

УДК 629.113

Д.А. Бутин, В.В. Беляков, К.О. Гончаров

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СПОРТИВНОГО АВТОМОБИЛЯ КЛАССА  
“FORMULA STUDENT” ПО ТРАЕКТОРИИ ПОСТОЯННОЙ КРИВИЗНЫ  
С КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТЬЮ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ  
MSC.ADAMS/CAR**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований свойств активной безопасности спортивного автомобиля класса “formula student”. Компьютерное моделирование выполнено в программном комплексе MSC.ADAMS/CAR лицензионного пакета University MD FEA Bundle, переданного в НГТУ компанией MSC.Software GmbH в рамках соглашения о стратегическом сотрудничестве.

*Ключевые слова:* спортивный автомобиль, моделирование, управляемость, активная безопасность.

Особенностью спортивного автомобиля является оптимизация всех систем и агрегатов под конкретную трассу, с целью получения автомобиля, способного преодолевать контрольный участок за минимальное время. Наибольшее влияние на характеристики автомобиля оказывают параметры подвески. Оптимизация параметров подвески занимает значительную часть времени от всех настроек. Для сокращения времени, затрачиваемого на настройку, все больше применяют имитационное моделирование. Моделирование представляет процесс конструирования на ЭВМ модели сложной реальной системы, функционирующей во времени, и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы [4].

В данной работе представлены результаты моделирования криволинейного движения автомобиля, имитирующего испытание “Skid-Pad”, проводимое в рамках соревнований “Formula Student”.

В качестве программного комплекса для проведения исследований был выбран программный комплекс MSC.ADAMS/CAR лицензионного пакета University MD FEA Bundle, обладающий значительным функционалом и имеющий широкий спектр возможностей:

- моделирование транспортного средства с учетом ключевых конструктивных параметров, оказывающих влияние на динамику криволинейного движения;
- моделирование автомобильных шин с использованием специального модуля ADAMS/tire, обеспечивающего учет жесткостных и демпфирующих свойств покрышки;
- возможность задания типовых управляющих воздействий на органы управления;
- обеспечение высококачественной текстурированной трехмерной визуализации;
- вывод графиков измеряемых величин (в частности, скорости, нормальных реакций на колесах, углов увода и пр.).

Объектом исследования являлся автомобиль категории M1 массой до 500 кг. В качестве аналога был выбран автомобиль, созданный студенческим конструкторским бюро “Amigo”, схема автомобиля приведена на рис. 1.

Моделирование движения транспортного средства в программном комплексе MSC.ADAMS/CAR можно разделить на основные этапы:

1. Создание виртуального полигона

- моделирование дорожного полотна;
- «разметка» участков виртуального испытания в соответствии с требованиями нормативных документов.

2. Создание модели автомобиля
  - создание подсистем и агрегатов транспортного средства;
  - сборка модели транспортного средства из подсистем;
  - задание управляющего воздействия (формирование алгоритма управления транспортным средством).
3. Моделирование криволинейного движения.
4. Анализ и обработка результатов моделирования.

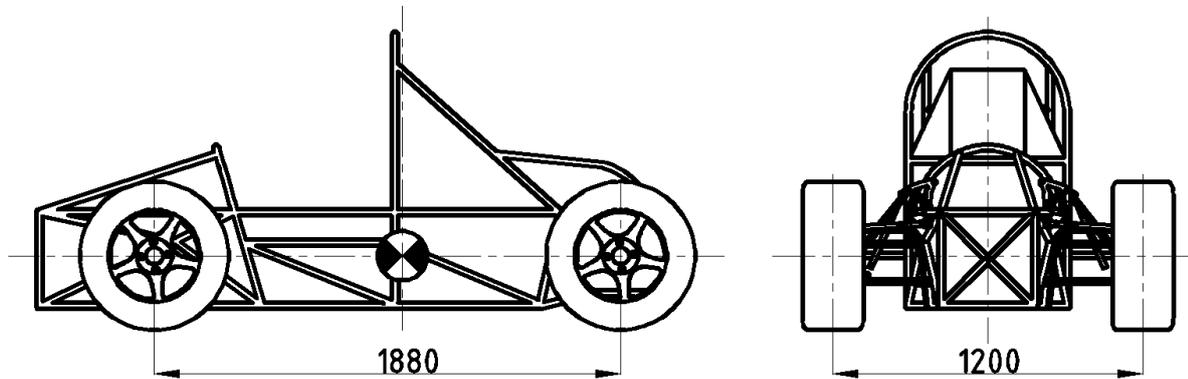


Рис. 1. Схема спортивного автомобиля класса “Formula Student”

