

Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание
МОО "Стратегия объединения"
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:

//Машины и установки: проектирование,
разработка и эксплуатация.
Электрон. журн. 2023. № 4. С. 1 – 10.

DOI:

Представлена в редакцию: 24.11.2023

Принята к публикации: 10.12.2023

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 629. 1-482

Определение рационального расположения шарнирных точек крепления системы поддрессоривания к несущей системе гоночного автомобиля класса «формула студент»

Бережнов М. К. *, Харрисон В. А.,
Евсеев К. Б.

* berezhnov.m@bk.ru

МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)

В статье приводится описание разработанной математической модели задней системы поддрессоривания гоночного автомобиля класса “Формула студент”, позволяющей проводить анализ кинематики системы подвески. На ее основе проведен поиск рационального расположения шарнирных точек крепления системы поддрессоривания к несущей системе с использованием суррогатного алгоритма с учетом изменения углов установки колес. В работе приведен анализ кинематики системы поддрессоривания для полученных в результате расчета рациональных координат точек крепления, которые соответствуют конструктивным требованиям и позволяют уменьшить диапазон изменения угла схождения в процессе работы системы поддрессоривания. В результате выполненного исследования было определено рациональное расположение шарнирных точек с учетом противоклевковой геометрии.

Ключевые слова: независимая система поддрессоривания, кинематика системы поддрессоривания, угол развала колес, угол схождения колес, центр крена, противоклевковая геометрия, несущая конструкция, шасси.

Введение

Более 40 лет во всем мире проходят международные студенческие соревнования различных команд, в том числе в России. Так, в 2012 году в МГТУ им. Н. Э. Баумана была создана команда “Bauman Racing Team” для участия в соревнованиях класса “Формула студент”, в рамках которых необходимо спроектировать и собрать гоночный автомобиль.

Автомобиль класса “Формула студент” состоит из следующих узлов и систем: несущая система, аэродинамический обвес, электромеханическая трансмиссия, мехатронная и тормозная системы, набор электрических и электронных компонентов и подсистем. Одной из таких систем, влияющих на устойчивость и управляемость автомобиля, является система поддрессоривания. Рассмотрим подробно конструкции систем поддрессоривания автомобиля

“BRT-7” (рис. 1), разработанного и изготовленного в 2019 году, и системы поддрессирования автомобиля “BRT-8D” (рис. 2), который модернизируется в настоящее время.



Рис. 1. “BRT-7”



Рис. 2. “BRT-8D”

1. Описание конструкции системы поддрессирования

На автомобилях “BRT-7” и “BRT-8D” задние системы поддрессирования (рис. 3 – 4) являются независимыми с двумя поперечно расположенными рычагами и одной реактивной тягой. Система поддрессирования имеет пять точек крепления к несущей системе, три из которых лежат на несущей плите.

Плита является частью несущей системы автомобиля и выполняет 2 функции:

1. На плиту крепится задняя система поддрессирования, соответственно, она обеспечивает общую компоновку шасси, облегчает позиционирование и увеличивает точность сборки. Также к ней прикреплены кронштейны силовой установки и трансмиссии, следовательно, плита должна выдерживать все нагрузки, создаваемые соединенными с ней системами.

2. Она выполняет функцию защиты силовой установки и других узлов и агрегатов от непреднамеренных внешних воздействий, поэтому, согласно регламенту соревнований, она должна иметь достаточную для этого прочность.



Рис. 3. Задняя система поддрессирования автомобиля “BRT-7”



Рис. 4. Задняя система поддрессирования автомобиля “BRT-8D”

2. Постановка цели и задач

В ранее разрабатываемой системе поддрессирования положение шарнирных точек крепления к несущей системе определялось методом подбора, на основании накопленного опыта и знаний ведущих конструкторов.

Автоматизация этого процесса позволит получить рациональные варианты геометрии системы поддрессирования и расположения точек крепления.

Цель работы - повышение устойчивости гоночного автомобиля “BRT-8D”.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ литературных источников;
- разработать математическую модель задней системы поддрессирования “BRT-8D”;
- определить рациональную геометрию системы поддрессирования;
- провести анализ полученных результатов.

