

УДК 629.371

Разработка подвески спортивного автомобиля класса «Формула студент»

Аругюнян Г.А.¹, Евсеев К.Б.²

*^{1,2}Студенты, кафедра «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия*

*Научный руководитель: Карташов А.Б, доцент кафедры «Колесные машины»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

*Онищенко Д.О., доцент кафедры «Поршневые двигатели»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана

george.arut@yandex.ru

kir_evseev@mail.ru

kartashov@bmstu.ru

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.

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/534532.html>

В 2012 году в МГТУ им. Н.Э. Баумана силами студентов и преподавателей кафедр СМ-10 «Колесные машины» и Э-2 «Поршневые двигатели» впервые организована команда для участия в этих престижных международных инженерно-спортивных соревнованиях.

Регламент соревнований предусматривает ограничения и требования к конструкции и компоновке болида. Автомобиль должен иметь открытые колеса с диаметром обода не менее 8 дюймов (см. рис. 1). Объем двигателя не должен превышать 610 см^3 . 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.



Рис.1. Общий вид автомобиля без аэродинамического обвеса

Отличительной особенностью разрабатываемого автомобиля является малая масса, относительно высокая удельная мощность, повышенные требования к управляемости и маневренности. Одним из актуальных вопросов является вопрос создания подвески, удовлетворяющей высоким требованиям соревнований.

Подвеска автомобиля представляет собой колебательную систему, собственная частота колебаний которой определяется жесткостью шины, жесткостью упругого элемента и массой, приходящейся на колесо. Являясь промежуточным звеном между корпусом автомобиля и дорогой, она должна быть легкой, прочной и наряду с обладанием наилучшими кинематическими и силовыми параметрами взаимодействия колеса с опорной поверхностью, должна обеспечивать максимальную безопасность при движении. Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

Именно подвеска передает на корпус автомобиля силы, возникающие в контакте колеса с дорогой.

К подвеске гоночного автомобиля предъявляются следующие требования [2, 5]:

- 1) достаточная прочность для восприятия действующих нагрузок, в том числе динамических;
- 2) обеспечение необходимых для гоночного автомобиля кинематических характеристик;
- 3) минимальная масса;
- 4) достаточная жесткость;
- 5) согласование силовых характеристик упругого и демпфирующего элементов с перемещением колеса;
- 6) согласование передней подвески с рулевым управлением;
- 7) простота и технологичность конструкции.

В процессе разработки были рассмотрены различные варианты конструкции передней и задней подвески.

Согласно источникам [1, 6 и 7], зависимая подвеска проста в изготовлении, позволяет получить высокий центр крена, у нее отсутствует изменение колеи, но ее недостатком является невозможность получения необходимого изменения угла развала колес при ходе подвески, что отрицательно сказывается на устойчивости движения и управляемости. Еще одним недостатком зависимой подвески является невозможность обеспечения достаточного сцепления колес с дорогой при повороте, что может привести к отрыву внутреннего колеса от дорожной поверхности. Ввиду названных причин, а также из-за компоновочных сложностей, применение такой схемы для передней и задней подвесок нецелесообразно.

Среди независимых подвесок наиболее подходящей была признана подвеска на двойных поперечных рычагах. Преимуществом данного типа подвески является возможность путем изменения длин рычагов и их расположения влиять на изменение развала, схождения и колеи. Также преимуществом данного типа подвески по сравнению с зависимой является отсутствие балки моста, которая вызывает компоновочные трудности. При этом подвеску на двойных поперечных рычагах можно выполнить с широким диапазоном регулировок без использования сложного технологического оборудования. В силу перечисленных особенностей предлагается использовать данную схему, как для передней, так и для задней подвески.

Как отмечалось ранее, к подвеске спортивного автомобиля предъявляются повышенные требования по обеспечению постоянного сцепления колеса с дорогой, что сопряжено с определенными трудностями особенно при применении широкопрофильных шин. Постоянное прилегание к дороге достигается путем выбора длин рычагов, их расположением и ориентацией в пространстве. Выполнение верхнего рычага более коротким, чем нижний, обеспечивает компенсацию бокового крена кузова изменением развала. В этом случае при повороте наружное колесо будет получать дополнительный отрицательный развал, а внутреннее – положительный. Такая кинематическая схема позволит колесам воспринимать большие продольные и поперечные реакции. Установка колес неведущей передней оси с отрицательным развалом позволяет увеличить величину воспринимаемых боковых реакций, при этом ведущие задние колеса должны передавать продольные силы, для чего они устанавливаются с минимальным развалом, чтобы обеспечить наибольшее пятно контакта [4].

