "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроит. производств". Изд. 3-е, стер. ; Гриф УМО. Санкт-Петербург : Лань, 2010. 512 с.
14. Маркина А.А., Чепкасов С.Н., Бережная М.А. Разработка комплексной системы управления движением спортивного автомобиля класса «Формула Студент» по заданной трассе // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2019. С. 1–12.
15. Петрова М.С. Охрана труда на производстве и в учебном процессе: учеб. пособие. М. : ЭНАС, 2006. 232 с.
16. Раймпель Й. Шасси автомобиля / под. ред. И. Н. Зверева. М. : Машиностроение, 1983. 356 с.
17. Раскин А.М. Основы расчета и указания к дипломному проектированию агрегатов шасси автомобиля. Саратов : Ротапринт, 1975. 68 с.
18. Рассадкин Н.А., Шорников Д.А., Агго С.Д., Пляшко А.Н. Влияние различных факторов на управляемость автомобиля // Colloquium-journal. 2021. №3 (90). С. 55–57.
19. Свинов В.В. Моделирование динамики рулевого управления автомобиля // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2008. С. 110–111.
20. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах Т2 / под ред. А.Г. Косиловой. М. : Машиностроение, 1985, 496 с.
21. Суслов А. Г. Технология машиностроения: учеб. для вузов. М. : Машиностроение, 2007. 429 с.

- 22.Шерстобитова О.О., Мошко Д.А. Разработка модульной каркасно-сборочной технологической оснастки для производства элементов спортивно-гоночных автомобилей» // Ежегодный сборник трудов "Студенческие инженерные проекты". 2017. С. 205–207.
- 23.Badih A. Jawad, Jason Baumann. Design of Formula SAE Suspension // Motorsport Engineering Conference & Exhibition Indianapolis, Indiana December. 2002. P. 2–5.
- 24.Formula SAE [Электронный ресурс] // URL: <http://www.fsaeonline.com/> (дата обращения: 05.04.2025).
- 25.Formula Student Germany [Электронный ресурс] // URL: <https://www.formulastudent.de/> (дата обращения: 05.04.2025).
- 26.Greg Wheatley, Brent Lane Design of a Rear Suspension for a Race Car // Engineering Letters Journal. 2020. P. 414–418.
- 27.Li Sun, Zhao Deng, Qing Zhang. Design and Strength Analysis of FSAE Suspension // The open Mechanical Engineering Journal. 2014. P. 414–418.
- 28.Popa C. 2005 Formula SAE-A Racer Car / University of Southern Queensland. 2005. P. 113–124.
- 29.Riley W. and George A. «Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis» / University of Cornwell. 2002. P. 85-88.
- 30.SAE Mobilus [Электронный ресурс] // URL: <http://students.sae.org/cds/formulaseries/> (дата обращения: 14.05.2025).