

Расчет и конструирование

УДК 62.9

DOI: 10.14529/engin170401

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ РАБОЧЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ

А.Ф. Дубровский, А.С. Алюков, С.В. Алюков, К.В. Прокопьев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В статье исследуется нелинейная характеристика упругого элемента подвески транспортного средства. Подвеска является важной составной частью любого автомобиля, и ее работоспособность во многом определяет правильную работу всего автомобиля в целом. При проектировании подвески особое внимание уделяют упругому элементу, входящему в конструкцию подвески, при этом важной задачей является задача рассмотрения рабочей характеристики этого элемента. Как правило, рабочие характеристики являются нелинейными, трудно поддающимися математическому описанию при исследовании динамики подвески. Это обстоятельство создает проблемы для построения математической модели подвески, затрудняет анализ, численное и аналитическое интегрирование системы дифференциальных уравнений, описывающих работу подвески. Поэтому на практике производят аппроксимацию рабочей характеристики упругого элемента. В статье проводится сравнительный анализ различных методов аппроксимации рабочих характеристик упругих элементов транспортных средств, выявляются положительные и отрицательные стороны этих методов. Наиболее часто при составлении математических моделей автомобиля рабочая характеристика упругого элемента принимается линейной. Однако это допущение не позволяет в полной мере оценить динамические процессы, протекающие в системе. Часто аппроксимация рабочей характеристики проводится с помощью кусочно-линейной функции, имеющей достаточно простую структуру. Такой подход требует рассмотрения цикла работы подвески по участкам. При этом приходится исследовать работу подвески как системы с переменной структурой, что вызывает значительные сложности при построении периодических решений и определении их устойчивости. В работе предложен новый метод аппроксимации рабочей характеристики упругого элемента с помощью аналитической функции, что позволяет рассматривать упругий элемент как систему с постоянной структурой, описывая работу упругого элемента лишь одной системой дифференциальных уравнений с аналитическими функциями. Это дает возможность получать решения системы в целом, не рассматривая отдельные участки работы упругого элемента. Такая возможность помогает проектировать подвеску транспортных средств, обладающих оптимальными характеристиками, создавать автомобили, параметры которых отвечают самым передовым современным требованиям.

Ключевые слова: подвеска, упругий элемент, рабочая характеристика, аппроксимация, сравнение.

Введение

Общеизвестно, что при разработке конструкции системы поддрессоривания транспортного средства, в том числе автомобиля, конструкторам всегда приходится решать проблему согласования следующих двух групп противоречивых требований: 1) требований обеспечения заданного уровня плавности хода (комфортабельности), быстроходности, минимизации динамических (вибрационных) нагрузок на перевозимый груз, узлы, звенья, пассажиров и водителей транспортного средства; 2) требований обеспечения управляемости, безопасности, устойчивости, стабилизации движения транспортного средства, стабилизации положения его кузова. Также общеизвестно, что наиболее эффективно согласовать отмеченные выше противоречивые требования можно лишь при выполнении следующих трех условий: 1) система поддрессоривания должна содержать упругий элемент с нелинейной характеристикой; 2) система поддрессоривания должна

Расчет и конструирование

содержать адаптивный амортизатор – амортизатор, осуществляющий возможность регулирования его рабочих характеристик во время движения транспортного средства в зависимости от дорожной ситуации; 3) при проектировании системы поддрессоривания необходимо обеспечить «очень точный» (оптимальный) подбор и согласование рабочих характеристик и параметров упругого элемента с нелинейной характеристикой и адаптивного амортизатора подвески транспортного средства, а также реализовать оптимальный алгоритм управления адаптивным амортизатором.

Упругий элемент, предназначенный для обеспечения упругих связей в подвеске автомобиля, является важнейшим элементом подвески и во многом определяет ее надежную и качественную работу. Основной характеристикой упругого элемента является характеристика жесткости – зависимость нормальной нагрузки F от деформации f подвески $F = F(f)$.

