

УДК 629.3.064

А.Н. СЕРГИЕНКО, стажер-преподаватель, НТУ «ХПИ»;
Б.Г. ЛЮБАРСКИЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Н.Г. МЕДВЕДЕВ, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
Н.Е. СЕРГИЕНКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭМП-АМОРТИЗАТОРА ПРИ ДВИЖЕНИИ АВТОМОБИЛЯ ПО НЕРОВНОСТЯМ

Предлагаются результаты имитационного моделирования в среде Matlab Simulink колебаний легкового автомобиля с линейным электромеханическим преобразователем (ЭМП) в качестве амортизатора. Рассматривается движение по неровностям синусоидального и случайного профиля, и а также через единичную неровность дороги. Представлены расчетные осциллограммы колебаний в механической и электрической системах модели в зависимости от скорости движения автомобиля и активного нагрузочного сопротивления в цепях фазных обмоток ЭМП. Установлен характер изменения вырабатываемой электрической энергии во всем рассматриваемом диапазоне скоростей движения автомобиля и нагрузочного сопротивления системы управления.

Ключевые слова: моделирование, результаты, электромеханический, линейный, преобразователь, амортизатор, движение, неровности, энергия.

Введение. Работы по рекуперации механической энергии колебаний поддрессоренных и неподдрессоренных масс автомобиля и выбору оптимальных параметров демпфирующих устройств являются актуальными и ведутся основными производителями автомобилей. Эффективность применения в конструкциях автомобиля электроприводов – электромеханических преобразователей (ЭМП) энергии подтверждается улучшением топливной экономичности автомобилей и уменьшением выбросов токсичных веществ ДВС. При этом управление выходными характеристиками ЭМП отличается относительной простотой и улучшается плавность хода машины [1–3]. Это обуславливает перспективность разработок ЭМП, систем их управления и эффективных накопителей электрической энергии, что важно при создании гибридных машин и электромобилей, а также для модернизации автомобилей традиционной конструкции.

Анализ последних достижений и публикаций. По оценкам автора работы [4] потери в подвеске автомобиля составляют 10 – 11%. Механическая энергия колебаний при движении по неровностям преобразуется в тепло и рассеивается в окружающую среду. При КПД автомобиля на средних режимах загрузки 6 – 8% [1] использование этой энергии для выполнения полезной работы становится особенно актуальным. Для рекуперации энергии в подвеске разработан ряд устройств. Авторами работы [5] обоснован вариант линейного ЭМП-амортизатора, который обладает рядом преимуществ. Исследования проводились на основе модели колебаний в ходовой части автомобиля [6], составной частью которой является оригинальный ЭМП-электроамортизатор транспортного средства [7]. Определение рациональных параметров амортизатора и его системы управления возможно при наличии и анализе данных, полученных при численном и натурном экспериментах.

Цель исследования – получение и оценка результатов работы ЭМП-амортизатора как элемента подвески легкового автомобиля в зависимости от условий движения и параметров регулировочных устройств системы управления.

Материалы исследований. При решении задачи рассмотрено три варианта профиля опорной поверхности: синусоидальный, случайный и единичная неровность. Высота (амплитуда) синусоидальной неровности задавалась в интервале 0,05...0,15 м, а период – (0,5...4)L (L = 2,2 м – база машины), т. е. 1,1... 8,8 м.

Случайная функция, описывающая микропрофиль дорожного покрытия, характеризуется корреляционной функцией и спектральной плотностью. Корреляционная функция аппроксимируется зависимостью

$$R(\tau) = De^{-\alpha|\tau|} \cos(\beta V\tau)$$

Значения коэффициентов корреляции α и β для выбранных дорог приведены в табл. 1. Дисперсия высот неровностей $D = 0,1 \text{ м}^2$. Связь между спектральной плотностью случайного процесса и его корреляционной функцией определяется преобразованием Фурье [8, 9].

Таблица 1 – Значения коэффициентов корреляции

Коэффициент	Вид дороги		
	асфальтобетон	мостовая	грунтовая
α	0,22	0,32	0,47
β	0,44	0,64	0,94

Единичная неровность имеет ступенчатый профиль высотой 0,1...0,15 м. Продольный размер неровности определялся, исходя из реальных дорожных условий движения автомобиля.

