

УДК 629.113

И.Е. Анучин, Д.А. Бутин, В.В. Беляков, К.О. Гончаров

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОНОЧНОГО БОЛИДА ФОРМУЛА-СТУДЕНТ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований тягово-скоростных свойств гоночного болида Формула-Студент, спроектированного и созданного командой НГТУ «АМІgo». Представлены результаты моделирования, полученные в программе SDK-Simulation, а также результаты дорожных испытаний, проведенных на гоночной трассе «Нижегородское кольцо», а также полученных в ходе международного этапа соревнований, проходивших в Италии с 12 по 17 сентября на гоночном треке Рикардо Палетти под Пармой.

Ключевые слова: гоночный болид, тяговые свойства, время разгона, максимальная скорость.

Исследование динамических свойств гоночного болида является важным этапом его проектирования и доводки. С целью минимизации временных и материальных затрат на поиск рациональных конструктивных параметров автомобиля, реальные испытания нередко заменяют виртуальными, имитируя при этом условия движения болида в каких-либо дорожных условиях [1-3].

Основным отличием условий движения гоночного болида от условий эксплуатации типового легкового автомобиля является характер контактного взаимодействия колес с опорной поверхностью. При движении спортивного автомобиля и совершении большинства маневров, колеса болида находятся в состоянии, близком к потере сцепления с дорогой, что не является характерным для типового автомобиля. В этой связи при проведении виртуальных испытаний гоночного болида важным является наиболее достоверная имитация процессов, наблюдаемых во время реальных испытаний, в том числе моделирование сил и моментов, возникающих в пятне контакта колеса с дорогой.

Объектом исследования настоящей работы является гоночный болид класса «Формула-Студент», спроектированный студенческим конструкторским бюро АМИ НГТУ «АМІgo». Целью работы являлось расчетно-экспериментальное исследование динамики движения болида в различных условиях эксплуатации, в том числе близких к критическим.

В качестве инструмента моделирования выбран программный комплекс SDK-Simulation. Пакет не позволяет воссоздать визуальное соответствие модели и реального гоночного болида (внешняя форма модели соответствует типовому легковому автомобилю, рис. 1, а), однако программа позволяет моделировать виртуальный полигон с различными участками трассы (рис. 1, б), а также в полной мере учитывать ключевые конструктивные параметры автомобиля.

Очевидно, что наибольшее влияние на результаты моделирования оказывают такие параметры модели, как: масса, моменты инерции узлов и агрегатов относительно главных осей, расположение центра масс, характеристики подвесок, а также характеристики покрышек. Определение достоверных и достаточно точных данных по массам и моментам инерции на стадии проектирования стало возможным благодаря применению современных программ трехмерного твердотельного и поверхностного моделирования. Расчет центра тяжести болида, а также моментов инерции основных элементов конструкции производился в программе Autodesk Inventor 2013. Для примера, на рис. 2, а показана геометрическая модель колеса, а на рис. 2, б изображено диалоговое окно программы, в котором задаются геометрические и

физические свойства. В табл. 1 представлены основные параметры автомобиля, использованные при создании виртуальной модели.

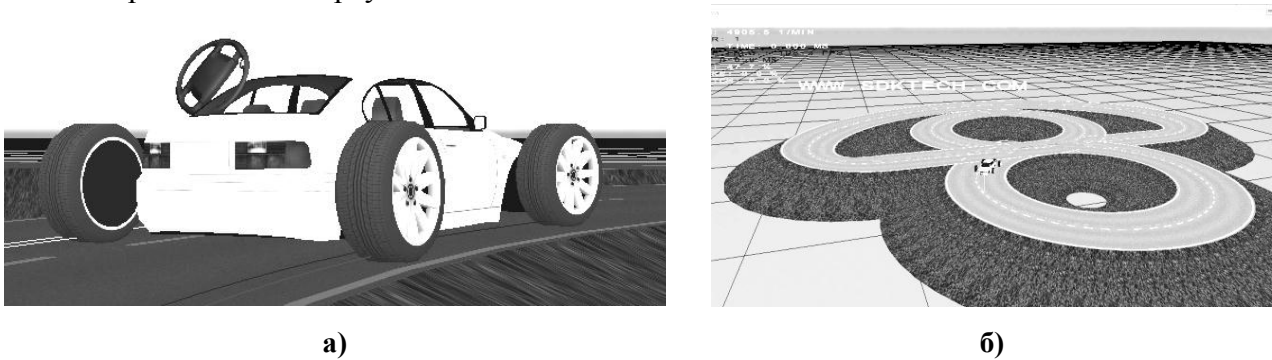


Рис. 1. Моделирование движения гоночного болида в программе SDK-Simulation:
a – модель гоночного болида; *б* – модель виртуального гоночного трека