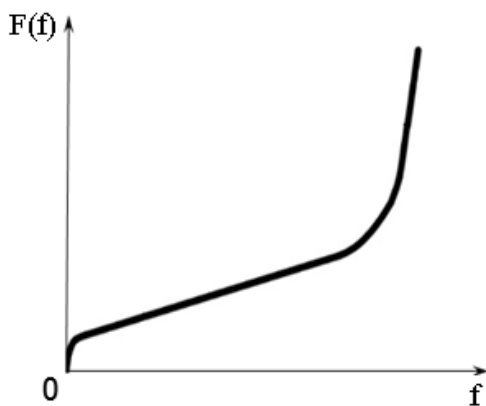


Рис. 1. Рабочая характеристика упругого элемента подвески автомобиля с учетом рабочих характеристик буферов сжатия и отбоя

Для адаптивной подвески обычно применяют упругий элемент с нелинейной характеристикой жесткости. Принимая во внимание рабочие характеристики буферов сжатия и отбоя, часто график зависимости $F = F(f)$ изображается в виде (рис. 1) [1]. Такой вид характеристики позволяет подвеске подстраиваться под различные условия неровностей дороги и различные режимы работы автомобиля, обеспечивая комфортабельные условия его эксплуатации.

Для создания математической модели подвески необходимо составить математическую функцию, график которой изображен на рис. 1. Точное решение такой задачи, как правило, затруднено, поэтому на практике пользуются методами аппроксимации [2–6].

Существуют различные методы аппроксимации рабочей характеристики упругого элемента. Рассмотрим эти методы более подробно и проведем их сравнительный анализ.

1. Методы аппроксимации нелинейной рабочей характеристики упругого элемента

При выполнении инженерных расчетов для их упрощения зависимость (см. рис. 1) обычно аппроксимируется непрерывной кусочно-линейной функцией переменной структуры (рис. 2) [1]:

$$F(f) = \begin{cases} k_1 f, & \text{при } f \in [0; f_1], \\ k_2 f + b, & \text{при } f \in [f_1; f_2], \\ k_3 f + c, & \text{при } f \in [f_2; f_3]. \end{cases} \quad (1)$$

Кусочно-линейная аппроксимация позволяет представить рабочую характеристику упругого элемента в виде совокупности участков, на каждом из которых эта характеристика является линейной.

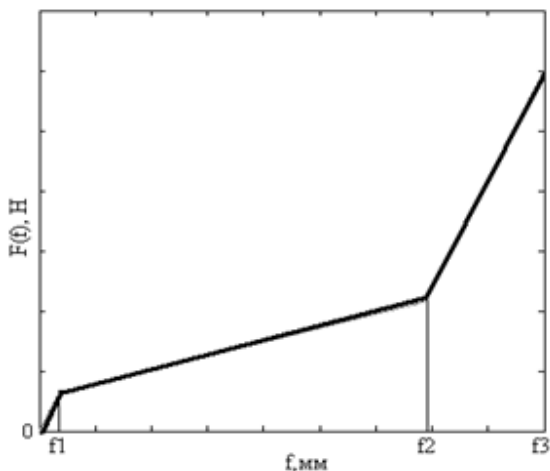


Рис. 2. Кусочно-линейная аппроксимация рабочей характеристики упругого элемента подвески автомобиля

Использование зависимости (1) при моделировании динамических процессов подвески позволяет упростить исследование подвески автомобиля на каждом из участков, но во многих случаях является неудобным, поскольку вызывает определенные сложности на этапе интегрирования дифференциальных уравнений. Эти сложности рассмотрены в работе [1] и связаны с необходимостью дальнейшего «сшивания» полученных по участкам решений в течение цикла работы подвески. При этом приходится следить за выполнением условий перехода характеристики от участка к участку при изучении переходных и периодических движений, что приводит к громоздким преобразованиям и представлению полученных решений в виде сложных аналитических выражений в форме совокупности решений по участкам.