Виды представленных выше неровностей поочередно использовались в комплексной математической модели [6, 7].

Скорости движения автомобиля задавались следующие: 3; 6; 9; 14; 17 м/с.

Численный эксперимент проводился для легкового автомобиля 2-го класса [10, 11], значения параметров модели которого приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Исходные параметры колебательной системы

Параметр	Ед. измерения	Величина
Подрессоренная масса автомобиля, приходящаяся на колесо	кг	400
Приведенная масса колеса	кг	30
Приведенная жесткость упругого элемента подвески	Н/м	11750
Коэффициент жесткости шины	Н/м	172000
Коэффициент демпфирования шины	Н·с/м	30

Пример изменения параметров движения элементов рассматриваемой схемы, электрические токи фаз и сила сопротивления ЭМП-амортизатора при движении колеса по неровностям синусоидального профиля представлен на рис. 1.

Средняя мощность, развиваемая ЭМП-амортизатором за промежуток времени 5 с, составляет 3,5 Вт. При установившемся движении наблюдается изменение параметров системы по синусоидальному закону.

При увеличении сопротивления в цепи фазных обмоток с 0,05 до 0,5 Ом уменьшается амплитуда колебаний. Средняя мощность уменьшается и составляет 0,05 Вт. При этом закон изменения параметров движения масс отличается от синусоидального. Период колебаний возрастает.

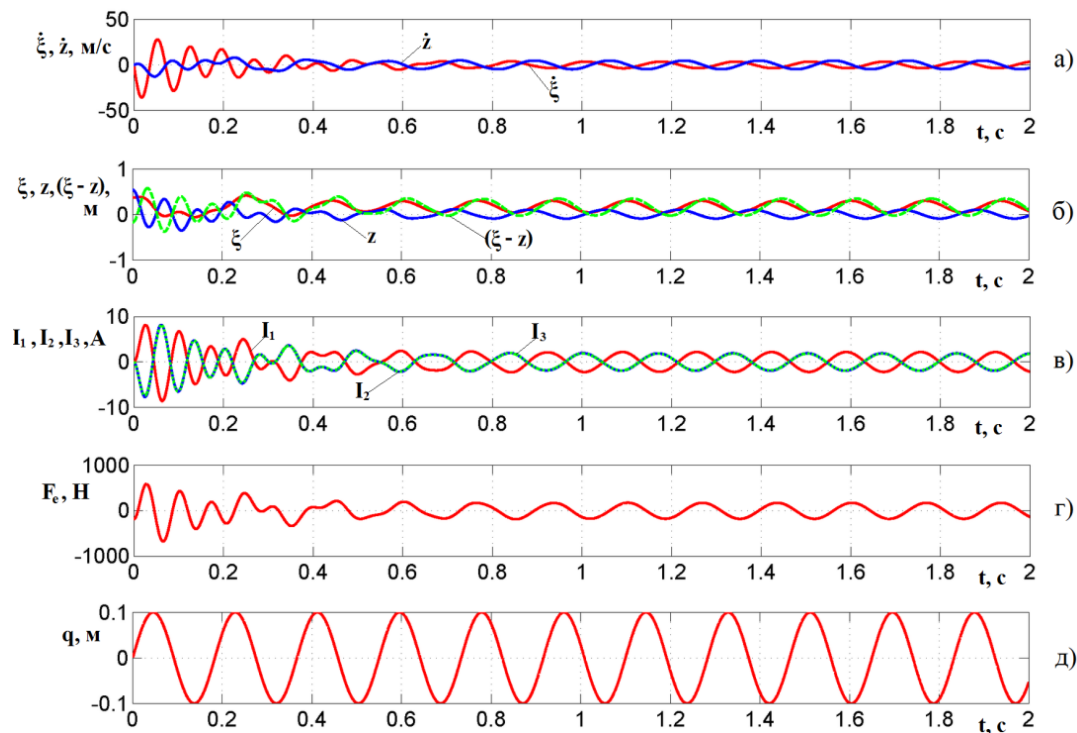


Рисунок 1 – Осциллограмма колебаний при синусоидальном законе изменения неровностей дороги ($V = 6$ м/с, $R = 0,05$ Ом, $t = 5$ с):

a – скорости $\dot{\xi}$ неподдресоренной и \dot{z} поддресоренной масс; *б* – перемещения ξ неподдресоренной и z поддресоренной масс; *в* – токи в обмотках фаз; *г* – сила сопротивления F_e ; *д* – координата профиля дороги