Подвеска на двойных поперечных рычагах допускает большое количество вариантов расположения упругого и демпфирующего элементов. На автомобилях класса «Формула студент» используются однотрубные амортизаторы с установленными на них пружинами. Для уменьшения длины амортизатора камера газового компенсатора выносится в сторону, как изображено на рис. 2.



Рис.2 Вид амортизатора

В настоящее время можно выделить несколько наиболее распространенных схем расположения амортизаторов: схема с прямым действием амортизатора, схема «Пушрод», схема «Пулрод» и схема с одним амортизатором.

Схема 1: «Прямое действие амортизатора» представлена на рисунке 3.

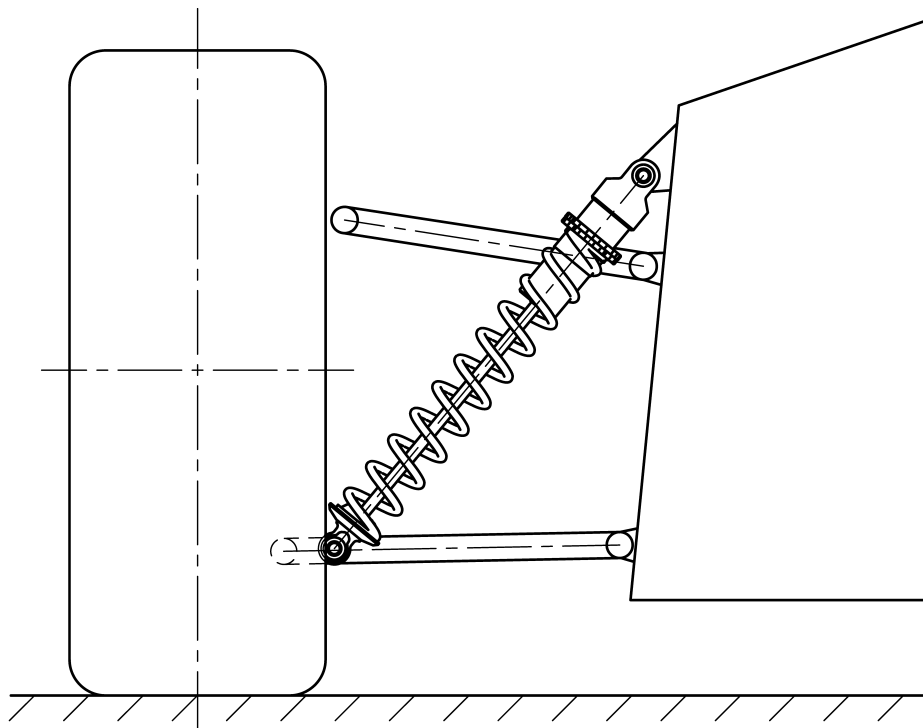


Рис.3 Прямое действие амортизатора

Для автомобилей класса «Формула студент» «классическая» схема расположения амортизатора, когда перемещение на амортизатор передается непосредственно от нижнего рычага (рис. 3) не распространена, так как необходимо использовать амортизаторы большой длины, соответственно, обладающие большой массой. Кроме того, затрудняется компоновка стабилизатора поперечной устойчивости, а также получение необходимого передаточного отношения подвески по силе и по перемещению. Амортизатор крепится к нижнему рычагу на минимальном расстоянии от стойки подвески для уменьшения изгибающих сил, действующих на рычаг и правильного согласования хода амортизатора с ходом подвески. Преимуществом данной схемы является простота и высокий КПД, ввиду отсутствия промежуточных элементов.

Схема 2: «Пушрод» (в переводе с английского «Pushrod» – толкающая тяга) представлена на рисунке 4.

