УДК 629.33 ***DOI: 10.46960/2782-5477_2023_4_4***

Д.Ю. Погорелов, Р.В. Ковалев, В.А. Сак, А.В. Сакало

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ»

Брянский государственный технический университет
Брянск, Россия

Представлен программный комплекс «Универсальный механизм», предназначенный для моделирования динамики механических систем в виде систем абсолютно твердых и/или упругих тел, связанных между собой силовыми и/или кинематическими элементами. Программа включает ряд специализированных модулей, предназначенных для решения задач динамики различного рода систем: железнодорожных экипажей, колесных и гусеничных машин, монорельсовых экипажей и других систем. Рассматриваются возможности программного комплекса «Универсальный механизм» для моделирования динамики и проведения виртуальных испытаний колесных машин с помощью модуля моделирования динамики автомобилей «UM Automotive». Демонстрируются возможности и различные инструменты программного комплекса для создания компьютерных моделей автотранспортных средств и дальнейшего исследования их динамических и кинематических характеристик. Показано моделирование управляемости и устойчивости колесных машин путем прохождения испытаний в виртуальном окружении. Выполнено несколько видов испытаний по ГОСТ 31507-2012: опрокидывание на стенде, рывок руля, поворот и переставка. В реализованных компьютерных испытаниях используются модели грузовых автомобилей.

Ключевые слова: универсальный механизм, компьютерное моделирование, динамика машин, колесные машины, методы испытаний, управляемость и устойчивость, опрокидывание на стенде, рывок руля, поворот, переставка.

Введение

Компьютерное моделирование механических систем и определение их динамических показателей для различного рода тестов служит полезным инструментом в дополнение к натурным испытаниям. В сравнении с последними компьютерное моделирование позволяет измерить больший спектр интересующих динамических показателей. Не менее важным является возможность тестирования на этапе проектирования машин. Кроме того, проведение численного эксперимента механической системы является более безопасным и менее затратным способом проведения анализа [1]. Программный комплекс «Универсальный механизм» (ПК УМ) (www.universalmechanism.com) предназначен для автоматизации процесса моделирования динамики механических систем. В состав ПК УМ входит специализированный модуль моделирования динамики автомобилей. В статье рассматриваются возможности ПК УМ для моделирования динамики автотранспортных средств и демонстрируются примеры выполнения типовых испытаний, регламентированных ГОСТ 31507-2012 [2].

Модуль UM Automotive. Моделирование динамики автомобилей

В состав ПК УМ входит специализированный модуль для анализа динамики автомобилей, который предназначен для решения таких задач, как определение параметров колебаний автомобиля при различных видах возмущений от дорожных неровностей, оптимизация по различным критериям параметров и характеристик элементов подвесок и трансмиссии автомобиля с учетом ограничений, вызванных условиями их работы,

определение воздействия на пассажира или груз, определение динамических параметров автомобиля при совершении различных маневров и др.

Модуль UM Automotive включает в себя следующие основные компоненты:

- инструменты задания и визуализации макрогеометрии дороги;
- инструменты задания и визуализации микропрофиля дорожного покрытия;
- библиотеку файлов микропрофиля и спектров микропрофиля дорожного покрытия;
- математические модели сил в контакте между колесом и дорогой;
- математические модели управления транспортным средством – модели водителя.

Макропрофиль пути описывается с помощью трех плоских кривых: плана пути (проекции пути на горизонтальную плоскость), вертикального профиля и уклона пути (рис. 1). Эти кривые представляют собой набор точек, соединенных прямыми, дугами окружности и сплайнами. План пути задается координатами точек (X_i, Y_i) в инерциальной системе координат СК0. Вертикальный профиль пути задается точками (Z_i, s_i), где Z_i – вертикальная координата пути в СК0, s_i – пройденный путь (расстояние вдоль траектории пути). Профиль уклона пути задается точками (γ_i, s_i), где γ_i – поперечный уклон дороги (в градусах).