3. Методика определения рационального расположения шарнирных точек крепления системы поддрессирования

На рис. 5 представлена блок-схема математической модели системы поддрессирования автомобиля “BRT-8D”, которая состоит из набора твердых тел, которые имеют кинематические и силовые связи. Система уравнений, описывающих динамику тел, синтезируется в автоматизированном режиме с применением программных комплексов – «система динамики твердых тел».

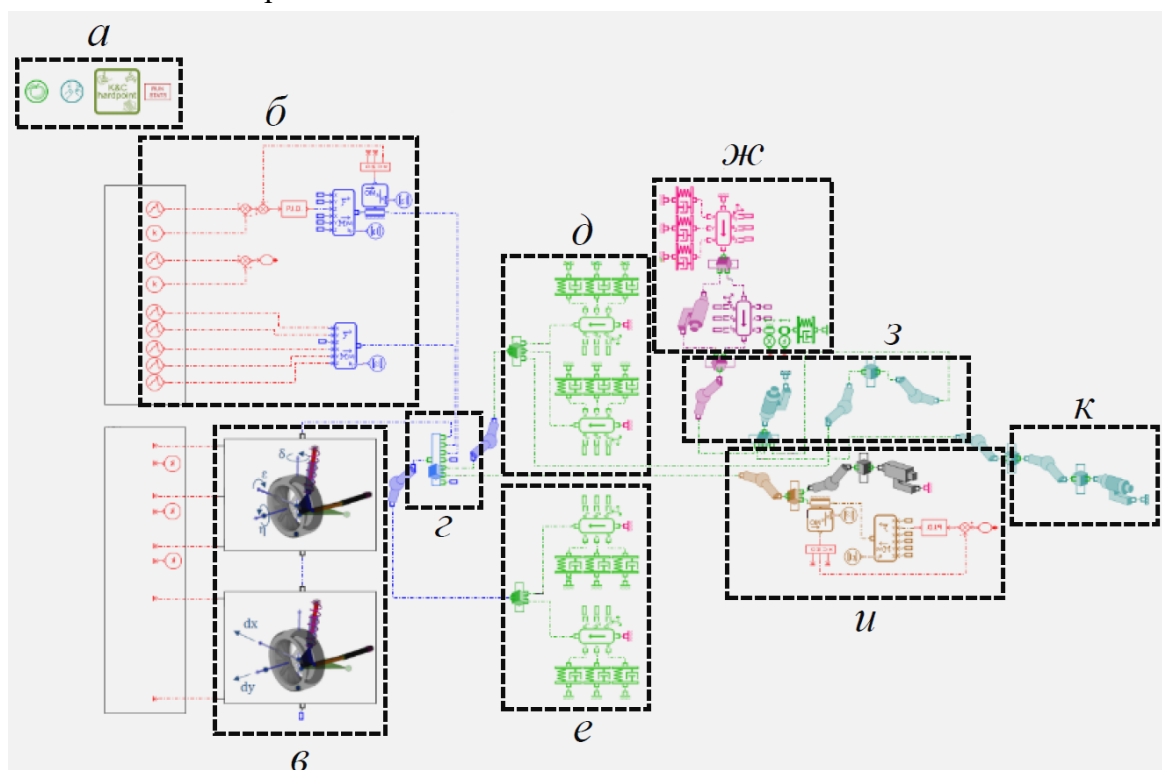


Рис. 5. Блок-схема математической модели системы поддрессирования: *а* – блоки управления моделью; *б* – блоки для задания входных параметров; *в* – блоки колеса; *г* – блоки ступичного узла; *д*, *е* – блоки верхнего и нижнего рычагов; *ж* – блоки амортизатора и пружины; *з* – блоки соединительных элементов; *и* – блоки реактивной тяги; *к* – блоки стабилизатора поперечной устойчивости

Модель состоит из подсистем, отвечающих за работу соответствующих систем: колесо (рис. 6, а), верхний (рис. 6, б) и нижний (рис. 6, в) рычаги, реактивная тяга (рис. 6, г), пружина (рис. 6, д), амортизатор (рис. 6, е) и стабилизатор поперечной устойчивости (рис. 6, ж). Она позволяет исследовать ход системы поддрессоривания, изменение углов установки колес и другие параметры.