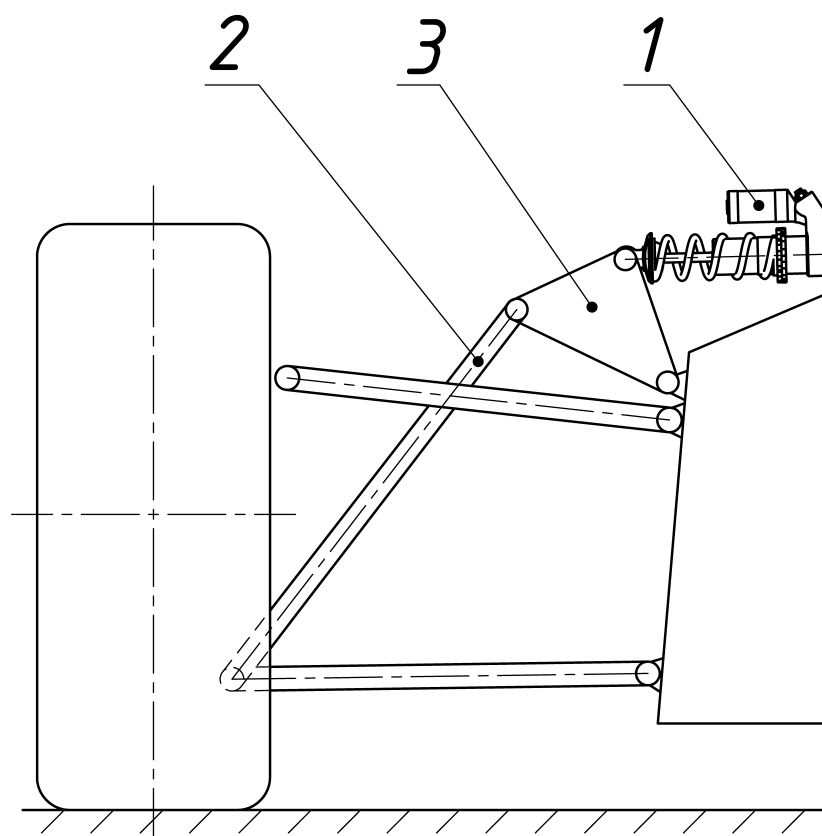


Рис.4. Схема «Пушрод»

Схема подвески «Пушрод» изображена на рис. 4. В данной схеме, в отличие от предыдущей, воздействие на амортизатор (1) происходит через тягу (2) и маятник (3). Амортизаторы, используемые на автомобилях класса «Формула студент» обычно обладают небольшой длиной, что затрудняет их непосредственное крепление к рычагу. Преимуществом схемы «Пушрод» является удобство компоновки амортизатора на раме автомобиля. Амортизатор возможно расположить вне воздушного потока или вдоль потока, что позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление. Кроме того, появляется возможность согласования характеристик упругого и демпфирующего элементов подвески с перемещением колеса путем выбора плеч маятника. Также закрепление амортизатора на раме автомобиля позволяет уменьшить неподрессоренную массу. 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.

Схема 3: «Пулрод» (в переводе с английского «Pullrod» – тянущая тяга) представлена на рисунке 5.

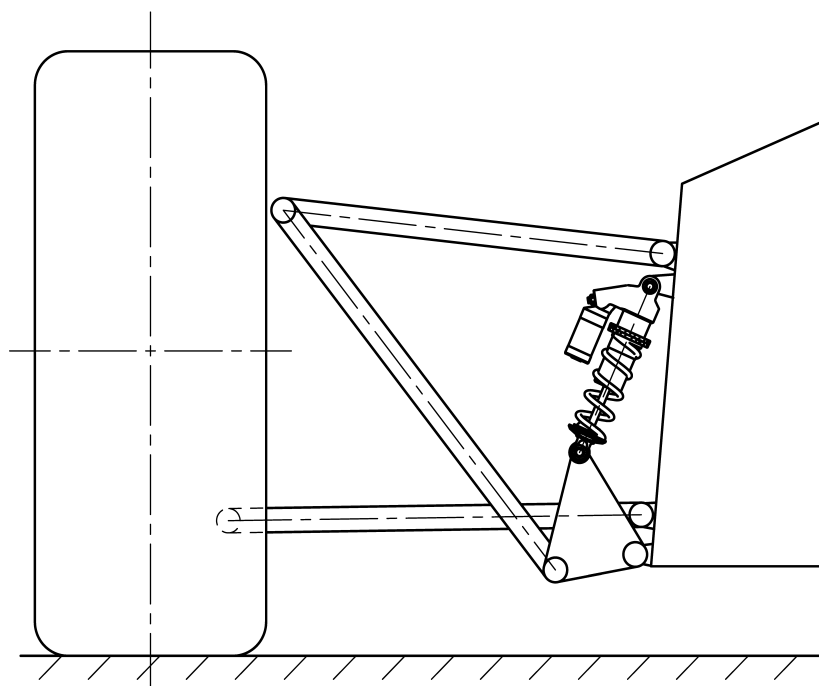


Рис.5. Схема «Пулрод»

Также как и в предыдущей схеме, перемещение на амортизатор передается через тягу и маятник (рис. 5), поэтому она обладает всеми преимуществами предыдущей. Однако отличительной особенностью данной схемы является то, что тяга маятника при сжатии подвески работает на растяжение, что исключает возможность потери устойчивости. Таким образом, тягу можно облегчить, сделав ее меньшего диаметра. Другим преимуществом является то, что амортизаторы при такой схеме располагаются в нижней части рамы, благодаря чему несколько снижается центр масс автомобиля.