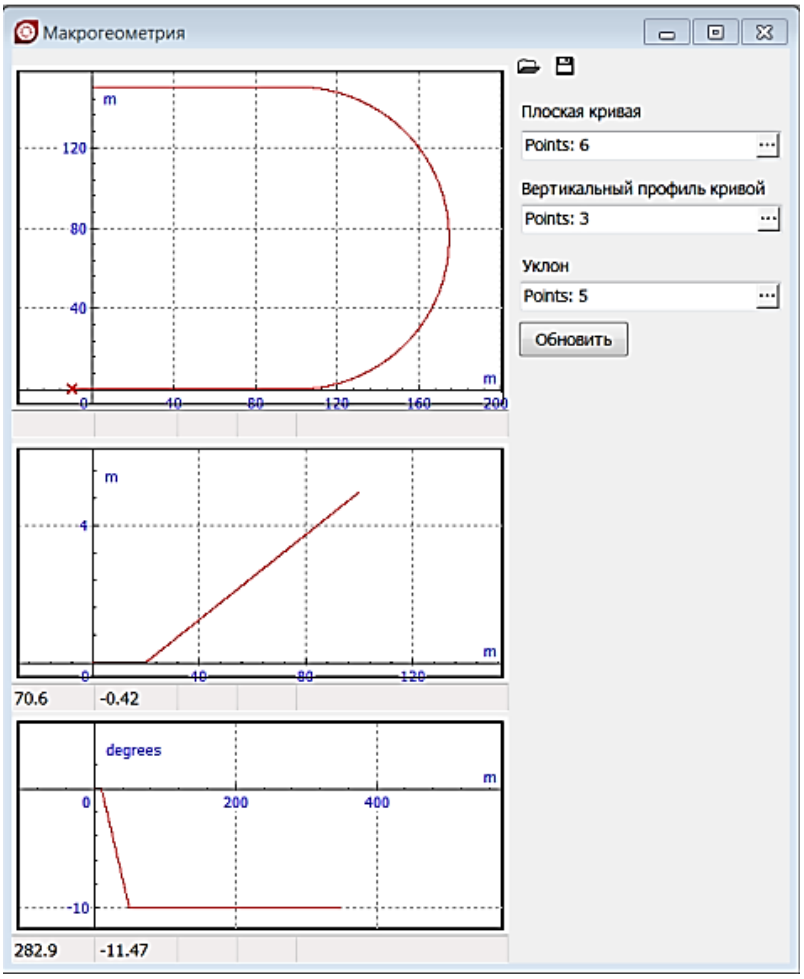

Рис. 1. Мастер описания макрогеометрии пути:
сверху вниз: план, вертикальный профиль, уклон пути

ПК УМ позволяет также задавать микропрофиль пути. Он хранится в файле отдельно для левой и правой колеи. В поставку ПК УМ в конфигурации с модулем *UM Automotive* входит библиотека спектров и реализаций неровностей, соответствующих различным дорожным покрытиям и их состояниям [3]. На рис. 2 представлены неровности, синтезированные по спектрам, входящим в эту библиотеку.

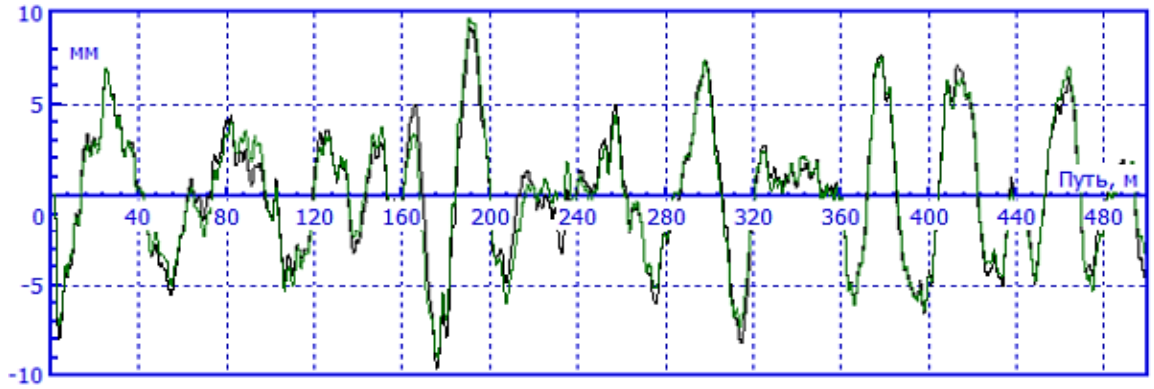

Рис. 2. График неровностей для левой и правой колеи: цементобетон на жестком основании

Для создания микропрофиля используется специальный инструмент (рис. 3). Окно разделено на две части: в верхней части окна находится результирующий профиль, в нижней описываются отдельные профили, из которых формируется результирующий.