Кроме того, применение аппроксимирующей зависимости (1) приводит к значительной погрешности в окрестностях точек перехода от участка к участку (рис. 1б), так как в реальности эти переходы имеют скругленный характер (рис. 1а). В связи с этим, возникает задача представления зависимости (1) в виде единого аналитического выражения постоянной структуры.

Для записи системы (1) в виде одного выражения часто применяют функцию Хевисайда [7]:

$$H(f) = \begin{cases} 0, & \text{при } f < 0, \\ 1, & \text{при } f \geq 0. \end{cases}$$

Используя данную функцию, выражение (1) можно записать так:

$$F(f) = H(f_1 - f) \cdot k_1 f + H(f - f_1) \cdot H(f_2 - f) \cdot (k_2 f + b) + H(f - f_2) \cdot (k_3 f + c). \quad (2)$$

Выражение (2) также является неудобным в некоторых случаях для моделирования и исследования работы подвески, поскольку функция Хевисайда является не аналитической, а разрывной. Поэтому, несмотря на единое выражение (2) для характеристики упругого элемента, это выражение при исследовании работы подвески также приходится рассматривать по участкам постоянства функции Хевисайда. При этом проблема «сшивания» решений по участкам по-прежнему остается со всеми вытекающими негативными вышеописанными последствиями. Исходя из сказанного, возникает необходимость представления рабочей характеристики упругого элемента в виде аналитической функции на всей области изменения значений деформации f упругого элемента.

Для проведения сравнительного анализа возможных решений поставленной задачи рассмотрим методы аппроксимации рабочей характеристики упругого элемента с помощью пяти различных аналитических функций, приближенных к функции Хевисайда.

1.1. Аппроксимация с использованием функции $y = \arctg x$

Для приближения функции $y = \arctg x$ к функции Хевисайда преобразуем эту функцию к виду $y = 0,5 + \pi^{-1} \cdot \arctg(Nx)$, где $N \in \mathbb{R}$ [1]. При достаточно больших значениях N погрешность аппроксимации может быть сколь угодно малой.

Тогда выражение рабочей характеристики упругого элемента запишется так

$$F(f) = \varphi(N(f_1 - f)) \cdot k_1 f + \varphi(N(f - f_1)) \cdot \varphi(N(f_2 - f)) \cdot (k_2 f + b) + \varphi(N(f - f_2)) \cdot (k_3 f + c), \quad (3)$$

где $\varphi(f) = 0,5 + \pi^{-1} \cdot \arctg f$.

1.2. Аппроксимация с использованием s-образной функции $y = \frac{1}{1+e^{-x}}$

Преобразуем функцию к виду $y = \frac{1}{1+e^{-Nx}}$, где $N \in \mathbb{R}$ [7].

Тогда выражение (3) можно записать как

$$F(f) = \psi(N(f_1 - f)) \cdot k_1 f + \psi(N(f - f_1)) \cdot \psi(N(f_2 - f)) \cdot (k_2 f + b) + \psi(N(f - f_2)) \cdot (k_3 f + c), \quad (4)$$

где $\psi(f) = \frac{1}{1+e^{-f}}$.

1.3. Аппроксимация с использованием функции распределения Лапласа

Используется функция $y(x) = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$, где $N \in \mathbb{R}$ [7].

Выражение (2) примет вид

$$F(f) = \chi(f_1 - f) \cdot k_1 f + \chi(f - f_1) \cdot \chi(f_2 - f) \cdot (k_2 f + b) + \chi(f - f_2) \cdot (k_3 f + c), \quad (5)$$

где $\chi(f) = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^f e^{-t^2} dt$.

Заметим, что функция Лапласа не является элементарной. Она выражается через интеграл, что в прикладных случаях затрудняет ее использование для математического моделирования и исследования объектов, процессов и явлений.