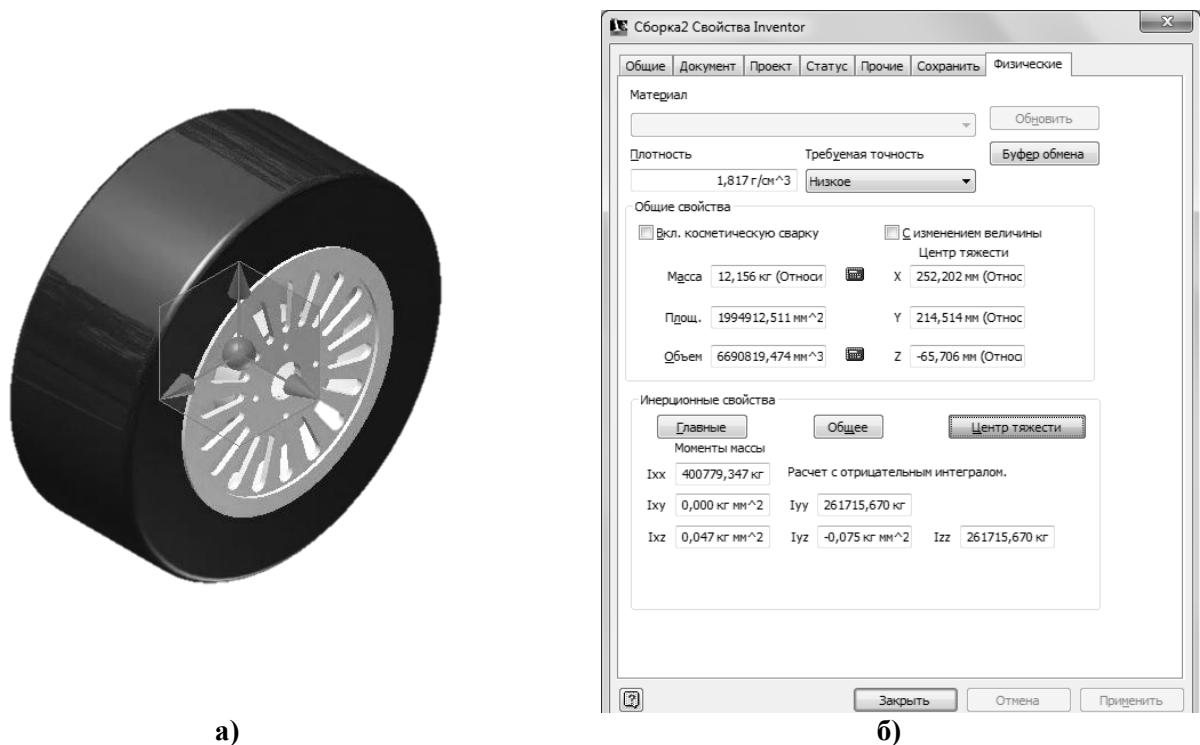


Рис. 2. Расчет геометрических характеристик в программе Autodesk Inventor 2013:
a – модель колеса; *б* – диалоговое окно программы

На первом этапе исследования, оценка тягово-скоростных свойств и свойств активной безопасности автомобиля проводилась по результатам моделирования в условиях движения модели по трассе Skid-Pad «восьмерка». Основная задача таких испытаний заключается в определении максимального (предельного) бокового ускорения, с которым автомобиль может двигаться в повороте, сохраняя при этом устойчивое криволинейное движение. На рис. 3 показаны графики изменения скорости движения и бокового ускорения при моделировании криволинейного движения болида.

По результатам моделирования было установлено, что время прохождения трассы Skid-Pad «восьмерка» составляет 7,05 с. При сравнении данного результата с аналогичными данными, известными для болидов других международных команд [4], было установлено, что принятые параметры болида могут обеспечить достаточные тягово-скоростные свойства, необходимые для конкурирования с лучшими командами Европы, США и других стран.

