

УДК 629.331

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ РАЗГОНА  
АВТОМОБИЛЯ FORMULA ELECTIC MADI, ПОЛУЧЕННАЯ ПРИ  
ПРОВЕДЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И  
НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

**Горшенков Илья Сергеевич**, студент,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, [medvedkovoo@mail.ru](mailto:medvedkovoo@mail.ru)

**Шадрин Сергей Сергеевич**, д-р техн. наук., проф.,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, [shadrin@madi.ru](mailto:shadrin@madi.ru)

**Аннотация.** Работа посвящена оценке точности результатов математического моделирования в сравнении с натурным экспериментом. Актуальность данной работы заключается в том, что в процессе проектирования автомобиля недостатки конструкции можно выявить еще на этапе компьютерных испытаний. Делается это потому, как завод далеко не всегда может испытать в металле все выпускаемые им изделия, так как на это придется серьезно потратиться. К тому же, не все можно устроить на собственных площадках. Логичнее заменить некоторые реальные испытания виртуальными, при этом выиграв во времени и затратах. В статье рассматривается методика исследования на стадии проектирования динамических показателей гоночного автомобиля класса формула студент. Описывается объект испытаний, программный комплекс используемый для проектирования модели автомобиля и проведения математического моделирования. Проводится описание работы с программным комплексом, обработка данных с тестовых испытаний и графический анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** гоночный автомобиль; динамика автомобиля; формула студент.

**COMPARATIVE EVALUATION OF THE FORMULA ELECTIC MADI  
CAR ACCELERATION DYNAMICS OBTAINED BY THE  
MATHEMATICAL MODELING AND THE NATURAL EXPERIMENT**

**Gorshenkov Ilya S.**, student,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, [medvedkovoo@mail.ru](mailto:medvedkovoo@mail.ru)

**Shadrin Sergey S.**, Dr. Sc., professor,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, [shadrin@madi.ru](mailto:shadrin@madi.ru)

**Abstract.** The article discusses the research methodology at the stage of designing the dynamic indicators of the formula student racing car. The accuracy of mathematical modeling is investigated in comparison with a full-scale experiment. The software package used to design a car model and conduct mathematical modeling is described. A description of

the work with the software package is carried out. A graphical analysis of the results is proposed.

**Keywords.** Race car; car dynamics; formula student

### **Введение.**

Работа посвящена исследованию метода компьютерного моделирования разгона автомобиля в целях выполнения курсового проекта. [1] Динамика разгона – довольно весомый показатель при покупке автомобиля. Каждый автомобиль перед выпуском в серийное производство проходит немало испытаний, с помощью которых проверяют его надежность, безопасность, управляемость и т.д. Но на испытания уходит много времени, а самое главное финансов. Решение этой проблемы – компьютерный расчет, который позволяет не только удешевить производство, но и выявить различные недочеты еще на момент проектировки. Цель данной работы: сравнить показатели разгона компьютерной модели с реальным образцом.

### **Описание объекта исследования**

Формула SAE, более известная в Европе как Формула Студент – это студенческие инженерные соревнования, изначально организованные Сообществом Автомобильных Инженеров (Society of Automotive Engineers, SAE) и входящие в Серию Студенческих Инженерных соревнований (Collegiate Design Series) SAE. По замыслу организаторов команда студентов должна разработать, построить, испытать прототип автомобиля формульного класса. Испытанием для команд является сама постройка болида, который сможет успешно пройти все дисциплины на соревнованиях. Соревнования «Формула студент» проводятся с 1978 года. В настоящее время ежегодно проводится 13 этапов в 12 странах мира. В некоторых этапах участие принимают более 100 команд.

Регламент соревнований предусматривает конструкции и компоновке болида. Автомобиль должен иметь открытые колеса с

диаметром обода не менее 8 дюймов. Объем двигателя не должен превышать 610 см<sup>3</sup>. Конструкция подвески должна обеспечивать 25,4 мм хода сжатия и отбоя. В подвеске автомобиля необходимо присутствие амортизаторов как спереди, так и сзади. В большинстве случаев автомобили используют среднемоторную компоновку с задним приводом. Полная масса для автомобилей класса «Формула студент» обычно изменяется в диапазоне от 300 до 350 кг. Автомобиль должен быть разработан силами студентов без непосредственно участия профессионалов.

В качестве исследуемого автомобиля будет использоваться прототип (рис.1) класса Formula SAE спроектированный для команды Formula Electric MADI, который до 2019 года был единственным на территории СНГ электрическим болидом класса Формула Студент.