1.4. Аппроксимация с использованием вложенных синусоидальных функций

В этом случае используется метод, предложенный в работе [8]. В соответствии с данным методом, для аппроксимации функции Хевисайда используется выражение

$$y(x) = 0,5 + 0,5 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \sin\left(\dots \frac{\pi}{2} \cdot \sin(x)\right)\right). \quad (6)$$

Данная функция является периодической. С помощью этой функции удобно применять аппроксимацию для описания периодических процессов. Что касается аппроксимации непериоди-

Расчет и конструирование

ческих функций (как в нашем случае), следует следить за тем, чтобы период функции (6) покрывал область определения исходной функции (1). Так, в нижеописанном примере используется функция вида

$$\zeta(f) = 0,5 + 0,5 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \sin\left(\dots \frac{\pi}{2} \cdot \sin(3f/2N)\right)\right).$$

Тогда выражение (2) можно записать как

$$F(f) = \zeta(f_1 - f) \cdot k_1 f + \zeta(f - f_1) \cdot \zeta(f_2 - f) \cdot (k_2 f + b) + \zeta(f - f_2) \cdot (k_3 f + c). \quad (7)$$

В дальнейшем для удобства описания будем нумеровать рассмотренные методы соответственно номерам подпунктов первого раздела данной статьи.

2. Новый метод аппроксимации рабочей характеристики упругого элемента.

Сравнительный анализ методов аппроксимации нелинейной рабочей характеристики упругого элемента

В данной работе описывается новый метод аппроксимации рабочей характеристики упругого элемента с использованием функции

$$y = 0,5 + 0,5 \frac{x}{\sqrt{x^2 + \frac{1}{N}}}. \quad (8)$$

Используя данную функцию (8), выражение (2) запишется как

$$F(f) = \xi(N(f_1 - f)) \cdot k_1 f + \xi(N(f - f_1)) \cdot \xi(N(f_2 - f)) \cdot (k_2 f + b) + \xi(N(f - f_2)) \cdot (k_3 f + c), \quad (9)$$

где $\xi(f) = 0,5 + 0,5 \frac{f}{\sqrt{f^2 + \frac{1}{N}}}$.

Предложенный новый метод в рамках этой статьи будем называть пятым методом аппроксимации.

Выполним сравнительный анализ методов аппроксимации рабочей характеристики подвески автомобиля ВА3-2110, построив выражения (3)–(8) в среде моделирования Matlab. Построения проводились при одном и том же значении $N = 100$ для описанных методов аппроксимации.

В качестве примера возьмем подвеску автомобиля ВА3-2110 с параметрами:

$$f_1 = 7,2 \text{ мм}, f_2 = 137,6 \text{ мм}, f_3 = 180 \text{ мм}, k_1 = 17,36, k_2 = 2,34, k_3 = 18,161, \\ b = 108,152, c = -2068,8.$$

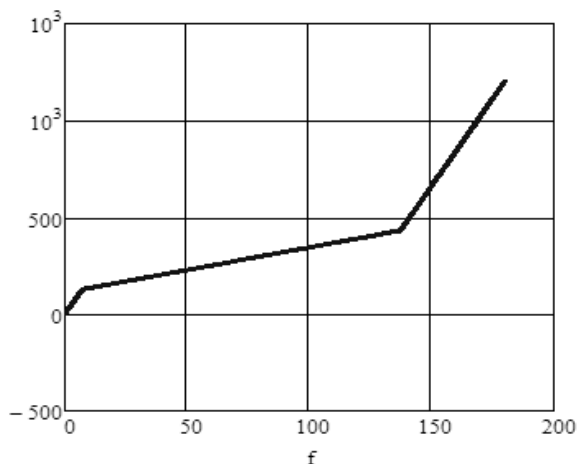


Рис. 3. Зависимости, построенные при применении рассмотренных методов

имеет, в окрестностях точек перехода f_1 и f_2 эта характеристика имеет скругления (см. рис. 1). Поэтому наиболее гладкий переход между прямыми участками кусочно-линейной функции обеспечивает применение методов 3 и 4. Но, как было отмечено ранее, метод 3 требует использования не элементарной функции Лапласа, что затрудняет дальнейшее исследование работы подвески автомобиля. Кроме того, существенным является отклонение полученной зависимости по методу 3 от реальной рабочей характеристики в местах перехода на прямолинейные участки, что особенно ярко проявляется на рис. 5.

