

УДК 629.113

DOI: 10.46960/2782-5477_2023_1_12

В.А. Кузмичёв, А.Л. Кулагин, К.О. Гончаров

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПОДВЕСКИ СПОРТИВНОГО АВТОМОБИЛЯ
КЛАССА «FORMULA STUDENT» В ADAMS CAR**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Разработана методика, позволяющая на ранних стадиях проектирования спортивного автомобиля при отсутствии физического прототипа проводить первоначальный анализ прочности и долговечности деталей ходовой части автомобиля, а также осуществлять проверку и корректировку эксплуатационных параметров подвески. Моделирование виртуальных испытаний как в целом автомобиля, так и отдельных его узлов и деталей позволяет конструктору оперативно оценивать работоспособность создаваемой конструкции, что снижает риск принятия неверного решения, приводит к сокращению сроков и затрат на проектирование, повышает качество и продуктивность создаваемой продукции.

Ключевые слова: имитационное моделирование, подвеска спортивного автомобиля, *FormulaStudent*, *AdamsCar*, *AutodeskInventor*, эксплуатационные параметры подвески.

Введение

Подвеска – один из самых важных элементов спортивного автомобиля. Ее оптимальные настройки позволяют повысить динамические характеристики автомобиля и сформировать обратную связь между водителем и дорогой. Подвеска должна обеспечивать постоянный контакт шин с дорожным покрытием таким образом, чтобы они могли приблизиться к предельным характеристикам. Современные инженерные инструменты позволяют создать трехмерный прототип подвески, в котором будут скомпонованы между собой элементы и учтено множество конструктивных и эксплуатационных факторов. Проектирование конструктивно сложной системы подразумевает наличие параметрической модели с возможностью изменения геометрии составных частей, ввиду чего все элементы модели подвески должны обладать свойствами адаптивности. Полученные виртуальные модели используют в расчетных программных пакетах для оценки прочности, по результатам которых делаются выводы о надежности элемента или рассматриваются варианты оптимизации конструкции.

Трехмерная модель, в отличие от физической, может быть скорректирована без затрат. Еще одним ее преимуществом является возможность провести виртуальные динамические испытания и уже на этапе компьютерного моделирования сформировать эксплуатационные характеристики подвески. Тематика проектирования и создания подвесок для спортивных автомобилей подразумевает наличие ограничений и требований, описанных в регламенте. Данные ограничения затрагивают ряд эксплуатационных параметров подвески.

Исходя из сложности компоновки элементов подвески, подбора оптимальных настроек углов установки колес и наличия ограничений требования регламента [1] требуется применение различных инженерных механизмов, которые рассмотрены в данной статье.

Разработка трехмерного прототипа подвески в программном пакете *Autodesk Inventor*

Для проведения виртуальных испытаний подвески необходимо создать полноценную трехмерную модель на базе пространственного каркаса безопасности. Трехмерная модель учитывает конструктивные, компоновочные и эксплуатационные параметры подвески [2].

Подвеска автомобиля состоит из большого количества элементов, сопряженных между собой различными видами соединений. Для получения трехмерного прототипа подвески необходимо сформировать каждую деталь, как самостоятельную модель.

В основе построения трехмерной модели детали в системе *Inventor* лежит плоский контур (рис. 1). Даже самая сложная модель детали состоит из набора контуров и примененных к ним операций по созданию трехмерной модели. Сам контур создается в режиме «Эскиз» из простейших геометрических фигур (примитивов): отрезок, сплайн, окружность, дуга, точка и др. Взаимосвязь примитивов создается при помощи зависимостей. При отсутствии зависимостей может непредсказуемо измениться форма контура и ориентация его примитивов. После того, как был получен контур детали, необходимо перейти из режима «Эскиз» в режим «Модель» и произвести преобразования двухмерного контура в трехмерную модель (рис. 2). Зачастую деталь состоит из нескольких эскизов, находящихся в разных плоскостях. Геометрию детали можно корректировать, как меняя эскиз, так и поверхностно добавляя фаски, скругления, резьбы и т.д.