При скорости 14 м/с средняя мощность возрастает до 147 Вт. Особенностью процесса колебаний является то, что максимум производимой энергии достигается вследствие работы подвески в зоне, близкой к резонансной. Все показатели изменяются по синусоидальному закону с постоянными амплитудами.

При увеличении скорости автомобиля до 17 м/с характер изменения параметров несколько меняется. Средняя мощность составляет 8,8 Вт. В начальный момент параметры колебаний существенно зависят от начальных условий. При выходе на установившийся режим движения размах и частота колебаний в механической (перемещения и их скорости) и электрической (токи в фазных обмотках и

электромагнитная сила) системах уменьшаются. Это наблюдается примерно через 1 с после начала процесса.

Величина получаемой электрической энергии (рис. 2) при демпфировании колебаний изменяется от 0,17 до 750 Дж. Её значения существенно зависят от величины активного сопротивления, которое изменялось от 0,5 до 0,005 Ом, и скорости движения автомобиля. При скорости движения 14 м/с наблюдается максимум значений энергии при всех значениях активного сопротивления. Наблюдается увеличение скоростей и относительных перемещений подрессоренной и нерессоренной масс, токов в фазных обмотках и электромагнитной силы.

Величина периода неровности незначительно влияет на изменение энергии, а увеличение высоты вызывает рост вырабатываемой энергии.