Применение описанных методов аппроксимации 1–5 на всей области определения исходной функции (1) показывает (рис. 3), что в данном масштабе все методы дают практически один и тот же результат. Различия в графиках на рис. 3 не прослеживаются.

Для более подробного анализа различий рассмотрим графики аппроксимирующих функций в окрестностях угловых точек f_1 и f_2 (рис. 4а, б).

Номера кривых на рис. 4а, б соответствуют номерам пунктов описания методов.

Как следует из этих рисунков, методы 1, 2, 5 наилучшим образом приближают кусочно-линейную функцию (1). Однако следует помнить, что в реальности характеристика жесткости упругого элемента угловых точек не

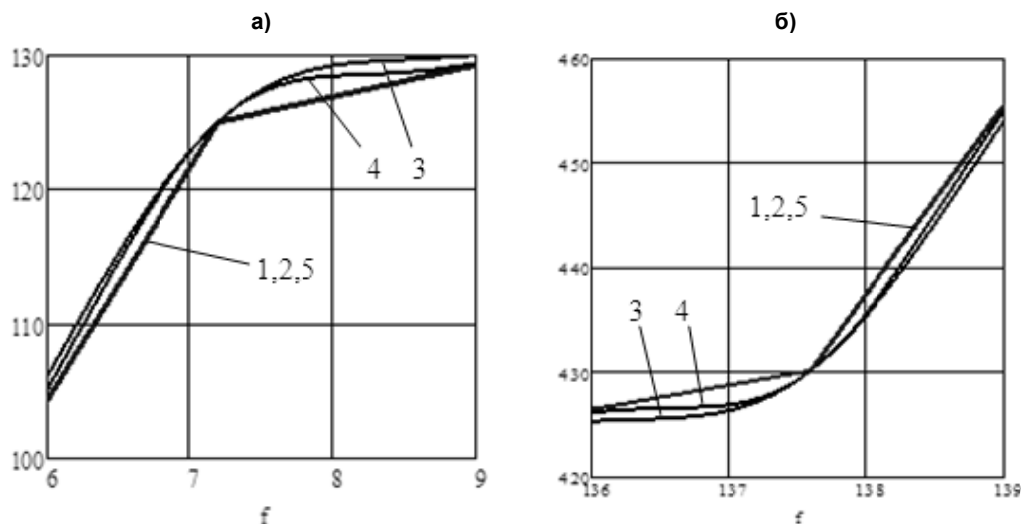


Рис. 4. Графики аппроксимирующих функций в окрестностях угловых точек:
а – $f_1 = 7,2$ мм; б – $f_2 = 137,6$ мм

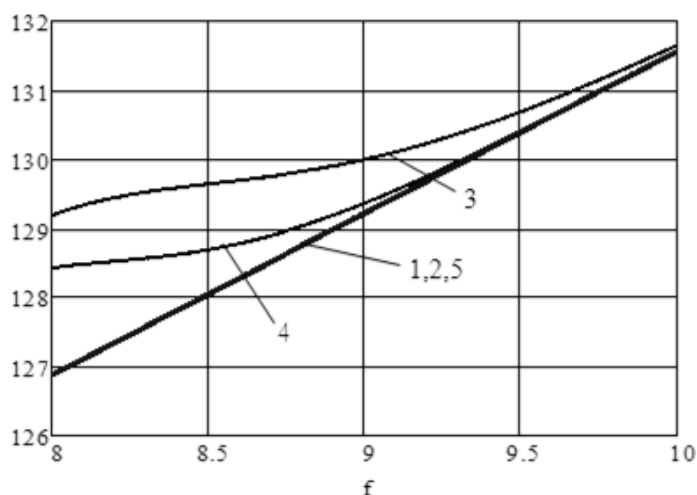


Рис. 5. Графики аппроксимирующих функций при переходе
на прямолинейные участки характеристики

Целесообразным в инженерных расчетах является использование метода вложенных синусоидальных функций (метод 4), обеспечивающий быстрый выход аппроксимирующей функции на прямолинейные участки (см. рис. 5) и гладкий переход между этими участками (см. рис. 4).

