

УДК 629.331

Исследование влияния жесткости резинометаллических шарниров на кинематику подвески автомобиля

Нескин Иван Владимирович^(*)

neskin@bmstu.ru

Арутюнян Георгий Артурович

georgy.arut@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена проблема влияния податливости резинометаллических шарниров (РМШ) на кинематические характеристики независимой подвески автомобиля. Представлена виртуальная модель подвески, реализованная в программном комплексе для моделирования динамики систем твердых тел. Показано, что учет податливости РМШ приводит к значительным изменениям параметров развала, схождения и колеи в режимах торможения, разгона и поворота. Сделаны выводы, что для повышения точности синтеза кинематики и безопасности автомобиля необходимо учитывать податливость шарниров на этапе проектирования, а варьирование жесткостью РМШ может быть использовано для коррекции кинематики.

Ключевые слова: резинометаллический шарнир, кинематика подвески, виртуальное моделирование, развал колес, схождение колес, управляемость автомобиля

Research of the influence of rubber-metal hinge stiffness on suspension kinematics

Neskin Ivan Vladimirovich^(*)

neskin@bmstu.ru

Arutyunyan Georgy Arturovich

georgy.arut@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The problem of the influence of rubber-metal hinge (RMH) compliance on the kinematic characteristics of an independent car suspension is considered. A virtual suspension model implemented in the Adams software complex is presented. It is shown that accounting for RMH compliance leads to significant changes in camber, toe and track width parameters under braking, acceleration and cornering conditions. It is concluded that to improve the accuracy of kinematics synthesis and vehicle safety, it is necessary to take into account the compliance of hinges at the design stage, and varying the stiffness of RMH can be used to correct kinematics.

Keywords: rubber-metal hinge, suspension kinematics, virtual simulation, wheel camber, wheel toe, vehicle handling

Введение. Современные тенденции в автомобилестроении направлены на повышение безопасности, комфорта и управляемости транспортных средств. Одним из ключевых элементов, определяющих эти характеристики, является подвеска. Помимо базовых требований к кинематике, таких как обеспечение недостаточной поворачиваемости автомобиля для предсказуемого поведения

[1], минимизация сопротивления качению и износа шин [2], перед конструктором стоит комплексная задача совмещения безопасности и комфорта. Ключевым инструментом для достижения последнего являются определение свойств резинометаллических шарниров (РМШ), снижающих высокочастотные вибрации. Однако их податливость напрямую конфликтует с требованием точной кинематики, определяющей безопасность. На начальных этапах проектирования кинематики системы поддрессоривания предполагается, что все соединения являются идеальными шарнирами. Однако широко применяемые в современных подвесках РМШ обладают значительной податливостью [3]. Это создает указанное противоречие: с одной стороны, мягкие РМШ улучшают виброакустический комфорт, с другой, ухудшают точность кинематики, что негативно сказывается на устойчивости и управляемости [4].

Актуальность данного исследования заключается в необходимости количественной оценки этого влияния для последующей разработки конструкции.

Цель работы — исследование влияния жесткости РМШ на кинематические параметры подвески в различных режимах движения.

Задачи:

- построить виртуальную модель подвески с податливыми соединениями;
- провести кинематический анализ при параллельном ходе колес, а также при действии боковых, тормозных и тяговых сил;
- количественно оценить изменения параметров;
- проанализировать возможность управления кинематикой за счет варьирования жесткостных характеристик РМШ.

Материалы и методы. Объектом исследования являлась виртуальная модель передней подвески типа Макферсон легкового автомобиля.

На рис. 1 представлена общая схема модели, включающая следующие основные элементы: поворотный кулак со ступицей, нижний рычаг, рулевую тягу и амортизаторную стойку.