Таблица 1

Параметры гоночного автомобиля

№	Параметр	Значение	Размерность
	Масса	300	кг
2	Центр тяжести	-1,65;0;0,325	м
3	Момент инерции X	40,97	кг·м ²
4	Момент инерции Y	61,98	кг·м ²
5	Момент инерции Z	181,95	кг·м ²
6	Площадь проекции X;Y;Z	0,8;1,5;1,5	м ²
7	Центр площади	-1,5;0;0,45	м
8	Мощность двигателя	100	Нм
9	Максимальные обороты	6000	об/мин
10	Максимальный момент, передаваемый сцеплением	100	Нм
11	Передаточные числа КПП	5,56; 3,8; 3,04; 2,6; 2,2; 2,1	
12	Передаточное отношение главной передачи	3	
Передняя ось			
13	Центр переднего моста	-0,7;0;0,216	м
14	Расстояние между колесами	1,504	м
15	Расстояние между осями поворота	1,344	м
16	Расстояние между пружинами	1,344	м
17	Расстояние между амортизаторами	1,344	м
18	Жесткость стабилизатора	0	Н/м
19	Передаточное число пружин	0,7	
20	Поперечный наклон шкворня	-1	градус
21	Схождение колес	0,2	градус
22	Поперечный наклон шкворня	0	градус
23	Продольный наклон шкворня	5	градус
24	Не подрессоренная масса	13,1	кг
Задняя ось			
25.	Центр заднего моста	-2,58;0;0,216	м
26.	Расстояние между колесами	1,504	м
27.	Расстояние между осями поворота	1,344	м
28.	Расстояние между пружинами	1,344	м
29.	Расстояние между амортизаторами	1,344	м
30.	Жесткость стабилизатора	0	Н/м
31.	Передаточное число пружин	0,7	
32.	Поперечный наклон шкворня	-1	градус
33.	Схождение колес	0,2	градус
34.	Поперечный наклон шкворня	0	градус
35.	Продольный наклон шкворня	5	градус
36.	Не подрессоренная масса	13,1	кг
37.	Диаметр колеса	0,532	м
38.	Момент инерции колеса	0,39	кг·м ²
39.	Жесткость шин	250000	Н/м
40.	Профиль шины	0,4	Ш/Д
41.	Жесткость пружин	60000	Н/м
42.	Предварительная сила	0	Н
43.	Жесткость амортизаторов при сжатии	2377	Н·с/м
44.	Жесткость амортизаторов при отбое	1829	Н·с/м
45.	Передаточное число рулевого управления	0,116	град./град.

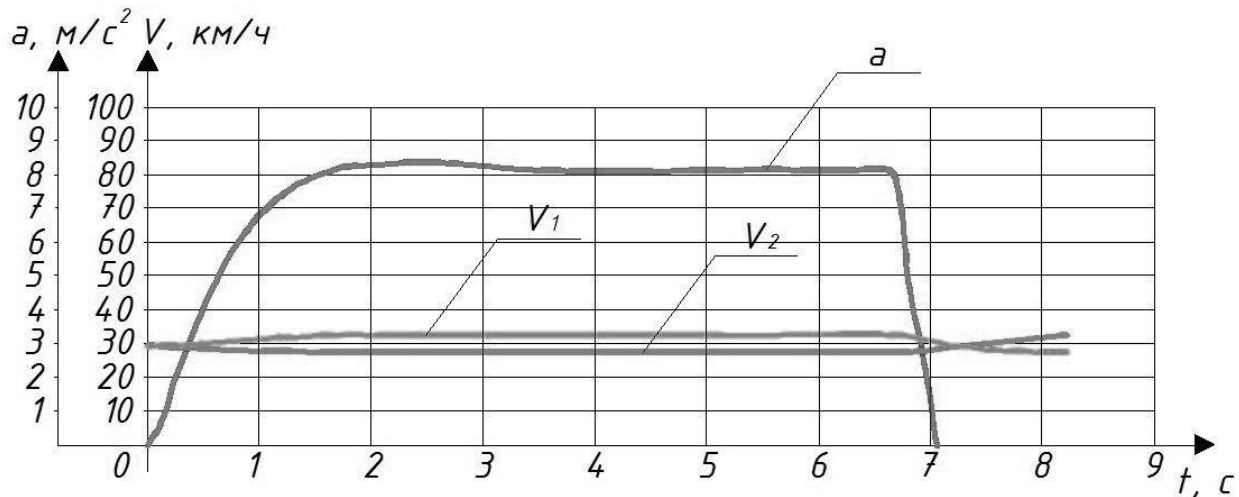
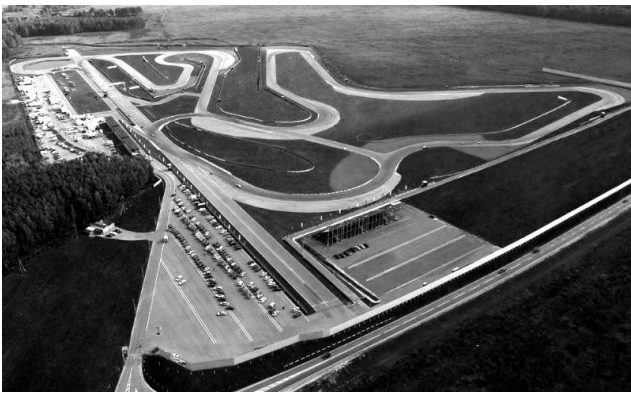
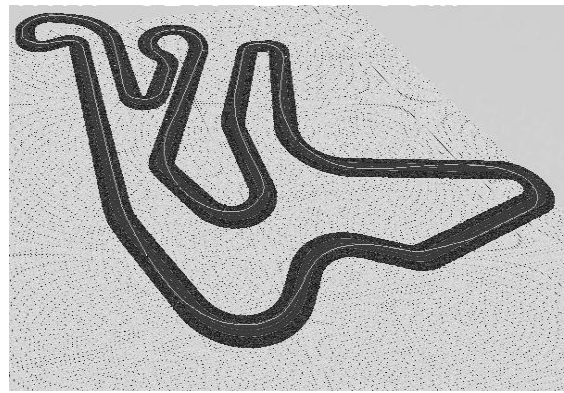