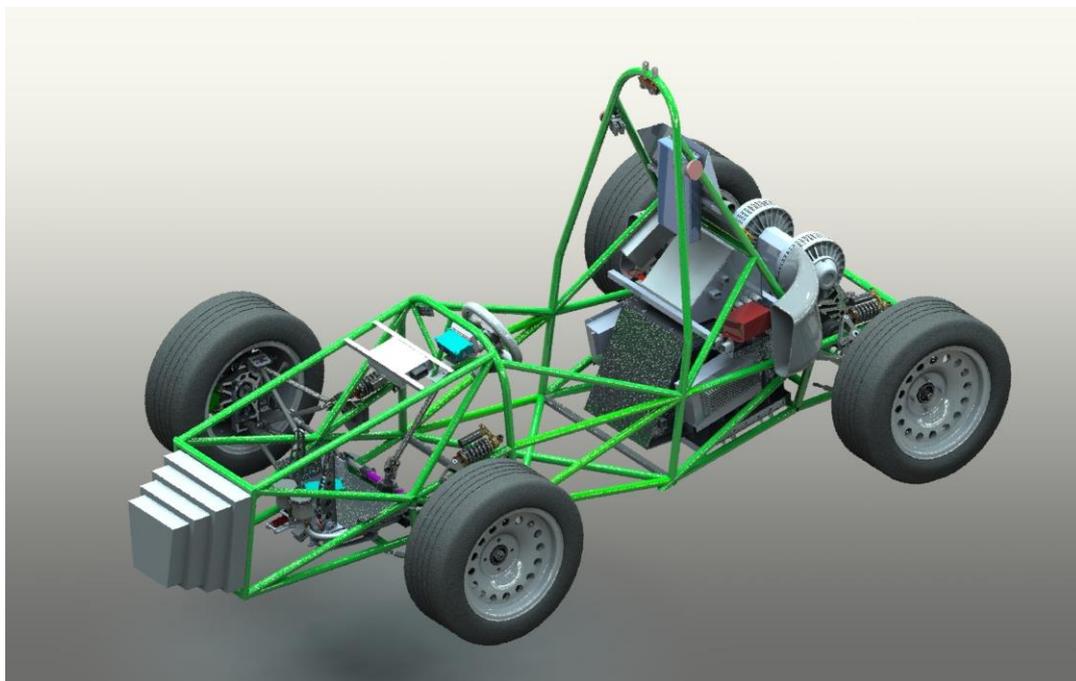
Данный автомобиль имеет два электромотора по 36 кВт каждый, с емкостью батареи 75 Ач.



*Рис.1. Болид «Cheglock».*

Проектирование автомобиля производилось в программном комплексе SolidWorks (рис.2). Пространственная рама выполнена из

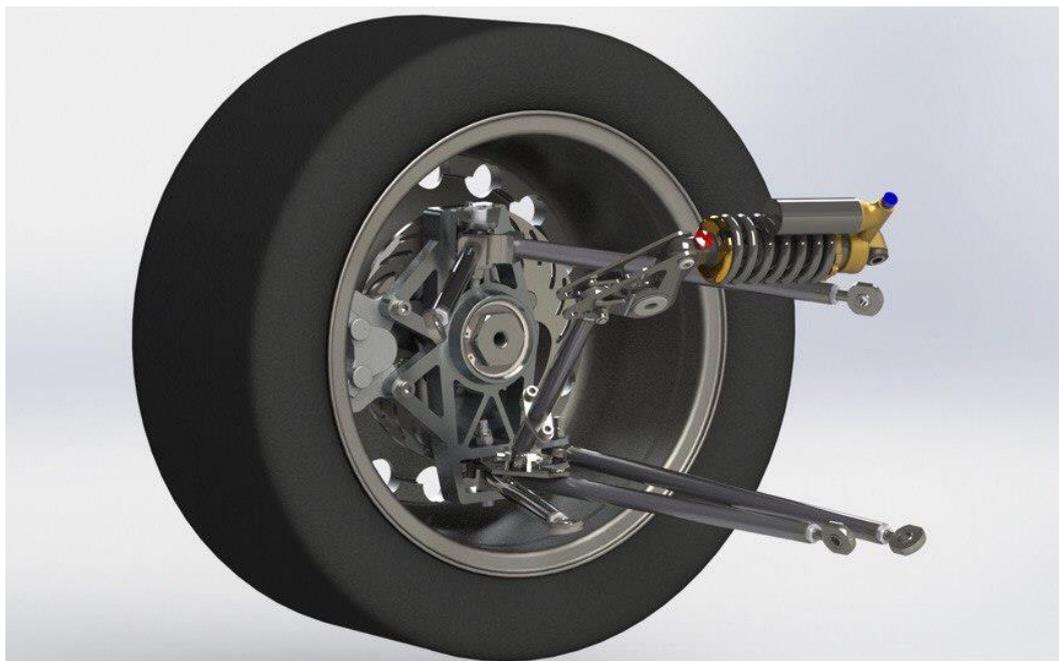
стальных бесшовных труб в соответствии с регламентом соревнований. Как и на других автомобилях данного класса присутствуют быстросъемный руль, гасящий от ударов элемент и защита от возгорания силового элемента.