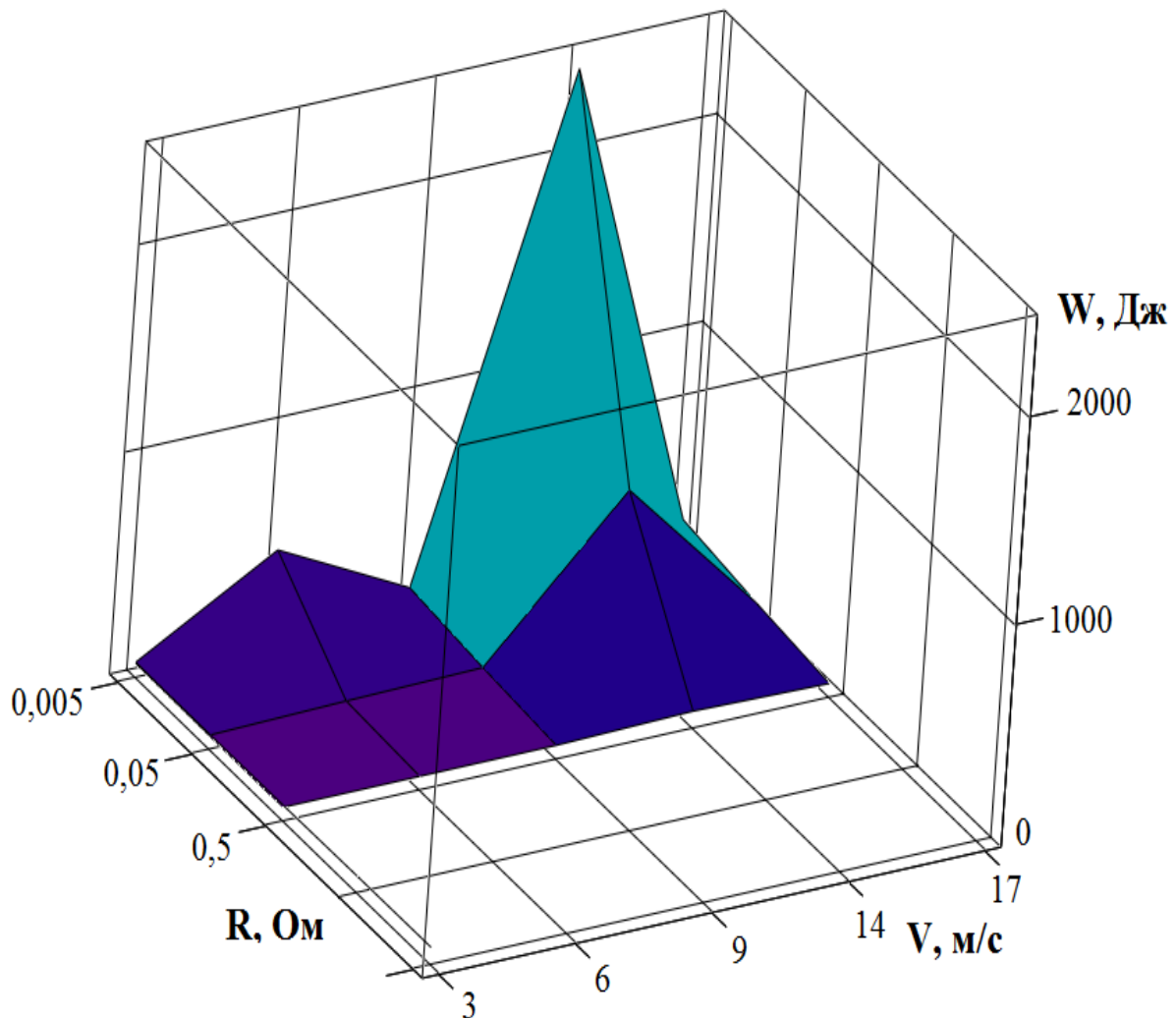


Рисунок 2 – Изменение энергии в зависимости от скорости автомобиля и активного сопротивления в цепях обмоток фаз при синусоидальном профиле неровностей дороги

Изменение параметров колебаний при движении по случайному микропрофилю асфальтобетонной дороги представлен на рис. 3.