Рис. 3. График скорости колес и бокового ускорения (результаты моделирования):
 a – боковое ускорения автомобиля, м/с^2 ; V_1 – скорость внешних колес в повороте, км/ч ;
 V_2 – скорость внутренних колес в повороте, км/ч

На втором этапе исследования тягово-скоростных свойств гоночного болида имитировалось его движение по трассе автополигона «Нижегородское кольцо» (рис. 4). Длина трассы составляет 3222 м, а ширина полотна пути 12...16 м. Основная задача этого виртуального испытания заключалась в определении минимального времени прохождения круга и определение наибольших значений боковых ускорения, возникающих при прохождении трассы. Движение модели автомобиля осуществлялось по так называемой «идеальной» траектории, рекомендуемой для скоростного движения.



а)



б)

Рис. 4. Гоночная трасса «Нижегородское кольцо»:
 a – фотография трассы; b – виртуальная модель трассы

В программном комплексе SDK-Simulation существует возможность имитации поведения водителя (пилота), реализуемая с помощью различных алгоритмов управления автомобилем и задаваемых параметров, характеризующих физиологические свойства человека (время реакции, скорость манипулирования органами управления и др.). Изменяя алгоритм действий пилота (момент переключения передач, интенсивность разгона и торможения), можно добиться оптимальной скорости прохождения определенного участка трассы. По результатам виртуальных испытаний были получены следующие значения:

- максимальное продольное ускорение $a_{\max} = 10 \text{ м/с}^2$ (при торможении);
- максимальное боковое ускорение $a_{\max} = 10 \text{ м/с}^2$;
- максимальная скорость движения $V_{\max} = 130 \text{ км/ч}$;
- время прохождения круга $t = 160 \text{ с}$.

Проверка адекватности разработанной модели и оценка целесообразности принятых конструктивных параметров проводилась по результатам дорожных испытаний.

Первые положительные результаты были получены на чемпионате мира Formula SAE, проходившем в Италии с 12 по 17 сентября 2013г. на гоночном треке Рикардо Палетти под Пармой, где 55 команд из 40 стран мира представляли свои гоночные автомобили в классе Formula Student и Formula Electro, созданные в соответствии с регламентом спортивно-технических состязаний [5]. Нижегородской команде, единственной из семи российских команд-участниц чемпионата, удалось дойти до финала и успешно финишировать в гонке на 22 километра со сменой пилота (рис. 5). По результатам суммирования всех баллов за все теоретические и практические этапы нижегородская команда заняла 35 место из 55. Автомобиль нижегородских политехников занял десятое место в тесте на экономичность.