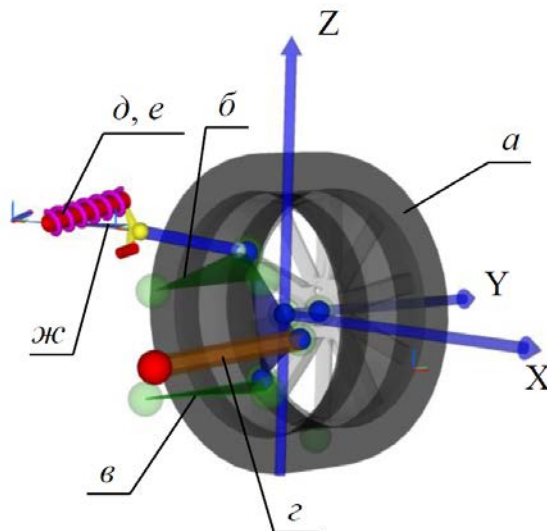


Рис. 6. 3D визуализация математической модели системы поддрессоривания: а – колесо; б, в – верхний и нижний рычаги; г – реактивная тяга; д – пружина; е – амортизатор; ж – стабилизатор поперечной устойчивости.

Среди всех автомобилей, разработанных командой, наилучшая кинематика системы поддрессоривания была достигнута на модели “BRT-7”. В его конструкции использовали более длинные рычаги независимой системы поддрессоривания, благодаря принятым удачным компоновочным решениям. Увеличение длины рычага приводит к уменьшению диапазон изменения углов установки колес. Из-за конструктивных особенностей задняя часть несущей системы “BRT-8D” шире, чем на автомобиле “BRT-7”, при этом рычаги задней системы поддрессоривания меньшей длины, что негативно влияет кинематику.

Для совершенствования геометрии системы поддрессоривания автомобиля "BRT-8D" необходимо решить задачу настройки алгоритма оптимизации таким образом, чтобы кинематика исследуемой системы поддрессоривания максимально соответствовала кинематике задней подвески автомобиля “BRT-7”. Для этого следует найти требуемые положения шарнирных точек крепления системы поддрессоривания с учетом заданных ограничений.

Используемое в работе программное обеспечение предусматривает содержание двух программных блоков: “блок оптимизации” и “блок запуска”. В “блоке запуска” происходит запуск расчета для исследования изменения параметров систем поддрессоривания в зависимости от хода колеса в математической модели с заданными ей значениями переменных. “Блок оптимизации” изменяет входные значения переменных в заданном диапазоне при запуске, затем записывает значения на выходе. Варьируемые параметры изменяются с заданным шагом. В итоге используемый в программном обеспечении алгоритм позволяет найти наиболее подходящий вариант. Расчет проводился в несколько шагов с последовательным добавлением ограничений.

Среди всех автомобилей, разработанных командой, наилучшая кинематика системы поддрессирования была достигнута на модели “BRT-7”. В его конструкции использовали более длинные рычаги независимой системы поддрессирования, благодаря принятым удачным компоновочным решениям. Увеличение длины рычага приводит к уменьшению диапазон изменения углов установки колес

Из-за конструктивных особенностей задняя часть несущей системы “BRT-8D” шире, чем на автомобиле “BRT-7”, при этом рычаги задней системы поддрессирования меньшей длины, что негативно влияет кинематику.

Для совершенствования геометрии системы поддрессирования автомобиля "BRT-8D" необходимо решить задачу настройки алгоритма оптимизации таким образом, чтобы кинематика исследуемой системы поддрессирования максимально соответствовала кинематике задней подвески автомобиля “BRT-7”. Для этого находятся требуемые положения шарнирных точек крепления системы поддрессирования с учетом заданных ограничений.