В соответствии с требованием регламента наиболее значимыми являются результаты динамического испытания (определение критической скорости движения по траектории постоянной кривизны)

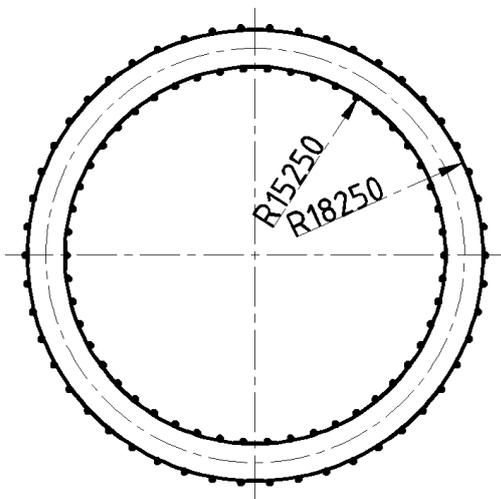


Рис. 2. Схема виртуального полигона для имитации испытания «статическая чувствительность к управлению»

На рис. 2 представлена схема созданного виртуального полигона, необходимого для имитации испытания (движение по траектории постоянной кривизны) в соответствии с регламентом соревнований “Formula Student”.

На рис. 3 представлена модель автомобиля, учитывающая основные конструктивные параметры: расположение центра тяжести, кинематику и упруго-демпфирующие свойства подвесок и пр.

На первом этапе моделирования с целью проверки работоспособности и предварительной оценки адекватности поведения имитационной модели были выполнены тестовые испытания. По результатам данного испытания, можно судить о адекватности реакций автомобиля.

На рис. 4 показано компьютерное моделирование, при котором модель автомобиля движется по испытательному полигону.

На рис. 5 показан фрагмент натуральных испытаний, выполненных на территории авто спортивного комплекса “Нижегородское кольцо”. Сравнительный анализ результатов испытаний с данными имитационного моделирования представлен в табл. 1. Из данных таблицы видно, что расхождение значений критической скорости движения и радиуса траектории составляет менее 1%, что является вполне приемлемым и свидетельствует об адекватном поведении модели и корректном выборе параметров.



Рис. 3. Схема модели спортивного автомобиля класса «Formula Student»

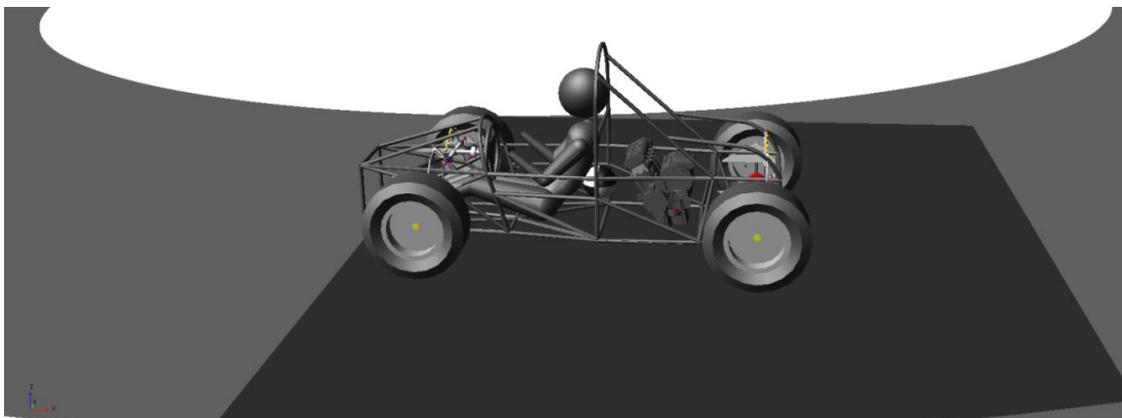


Рис. 4. Имитация испытания «движение по траектории постоянной кривизны»