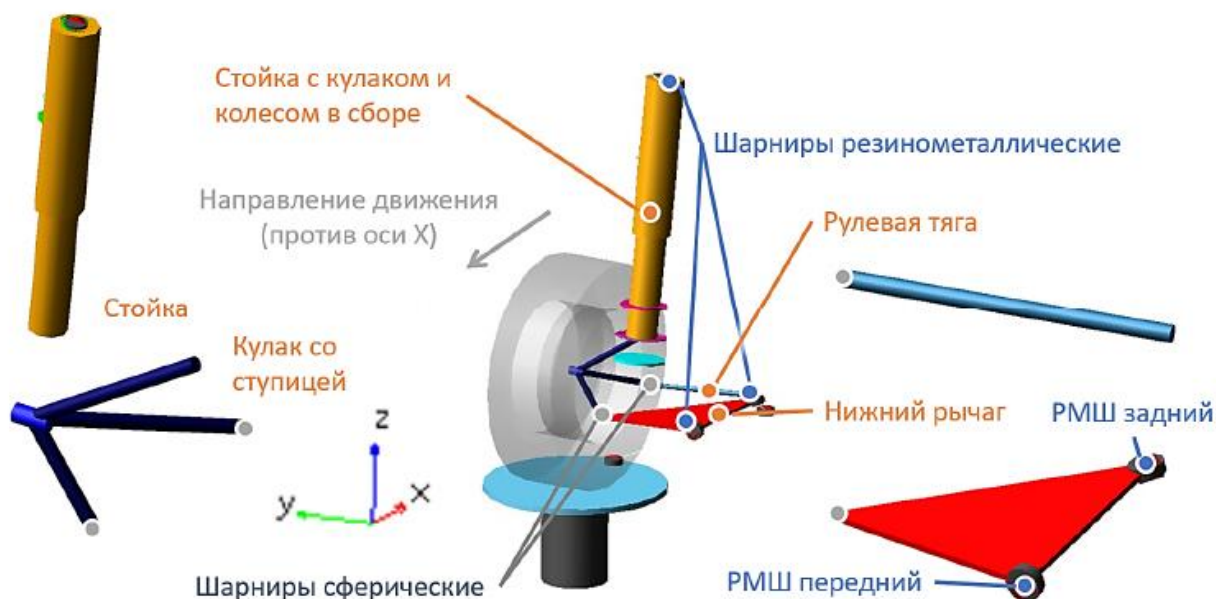


Рис. 1. Модель в программном комплексе моделирования динамики систем твердых тел

Для наиболее точного моделирования поведения подвески все соединения, традиционно рассматриваемые в кинематическом анализе как идеальные шарниры, были заменены на упругие элементы (bushing elements). Жесткостные характеристики РМШ были назначены на основе экспериментальных данных для автомобиля-аналога и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Жесткостные характеристики РМШ виртуальной модели

Расположение РМШ	$F_x, \text{N}\cdot\text{mm}$	$F_y, \text{N}\cdot\text{mm}$	$F_z, \text{N}\cdot\text{mm}$	$T_x, \text{N}\cdot\text{mm}\cdot\text{deg}$	$T_y, \text{N}\cdot\text{mm}\cdot\text{deg}$	$T_z, \text{N}\cdot\text{mm}\cdot\text{deg}$
Рычага передний	1500	3000	300	6000	3000	4500
Рычага задний	24 000	24 000	1500	8000	8000	13 500
Стойки	8000	8000	1500	15 000	15 000	4000

На рис. 2 схематично представлен качественный анализ влияния жесткости нижнего РМШ на кинематику: при правом повороте и действии боковой силы R_y более податливый шарнир (жесткость C_1) позволяет колесу сместиться на величину Δ_1 , в то время как более жесткий шарнир (жесткость $C_2 > C_1$) ограничивает смещение величиной $\Delta_2 < \Delta_1$. Данное схематичное представление легло в основу количественного исследования. Для анализа были смоделированы четыре режима нагружения: статический (вертикальный ход колес), крен кузова (поворот), торможение и разгон. Контролируемыми параметрами были: развал колеса (Camber), сходжение (Toe), изменение колеи (Track Width). Для валидации модели была проведена проверка на соответствие кинематики «жесткой» подвески (с идеальными шарнирами) теоретическим расчетам.

Влияние свойств резинометаллических шарниров на кинематику подвески:

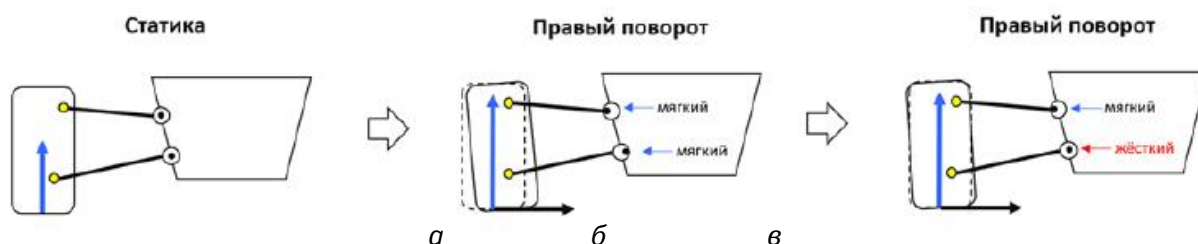


Рис. 2. Схема влияния жесткости РМШ на смещение колеса при боковом нагружении:

а — статика; *б* — мягкий шарнир; *в* — жесткий шарнир

Результаты. По результатам расчетов получены графические зависимости изменения кинематических параметров от хода подвески и приложенных сил. Установлено, что учет податливости РМШ незначительно влияет на кинематику при симметричном вертикальном ходе колес, однако приводит к существенным изменениям в нагруженных режимах.