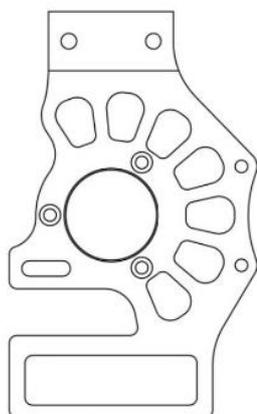


Рис. 1. Эскиз поворотного кулака



Рис. 2. Трехмерная модель поворотного кулака

Трехмерные детали компонуются в сборку (рис. 3) посредством наложения взаимосвязей и соединений. При помощи приложения для моделирования динамики автомобиля *Adams Car* можно провести исследования и оптимизировать параметры разрабатываемого изделия [3].

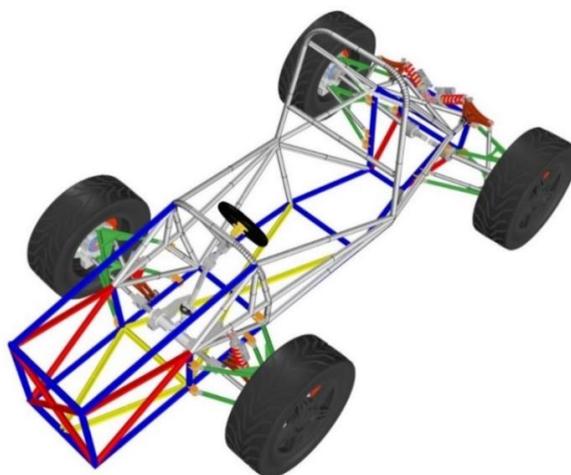


Рис. 3. Сборка подвески на пространственном каркасе безопасности

Моделирование подвески управляемой оси спортивного автомобиля в Adams Car

При создании модели передней оси спортивного автомобиля в *Adams Car* работа происходит, прежде всего, с параметризованной моделью, включающей подсистемы подвески и рулевого управления, многие элементы которых могут быть податливыми. По результатам исследований параметры подсистем могут быть скорректированы по геометрическим размерам, местам крепления, типам компонентов автомобиля.

План построения имитационной модели управляемой оси спортивного автомобиля в *Adams Car* включает 6 пунктов:

- 1) формирование новой базы данных (шаблонов);
- 2) расстановка начальных и конечных точек элементов управляемой оси;
- 3) формирование твердотельной геометрии элементов передней оси;
- 4) наложение зависимостей на трехмерные модели;
- 5) проверка наложенных зависимостей и сохранение модели;
- 6) настройка параметров подвески;
- 7) импорт и адаптация рулевого управления из базы данных в модель передней подвески спортивного автомобиля.

В результате создается имитационная модель управляемой оси спортивного автомобиля (рис. 4).

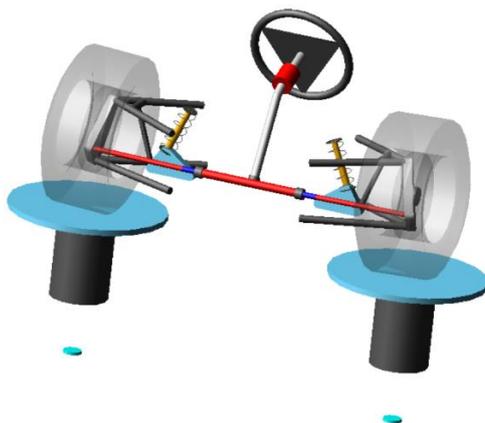


Рис. 4. Модель передней управляемой оси спортивного автомобиля «*FormulaStudent*»

Проведение компьютерных испытаний в *Adams Car*, направленных на получение эксплуатационных характеристик подвески спортивного автомобиля «*Formula Student*»

Программа *Adams Car* позволяет моделировать различные испытания подвески с целью выявления эксплуатационных параметров ее работы. Далее назовем и охарактеризуем испытания, которые можно провести с подвеской автомобиля.

1. **Parallel Travel** – включает сжатие и отбой подвески одновременно двух колес передней оси в одном направлении. Имеется возможность задать диапазон вертикального перемещения колеса в миллиметрах и повернуть руль на определенный угол.
2. **Opposite Travel** – задает вертикальное перемещение левого и правого колеса в противоположные направления. Одновременно настраивается диапазон вертикального перемещения колеса (мм), и есть возможность фиксации рулевого колеса в определенном положении ($^{\circ}$).