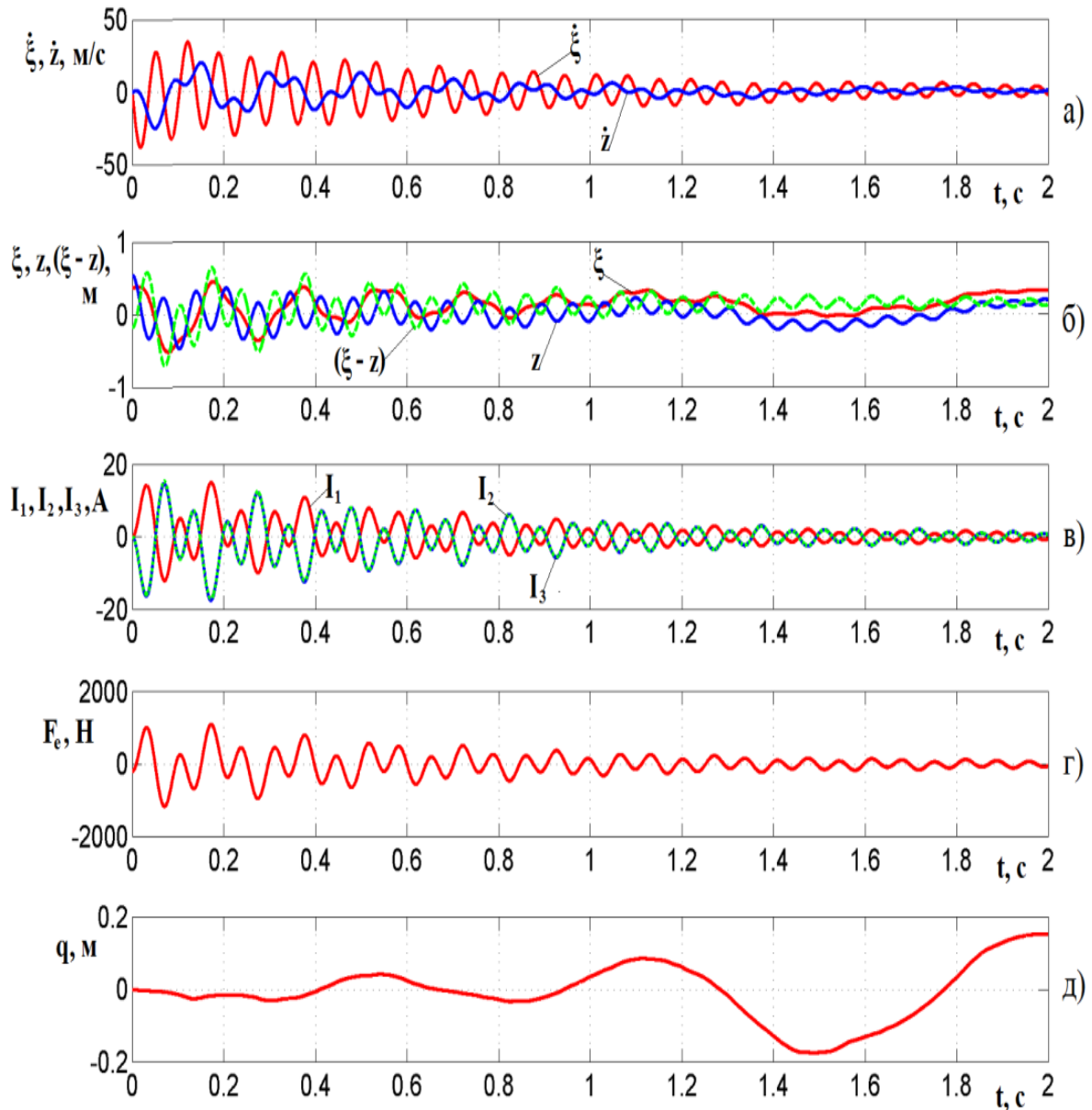


Рисунок 3 – Осциллограмма колебаний при случайном законе изменения неровностей дороги ($V = 9$ м/с, $R = 0,005$ Ом, $t = 5$ с, асфальтобетон) (обозначение а – д см. рис. 2)

Средняя мощность, развиваемая ЭМП-амортизатором за промежутки времени 5 с при движении по асфальтобетонной дороге, составляет 1,2 Вт, по грунтовой дороге – 1,1 Вт, по мощеной дороге – 1,1 Вт.

Сравнение результатов показывает, что при движении колеса автомобиля по одному и тому же случайному профилю изменение параметров колебаний и развиваемой мощности несущественно зависит от активного сопротивления в цепях фаз обмоток, которое варьировалось в интервале 0,005 ... 0,05 Ом.

Вариант результатов исследований при переезде единичного препятствия представлен на рис. 4. Изменение вырабатываемой энергии в зависимости от скорости автомобиля и нагрузочного сопротивления при проезде единичной неровности показано на рис. 5.