Наибольшие отклонения наблюдались в режиме торможения. Для модели с податливыми шарнирами по сравнению с моделью с идеальными шарнирами зафиксированы следующие изменения: сходжение левого и правого колес

изменилось на величину $\Delta\delta = -0,66^\circ$ (уход в отрицательное схождение); изменение развала составило $\Delta\gamma = -0,13^\circ$ (увеличение отрицательного развала); колея уменьшилась на $\Delta Tw = 3,05$ мм. В режиме поворота и разгона изменения были менее выражены, но также значимы. На рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** представлено сравнение характеристик для двух моделей в режиме торможения. Параметры режимов нагружения были рассчитаны по методике [5].

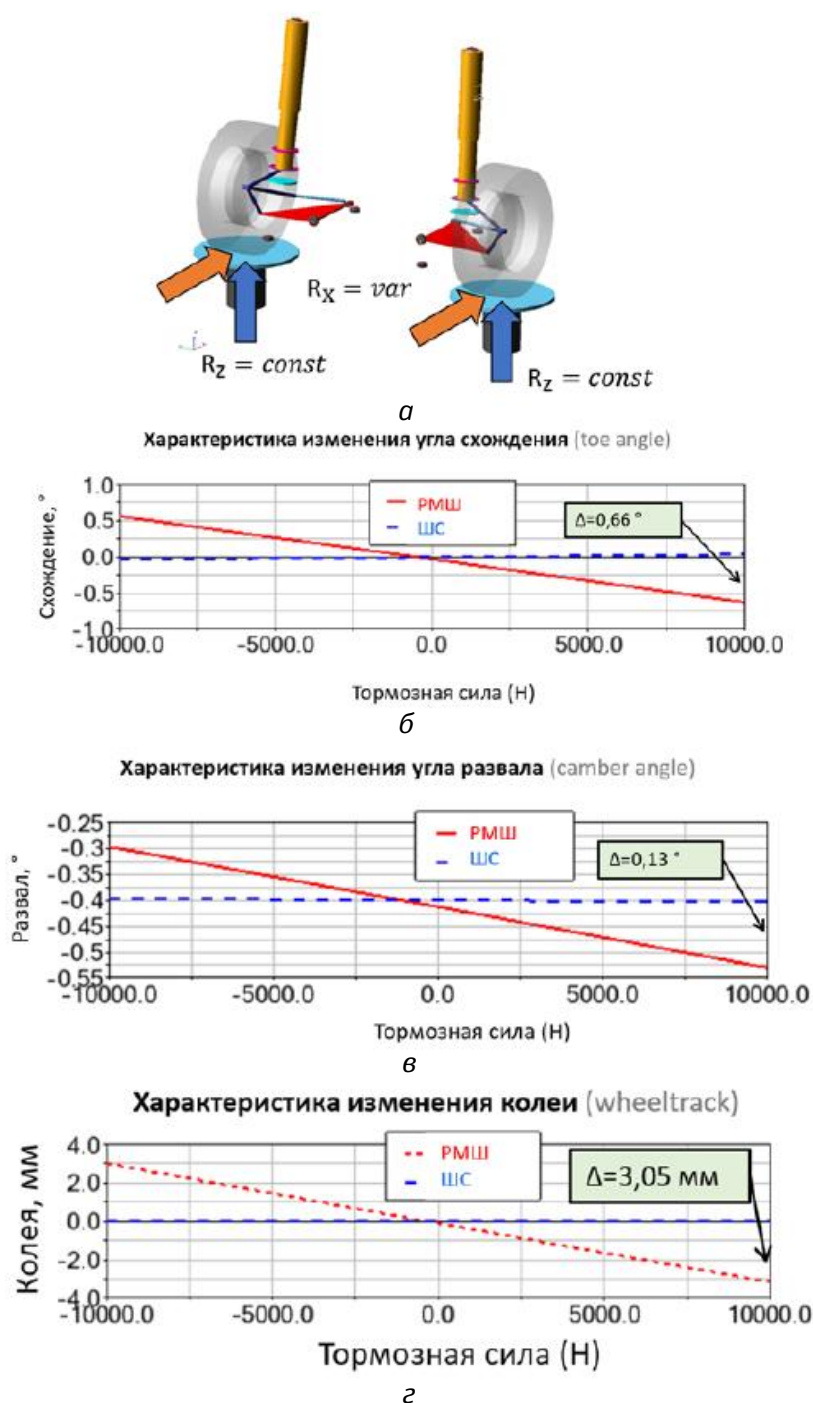


Рис. 3. Оценка изменения схождения колеса в режиме торможения для моделей с идеальными и податливыми шарнирами:

а — расчетная схема; б — характеристика изменения угла схождения; в — характеристика изменения угла развала; г — характеристика изменения колеи

В табл. 2 численно представлено различие характеристик изменения развала, схождения и колеи для моделей с идеальными и податливыми шарнирами.

Таблица 2

Численное сравнение характеристик изменения развала, схождения и колеи для моделей с идеальными и податливыми шарнирами

Режим нагружения	Отличие развала, градусы	Отличие схождения, градусы	Отличие колеи, мм
Параллельный ход	0,14	0,18	0,70
Боковая сила	0,08	0,46	2,04
Тормозная сила	0,13	0,66	3,05
Тяговая сила	0,11	0,61	2,78

Обсуждение полученных результатов. Полученные результаты согласуются с данными других исследователей о том, что податливость элементов подвески вносит значительные коррективы в ее кинематику [6]. Обнаруженное значительное изменение схождения в режиме торможения ($-0,66^\circ$) является критичным с точки зрения управляемости, так как может привести к неустойчивости автомобиля при торможении в повороте. Уменьшение колеи также негативно сказывается на стабильности поведения автомобиля.

Важным выводом является нелинейный характер влияния: в ненагруженном состоянии (вертикальный ход) влияние невелико, но в зоне действия значительных сил (при торможении) оно становится определяющим. Это подтверждает гипотезу о том, что традиционный кинематический анализ без учета податливости соединений дает неполную и заведомо идеализированную картину.