Используемое в работе программное обеспечение предусматривает содержание двух программных блоков: “блок оптимизации” и “блок запуска”. В “блоке запуска” происходит запуск расчета для исследования изменения параметров систем поддрессирования в зависимости от хода колеса в математической модели с заданными ей значениями переменных. “Блок оптимизации” изменяет входные значения переменных в заданном диапазоне при запуске, затем записывает значения на выходе. Варьируемые параметры изменяются с заданным шагом. В итоге используемый в программном обеспечении алгоритм позволяет найти наиболее подходящий вариант. Расчет проводился в несколько шагов с последовательным добавлением ограничений.

На первом этапе использовалась многокритериальная и безусловная оптимизация, для которой целевой функцией являлся минимум разности квадратов площадей под графиками угла развала колес в зависимости от хода колеса для автомобилей “BRT-7” и “BRT-8D”, а также минимум разности квадратов площадей под графиками угла схождения колес в зависимости от хода колеса. В качестве варьируемых параметров выбраны координаты шарнирных точек крепления независимой системы поддрессирования в сферической системе координат. Перемещение точек проводилось в пределах сфер радиусом 50 миллиметров с шагом в 1 миллиметр. Далее на втором шаге оптимизации предусматривалось добавление ограничения на принадлежность трех шарнирных точек крепления к плите.

Для реализации проверки в математической модели на принадлежность каждой из выбранных точек системы поддрессирования, было получено математическое уравнение плоскости плиты вида $A \times x + B \times y + C \times z + D = 0$. Для каждой точки было задано ограничение в виде такого равенства

На третьем шаге оптимизации было настроено ограничение на расположение центра крена. В математической модели реализовано вычисление его координаты путем определения точки пересечения прямых, с использованием системы уравнений прямых вида $\frac{x-x_0}{l} = \frac{y-y_0}{m} = \frac{z-z_0}{n}$. Для обеспечения оптимального крена автомобиля в повороте необходимо, чтобы центр крена задней оси был удален от центра тяжести автомобиля более, чем центр крена передней оси.[5] Первое требование к высоте расположения центра крена задней оси сформулировано в виде неравенства $|RC_{\text{REAR}} - CG| > |RC_{\text{FRONT}} - CG|$, где RC_{REAR} – центр крена задней оси, RC_{FRONT} – центр крена передней оси, CG – центр тяжести. Второе требование было сформулировано в виде неравенства таким образом, чтобы

полученный центр крена задней оси, был сильнее приближен к центру тяжести, чем изначальный: $|RC_{REAR0}| > |RC_{REAR}|$. Его выполнение уменьшит крен автомобиля в повороте.

На четвертом шаге оптимизации задано ограничение величины влияния противоклевковой геометрии системы поддрессоривания. Ее показатель оценивает величину продольного крена автомобиля при разгоне и выражается он в процентах, где при величине 100% крен отсутствует. Его вычисление реализовано в математической модели с путем определения точки пересечения прямых, через систему уравнений прямых вида $\frac{x-x_0}{l} = \frac{y-y_0}{m} = \frac{z-z_0}{n}$. Максимальное значение примем величиной 50%, так как при больших значениях рычаги системы поддрессоривания подвергаются чрезмерно большим нагрузкам, которые могут привести к деформации, что негативно повлияет на поведение автомобиля в процессе движения. Ограничение на величину противоклевковой геометрии (рис. 7.) задано в диапазоне от 0% до 50%.

Расчетная модель имеет 18 варьируемых параметров, шаг их изменения (0,01 радиан для углов и 1 миллиметр для радиус-векторов), необходимый для соблюдения условия принадлежности трех точек крепления плите. Для уменьшения времени расчета, разность квадратов площадей графиков изменения развала в зависимости от хода колеса и разность квадратов площадей графиков изменения схождения в зависимости от хода колеса сведены к одной переменной, с использованием весовых коэффициентов. Весовые коэффициенты подобраны так, чтобы разности имели одинаковый порядок малости. Получена многомерная условная и однокритериальная оптимизационная программа.