Схема 4: «Моношок» (в переводе с английского «Monoshock» – с одним амортизатором) представлена на рисунке 6.

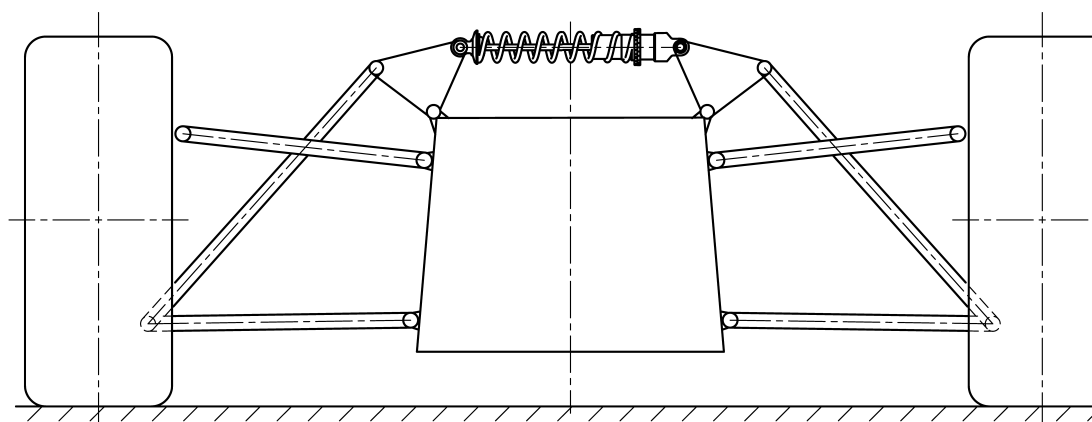


Рис. 6. Схема с одним амортизатором

Особенностью этой схемы является использование только одного амортизатора и обязательное использование стабилизатора поперечной устойчивости. Амортизатор воспринимает только вертикальные перемещения, а стабилизатор поперечной устойчивости – только поперечный крен. Таким образом, появляется возможность независимого изменения вертикальной и угловой жесткости подвески. Кроме того, наличие только одного амортизатора, несмотря на увеличение его габаритов, может привести к некоторому снижению массы автомобиля.

Ни одна из рассмотренных схем не имеет явных преимуществ, поэтому все они применяются в конструкциях автомобилей соревнований «Формула студент». Для автомобиля команды МГТУ им. Н.Э. Баумана была выбрана схема 2 «Пулрод» как для передней подвески, так и для задней. Данная схема позволяет использовать стандартные для формулы студент амортизаторы, а также разгрузить тягу маятника от сжимающих усилий.

Задача определения геометрии подвески усложняется тем, что ее необходимо рассматривать для всех возможных положений колеса и учитывать изменение всех параметров при ходах сжатия и отбоя. Для решения этой задачи выбрана система автоматизированного проектирования SolidWorks, позволяющая создавать параметрические эскизы и назначать необходимые математические взаимосвязи на элементы эскиза при помощи инструмента «Уравнения». С помощью построенных двух- и трехмерных эскизных моделей передней и задней подвески были проанализированы изменение всех параметров: углов развала, схождения, продольного и поперечного наклона оси поворота, колеи, продольного и поперечного плеча обкатки при ходах отбоя и сжатия.

Для вычисления необходимых коэффициента жесткости упругого элемента c_{y_0} и коэффициента сопротивления амортизатора k_a используют следующие зависимости [3]: $c_{y_0} = c_n i_p^2$, $k_a = k_n i_h^2$, где c_n и k_n – приведенные к центру пятна контакта шины с опорной поверхностью коэффициенты жесткости упругого элемента и сопротивления амортизатора соответственно; i_p и i_h – передаточные отношения от колеса до амортизатора по силе и перемещению соответственно. Коэффициенты c_n и k_n рассчитываются исходя из собственной частоты вертикальных колебаний массы поддрессоренной части автомобиля [2, 3, 6]. Некоторую сложность представляет определение передаточных отношений i_p и i_h данной конструкции подвески в зависимости от хода колеса.