Предложенная модель позволяет не только оценить величину отклонений, но и, варьируя жесткостные характеристики виртуальных РМШ, найти их оптимальное соотношение, которое минимизирует негативное влияние на кинематику, сохраняя при этом виброизоляционные свойства, что является решением задачи по совмещению комфорта и безопасности.

Заключение. В ходе исследования достигнута поставленная цель — доказано и количественно оценено значительное влияние жесткостных характеристик резинометаллических шарниров на кинематику подвески. Полученные результаты были ожидаемыми с качественной точки зрения, однако их количественная оценка выявила критически важные для безопасности отклонения, в частности, значительное изменение схождения при торможении.

Практическая значимость работы заключается в том, что она демонстрирует необходимость обязательного учета податливости соединений на этапе синтеза кинематики подвески. Разработанная модель позволяют инженерам-конструкторам более точно назначать статические углы установки колес

с поправкой на упругие деформации, а также обоснованно подходить к выбору жесткости РМШ как к инструменту тонкой коррекции поведения автомобиля.

Важным выводом является нелинейный характер влияния: в ненагруженном состоянии (вертикальный ход) влияние невелико, но в зоне действия значительных сил (при торможении) оно становится определяющим [7].

Перспективой дальнейших исследований является интеграция данной модели в комплексный анализ, включающий динамику и прочность, а также проведение натурных испытаний для верификации виртуальных расчетов.

Список источников

- [1] Gillespie T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International, 1992, 495 p.
- [2] Раймпель Й. *Шасси автомобиля. Т. 1. Анализ кинематики и конструкции подвесок*. Москва, Машиностроение, 2019, 356 с.
- [3] Ambrósio J., Verissimo P. *Improved bushing models for general multibody systems and vehicle dynamics*. Springer Science+Business Media B.V., 2009.
- [4] Blundell M., Harty D. *The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics*. Elsevier, 2015, 420 p.
- [5] Бокарев А.И. *Расчетное определение реакций в пятне контакта колес с опорной поверхностью на ранних стадиях проектирования легковых автомобилей*. Москва, НАМИ, 2021.
- [6] Blundell M.V. The influence of rubber bush compliance on vehicle suspension movement. *Materials and Design*, 1998, no. 19, pp. 29–37.
- [7] Pacejka H.B. *Tire and Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann, 2012, 670 p.