Предложенный новый метод, наряду с известными методами 1 и 2, дает хорошее приближение кусочно-линейной зависимости (см. рис. 2). Этот метод хуже, чем методы 3 и 4, сглаживает кусочно-линейную функцию в окрестностях угловых точек, но имеет достаточно простое аналитическое выражение и также может быть использован для аппроксимации исходной нелинейной рабочей характеристики упругого элемента автомобильной подвески.

Следует отметить, что предложенные аппроксимирующие функции можно варьировать путем изменения значения параметра N , а в случае применения вложенных синусоидальных функций также и с помощью изменения числа этих вложений. При этом можно добиться результата, в наибольшей степени удовлетворяющего поставленным условиям проводимых исследований.

Важно отметить, что рассмотренные методы являются универсальными и могут применяться для исследований широкого многообразия и чисто математических, и прикладных задач в различных областях науки и техники [9–20].

Выводы

1. В работе проведен сравнительный анализ основных методов аппроксимации рабочей характеристики упругого элемента адаптивной подвески автомобиля. Основная идея заключалась в представлении исходной нелинейной рабочей характеристики упругого элемента в виде кусочно-

Расчет и конструирование

линейной функции с последующей аппроксимации кусочно-линейной функции аналитическими зависимостями на основе аппроксимации функции Хевисайда. Отмечены преимущества и недостатки рассмотренных методов. Выявлено, что наиболее приемлемым методом для наиболее полного описания исходной нелинейной характеристики является метод, основанный на вложенных тригонометрических функциях. Этот метод хорошо сглаживает кусочно-линейную функцию в окрестностях угловых точек и, вместе с тем, хорошо аппроксимирует кусочно-линейную функцию на прямолинейных участках.

2. Предложен новый метод аппроксимации нелинейной характеристики упругого элемента. Показано, что предложенный метод имеет достаточно простую структуру и может применяться, наряду с другими методами, для аппроксимации функции Хевисайда, что позволяет использовать этот метод для математического моделирования динамических процессов в работе элементов адаптивной подвески автомобиля и моделирования всей подвески в целом. Проверка теоретических положений численными методами в компьютерной среде Matlab показала высокую сходимость результатов.

3. Отмечено, что рассмотренные методы являются универсальными, поэтому результаты исследования могут широко применяться для решения других технических и математических задач, в основе которых лежит описание с помощью кусочно-линейных, ступенчатых и других видов функций.

Обсуждение и применение

Использование полученных результатов при проектировании автомобилей способствует высокоэффективному решению задачи кардинального улучшения комфортабельности, увеличения плавности хода транспортного средства, значительного снижения уровня динамических нагрузок на перевозимый груз, пассажиров, экипаж, узлы и звенья транспортного средства. Особенно это важно при перемещении по дорожному покрытию пониженного качества, что характерно, в частности, для дорожных условий Российской Федерации. Область применения конструкций, при проектировании которых могут быть использованы результаты проведенных исследований, очень широкая: подвески практически любых транспортных средств, кроме «водоплавающих»: это и автомобили (грузовые, легковые, автобусы), и быстроходные гусеничные машины, в том числе специального назначения, и прицепы, летательные аппараты различного назначения, железнодорожный транспорт, в особенности высокоскоростной, мотоциклы и т. п. Использование результатов проведенных исследований позволит оптимально согласовать различные требования к эксплуатационным характеристикам транспортных средств. При их применении транспортное средство будет снабжено подвеской, которая может по своим технико-экономическим показателям качественно превзойти известные бренды.