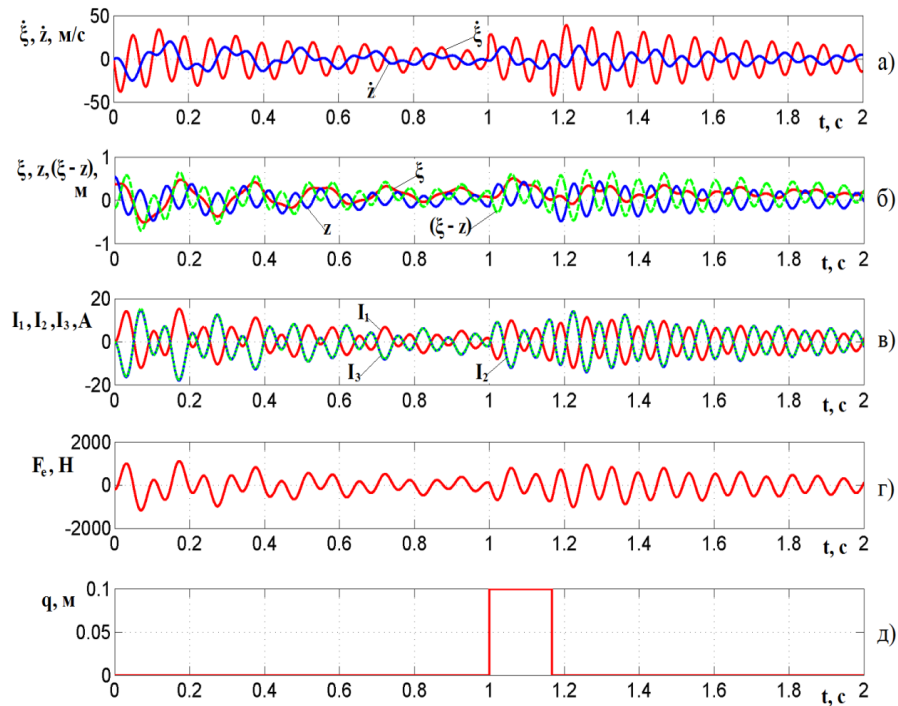


Рисунок 4 – Осциллограмма колебаний при единичном законе изменения неровности дороги ($V = 3$ м/с, $R = 0,005$ Ом, $t = 5$ с) (обозначения $a - d$ см. рис. 2)

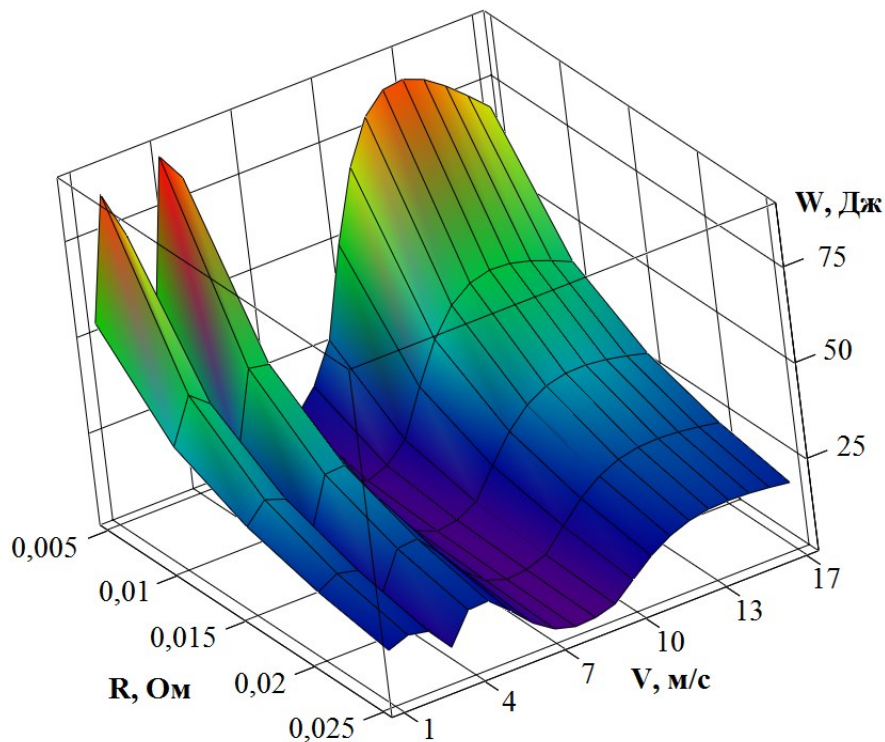


Рисунок 5 – Изменение вырабатываемой энергии в зависимости от скорости автомобиля и нагрузочного сопротивления при проезде единичной неровности

Выводы. Результаты исследований показывают, что вырабатываемая энергия зависит от скорости движения и активного нагрузочного сопротивления в цепях фазных обмоток. Изменение скорости вызывает колебания количества энергии как следствие колебаний ротора относительно статора ЭМП-амортизатора. Существуют значения скорости, при которых величина вырабатываемой энергии для заданного варианта параметров ЭМП наибольшая. Уменьшение активного сопротивления приводит к росту вырабатываемой электрической энергии, так как при этом увеличиваются размах и частота колебаний элементов подвески. Однако это входит в противоречие с требованием эффективного гашения колебаний кузова. Поэтому требуется выбор рациональных параметров механической системы подвески и системы управления ЭМП.