Рассмотрим определение передаточных отношений i_p и i_h на примере задней подвески. Для этого отдельно рассмотрим схемы направляющего устройства и маятника с амортизатором, изображенные на рис. 7. Плоскость, перпендикулярную оси вращения маятника и проходящую через ось амортизатора назовем плоскостью маятника. Формулы для определения i_p и i_h [3]: $i_p = P_a/P_z$; $i_h = h_a/h$, где P_z – вертикальная нагрузка на колесо; P_a – сила сопротивления амортизатора; h_{zn} – прогиб подвески; h_a – перемещение штока амортизатора.

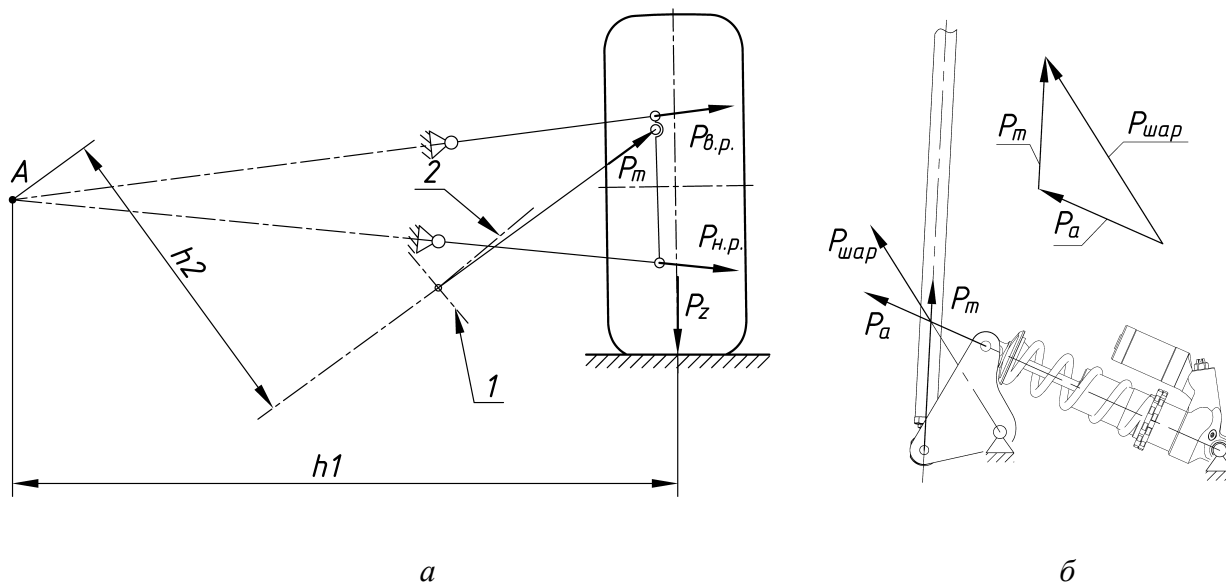


Рис.7 Расчетные схемы:

а – схема направляющего устройства ($P_{в.р.}$ – сила, действующая на верхний рычаг; $P_{н.р.}$ – сила, действующая на нижний рычаг; 1 – ось вращения маятника; 2 – плоскость маятника); *б* – схема маятника и амортизатора ($P_{шар}$ – реакция в шарнире маятника)

Запишем сумму моментов относительно точки *A* для первой схемы (см. рис. 7, *а*): $\sum M_{Am} = P h_2 - P h_1 = 0$, где P_m – сила, действующая на тягу маятника. Из этого уравнения находим P_m через P_z : $P_m = P_z h_1 / h_2$. Как видно из схемы, ось тяги и плоскость маятника не совпадают, но ввиду малой величины угла между ними, этим можно пренебречь. Перейдем к рассмотрению схемы маятника и амортизатора (см. рис. 7, *б*). Строим план сил: силы P_a и $P_{шар}$ известны по направлению, а P_m известна по величине и направлению. Величину силы P_z задаем равной единице, т.к. нас интересует отношение сил. Из плана сил находим силу P_a , численно равную передаточному отношению i_p . Таким образом, определяется передаточное отношение по силе для одного положения подвески.
<http://sntbul.bmstu.ru/doc/534532.html>

Средства SolidWorks позволяют автоматизировать процесс определения передаточного отношения по силе и по перемещению для различных положений подвески. Также с помощью инструмента системы SolidWorks «Уравнения» была создана глобальная переменная со значением, равным длине амортизатора. Для автоматизации процесса определения параметров подвески в различных ее положениях разработана программа-макрос, которая, перебирая различные значения прогиба подвески, записывает в файл значения текущих параметров подвески. Полученные данные позволяют построить характеристики изменения передаточных отношений по силе и перемещению в зависимости от прогиба подвески. Характеристики приведены на рис. 8.