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.А03.21.0011.

Литература / References

1. Дубровская О.А., Дубровский А.Ф., Алюков С.В. и др. О построении характеристики жесткости пружинной подвески автомобиля. Вестник СибАДИ. Омск: СибАДИ. 2010. № 3 (17). С. 22–24. [Dubrovskaya O.A., Dubrovsky S.A., Dubrovsky A.F., Alyukov S.V. [On the Construction of the Stiffness of the Spring Suspension of the Car]. *Vestnik SibADI*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 22–24. (in Russ.)]
2. Pugach P.A., Shlyk V.A. Piecewise Linear Approximation and Polyhedral Surfaces. *Journal of Mathematical Sciences*, 2014, vol. 200, no. 5, pp. 617–623.
3. Imamoto A., Tang B. Optimal Piecewise Linear Approximation of Convex Functions. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science [World Congress WCECS 2008], 2008, pp. 1191–1194.
4. Kraft A. Piecewise Approximation Functions an Educational Note. *Decision Sciences*, 1975, vol. 6, no. 3, pp. 568–580.
5. Hua Yi, Tao Yu, Zhiqian Chen, Jingwen Zhu. Continuous Piecewise Linear Approximation of BV Function. *Applied Mathematics*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 667–671.
6. Wei Wei, Peiyi Shen, Ying Zhang, Liang Zhang. Information Fields Navigation with Piece-Wise

Polynomial Approximation for High-Performance OFDM in WSNs. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 261–270.

7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1973. 832 с. [Korn G., Korn, T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh sotrudnikov i inzhenerov* [Handbook of Mathematics (for scientists and engineers)]. Moscow, Nauka, 1973. 832 p.]

8. Алюков, С.В. Аппроксимация ступенчатых функций в задачах математического моделирования. Математическое моделирование. 2011. Т. 23, № 3. С. 75–88. [Alyukov S.V. [Approximation of Step Functions in Problems of Mathematical Modeling]. *Mathematical Modeling*, 2011, vol. 23, no. 3, pp. 75–88. (in Russ.)]

9. Dubrovskiy A., Aliukov S., Dubrovskiy S., Alyukov A. [Basic Characteristics of Adaptive Suspensions of Vehicles with New Principle of Operation]. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 193–203.

10. Dubrovskiy A., Aliukov S., Keller A., Dubrovskiy S. et al. [Adaptive Suspension of Vehicles with Wide Range of Control]. Available at: <http://papers.sae.org/2016-01-8032/> (accessed 27.09.2016).

11. Dubrovskiy A., Aliukov S., Dubrovskiy S., Alyukov A. [Adaptive Suspension of Vehicles with Ultra-Wide Range of Control Performance]. *Proceedings of the World Congress on Engineering* [World Congress WCE 2015], 2015, pp. 1076–1083.

12. Alyukov S.V. [Relay-Type Free-Wheel Mechanism]. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, no. 9, pp. 549–553.

13. Aliukov S., Alyukov A. Analysis of Methods for Solution of Differential Equations of Motion of Inertial Continuously Variable Transmissions. Available at: <http://papers.sae.org/2017-01-1105/> (accessed 28.03.2017).

14. Dubrovskiy A., Aliukov S., Rozhdestvenskiy Y., Dubrovskaya O., Dubrovskiy S. An Adaptive Suspension of Vehicles with New Principle of Action. Available at: <http://papers.sae.org/2014-01-2310/> (accessed 30.09.2014).

15. Aliukov S., Keller A., Alyukov A. Design and Calculating of Relay-Type Overrunning Clutch. Available at: <http://papers.sae.org/2016-01-1134/> (accessed 05.04.2016).

16. Kochurov A.S. Direct and Inverse Theorems on Approximation by Piecewise Polynomial Functions. *Journal of Mathematical Sciences*, 2015, vol. 209, no. 1, pp. 96–107.

