

Разработка непрерывного закона управления полуактивной системой поддрессирования с нечеткой настройкой параметров

07, июль 2013

DOI: 10.7463/0713.0567714

Жилейкин М. М., Федотов И. В., Мардеева Л. Р.

УДК 62-522.2

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Россия, ОАО «КАМАЗ»

jileykin_m@mail.ru

automobile@yandex.ru

mardeeval@yandex.ru

Введение

Создание эффективных средств защиты от внешних динамических воздействий всегда являлось одной из важных проблем современной техники. Особенно остро вопросы обеспечения допустимых уровней колебаний ставятся при создании современных транспортных средств: летательных аппаратов, автомобилей, судов. С возрастанием скоростей движения этих средств интенсивность динамических воздействий обычно увеличивается, поэтому развитие транспортных средств сопровождается непрерывным повышением требований к системам виброзащиты.

Тягово-скоростные свойства многоосных колесных машин (МКМ) оказывают основное влияние на формирование максимальных и средних скоростей движения. Другие эксплуатационные свойства, в частности, плавность хода, выступают в качестве факторов, ограничивающих дальнейшее повышение эксплуатационных скоростей. В настоящее время конструктивные решения узлов и агрегатов МКМ, влияющие на показатели устойчивости, управляемости, тормозных свойств, поворачиваемости, проходимости достигли высокой степени совершенства. Тем не менее, несмотря на достигнутые успехи, система первичного поддрессирования сдерживает дальнейший рост скоростей движения [1, 2].

Повышение средних скоростей возможно путём сбалансированного увеличения удельной мощности двигателя и совершенствования системы подвески. Хорошо известно, что увеличение удельной мощности двигателя и изменение передаточных чисел не

приводят к увеличению средних скоростей движения. Сложившаяся ситуация объясняется тем, что водитель ограничивает скорость движения в тех случаях, когда виброускорения начинают превышать границу вибробезопасности или утомляемости [3].

Вместе с тем, МКМ имеют значительные величины удельной мощности силовых установок, обусловленные необходимостью получения высоких показателей по разгону, проходимости и поворачиваемости. Поэтому совершенствование системы первичного поддрессоривания МКМ, проводимое с целью увеличения средних скоростей их движения, является актуальной задачей.

Важность совершенствования подвески повышается, если учесть значительную стоимость и особенности специальных грузов, перевозимых многоосными автомобилями, а также необходимость высоких средних скоростей движения по дорогам и местности.

У современных МКМ качество системы поддрессоривания обеспечивается путем согласованного выбора характеристик упругих и демпфирующих элементов. При этом разработчики стремятся достичь максимального демпфирования колебаний корпуса и, в то же время, наименьшего возмущения, передаваемого на поддрессоренную часть машины [4]. Возможности увеличения демпфирования в резонансных режимах корпуса на обратном ходе колес ограничены условием их «зависания». Таким образом, увеличение уровня демпфирования, при ограниченных динамических ходах, необходимое, главным образом именно в «резонансных» режимах движения, достигается увеличением сопротивления (уровня демпфирования) амортизаторов на прямом ходе колес. В «зарезонансных» режимах движения это приводит к увеличению вертикальных ускорений корпуса. Следовательно, обеспечение плавности хода при движении многоосной машины с разными скоростями по местности со случайными неровностями, определяет противоречивые требования к элементам подвески.

Также известно, что колебательная система «корпус колесной машины – подвеска» находится под воздействием как силового, так и кинематического возмущений. Силовое возмущение непосредственно передается на корпус машины, и определяется тяговыми и тормозными силами на грунте, а также силами от системы вооружения в режимах наведения и стрельбы. Для уменьшения уровня передаваемых возмущений и стабилизации корпуса в этом случае требуется, как можно более «жесткая» подвеска. Кинематическое возмущение передается от неровностей трассы на корпус через систему поддрессоривания, и поэтому для улучшения плавности хода в этом случае требуется «мягкая» подвеска с целью уменьшения передаваемого возмущения. То есть требования к элементам подвески при кинематическом и силовом возмущении также противоречивы.

Разрешить эти противоречия, имеющие важное значение для автомобилестроения в целом, можно введением в подвеску системы, которая обеспечивает изменение сил (в

достаточно широком диапазоне) действующих на корпус машины как функцию условий и режимов движения.

Традиционные неуправляемые системы поддрессирования не позволяют получить приемлемые показатели плавности хода для всего многообразия условий эксплуатации многоосных колесных машин, а также не позволяют разрешить противоречий между требованиями по плавности хода и повышению параметров профильной проходимости МКМ [5, 6]. С этой задачей способны справиться только управляемые системы поддрессирования, эффективное применение которых зависит от алгоритмического и программного обеспечения, построенных на законах прикладной механики и отражающих физическую суть процессов и взаимосвязей элементов колесных машин.

Целью данной работы является повышение плавности хода многоосных колесных машин путем адаптивного управления упругодемпфирующими элементами системы поддрессирования.