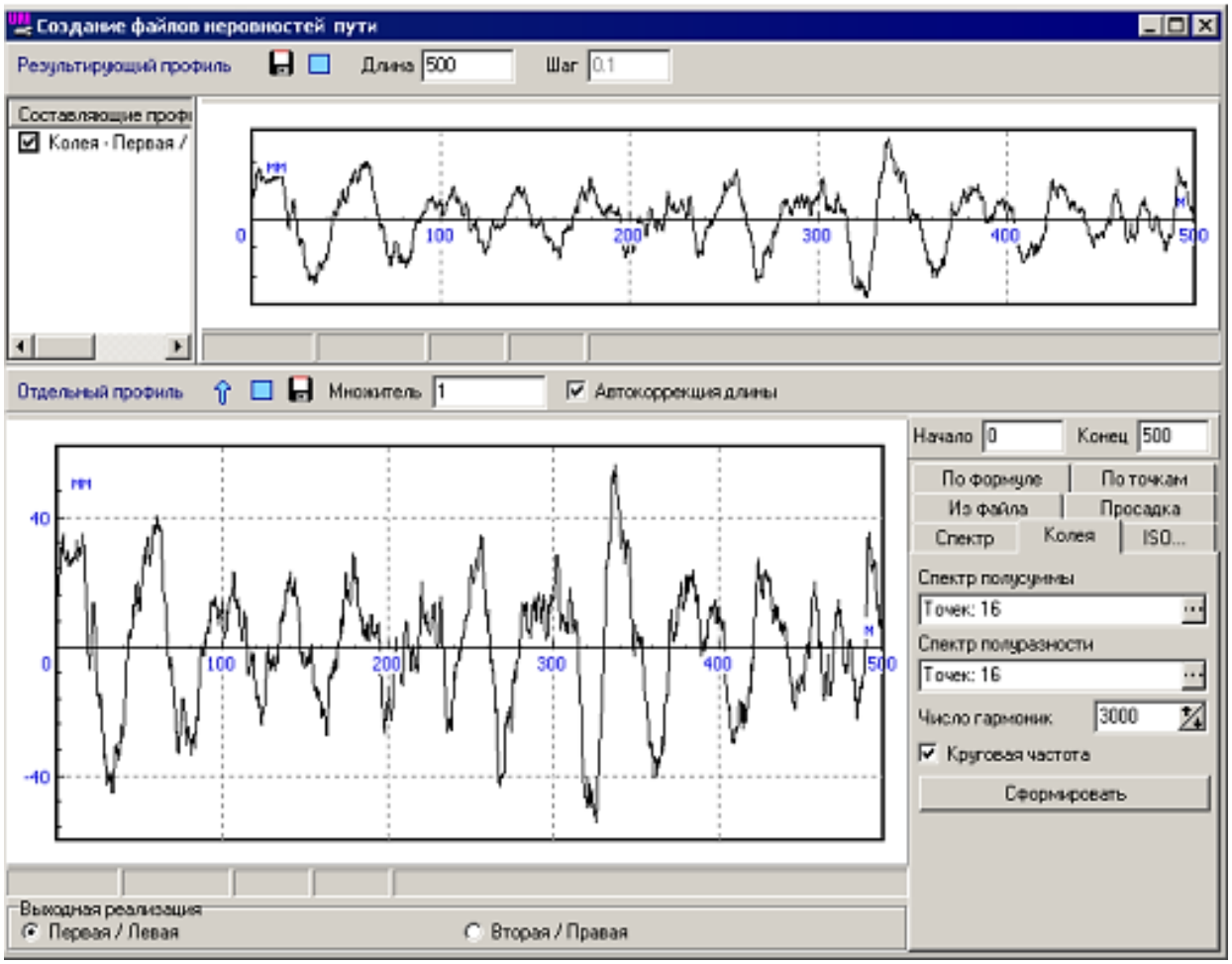

Рис. 3. Мастер создания неровностей

В ПК УМ реализовано несколько моделей контактных сил шины с дорогой. Модели контактных сил позволяют в каждый момент времени получить значения сил и моментов, действующих в контакте между колесом и дорогой в зависимости от кинематических параметров шины (угол бокового увода, проскальзывание, угол развала и др.)