*Рис. 2. Сборка болида в программе SolidWorks*

Особое внимание при проектировке гоночного автомобиля уделяется подвеске. Даже имея сильный мотор, автомобиль не будет ехать быстро, если шины автомобиля не будут работать на пределе своих возможностей. Для данного автомобиля была выбрана подвеска с двойными поперечными рычагами со схемой «Pushrod» (рис.3). В данной схеме воздействие на амортизатор происходит через тягу и маятник. Преимуществом схемы «Pushrod» является возможность получения необходимого передаточного числа от колеса до амортизатора, путем изменения положения толкающей тяги, и тем самым, обеспечения возрастающей характеристики жесткости подвески. Амортизатор возможно расположить вне воздушного потока или вдоль потока, что позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление. Наличие маятника дает возможность упростить крепление стабилизатора

поперечной устойчивости, благодаря этому упрощается его компоновка и уменьшается длина и масса. Недостатком данной схемы является то, что тяга маятника в статике испытывает сжатие, что, учитывая ее большую длину, приводит к возможной потере устойчивости. [2] Дальнейшая разработка кинематики подвески производилась в программном комплексе Optimum Kinematics.



*Рис. 3. Подвеска болида со схемой «Pushrod» спроектированная в программе SolidWorks*

### **Описание пакетного продукта Optimum Lap.**

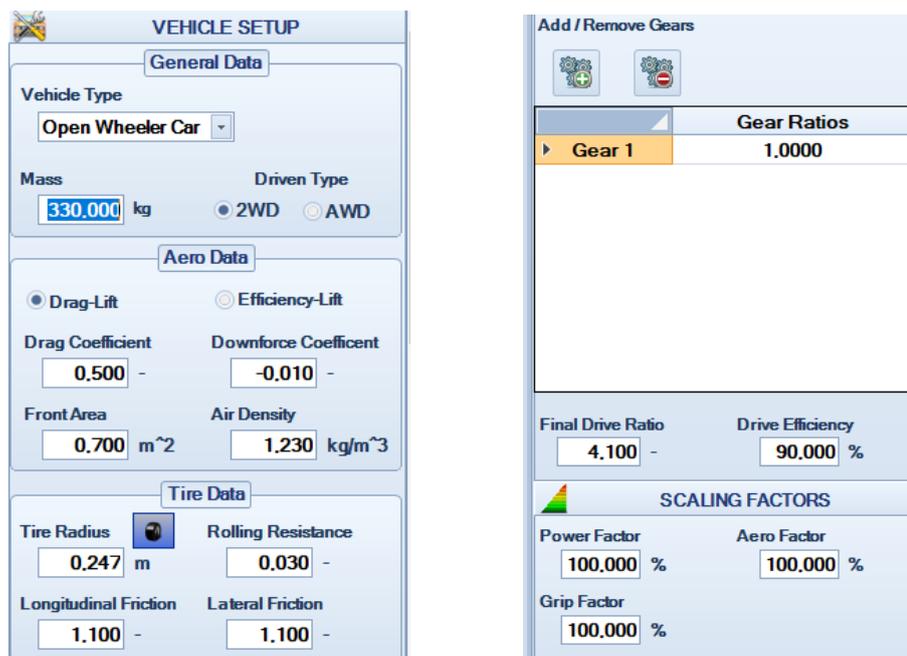
Для расчета разгона автомобиля будем использовать программу Optimum Lap. Optimum Lap - это бесплатный, упрощенный инструмент для моделирования транспортных средств, предназначенный для оценки характеристик автомобиля в пределах 10% от реальности. [3]

С помощью данной программы можно упростить динамическое моделирование автомобиля до такой степени, что любой может получить достаточно точные и очень полезные результаты в течение нескольких минут. Разработчики считают, что по основным компонентам автомобиля, можно определить его поведение на дороге. Благодаря простому входным параметрам и понятному интерфейсу можно собрать любой автомобиль за

несколько минут. Значения всех входных параметров легко измерить, либо найти в справочниках. Так же в программе существует собственная библиотека шаблонов готовых автомобилей. В Optimum Lap можно загрузить свою трассу зарегистрированных с помощью Optimum Lap Track Maker, либо получить из базы данных OP Track. Транспортное средство представлено в программе, как точечная масса. Кажется, что этого недостаточно для такого сложного анализа, но производители уверяют нас об обратном. В данной работе постараемся в этом разобраться.