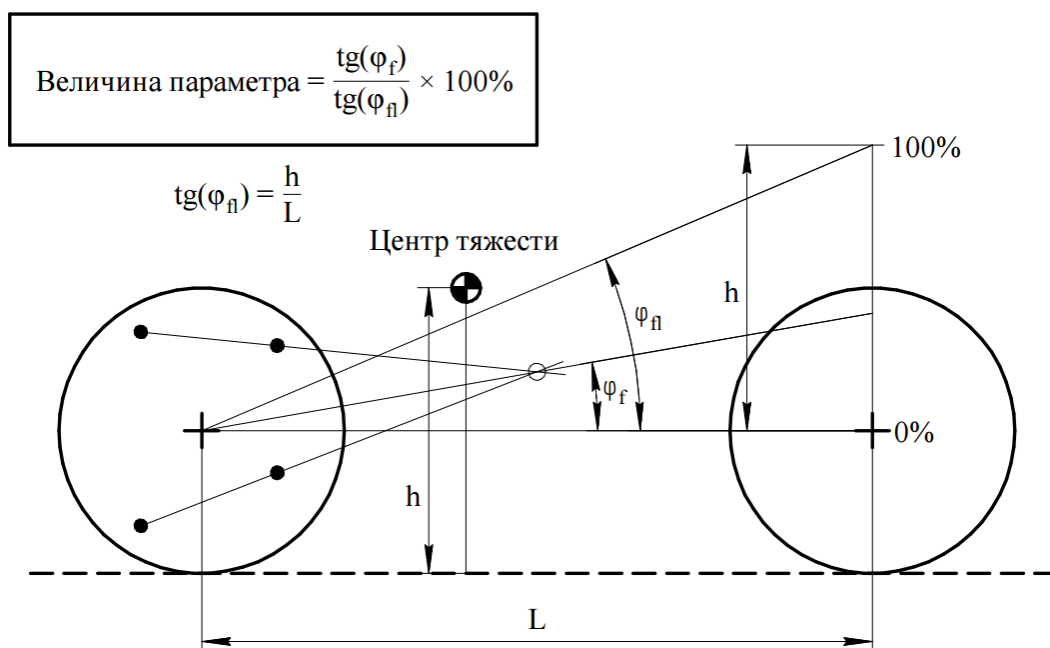


Рис. 7. Схема определения величины параметра противоклевковой геометрии задней системы поддрессоривания.

4. Результаты и выводы

В результате расчета площадь под графиком схождения уменьшилась на 65% (рис. 8), а площадь под графиком развала на 5% (рис. 9).