3. **Roll and Vertical Force** – имитирует крен кузова с возможностью нагружения подвески вертикальной силой. Настраиваются верхний и нижний предел угла крена, общая вертикальная сила (Н) и присутствует возможность зафиксировать рулевое колесо в определенном положении ($^{\circ}$).
4. **Single Travel** – задает движение одному из колес оси на выбор. Предварительно настраивается диапазон вертикального перемещения колеса в мм и присутствует возможность фиксации рулевого колеса в определенном положении ($^{\circ}$).
5. **Steering** – позволяет осуществлять поворот колес на определенный диапазон угла поворота ($^{\circ}$). Дополнительно можно настроить фиксированную величину сжатия/отбоя вертикального перемещения подвески отдельно для левого и правого колес в мм.
6. **Static Loads** – включает испытания подвески передней оси спортивного автомобиля при следующих входных данных:
 - выравнивающий момент, (Н·м);
 - поворотная сила, (Н);
 - тормозная сила, (Н);
 - тяговая сила, (Н);
 - вертикальная длина, (м);
 - опрокидывающий момент, (Н·м);
 - крутящий момент крена, (Н·м);
 - сила повреждения, (Н);
 - радиус повреждения, (м);
 - пределы угла поворота, ($^{\circ}$).

Каждый параметр указывается для каждого колеса в отдельности и подразделяется на две составляющие: верхний и нижний предел.

7. **Dynamic** – тестирование подвески спортивного автомобиля происходит при известных нагружениях левого и правого колес.

Для проведения теста необходимо ввести следующие параметры:

- поворотная сила, (Н);
- тормозная сила, (Н);
- тяговая сила, (Н);
- выравнивающий момент, (Н·м);
- опрокидывающий момент, (Н·м);
- крутящий момент крена, (Н·м);
- сила повреждения, (Н);
- радиус повреждения, (м);
- воздействие на рулевое колесо.

Таким образом можно провести виртуальные испытания подвески передней оси спортивного автомобиля с анализом воздействия на эксплуатационные параметры интегрированного рулевого управления [4]. Результаты имитационного моделирования можно проанализировать и сравнить с расчетными параметрами [5-7].

Заключение

Ключевой стадией разработки виртуального прототипа подвески является проведение анализа результатов: расчетов, трехмерного и имитационного моделирования. По результатам анализа инженер делает вывод о правильности работы системы. На данном этапе формирования подвески присутствует возможность без затрат скорректировать параметры с по-

вторным проведением компьютерных испытаний. Это дает дополнительную экономию времени до момента выпуска деталей системы подвески в производство.

Работа выполнена при поддержке студенческого конструкторского бюро FormulaStudent–Atigo. Авторы выражают благодарность Даниле Александровичу Бутину за консультирование при построение имитационной модели управляемой оси спортивного автомобиля.

Библиографический список

1. Formula SAE Rules. SAE International, 2021 [Электронный ресурс] // Режим доступа https://fsae.engineering.columbia.edu/FSAE_Rules_2021_V1.html (дата обращения 05.12.2022).
2. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учебник [Текст] / В.Н. Кравец. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013. – 413 с.
3. **Раймпель, Й.** Шасси автомобиля: Амортизаторы, шины и колеса [Текст] / Й. Раймпель. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
4. **Раймпель, Й.** Шасси автомобиля: Рулевое управление [Текст] / Й. Раймпель. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
5. **Кузмичёв, В.А.** Расчет координаты центра масс спортивного автомобиля класса «FORMULA STUDENT» [Текст] / В.А. Кузмичёв, А.Л. Кулагин, К.О. Гончаров // Будущее технической науки. Сборник материалов XIX-й Всероссийской молодежной научно-технической конференции. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2020. С. 149-151.
6. **Кузмичёв В.А.** Расчет плеч рокера на основе распределения сил в подвеске спортивного автомобиля класса «FORMULA STUDENT» [Текст] / В.А. Кузмичёв, А.Л. Кулагин // Будущее технической науки. Сборник материалов XX-й Всероссийской молодежной научно-технической конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2021.
7. **Кулагин А.Л.** Formation of performance characteristics of a Formula SAE sports vehicle based on calculations and simulations of systemic elements [Текст] / А. Кулагин, К. Гончаров, В. Кузмичёв, М. Голубев, М. Гулин, В. Хозеров, А. Зайцев // Материаловедение и инженерия, Том 1086, 5-й Международный научно-практический семинар «Мобильность транспортных и технологических транспортных средств» (МТТВ 2020) 12-13 ноября 2020 г., Нижний Новгород, Российская Федерация.