17. Danca M.F. Continuous Approximations of a Class of Piece-Wise Continuous Systems. Available at: <https://arxiv.org/abs/1402.6816> (accessed 27.01.2014).

18. Aghezzaf E.H., Wolsey L.A. Modelling Piecewise Linear Concave Costs in a Tree Partitioning Problem. *Discrete Applied Mathematics*, 1994, vol. 50, no. 2, pp. 101–109.

19. Croxton K.L., Gendron B., Magnanti T.L. Variable Disaggregation in Network Flow Problems with Piecewise Linear Costs. *Operations Research*, 2007, vol. 55, no. 1, pp. 146–157.

20. Hickernell F.J., Sloan I.H., Wasilkowski G.W. A Piecewise Constant Algorithm for Weighted L1 Approximation over Bounded and Unbounded Regions in \mathbb{R}^s . *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 2005, no. 43, pp. 1003–1020.

Дубровский Анатолий Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, duanf@mail.ru.

Алюков Александр Сергеевич, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, alukovalexandr@gmail.com.

Алюков Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление инновациями в бизнесе», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, alysergey@gmail.com.

Прокопьев Кирилл Валерьевич, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, duanf@mail.ru.

Поступила в редакцию 15 сентября 2017 г.

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF APPROXIMATION OF THE WORKING CHARACTERISTICS OF ELASTIC ELEMENT OF SUSPENSION OF THE VEHICLE

A.F. Dubrovskiy, duanf@mail.ru,
A.S. Alyukov, alyukovalexandr@gmail.com,
S.V. Aliukov, alysergey@gmail.com,
K.V. Prokopiev, duanf@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In the article the nonlinear characteristic of the elastic element of the vehicle suspension is investigated. Suspension is an important part of any car and its performance, in many ways, determines the correct operation of the entire car as a whole. When designing the suspension, special attention is paid to the elastic element that is part of the suspension design, while an important task is to consider the performance of this element. As a rule, performance characteristics are non-linear, difficult to be mathematically described when studying suspension dynamics. This circumstance creates problems for the construction of a mathematical model of suspension, hampers analysis, numerical and analytical integration of a system of differential equations describing the operation of the suspension. Therefore, in practice, an approximation is made of the working characteristic of the elastic element. The article compares various methods for approximating the performance characteristics of elastic elements of vehicles, reveals the positive and negative aspects of these methods. Most often when compiling mathematical models of a car, the working characteristic of an elastic element is assumed to be linear. However, this assumption does not allow us to fully appreciate the dynamic processes taking place in the system. Often the approximation of the working characteristic is carried out using a piecewise linear function having a rather simple structure. This approach requires consideration of the suspension work cycle in sections. It is necessary to study the operation of the suspension as a system with a variable structure, which causes considerable difficulties in constructing periodic solutions and determining their stability. The paper proposes a new method for approximating the working characteristic of an elastic element with the help of an analytic function, which considers an elastic element as a system with a constant structure, describing the work of an elastic element by only one system of differential equations with analytic functions. This makes it possible to obtain solutions of the system as a whole, without considering individual sections of the work of the elastic element. Such an opportunity helps to design a suspension of vehicles with optimal characteristics, to create cars, the parameters of which meet the most advanced modern requirements.

Keywords: suspension, elastic element, operating characteristic, approximation, comparison.

Received 15 September 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сравнительный анализ методов аппроксимации рабочей характеристики упругого элемента подвески автомобиля / А.Ф. Дубровский, А.С. Алюков, С.В. Алюков, К.В. Прокопьев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 5–12. DOI: 10.14529/engin170401

FOR CITATION

Dubrovskiy A.F., Alyukov A.S., Aliukov S.V., Prokopiev K.V. Comparative Analysis of Methods of Approximation of the Working Characteristics of Elastic Element of Suspension of the Vehicle. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 5–12. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin170401