Рис. 5. Команда «АМІго» на соревнованиях в Италии

Более детальное исследование тягово-скоростных свойств гоночного болида было проведено на трассе полигона «Нижегородское кольцо» (рис. 6). Разгонная динамика проверялась на прямом участке спортивного комплекса, а криволинейное движение проводилось на специальной широкой площадке, расположенной около основной трассы. Динамические характеристики автомобиля (ускорение, скорость, пройденный путь) замерялись бесконтактной измерительной системой Racelogic.



Рис. 6. Испытания гоночного болида на трассе «Нижегородское кольцо»

На рис. 7 показан график разгона гоночного болида, полученный в ходе испытаний (кривая 1); кривая 2 показывает аналогичный график разгона, полученный по результатам моделирования. Видно, что результаты имеют хорошую сходимость, расхождение результатов не превышает 1-3%.

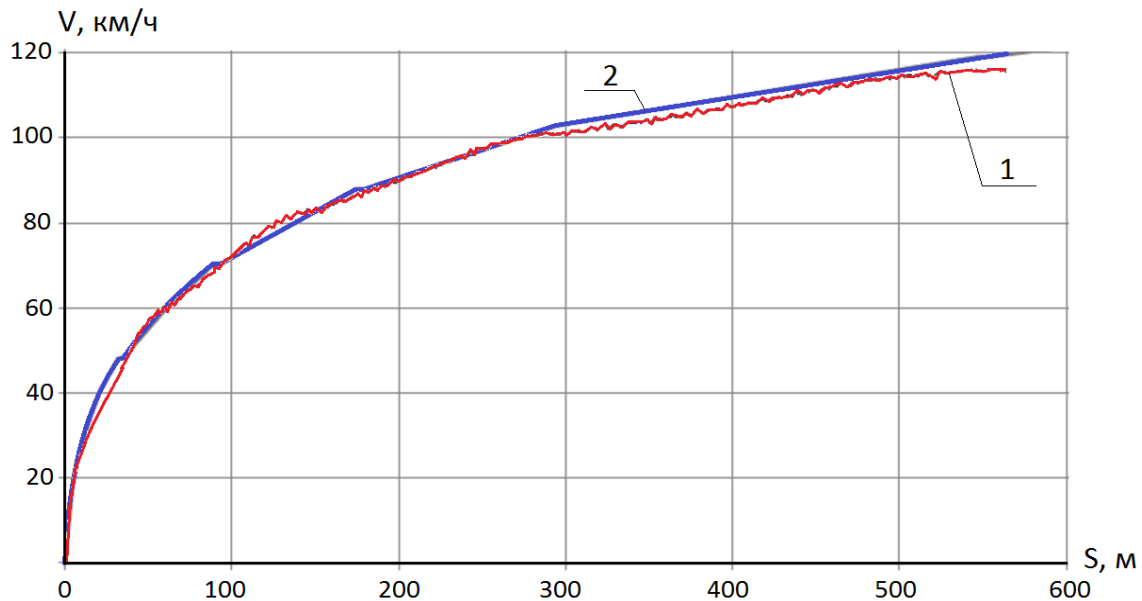


Рис. 7. График разгона гоночного болида:

1 – результаты дорожных испытаний; 2 – результаты моделирования

На рис. 8 показан график скорости движения автомобиля по круговой траектории, аналогичной той, которая моделировалась на первом этапе исследования (рис. 1, б). Сравнение графиков рис. 8 и рис. 3 показывает, что в обоих случаях предельная скорость криволинейного движения гоночного болида составила около 30 км/ч. Полученные результаты свидетельствуют о достоверности разработанной имитационной модели, а также справедливости подходов моделирования, принятых на этапе проектирования болида.