При разработке закона управления системой поддрессирования МКМ будем пользоваться классификационной терминологией, предложенной в работе [1]. Под принципом непрерывного управления будем понимать такой процесс регулирования, когда должно быть реализовано точное значение управляющего приращения усилия в подвеске, которое рассчитано алгоритмом. Под полуактивной системой поддрессирования будем понимать систему, где энергия управления затрачивается не на создание активной восстанавливающей силы, а на управление исполнительными устройствами, в качестве которых могут выступать регулируемые дроссели, регулируемые напорные, обратные, запорные клапаны. Усилие же, требуемое для осуществления гашения колебаний по заложенному алгоритму, создается в пассивных элементах подвески (упругих или демпфирующих).

Среди полуактивных управляемых систем поддрессирования конструктивно интересны амортизаторы, которые содержат дисперсные ферромагнетики (суспензии с твердой ферромагнитной фазой) – магнитореологические демпферы (МРД).

В работе [7] отмечены преимущества МРД в роли управляемых демпферов:

- малое сопротивление при отключении и достаточно большое значение сопротивления при максимальном демпфировании;
- возможность непрерывного и бесступенчатого изменения демпфирования;
- возможность изменять сопротивления демпфирования до 1000 раз в секунду при достаточно малом потреблении энергии;
- отсутствие клапанов в гидравлической системе, что значительно повышает ресурс устройства.

Для управления магнитореологическими демпферами рассмотрим два наиболее известных алгоритма: «инерциальный демпфер» [8] и алгоритм противодействия

продольно-угловым колебаниям корпуса [4]. Последний разработан проф. А.А. Дмитриевым для быстроходных гусеничных машин.

1. Разработка непрерывного закона управления полуактивного системой подпрессоривания на основе принципа «инерциальный демпфер» с нечеткой настройкой параметров

Принцип работы инерциального демпфера можно изложить следующим образом [8]. Чтобы энергия, связанная с работой восстанавливающей силы P_y в подвеске, рассеивалась, должно выполняться условие

$$P_y \cdot \dot{x}_{отн} \geq 0,$$

где $\dot{x}_{отн}$ - скорость прогиба подвески.

Восстанавливающая сила $P_y = -b \cdot \dot{x}_{abs}$ (где $\dot{x}_{abs}$ - абсолютная вертикальная скорость точки корпуса в месте крепления подвески; b – коэффициент пропорциональности), создаваемая системой управления, должна изменять знак виброскорости $\dot{x}_{отн}$ в соответствии с вынуждающим воздействием $q(t)$, так как восстанавливающая сила не может вводить энергию в систему, а распределяет энергию колебаний путем соответствующей ее модуляции:

$$\begin{aligned} \text{при } \dot{x}_{отн} \cdot \dot{x}_{abs} > 0 \rightarrow P_y &= -b \cdot \dot{x}_{abs}; \\ \text{при } \dot{x}_{отн} \cdot \dot{x}_{abs} \leq 0 \rightarrow P_y &= 0. \end{aligned} \tag{1}$$

Применительно к управлению магнитореологическим демпфированием условия (1) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{при } \dot{x}_{отн} \cdot \dot{x}_{abs} > 0 \rightarrow P_y &= -b \cdot \dot{x}_{abs}; \\ \text{при } \dot{x}_{отн} \cdot \dot{x}_{abs} \leq 0 \rightarrow &\text{минимальный уровень демпфирования.} \end{aligned}$$

Принцип управления магнитореологическим демпфером пояснен на рис. 1.