Рис. 5. Натурное испытание «движение по траектории постоянной кривизны»

Таблица 1

## Сравнение результатов натуральных и виртуальных испытаний

Параметр	Натурные испытания	Виртуальное испытание	Расхождение, %
Время прохождения круга, с	6,716	6,571	2,159
Средняя скорость движения, м/с	8,25	8,199	0,61
Среднее боковое ускорение, м/с <sup>2</sup>	7,722	7,84	1,52
Средний радиус движения, м	9,117	9,115	0,02

Следующим этапом работы была модернизация подвески и рулевого управления автомобиля на основании теории автомобиля и результатов анализа автомобиля со стандартными узлами.

*Основные изменения в конструкции:*

- колесная база;
- кинематика направляющего механизма подвески;
- зависимость поворота управляемых колес.

Для оценки влияния изменений на свойства автомобиля, были проведены виртуальные испытания модели с модернизированной подвеской и рулевым управлением.

На рис. 6, 7, 8 изображены графики основных параметров измеряемых при движении моделей автомобиля по испытательному полигону.

Результаты виртуальных испытаний автомобиля со стандартной и модернизированной подвеской и рулевым управлением представлены в табл. 2.

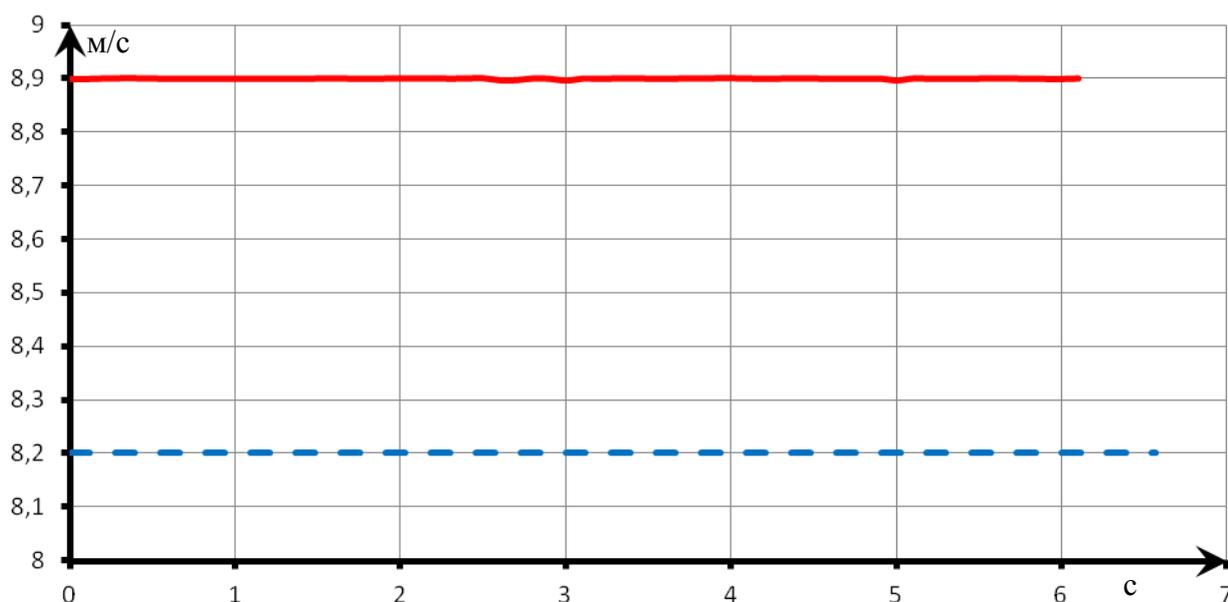
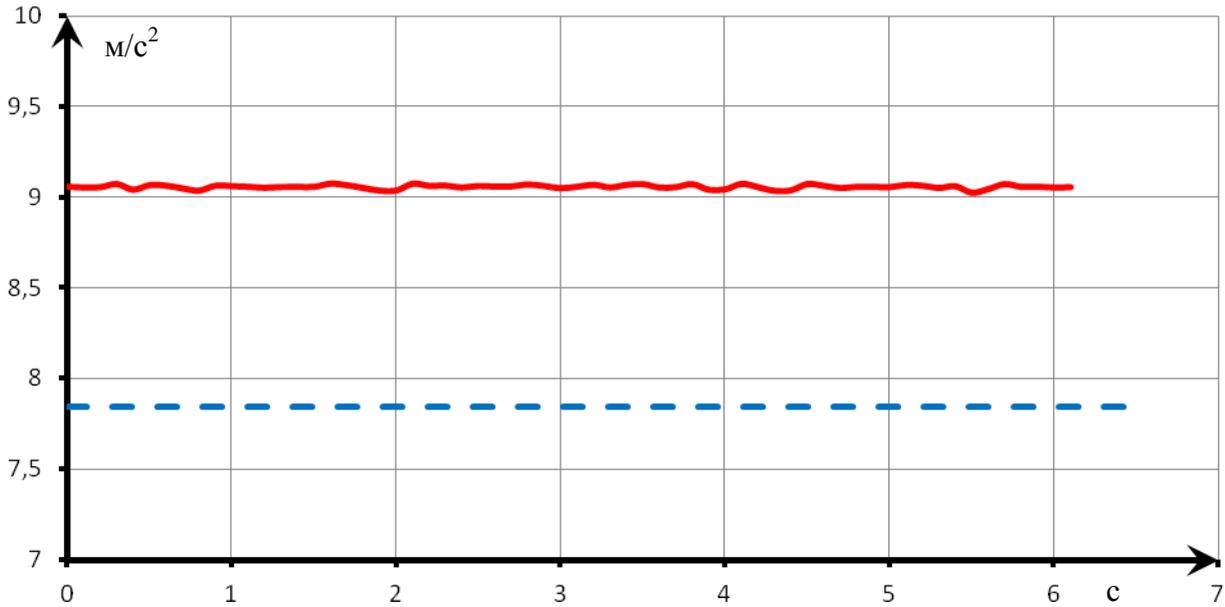