## Создание модели автомобиля в программе Optimum Lap.

В совокупности с данными по силовой установке описываются параметры трансмиссии (количество передач, передаточные числа, передаточное число главной передачи, КПД трансмиссии) аэродинамики (коэф. Сопротивления, лобовая площадь прижимная сила и тд) , шин (коэф. сцепления, размеры и тд), типа транспортного средства, вес автомобиля вместе с водителем и тип привода. Все эти данные записываются в виде показанном на рис.4 и были определены экспериментально, либо с помощью непосредственного замера.



*Рис. 4. Интерфейс ввода параметров трансмиссии в компьютерной программе*

Выходная скоростная характеристика описывается зависимостью крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала двигателя в табличном виде и аппроксимируется автоматически программой в виде графика, представленного на рис. 5. Данные были предоставлены производителем электродвигателей LEM-200.

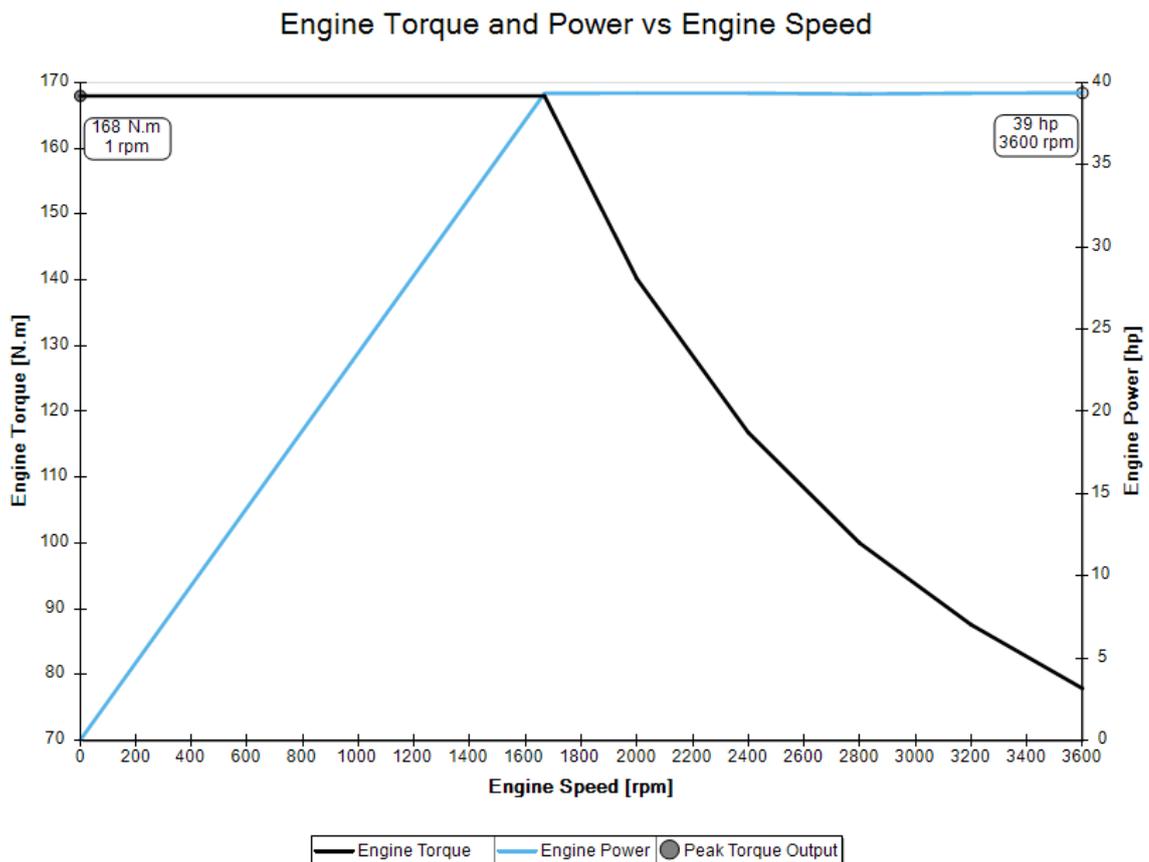


Рис. 5. Кривые крутящего момента и мощности силовой установки болида, обработанные компьютерной программой OptimumLap.[4]

## Моделирование режимов движения автомобиля.

Для симуляции автомобиля необходимо выбрать траекторию его движения. Соревнования Формула Студент ежегодно проходят в Германии на трассе Носкенheim. Конфигурация трассы представлена на рис.6.