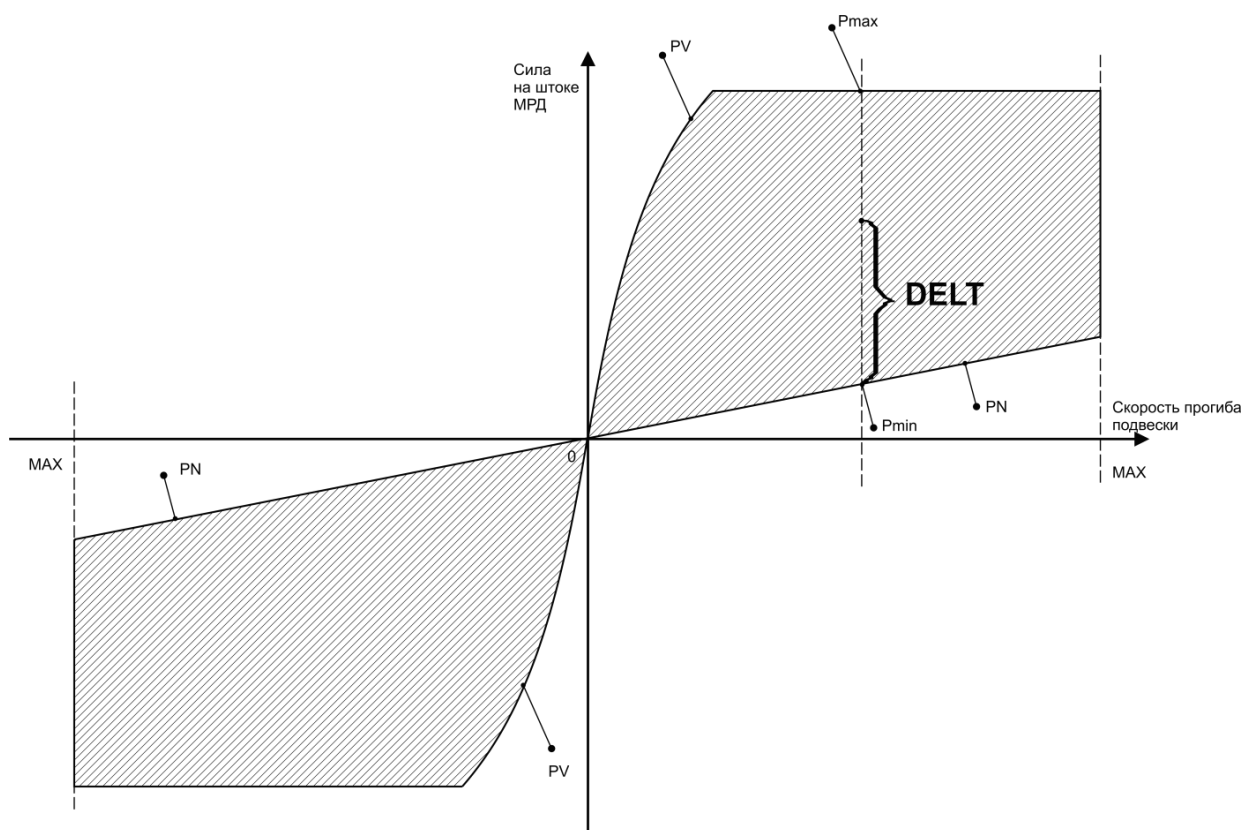


Рис. 1. Область допустимых значений управляющих воздействий для МРД:

PV – уровень максимального демпфирования в МРД; PN – уровень минимального демпфирования в МРД; P_{min} – текущий минимально возможный уровень демпфирования в МРД; P_{max} – текущий максимально возможный уровень демпфирования в МРД; **DELT** – управляющее воздействие

Значения P_{min} и P_{max} обоснованы в работе [9]. Управляющее воздействие **DELT** является приращением к минимальному текущему уровню демпфирования P_{min} . Таким образом, текущая демпфирующая сила P_D в МРД рассчитывается по формуле

$$P_D = P_{min} + (P_{max} - P_{min}) \cdot DELT.$$

Для определения величины управляющего воздействия **DELT** воспользуемся методами нечеткой логики. Введем соответствующую выходную лингвистическую переменную **DELT**. В качестве входной лингвистической переменной используем абсолютное значение вертикальной скорости точки крепления подвески к корпусу $|\dot{x}_{abs}|$. Введем следующие термы для обеих лингвистических переменных: «высокий уровень»; «средний уровень»; «низкий уровень». Функции принадлежности для входной и выходной лингвистических переменных показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

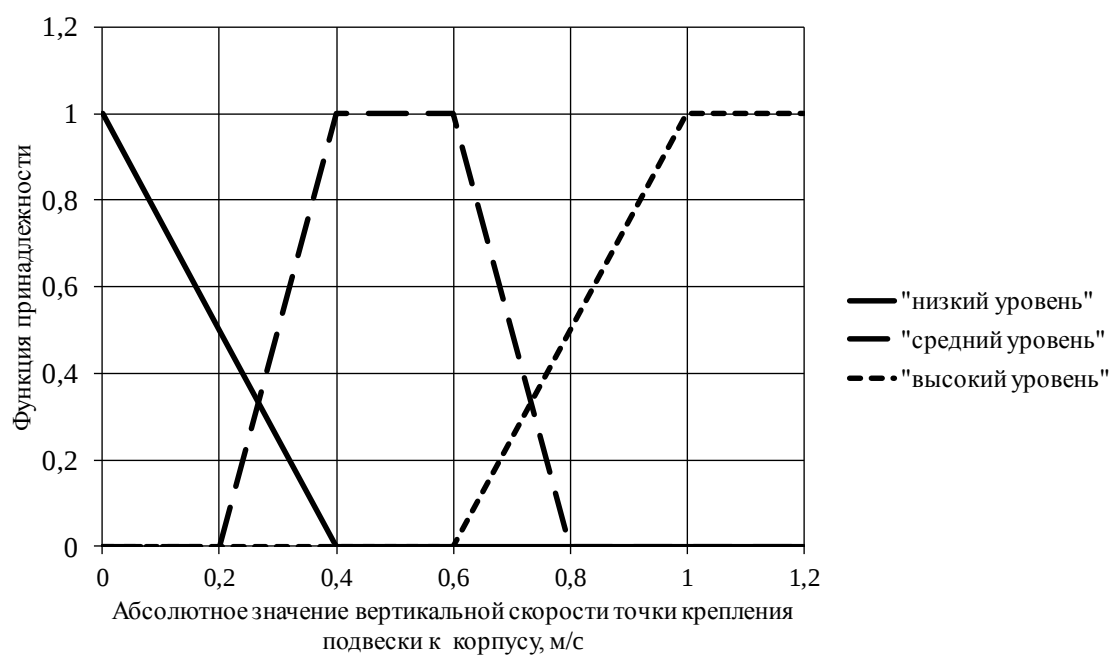


Рис. 2. Функции принадлежности входной переменной «Абсолютное значение вертикальной скорости точки крепления подвески к корпусу»