Рис. 6. Скорость продольная АТС:

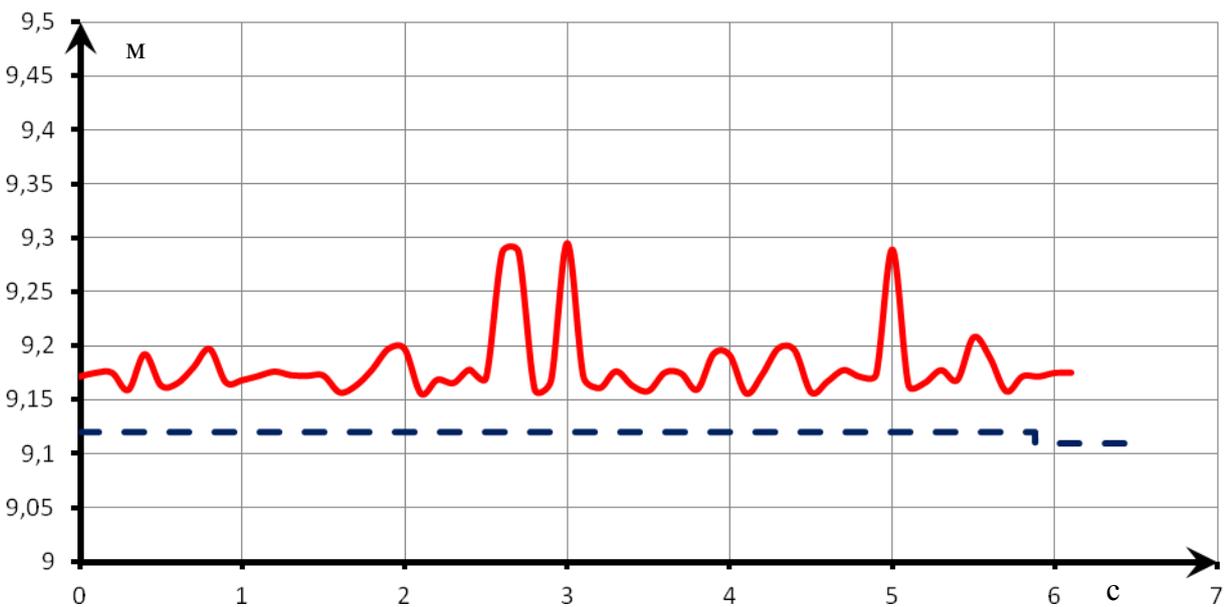
- АТС с модернизированной подвеской и рулевым управлением;
- АТС со стандартной подвеской и рулевым управлением