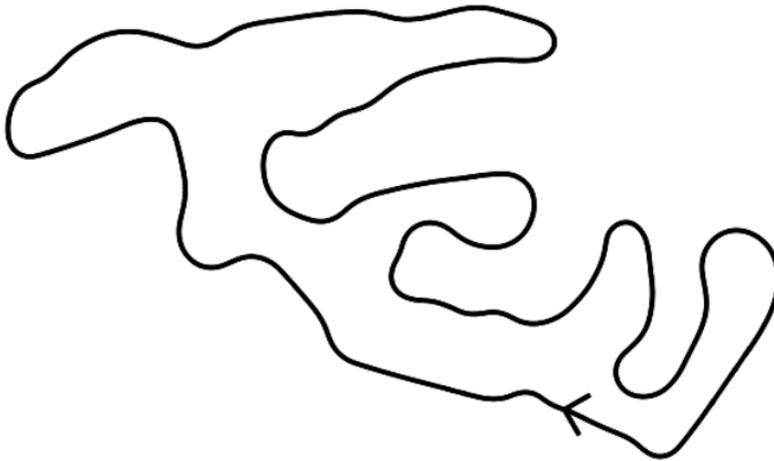


Рис. 6. Конфигурация трассы Hockenheim FSAE.

Для описания траектории в компьютерной программе необходимо и достаточно следующей информации:

Type	Section Length (m)	Corner Radius (m)
Right	1,127	27,808
Right	1,167	22,476
Right	1,189	34,580
Right	1,177	32,790
Right	1,169	20,679
Right	1,159	18,429
Right	1,130	21,312
Right	1,078	32,791
Left	1,015	75,551
Left	0,959	13,650
Left	0,954	10,350
Left	0,932	9,448
Left	0,908	9,175
Left	0,888	9,415
Left	0,881	9,738
Left	0,888	9,903
Left	0,899	10,500
Left	0,919	10,256
Left	0,955	10,892
Left	0,998	15,380
Left	1,019	18,817
Left	1,027	73,704

Рис. 7. Математическое описание трассы Hockenheim FSAE

Как видно из рис. 7, повороты описываются радиусом и длиной дуги, а прямые участки только длиной. Программа автоматически сшивает данные в траекторию, по которой должна двигаться машина. Необходимо учитывать то, что трасса и условия идеализированы, другими словами результат, который может быть достигнут профессиональным пилотом при идеальных погодных условиях, шинах и прогретой трассе будет выглядеть как результат симуляции.

На соревнованиях Формула Студент существует дисциплина Acceleration (ускорение). Задача автомобиля проехать 75 метров по прямому участку дороги, как можно быстрее. В качестве эксперимента будем рассматривать данную дисциплину. [5]

Описав траекторию прямой длиной 75 метров и выбрав необходимый нам автомобиль, протестируем разгон автомобиля с места. По результату симуляции шасси на данной трассе мы получаем спектр информации, включающей: боковые и продольные ускорения шасси, вертикальную реакцию шины, перемещение масс, скорость болида на трассе и данные по оптимальному переключению передач. Данные можно выводить как в виде графиков, так и в виде таблиц. На рис. 8 и 9 показана скорость автомобиля, развиваемая шасси на данной трассе на выбранных шинах.