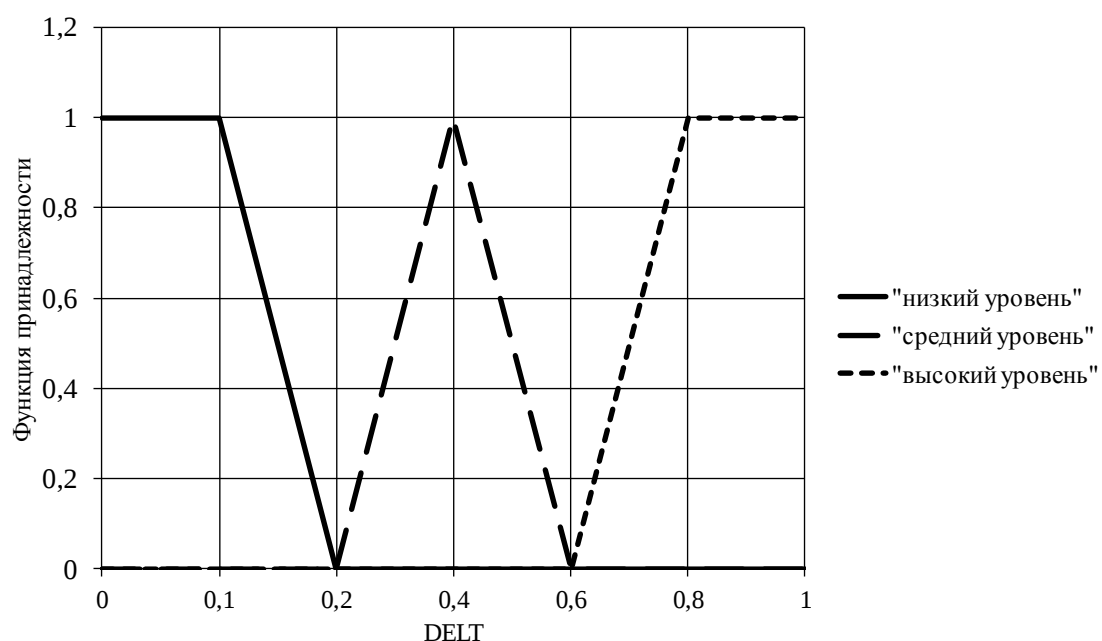


Рис. 3. Функции принадлежности выходной переменной «DELTA»

Полный набор нечетких правил выглядит следующим образом.

при $\dot{x}_{отн} \cdot \dot{x}_{abs} \leq 0 \rightarrow DELT = \text{"низкий уровень"};$

при $\dot{x}_{отн} \cdot \dot{x}_{abs} > 0;$

если $\dot{x}_{abs} = \text{"низкий уровень"} \rightarrow DELT = \text{"низкий уровень"};$

если $\dot{x}_{abs} = \text{"средний уровень"} \rightarrow DELT = \text{"средний уровень"};$

если $\dot{x}_{abs} = \text{"высокий уровень"} \rightarrow DELT = \text{"высокий уровень"}.$

Будем использовать алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани [10].

2. Разработка непрерывного полуактивного закона управления системой подрессоривания на основе принципа противодействия продольно-угловым колебаниям корпуса с нечеткой настройкой параметров

Принцип работы алгоритма противодействия продольно-угловым колебаниям профессора А.А. Дмитриева обладает следующим существенным недостатком: склонностью к возникновению автоколебаний, из-за чего приходится вводить зону нечувствительности, конкретные параметры которой – одна из форм неопределенности при проектировании регулятора. Чтобы избежать указанных трудностей, воспользуемся методами нечеткой логики. Для этого введем одну входную лингвистическую переменную «продольно-угловая скорость корпуса» $\dot{\phi}$ и одну выходную лингвистическую переменную **DELT**, аналогично тому, как это было сделано в разделе 1. Функции принадлежности для входной переменной показаны на рис. 4, для выходной переменной – на рис. 3.

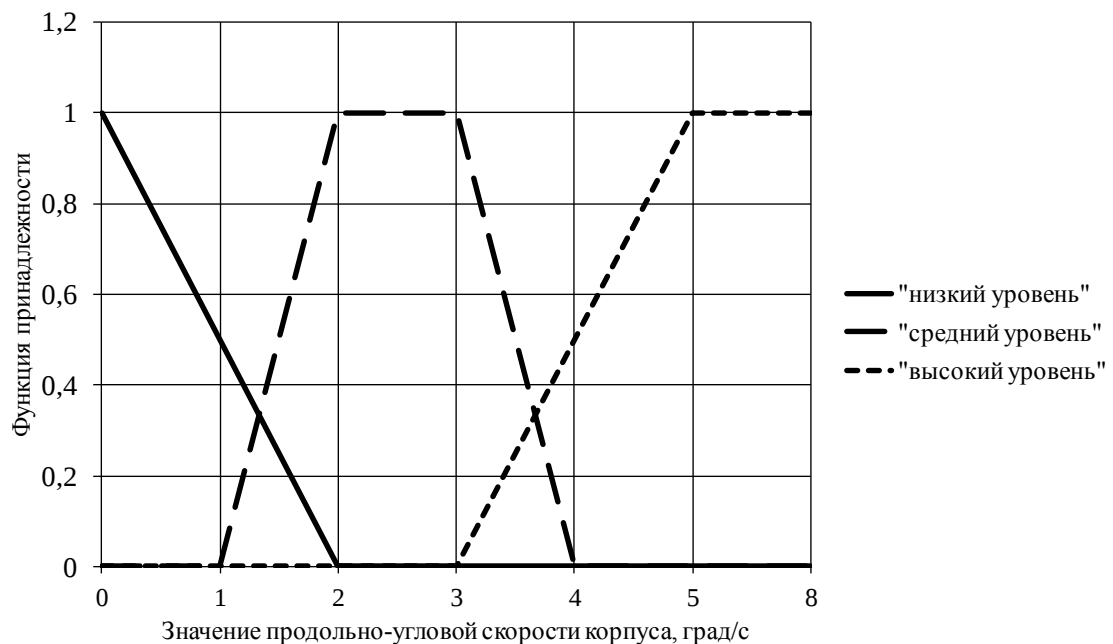


Рис. 4. Функции принадлежности входной переменной
«Продольно-угловая скорость корпуса»

Полный набор нечетких правил выглядит следующим образом.