**Рис. 7. Графики поперечных ускорений:**

- АТС с модернизированной подвеской и рулевым управлением;
- АТС со стандартной подвеской и рулевым управлением

Из табл. 2 видно, что время прохождения контрольного участка уменьшилось почти на пол-секунды, что означает повышение конкурентной способности спортивного автомобиля с модернизированной подвеской и рулевым управлением при участии в соревнованиях класса “Formula Student”. Увеличившееся среднее значение бокового ускорения свидетельствует, о расширении области управляемого движения и о повышении активной безопасности АТС.



**Рис. 8. Графики радиусов кривизны траектории движения ЦМ:**

- АТС с модернизированной подвеской и рулевым управлением;
- АТС со стандартной подвеской и рулевым управлением

Таблица 2

## Сравнение результатов испытаний

Параметр	АТС со стандартной подвеской	АТС с модернизированной подвеской	Расхождение, %
Время прохождения круга, сек	6,571	6,1	-7,167
Средняя скорость движения, м/с	8,199	8,9	8,549
Среднее боковое ускорение, м/с <sup>2</sup>	7,84	9,05	15,433
Средний радиус движения, м	9,115	9,18	-0,713

## Библиографический список

1. Проектировочный расчет рулевого управления с маятниковыми рычагами для болида класса Formula Student / Д.А. Бутин, А.В. Гумасов // Будущее технической науки: сб. материалов XII Международной молодежной научно-техн. конференции; НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. С. 142.
2. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз [и др.]; под ред. В.И. Кнороза. – М.: Транспорт, 1976. – 238 с.
3. Шасси автомобиля: [сокр. пер. с нем. В.П. Агапова]; под ред. И.Н. Зверева. – М.: Машиностроение, 1983. – 356 с.
4. Шасси автомобиля: Элементы подвески [пер. с нем. А.Л. Карпухина]; под ред. Г.Г. Гридасова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
5. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учеб. пособие / В.Н. Кравец; НГТУ. – Нижний Новгород, 2007. – 362 с.
6. Formula Student Combustion Rules 2014 [электронный ресурс] URL: [http://www.formulastudent.de/uploads/media/FSC\\_Rules\\_2014\\_v1.1.0.pdf](http://www.formulastudent.de/uploads/media/FSC_Rules_2014_v1.1.0.pdf) (дата обращения 30.07.2014)

Дата поступления  
в редакцию 29.01.2015

**D.A. Butin, V.V. Belyakov, K.O. Goncharov**

**SIMULATION MOUTION SPORT CAR CLASS OF “FORMULA STUDENT”  
ON CIRCULAR TRACK WITH A DEFINED RADIUS A CRITICAL SPEED IN  
MSC.ADAMS/CAR SOFTWARE**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Purpose** Research of sport car behavior in a "Skid-Pad" motion of the competition "Formula Student" on the basis of computer simulation results and its comparison with experimental data.

**Design/methodology/approach** The simulation study based on dynamic analysis method with using of MSC.ADAMS/CAR software that allows taking into account main vehicle parameters, road conditions and driver behavior.

**Findings** It is possible to apply the research results for estimation of sport car active safety characteristics on the basis of simulation results that shows high convergence with experimental data.

**Research limitations/implications** The present study provides a starting-point for further research in the field of sport car safety and estimation of effectiveness of active safety systems components.

**Originality/value** The main peculiarity of the study is original approach of computer simulation of sport car behavior that could have a good practical application.

*Key words:* sport car, simulation, skid-pad, stability, active safety.