На данный момент в ПК УМ реализовано четыре модели шины: модель FIALA, магическая формула Пасейки (Pacejka Magic Formula) [4], таблично заданная модель и модель TMEasy [5]. При помощи встроенного инструмента «Мастер описания параметров шины» создаются файлы с параметрами моделей контактных сил, которые затем используются в процессе моделирования динамики автомобилей. Также в ПК УМ реализованы математические модели управления транспортным средством: МакАдама и модель с прогнозированием второго порядка.

Модуль *UM Automotive* и его инструменты позволяют создавать динамические модели колесных машин и проводить компьютерные испытания. Для оценки управляемости и устойчивости автотранспортного средства (АТС) используется ГОСТ 31507-2012 [2]. Некоторые испытания данного ГОСТа реализованы в ПК УМ.

Испытание «опрокидывание на стенде»

Одним из испытаний на устойчивость АТС является «опрокидывание на стенде». Такое испытание проводят с целью определения показателей поперечной устойчивости против опрокидывания при наклоне платформы стенда до величины, при которой наблюдается отрыв всех колес одной стороны АТС. Требования ГОСТ 31507-2012 распространяются на автомобили категорий M, N, O.

Показателями поперечной устойчивости являются:

- угол статической устойчивости $\alpha_{\text{с.у}}$ – угол наклона опорной поверхности опрокидывающей платформы относительно горизонтальной плоскости, при котором произошёл отрыв всех колес одной стороны одиночного АТС или всех колес одной стороны одного из звеньев седельного автопоезда от опорной поверхности;
- угол крена подрессоренных масс φ – угол между опорной поверхностью опрокидывающей платформы и поперечной осью подрессоренных масс, проходящей через центр масс АТС, полученный в результате наклона автомобиля на опрокидывающей платформе.

Величина угла $\alpha_{\text{с.у}}$ статической устойчивости АТС против опрокидывания, полученная в результате испытаний, должна быть не меньше нормативного значения $\alpha_{\text{н}}$, зависящего от коэффициента q_{s} поперечной устойчивости автомобиля. Максимальное допустимое значение угла крена φ подрессоренных масс в центре масс АТС, полученное в результате испытаний, не должно превышать предельных значений $\varphi_{\text{н}}$, заданных в зависимости от коэффициента поперечной устойчивости q_{s}.

Коэффициент поперечной устойчивости q_{s} вычисляют по формуле:

$$q_{\text{s}} = \frac{0{,}5b}{h}, \tag{1}$$

где b – колея колес, приведенная к поперечному сечению АТС в плоскости, проходящей через его центр масс, мм; h – высота центра масс над опорной поверхностью, мм.

Наклон платформы осуществляют с угловой скоростью 0,5 °/с до отрыва одного, а затем всех колес одной стороны одиночного автомобиля от опорной поверхности. На рис. 4. показано моделирование в ПК УМ опрокидывания на стенде седельного тягача категории N3 массой 17 т.

Испытание «рывок руля»

Испытание «рывок руля» для автотранспортного средства проводят с целью определения курсовой устойчивости. В данном тесте в ПК УМ используется модель категории N3 трехосного бортового грузового автомобиля массой 22,5 т. АТС категории N3, согласно [2],

а) б) в)