при $\dot{\phi} \leq 0$ (крен корпуса на корму) $\rightarrow DELT = \text{"низкий уровень"};$

при $\dot{\phi} > 0$ (крен корпуса на нос);

если $\dot{\phi} = \text{"низкий уровень"} \rightarrow DELT = \text{"низкий уровень"};$

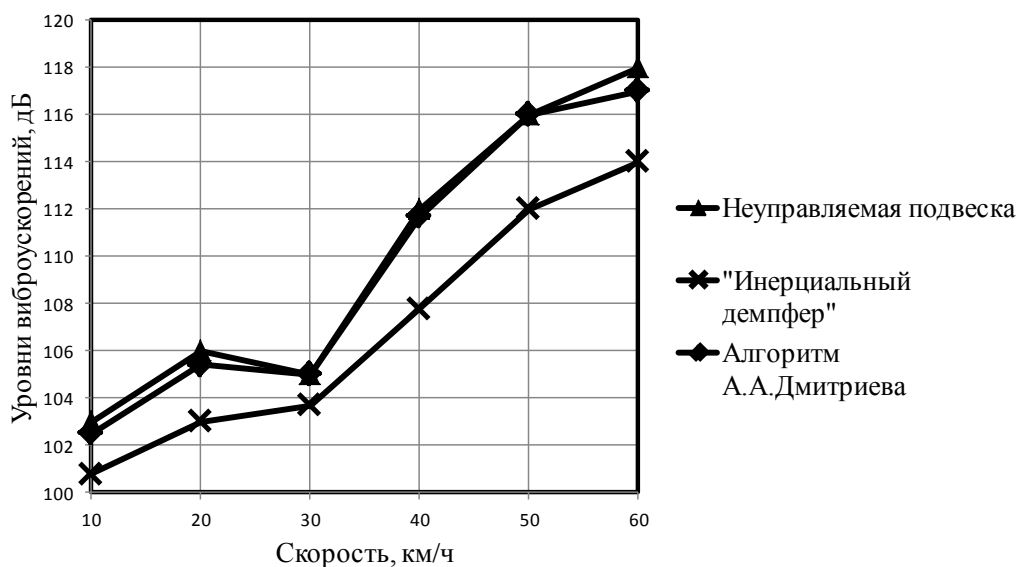
если $\dot{\phi} = \text{"средний уровень"} \rightarrow DELT = \text{"средний уровень"};$

если $\dot{\phi} = \text{"высокий уровень"} \rightarrow DELT = \text{"высокий уровень"}.$

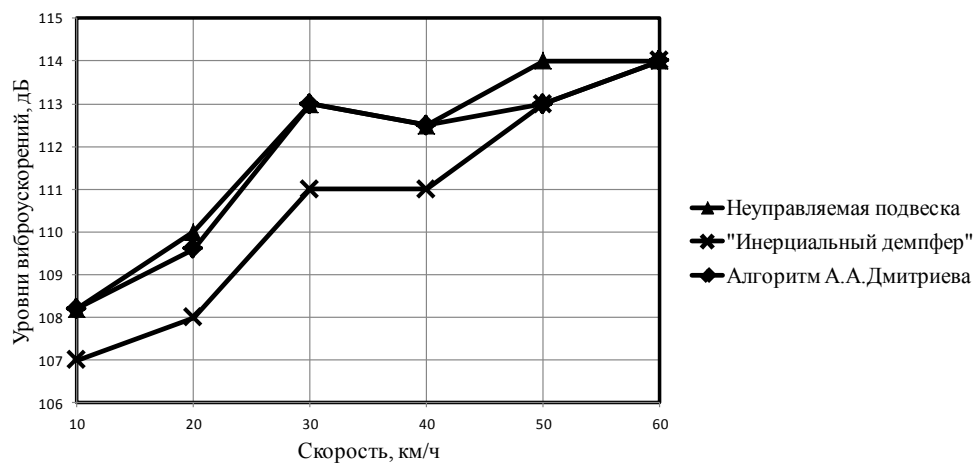
Будем использовать алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани [10].