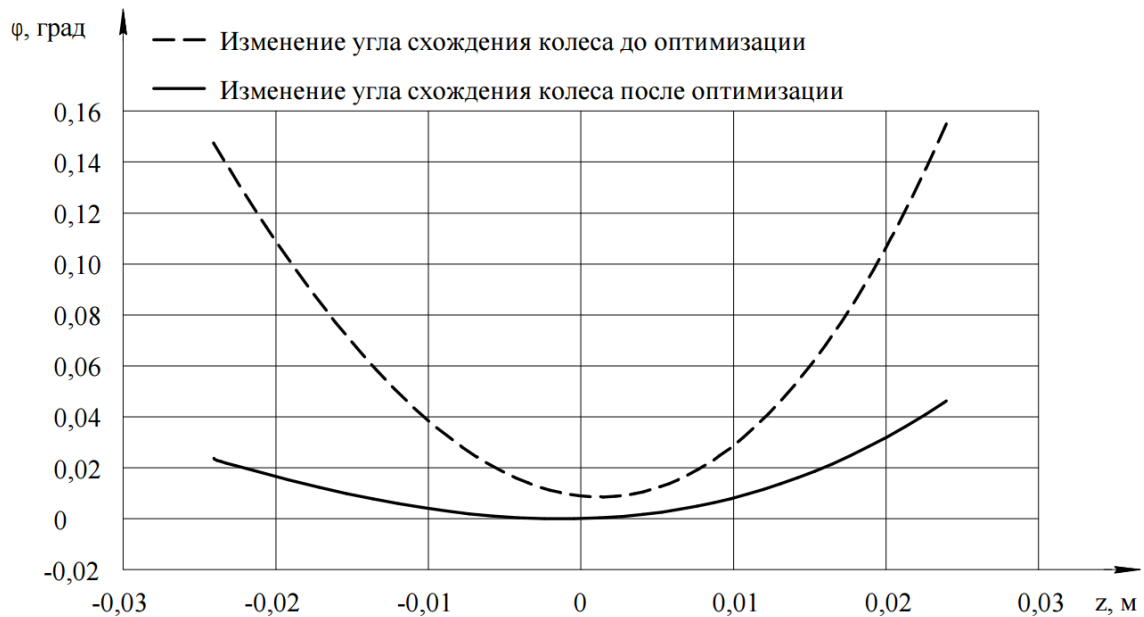


Рис. 8. Графики изменения угла схождения колеса в зависимости от перемещения колеса

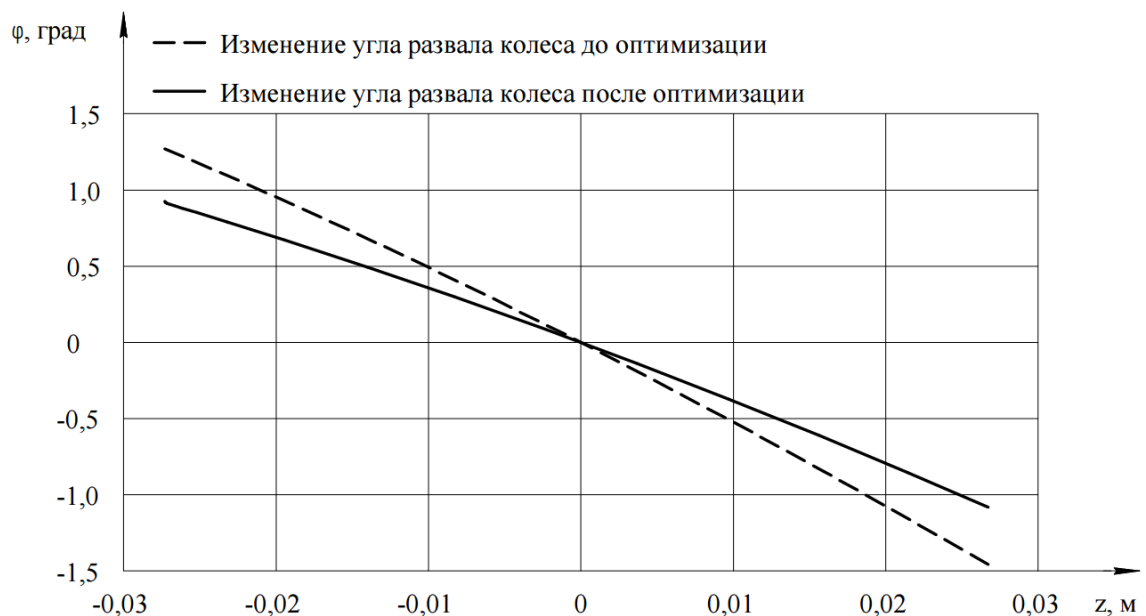


Рис. 9. Графики изменения угла развала колеса в зависимости от перемещения колеса

В результате проделанных исследований получено рациональное расположение узловых точек системы поддрессоривания. Центр крена задней оси стал на 18,2 миллиметра ближе к высоте центра тяжести автомобиля, диапазон изменения угла развала колеса в зависимости от хода колеса был уменьшен в 1,36 раза (с 2,73 до 2,01 градусов), а диапазон изменения угла схождения колеса в зависимости от хода колеса был уменьшен в 3,17 раза (с 0,146 до 0,046 градусов).