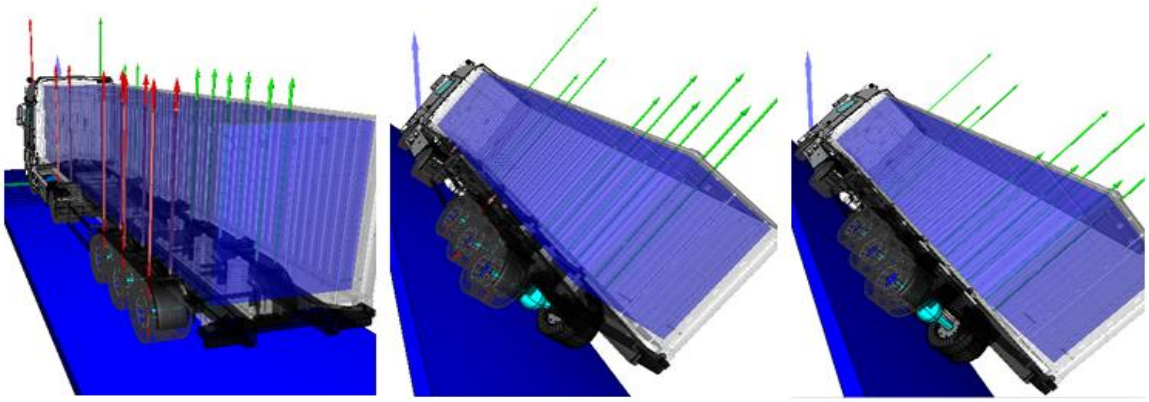

Рис. 4. Седельный тягач на опрокидывающей платформе:
а) нормальные контактные силы в начальный момент времени;
б) момент отрыва первого колеса; в) момент отрыва всех колес левой стороны АТС

на скорости 60 км/ч сначала движется прямолинейно и равномерно, а затем производит быстрый поворот с угловой скоростью рулевого колеса более 200 °/с, при котором боковое ускорение составляет 2 $м/с^2$. Далее по графику угловой скорости определяется заброс угловой скорости, а по графику угла поворота рулевого колеса определяется характеристика времени 90 % реакции. Примеры определения в ПК УМ угла поворота рулевого колеса и угловой скорости приведены на рис. 5 и 6.

Рис. 5. Определение установившегося значения угла поворота рулевого колеса

Рис. 6. Определение установившегося значения угловой скорости кузова

Испытание «поворот»

Испытание «поворот $R_п$=35 м» для АТС в соответствии с [2] проводят с целью определения показателей, характеризующих его управляемость и устойчивость в критических режимах движения. При выполнении теста определяют максимальную скорость маневра $v'_м$ при входе в поворот. Требования распространяются на АТС категорий M, N, и O. При выполнении теста в ПК УМ используется модель категории N3, двухосный бортовой автомобиль Урал-43206 массой 12,2 т.

Скорость маневра $v'_м$ АТС при выполнении маневра принимается та, при которой не было выхода за пределы разметки или отрыва одного из колес АТС от поверхности дороги. На рис. 7. показан пример выполнения теста «поворот» в ПК УМ.

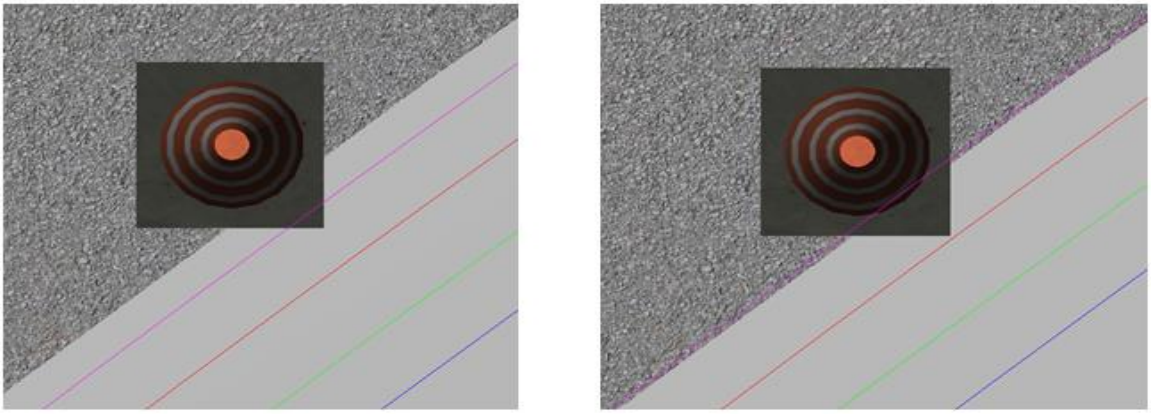

Рис. 7. Визуальное определение пересечения траекторий крайних точек АТС с изображениями дорожных конусов (вид сверху)