3. Анализ эффективности разработанных адаптивных непрерывных законов управления полуактивной системой подрессоривания

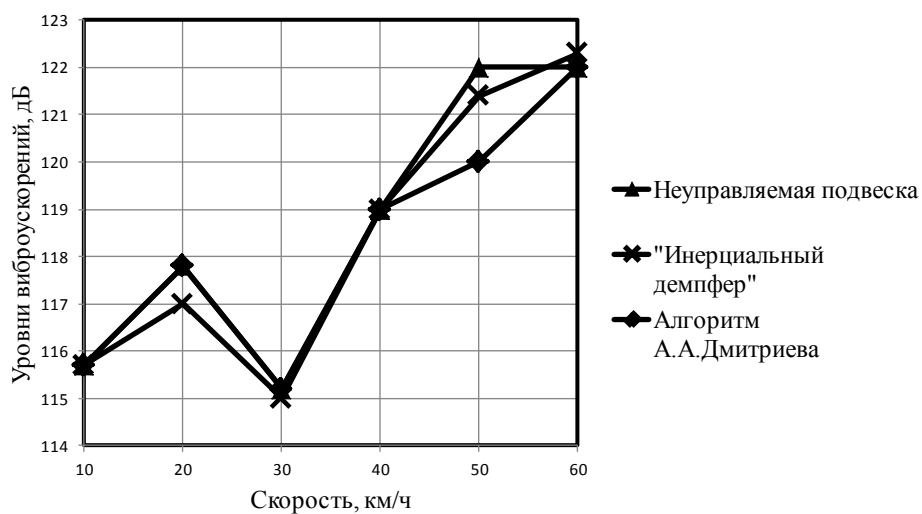
Для оценки эффективности разработанных адаптивных непрерывных законов управления подвеской на различных скоростях движения по грунтовой дороге второй категории [11] моделировалось движение МКМ в диапазоне скоростей 10...60 км/ч. Математическая модель движения МКМ представлена в работе [12], технические характеристики машины – в работе [11]. На рис. 5 (а–д) представлены уровни вертикальных виброускорений на месте водителя для I – V октавных полос частот.



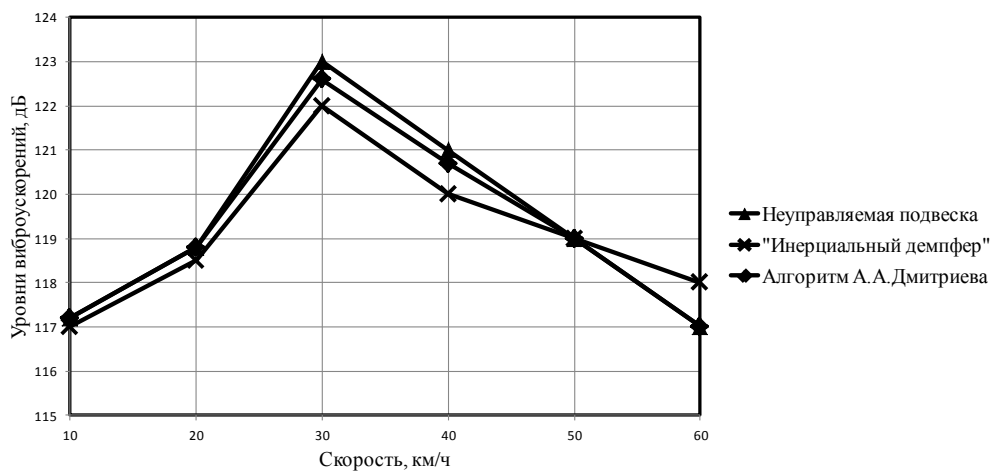
а)



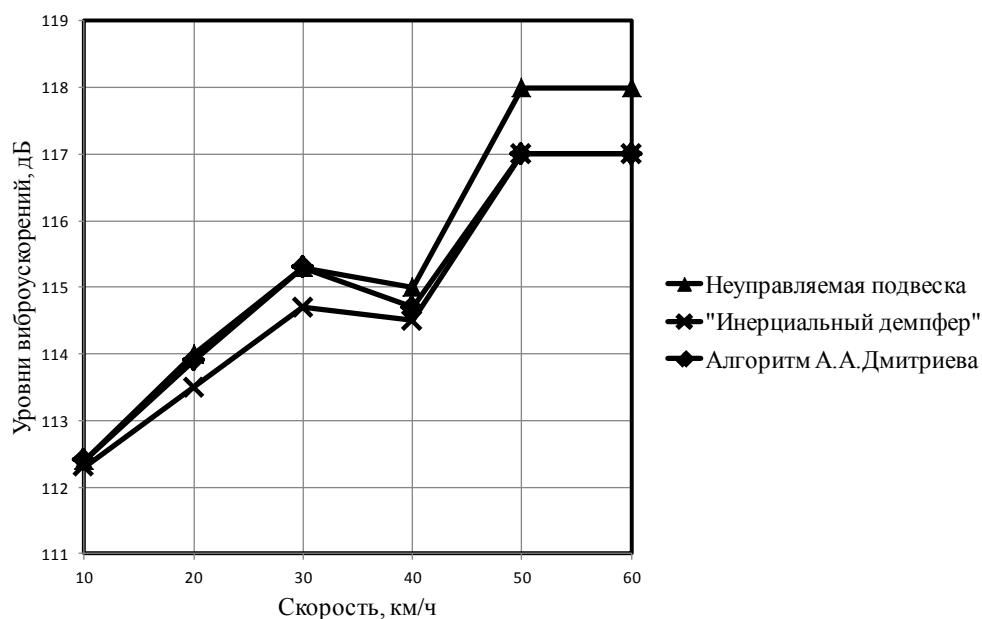
б)



в)



г)



д)

Рис. 5. Уровни вертикальных виброускорений в октавных полосах частот:

а) – I октава; б) – II октава; в) – III октава; г) – IV октава; д) – V октава.