Список литературы

1. Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Жеглов Л.Ф. и др.; Под ред. Полунгяна А.А.. Проектирование полноприводных колесных машин в трех томах: Учебник для вузов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 3 том с.319-341.
 2. Жилейкин М.М., Котиев Г.О.. Моделирование систем транспортных средств / М.М. Жилейкин, Г.О. Котиев. - М.: 2020. - 240 с.
 3. Аллан Станифорт. Подвеска соревновательного автомобиля / А. Станифорт. - М.: 1999. С. 197-215.
 4. Бекман В.В.. Гоночные автомобили / В.В. Бекман. - М.: 1980. С. 304-314.
 5. Й. Раймпель. Шасси автомобиля / Под ред. к.т.н. И.И. Зверевой. - М.: 1983. с. 274-354.
 6. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. – Минск: Новое знание, 2016. – 592 с.
 7. Бахмутов С.В., Ахмедов А.А. Многокритериальная параметрическая оптимизация в задачах совершенствования характеристик управляемости и устойчивости автотранспортных средств. // «Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ», № 2 (4) 2007 г.
 8. Ротенберг, Р. В. Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода / Р. В. Ротенберг. – Москва: Машиностроение, 1972. – 392 с.
-

АВТОРЫ

Бережнов Максим Константинович, студент каф. «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, 105005, Российская Федерация, berezhnov.m@bk.ru.

Харрисон Ваня Антони, студент каф. «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, 105005, Российская Федерация, vtkpes@gmail.com.

Евсеев Кирилл Борисович, доктор технических наук, доцент каф. «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, 105005, Российская Федерация, kb_evseev@bmstu.ru.

Determination of the rational location of the hinge attachment points of the springing system to the supporting structure of a “formula student” class racing car

Maksim K. Berezhnov*,
Vanya Anthony Harrison,
Kirill B. Evseev

* aleksandrovdimas10@gmail.com
Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russian Federation

The article describes the developed mathematical model of the rear suspension system of a racing car of the Formula Student class, which allows analyzing the kinematics of the suspension system. Based on it, a search was carried out for the rational location of the hinge attachment points of the springing system to the carrier system using a surrogate algorithm, taking into account changes in the angles of installation of the wheels. The paper presents an analysis of the kinematics of the springing system for the rational coordinates of the attachment points obtained as a result of the calculation, which meet the design requirements and reduce the range of changes in the angle of convergence during the operation of the springing system. As a result of the performed research, the rational location of the hinge points was determined, taking into account the anti-pecking geometry.

Keywords: independent springing system, kinematics of the springing system, wheel camber angle, wheel convergence angle, roll center, anti-biting geometry, load-bearing structure, chassis.

References

1. B.A. Afanasyev, B.N. Belousov, L.F. Zheglov, etc.; Edited by A.A. Polungyan. Designing four-wheel drive wheeled vehicles in three volumes: Textbook for universities. - M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2008. 3 volume pp.319-341.
2. M.M. Zhileikin, G.O. Kotiev. Modeling of vehicle systems / M.M. Zhileikin, G.O. Kotiev. - M.: 2020. - 240 p.
3. Allan Staniforth. Suspension of a competitive car / A. Staniforth. - M.: 1999. pp. 197-215.
4. V.V. Beckman. Racing cars / V.V. Beckman. - Moscow: 1980. pp. 304-314.
5. J. Raimpel. Car chassis / Edited by Candidate of Technical Sciences I.I. Zvereva. - M.: 1983. pp. 274-354.
6. Tarasik, V. P. Mathematical modeling of technical systems / V. P. Tarasik. – Minsk: Novoe znanie, 2016. – 592 p.

7. Bakhmutov S.V., Akhmedov A.A. Multi-criteria parametric optimization in the tasks of improving the characteristics of controllability and stability of motor vehicles. // "Izvestia of MSTU "MAMI". Scientific peer-reviewed journal. - M., MSTU "MAMI", No. 2 (4) 2007.

8. Rotenberg, R. V. Car suspension. Vibrations and smoothness of the course / R. V. Rotenberg. – Moscow: Mashinostroenie, 1972. – 392 p.

AUTHORS

Maksim K. Berezhnov, student of the "Wheeled Machines" Department of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 2nd Bauman str., 5, p. 1, 105005, Russian Federation, berezhnov.m@bk.ru.

Vanya Anthony Harrison, student of the "Wheeled Machines" Department of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 2nd Bauman str., 5, p. 1, 105005, Russian Federation, vtkpes@gmail.com.

Kirill B. Evseev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Wheeled Machines" of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 2nd Bauman str., 5, p. 1, 105005, Russian Federation, kb_evseev@bmstu.ru.