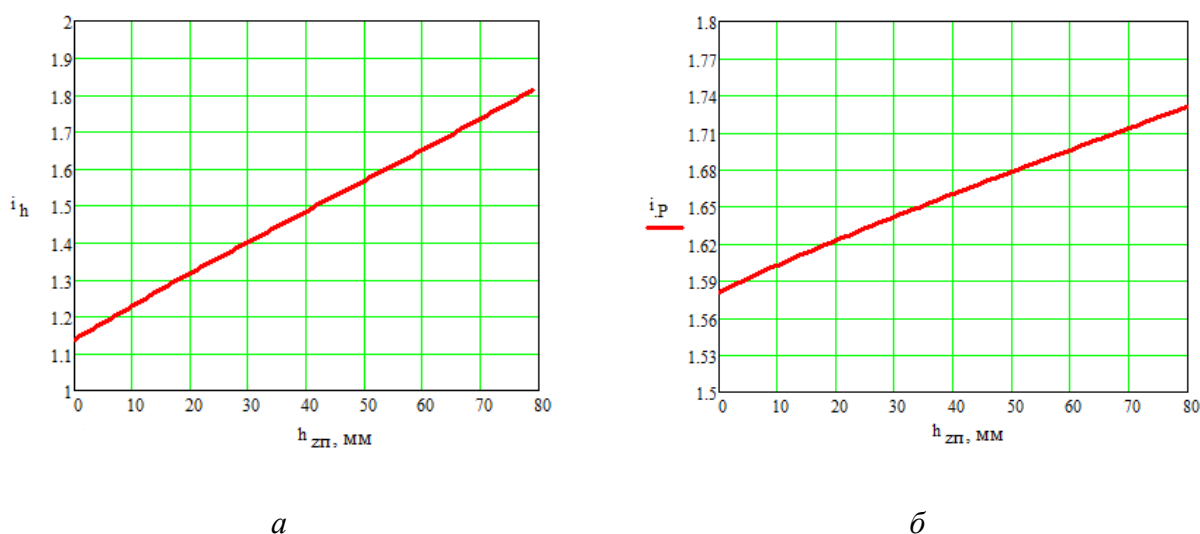


Рис.8 Характеристики изменения передаточных отношений в зависимости от прогиба подвески:

a – передаточного отношения по перемещению; *б* – передаточного отношения по силе

По полученным данным рассчитываются необходимые характеристики упругого элемента и амортизатора.

На основании проведенного обзора и сравнение различных типов конструкций современных систем поддрессоривания спортивных автомобилей разработана независимая подвеска гоночного автомобиля «Формула студент», представляющего собой сложный технический объект, состоящий из сотен узлов и десятков систем, размещенных в очень ограниченном пространстве. При этом с помощью средств автоматизированного проектирования обеспечено выполнение требований достаточно противоречивых критериев – безопасности, минимальной массы и прочности, а также предложен способ

определения передаточных отношений и других параметров подвески в автоматизированном режиме.

Список литературы

1. Раймпель Й. Шасси автомобиля./Сокр. пер. 1 тома 4 нем. изд. П. Агапова; Под ред. И. Н. Зверьева. М.: Машиностроение, 1983. – 356 с., ил.
2. Раймпель Й. Шасси автомобиля: Элементы подвески/Пер. с нем. А.Л. Карпухина; Под ред. Г. Г. Гридасова. –Машиностроение, 1987. – 288с.:ил.
3. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов: П79 В 3 т. Т. 3 / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Л.Ф. Жеглов, и др.; Под ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 432 с.: ил.
4. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин : учебник / В. В. Ларин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 391, [1] с. : ил.
5. Adam Theander. Design of a Suspension for a Formula Student Race Car. 2004.
6. Race car vehicle dynamics/ William F. Milliken, Douglas L. Milliken. 1995.
7. The Automotive Chassis: Engineering Principles. Second edition.JornsenReimpell. 2001.