Испытание «переставка»

Согласно [2], тесты «переставка $S_п$=16 м» и «переставка $S_п$=20 м» для АТС проводят с целью определения показателей, характеризующих его управляемость и устойчивость в критических режимах движения. При выполнении теста определяют максимальную скорость маневра $v'_м$ при смене полосы движения на ограниченном участке пути. Требования распространяются на АТС категорий M, N, и O. При выполнении теста в ПК УМ используется модель категории N3, двухосный бортовой автомобиль Урал-43206 массой 12,2 т. Скорость маневра $v'_м$ АТС при выполнении принимается та, при которой не было выхода за пределы разметки или отрыва одного из колес АТС от поверхности дороги. На рис. 8. показан пример выполнения теста «переставка $S_п$=20 м» в ПК УМ.

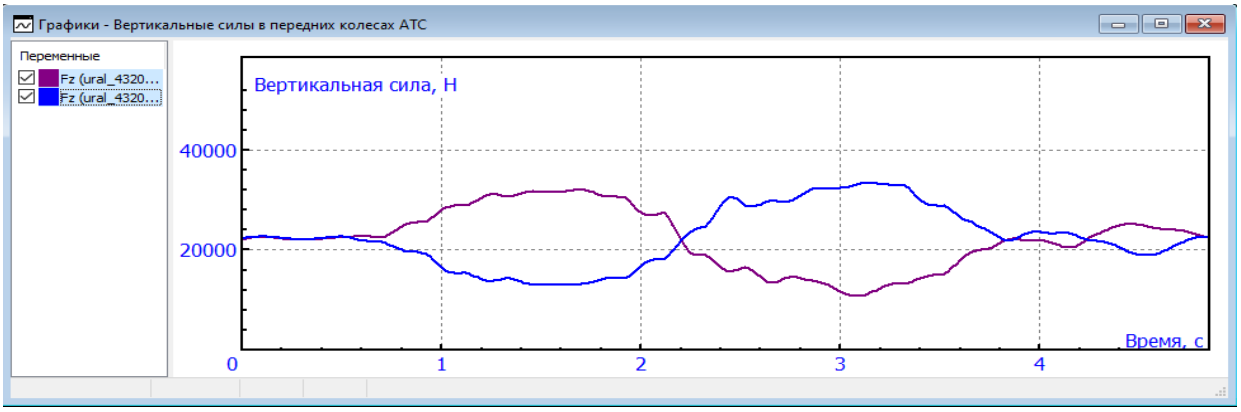

Рис. 8. Нормальные силы, возникающие в передних колесах грузового автомобиля при входе в поворот со скоростью 56 км/ч

Выводы

Компьютерное моделирование позволяет создавать цифровые двойники и проводить тесты в виртуальном окружении, что является более безопасным и менее затратным способом проведения анализа. Также в виртуальном окружении можно пройти испытания по ГОСТ, что является важным этапом на стадии тестирования автомобилей: при необходимости можно провести оптимизацию модели и оценить эффект различных технических решений. Программный комплекс «Универсальный механизм» позволяет создавать динамические модели транспортных средств и исследовать их динамику, заменять натурные эксперименты компьютерным моделированием, анализировать любые кинематические характеристики модели, а также оценивать динамические силы, возникающие в элементах конструкции.

Библиографический список

1. Погорелов, Д.Ю. Моделирование динамики гусеничных и колесных машин в программном комплексе «Универсальный механизм» / Д.Ю. Погорелов, Р.В. Ковалев, В.А. Сак // Материалы XXVI Международной научно-технической конференции, 12-14 октября 2022 г., Ярославль. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2022. С. 143-155.
2. ГОСТ 31507-2012. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013.
3. Хачатуров, А.А. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / А.А. Хачатуров. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
4. Bakker, E. A New Tyre Model with Application in Vehicle Dynamics Studies / E. Bakker, H.B. Pacejka, L. Lidner // A Proc. 4th Int. Conf. Automotive Technologies. – Monte Carlo, 1989, SAE paper 890087.
5. Rill, G. Road Vehicle Dynamics: Fundamentals and Modeling. – CRC Press, 2012.