Рис. 8. Скорость развиваемая шасси автомобиля на участках прямой

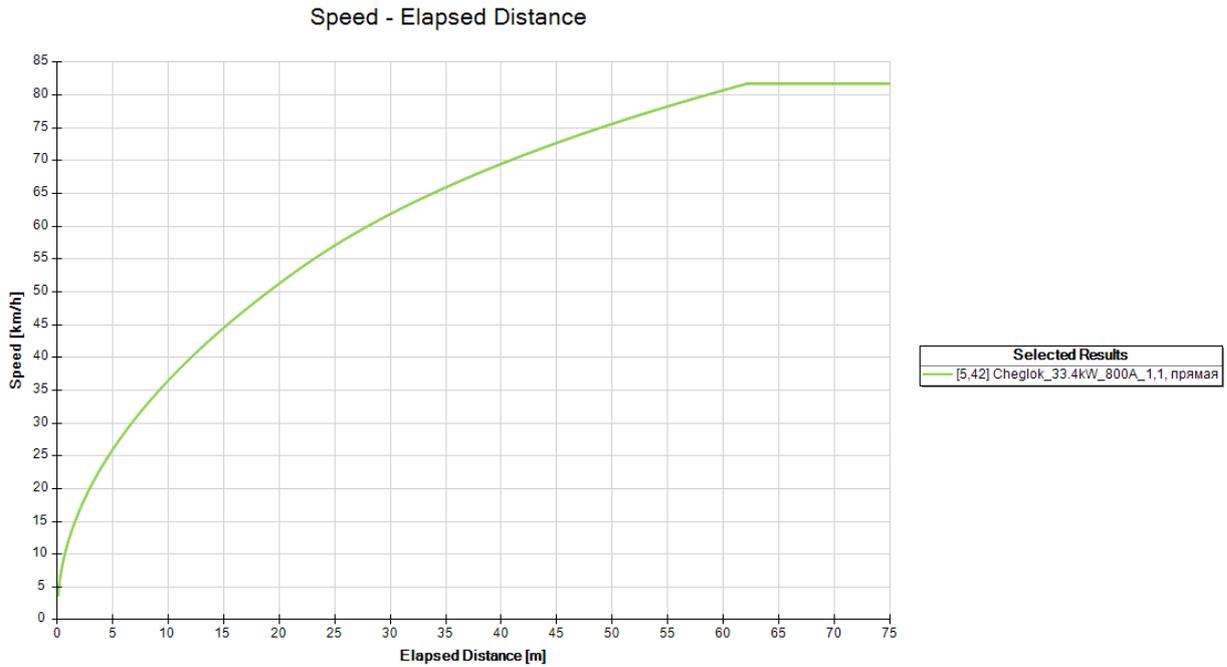


Рис. 9. График зависимости скорости от пройденной дистанции

На рисунках 8 и 9 мы видим, что автомобиль достиг максимальной скорости 81,7 км/ч примерно на 62 метрах пути и двигался так до конца дистанции.