Для проведения сравнительного анализа эффективности различных законов («инерциальный демпфер» и А.А.Дмитриева) используем критерий K_i (для i -ой скорости движения на всей совокупности грунтовых дорог), характеризующий работу данной системы по сравнению с неуправляемой подвеской [11]:

$$K_i = \left(\frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \frac{D_{ij} - D_{0ij}}{D_{0ij}} \right) \times 100\%. \quad (2)$$

Здесь D_{ij} - дисперсия вертикальных ускорений на месте водителя для случая управляемой подвески при движении с i -ой скоростью; j – номер категории грунтовой дороги.

Критерий (2) характеризует степень снижения дисперсии вертикальных ускорений на месте водителя для случая управляемой подвески по сравнению с неуправляемой системой поддрессоривания. На рис. 6 показана зависимость показателя эффективности K_i для различных адаптивных законов управления от скорости движения для всей совокупности грунтовых дорог.

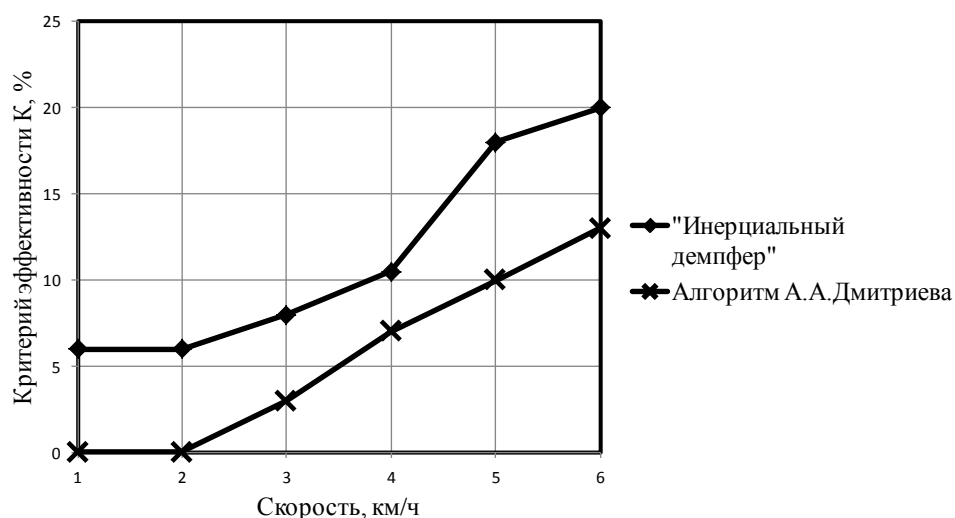


Рис. 6. Зависимость критерия эффективности K_i для различных адаптивных законов управления подвеской для различных скоростей движения по грунтовым дорогам

Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о том, что эффективность (снижение уровня дисперсии вертикальных ускорений на месте водителя по сравнению с неуправляемой подвеской) адаптивного закона «инерциальный демпфер» составляет 7...20%, закона противодействия продольно-угловым колебаниям – 0...13%.

Выводы

- 1) На основе применения методов нечеткой логики разработаны адаптивные законы непрерывного управления полуактивной системой поддрессоривания многоосных колесных машин, а именно адаптивный закон «инерциальный демпфер» и адаптивный закон противодействия продольно-угловым колебаниям.
- 2) Установлено методами имитационного моделирования, что эффективность (снижение уровня дисперсии вертикальных ускорений на месте водителя по сравнению с неуправляемой подвеской) адаптивного закона «инерциальный демпфер» составляет 7...20%, закона противодействия продольно-угловым колебаниям – 0...13%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора №9905/17/07-к-12 между ОАО «КАМАЗ» и «Московским государственным техническим университетом имени Н.Э. Баумана».

Список литературы

1. Жилейкин М.М. Синтез адаптивной динамической непрерывной системы гашения колебаний корпуса многоосных колесных машин // Наука и образование. МГТУ им.

- Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 10. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/347169.html> (дата обращения 26.05.2013).
2. Жилейкин М.М. Синтез адаптивной динамической непрерывной системы стабилизации корпуса // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/347435.html> (дата обращения 26.05.2013).
3. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет / Под общ. ред. Б.Н. Белоусова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 728 с.
4. Сухоруков А.В. Управление демпфирующими элементами в системе поддрессоривания быстроходной гусеничной машины: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2003. 204 с.
5. Жилейкин М.М. Разработка статического алгоритма управления подвеской многоосных колесных машин: автоматизированное преодоление эскарпа // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 8. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/347058.html> (дата обращения 26.05.2013).
6. Жилейкин М.М. Разработка статического алгоритма управления подвеской многоосных колесных машин: автоматизированное преодоление траншеи // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 9. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/347098.html> (дата обращения 26.05.2013).
7. Wang X., Gordaninejad F. Flow Analysis of Field-Controllable, Electro- and Magneto-Rheological Fluids Using Herschel-Bulkley Model // Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures. 2000. No. 2. P. 87-121.
8. Фурунжиев Р.И., Останин А. Н. Управление колебаниями многоопорных машин. М.: Машиностроение, 1984. 206 с.
9. Жилейкин М.М. Разработка адаптивного алгоритма релейного управления двухуровневым демпфированием подвески многоосных колесных машин // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 12. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/347444.html> (дата обращения 26.05.2013).
10. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.
11. Жилейкин М.М. Сравнительный анализ эффективности работы непрерывной и релейной систем управления подвеской многоосных колесных машин // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/347783.html> (дата обращения 26.05.2013).
12. Проектирование полноприводных колесных машин: учебник для вузов. В 3 т. Т. 3 / Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Жеглов Л.Ф. [и др.]; Под ред. А.А. Полунгяна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 432 с.