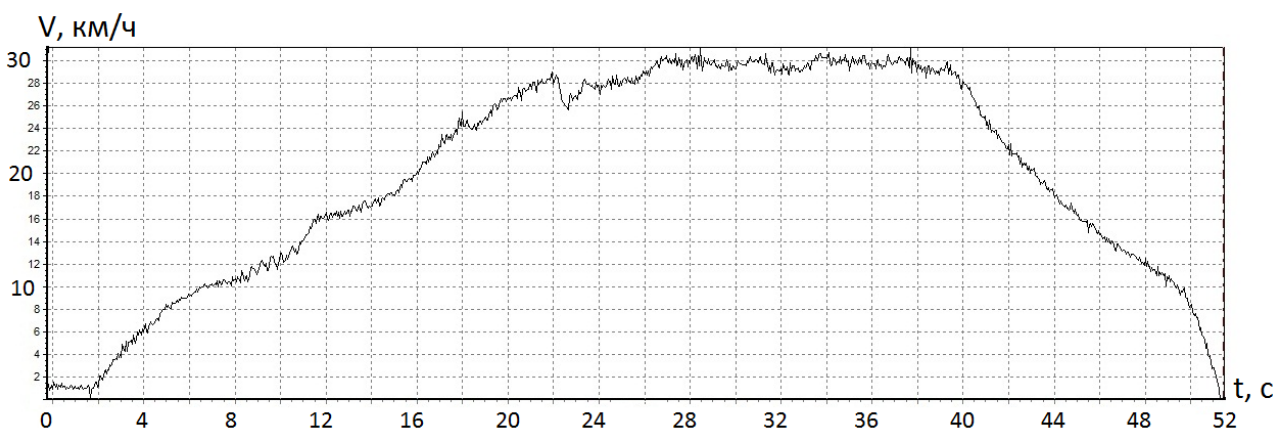


Рис. 8. График изменения скорости гоночного болида при движении по круговой траектории

Приведенные результаты расчетно-экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о том, что использование программного обеспечения SDK-Simulation на начальных этапах проектирования позволяет достоверным образом спрогнозировать тягово-скоростные свойства гоночного болида, а также выбрать наиболее рациональные конструктивные параметры. Рассмотрение нескольких вариантов модели позволяет оценить степень

влияния отдельных параметров на ключевые свойства болида и выявить предпочтительные решения, которые впоследствии могут обеспечить требуемые показатели тягово-скоростных свойств. Хорошая сходимость результатов моделирования с данными экспериментальных исследований указывает на правомерность такого подхода, однако следует отметить, что точность моделирования во многом зависит от способа выбора и обоснования числовых значений, закладываемых в модель. В этой связи целесообразным является продолжение исследований по указанной тематике, направленных на более точное определение параметров шин, геометрических и физических характеристик элементов подвески и рулевого управления, наибольшим образом влияющих на свойства управляемости и устойчивости. Не менее важным является определение внешней скоростной характеристики двигателя на разных нагрузочных режимах, для более точного определения тяговых показателей автомобиля. Решение данных вопросов будет являться целью дальнейших расчетно-экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. **Criens, C.H.A.** Building a MATLAB based Formula Student simulator / C.H.A. Criens, T. ten Dam, H.J.C. Luijten, T. Rutjes // Technische Universiteit Eindhoven, Department Mechanical Engineering, Dynamics and Control Technology Group, Eindhoven, 2006, 77 p. (<http://alexandria.tue.nl/repository/books/626941.pdf>)
2. **Razenberg, J.A.** Formula Student vehicle analysis by means of simulation / J.A. Razenberg, Dr. Ir. I.J.M. Besselink // Technische Universiteit Eindhoven, Department Mechanical Engineering, Dynamics and Control Technology Group, Eindhoven, 2006, 43p. (<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/6871.pdf>)
3. **Böhm, T.** SIMPACK Supports Formula Student racing Series // SIMPACK News, 2011 – P. 23-24. (http://www.simpack.com/fileadmin/simpack/doc/newsletter/2011/SN-2011-Dec_Uni_Stuttgart_Formula_Student_LR.pdf)
4. Formula Student Germany 2012 Result FSC Skid Pad [электронный ресурс] URL:http://www.formulastudent.de/uploads/media/2012_FSC_SKID_PAD.pdf (дата обращения 20.11.2013)
5. Нижегородские политехники покорили Италию [электронный ресурс] URL: <http://www.nntu.nnov.ru/node/1287> (дата обращения 25.11.2013)

*Дата поступления
в редакцию 02.12.2013*

I.E. Anuchin, D.A. Butin, V.V. Belyakov, K.O. Goncharov

SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF SPEED AND TRACTIVE CHARACTERISTICS OF FORMULA STUDENT RACING CAR

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

Purpose: Estimating of speed and tractive characteristics of Formula Student racing car on the basis of computer simulation results and experimental data.

Design/methodology/approach: The simulation study based on dynamic analysis method with using of SDK. Software that allows taking into account key race car parameters, road conditions and driver (racer) behavior.

Findings: It is possible to apply the research results for estimation of speed and tractive characteristics of Formula Student racing car on the basis of simulation results that shows high convergence with experimental data.

Research limitations/implications: Present study provides a starting-point for further research in the field of racing car active safety.

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

Key words: racing car, tractive characteristics, acceleration time, maximum speed.