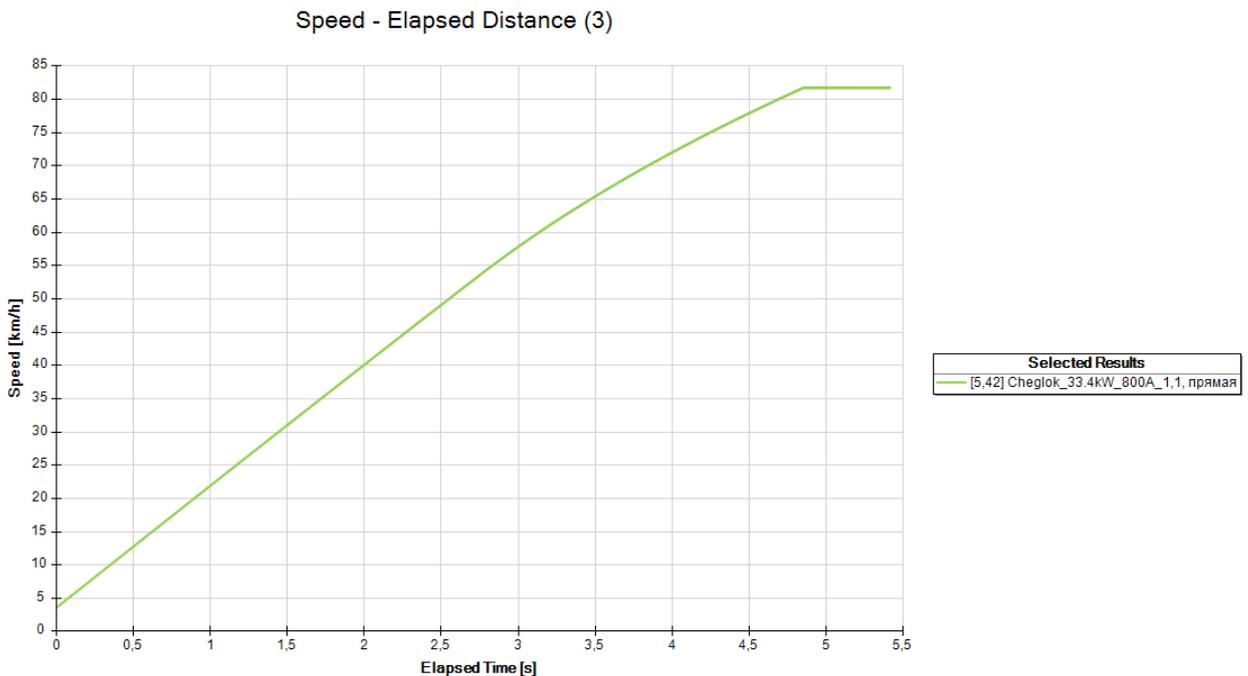


Рис. 10. График зависимости скорости от времени

Из данного графика мы видим, что время прохождения дистанции 75 м в реальных условиях должно составить примерно 5,42 секунды.

Так же еще на стадии проектировки можно проверить, как будет ехать автомобиль с мотором в два раза мощнее. Создав еще один автомобиль и поменяв двигатели с 33.4 кВт на 72 кВт, получим следующий результат:

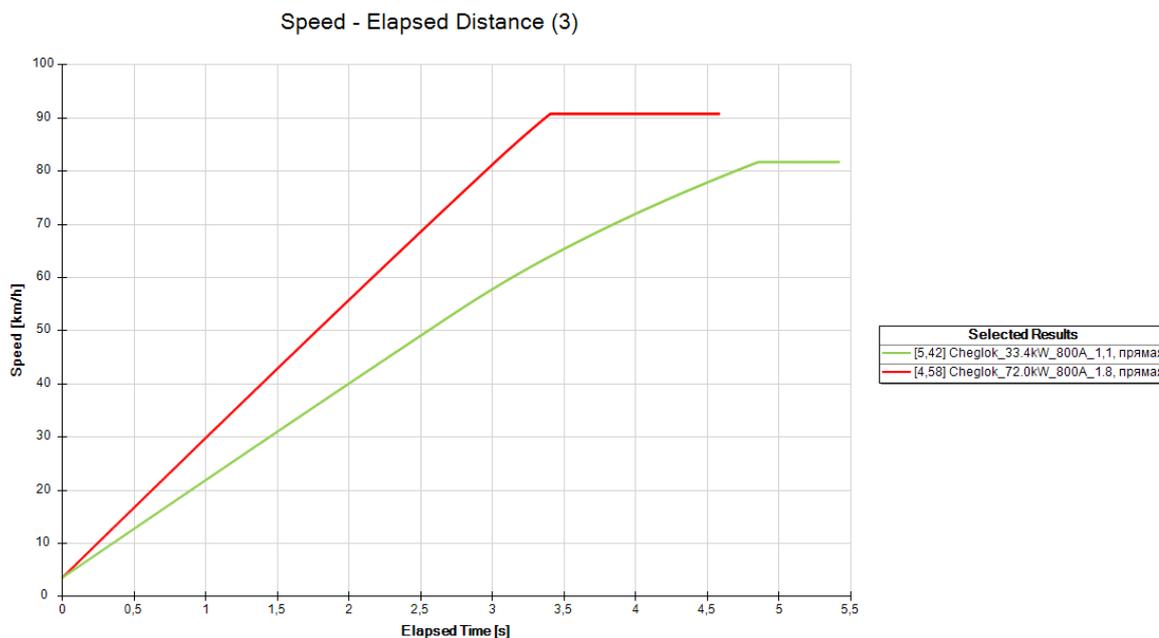


Рис.11. Сравнение автомобилей с разными силовыми установками.

Из графика видно, что автомобиль с двигателями 72 кВт проедет дистанцию гораздо быстрее.

Для подготовки к соревнованиям важно определить спектр нагрузок на шасси. Поэтому для прочностных расчетов мы получили данные по боковым и продольным ускорениям, развиваемых шасси автомобиля на конкретной трассе. Ниже составленный спектр нагрузок (рис. 12) был использован для прочностного анализа шасси методом конечных элементов. [6] Результат, полученный в результате прочностного расчета, был использован для оптимизации деталей автомобиля, также получилось получить данные по цикловой устойчивости компонентов подвески, что позволяет прогнозировать их замену до разрушения.

FSAE Endurance Germany 2012 - Speed (1)



Рис. 12. Боковые ускорения, развиваемые шасси при прохождении трассы.