Development of a continuous control law for a semi-active suspension system with a fuzzy configuration of parameters

07, July 2013

DOI: 10.7463/0713.0567714

Jileikin M.M., Fedotov I.V., Mardeeva L.R.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation
Russia, OJSC «KAMAZ»

jileikin_m@mail.ru

automobile@yandex.ru

mardeeval@yandex.ru

Creation of means of effective protection from external dynamic effects has always been one of the most important problems of modern equipment. The aim of this work is to increase smooth running of multi-wheeled vehicles using an adaptive control of elastic-damping elements of the suspension system. On the basis of application of methods of fuzzy logic, adaptive laws of a continuous suspension control system of multi-wheeled vehicles, namely the “inertial damper” adaptive law and the adaptive law of the counteraction of a linear-angular fluctuations, were developed. Methods of simulation modeling were used to determine that efficiency (reduction of the variance of the vertical accelerations at the driver's place compared to the unmanageable adaptive suspension) of the “inertial damper” law is 7...20%; one of the laws of counteraction of linear-angular fluctuations - 0...13%.

Publications with keywords: [fuzzy logic](#), [adaptive control](#), [multi-wheeled vehicles](#), [control suspension systems](#)

Publications with words: [fuzzy logic](#), [adaptive control](#), [multi-wheeled vehicles](#), [control suspension systems](#)

References

1. Zhileikin M.M. Sintez adaptivnoi dinamicheskoi nepreryvnoi sistemy gasheniia kolebaniy korpusa mnogoosnykh kolesnykh mashin [Synthesis of adaptive dynamic continuous system of oscillation damping of the case of multi-wheeled vehicles]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 10. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/347169.html> , accessed 26.05.2013.
2. Zhileikin M.M. Sintez adaptivnoi dinamicheskoi nepreryvnoi sistemy stabilizatsii korpusa [Synthesis of adaptive dynamic continuous system of stabilization of the case of multi-

wheeled vehicles]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/347435.html> , accessed 26.05.2013.

3. Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bol'shoi gruzopod'emnosti. Konstruktsiia. Teoriia. Raschet* [Wheel vehicles specially the big carrying capacity. Construction. Theory. Calculation]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 728 p.
4. Sukhorukov A.V. *Upravlenie dempfiruiushchimi elementami v sisteme podressorivaniia bystrokhodnoi gusenichnoi mashiny. Kand. diss.* [Management of damping elements in the system of suspension of high-speed tracked vehicle. Cand. diss.]. Moscow, 2003. 204 p.
5. Zhileykin M.M. *Razrabotka staticheskogo algoritma upravleniya podveskoy mnogoosnykh kolesnykh mashin: avtomatizirovannoe preodolenie eskarpa* [Static algorithm of control of a suspension bracket of multi-wheeled vehicles: the automated overcoming of the escarp]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 8. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/347058.html> , accessed 26.05.2013.
6. Zhileykin M.M. *Razrabotka staticheskogo algoritma upravleniya podveskoy mnogoosnykh kolesnykh mashin: avtomatizirovannoe preodolenie transhei* [Static algorithm of control of a suspension bracket of multi-wheeled vehicles: the automated overcoming of the trench]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 9. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/347098.html> , accessed 26.05.2013.
7. Wang X., Gordaninejad F. Flow Analysis of Field-Controllable, Electro- and Magneto-Rheological Fluids Using Herchel-Bulkley Model. *Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures*, 2000, no. 2, pp. 87-121.
8. Furunzhiev P.I., Ostanin A. N. *Upravlenie kolebaniiami mnogoopornykh mashin* [Control of oscillations of multisupporting machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 206 p.
9. Zhileykin M.M. *Razrabotka adaptivnogo algoritma releynogo upravleniya dvukhurovnevym dempfirovaniem podveski mnogoosnykh kolesnykh mashin* [Development of adaptive algorithm of relay management by a two-level damping of a suspension bracket of multi-wheeled vehicles]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 12. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/347444.html> , accessed 26.05.2013.
10. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Design of fuzzy systems by means of MATLAB]. Moscow, Goriachaia liniia -Telekom, 2007. 288 p.
11. Zhileikin M.M. *Sravnitel'nyi analiz effektivnosti raboty nepreryvnoi i releinoi sistem upravleniia podveskoi mnogoosnykh kolesnykh mashin* [Comparative performance analysis of continuous and relay control systems for the suspension bracket of multi-wheeled vehicles]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 3. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/347783.html> , accessed 26.05.2013.
12. Afanas'ev B.A., Belousov B.N., Zheglov L.F., et al. *Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin. V 3 t. T.3* [Design of all-wheel drive vehicles. In 3 vols. Vol.3]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 432 p.