## Обработка результатов полигонных испытаний.

Система телеметрии автомобиля позволяет получать данные о пройденном пути, времени, скорости, проскальзывании, тока и напряжения на моторах, температуру моторов, ускорения автомобиля во всех направлениях, сведения о заряде аккумулятора. Для сравнения полигонных результатов с расчетными будем использовать следующие данные: скорость, время, путь.

Результаты выводятся на компьютер в следующем виде:

timestamp	slip	send_mot	speedf	speedr	volt_bms	curr_bms	curr_ardu	voltage_lr	curr_lm	volt_rm	curr_rm	x	y	z	odometer	time
148238	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	0	0	0	0
148288	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	0	0	22	0
148338	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	-3	0	0	15	0
148388	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	-3	0	0	19	0
148439	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	0	0	22	0
148488	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	-3	0	0	19	0
148538	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	0	0	19	0
148589	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	3	3	3	19	0
148638	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	-3	-3	19	0
148688	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	-3	0	0	15	0
148739	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	-3	0	0	15	0
148789	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	0	0	19	0
148839	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	0	0	19	0
148889	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	-3	0	0	19	0
148938	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	-3	-3	19	0
148988	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	0	0	19	0
149039	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	-3	-3	-3	15	0
149088	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	-3	3	3	15	0
149138	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	0	0	22	0
149188	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	0	3	15	0
149238	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	0	0	0	15	0
149288	0	300	0	0	93	0	0	94	0	93	0	-3	0	0	19	0

Рис. 13. Необработанные данные с заезда

Далее данные необходимо обработать и привести в наглядный вид для простоты восприятия. [7]

Испытания разгона производились на полигоне НАМИ в солнечную, сухую, безветренную погоду. Мы получили следующие данные (рис. 14).



Рис. 14. Полученные данные в графическом виде.

Из графика (рис. 15) видно, что время прохождения дистанции 75 метров составило 5,45 секунд, при максимальной скорости 82 км/ч.

## Заключение

Полученные результаты моделирования и натурных испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение полученных результатов

	Результат моделирования	Результат испытания
Скорость, км/ч	81,7	82
Время, с	5,42	5,45

Вывод: Из таблицы 1 видно, что расхождения результатов минимальны. Расхождение по скорости 0,3%. Расхождение по времени 0,5%. Маленькую погрешность результатов можно объяснить правильным подбором исходных параметров, простым маршрутом трассы (прямая) и отсутствием многоступенчатой коробки передач. Из полученных данных можно сделать вывод о высокой точности программы и возможности ее применения для предварительных расчетов динамики автомобиля.

## Список литературы

1. Шадрин, С.С. Использование смартфонов в образовательном процессе МАДИ при проведении дорожных испытаний автотранспортных средств / С.С. Шадрин, А.М. Иванов // Известия ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы». Вып. 9: Межвуз. сб. науч. ст. / Волгоград: ВолгГТУ, 2014. - № 19 (146). - С. 81-85.
2. Аругюнян, Г.А. Разработка подвески спортивного автомобиля класса «Формула Студент» / Г.А. Аругюнян, К.Б. Евсеев // Молодёжный научно-технический вестник МГТУ. — 2013.
3. Официальный сайт программы Optimum Lap. 2019 - URL: <http://www.optimumg.com/software/optimumlap>
4. Официальный регламент соревнований формула студент. 2019 - URL: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
5. Ларин, В.В. Теория движения полноприводных колесных машин: учебник / В.В. Ларин. — М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010.
6. Испытания колёсных транспортных средств: учебное пособие / А.М. Иванов, С.Р. Кристальный, Н.В. Попов, А.Р. Спинов. – М.: МАДИ, 2018.

## References

1. SHadrin S.S., Ivanov A.M. *Izvestiya VolgGTU. Seriya «Nazemnye transportnye sistemy»*. Vyp. 9: *Mezhvuz. sb. nauch. st.*, 2014, no 19 (146), pp. 81-85.
2. Arutyunyan G.A., Evseev K.B *Molodyozhnyj nauchno-tehnicheskij vestnik MGTU*, 2013.
3. URL: <http://www.optimumg.com/software/optimumlap/>
4. URL:<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
5. Larin,V.V. *Teoriya dvizheniya polnoprivodnyh kolesnyh mashin* (The theory of movement of all-wheel drive vehicles), Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana, 2010.
6. Ivanov A.M., Kristal'nyj S.R., Popov N.V., Spinov A.R. *Ispytaniya kolyosnyh transportnyh sredstv* (Wheel Vehicle Testing), Moscow, MADI, 2018.