Список литературы: 1. Bose suspension system-white paper, Bose Company 2004. – Режим доступа: <http://www.bose.com/>. 2. Mazda: SKYACTIV technology. Режим доступа http://www.mazda.com/mazdaspirit/skyactiv/?link_id=rc/. 3. Regenerative Braking System. Режим доступа <http://www.mazda.com/mazdaspirit/env/engine/i-loop.html/>. 4. *Говорущенко Н.Я.* Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследований): монография / *Н.Я. Говорущенко*. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 292 с. 5. *Сергиенко А.Н.* Анализ конструкций электромеханических преобразователей и выбор схемы электроамортизатора неподрессоренных масс транспортного средства / *А.Н. Сергиенко, Б.Г. Любарский, В.Б. Самородов и др.* // Сборник научных трудов: Автомобильный транспорт. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – Вып. 31. – С. 18–25. 6. *Сергиенко А.Н.* Математическая модель колебаний в ходовой системе автомобиля с электромагнитным демпфированием / *А.Н. Сергиенко* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Транспортне машинобудування. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – №31 (1004). – С. 86–93. 7. *Сергиенко А.Н.* Математическая модель электромеханического преобразователя для электроамортизатора транспортного средства / *А.Н. Сергиенко, Б.Г. Любарский, Н.Е. Сергиенко* // Електротехніка і електромеханіка. Науково-практичний журнал. – 2012. – №6. – С. 61–65. 8. *Александрова Т.Е.* Имитационное моделирование внешних возмущений, действующих на танковую пушку / *Т.Е. Александрова, И.Е. Александрова, С.Н. Беляев* // Механіка та машинобудування, 2011, № 1. – С. 43–50. 9. *Светлицкий В.А.* Случайные колебания механических систем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с. 10. *Ротенберг Р.В.* Подвеска автомобиля. Изд. 3-е, переработ. и доп. М.: Машиностроение, 1972. – 392 с. 11. *Раймпель Й.* Шасси автомобиля: Элементы подвески / Пер. с нем. *А.Л. Карпухина*; Под ред. *Г.Г. Гридасова*. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bose suspension system-white paper, Bose Company 2004. – mode of access: <http://www.bose.com/>. 2. Mazda: SKYACTIV technology. Mode of access http://www.mazda.com/mazdaspirit/skyactiv/?link_id=rc/. 3. Regenerative Braking System. Mode of access <http://www.mazda.com/mazdaspirit/env/engine/i-loop.html/>. 4. *Govorushchenko N.Y.* Road transport systems engineering (design research methods): monograph / *N.Y. Govorushchenko*. – Kh.: KhNAHU, 2011. – 292 p. 5. *Sergienko A.N.* Analysis of structures and electromechanical transducers selection scheme electric shock absorber unsprung mass of the vehicle / *A.N. Sergienko, B.G. Lyubarskii, V.B. Samorodov et al.* /Collection of scientific works of Road Transport. – Kharkov: KhNAHU, 2012. – Vol. 31. – P. 18–25. 6. *Sergienko A.N.* A mathematical model of vibrations in the vehicle chassis

system with electromagnetic damping / *A.N. Sergienko* Herald of the National Technical University "KhPI". Scientific Papers. Series: Transport Engineering. – Kh.: NTU "KhPI." – 2013. – No31 (1004). – P. 86–93. **7.** *Sergienko A.N.* Mathematical model of electromechanical transducer for electric shock absorber vehicle / *A.N. Sergienko, B.G. Lyubarskii, N.Ye. Sergienko* Electronics and electrical engineering. Scientific journal. – 2012. – No6. – P. 61–65. **8.** *Alexandrova T.Ye.* Simulation modeling of external disturbances acting on the tank gun / *T.Ye. Alexandrova, I.Ye. Aleksandrova, S.N. Belyaev* Mechanics is the engineering, 2011, No 1. – P. 43–50. **9.** *Svetlitskiy V.A.* Random vibrations of mechanical systems. – 2 edit., rev. and enlar. – Moscow: Engineering, 1991. – 320 p. **10.** *Rothenberg R.V.* Suspension of the car. 3 Edition, revised and updated by. Moscow: Mechanical Engineering, 1972. – 392 p. **11.** *Raympel J.* Car chassis: Suspension elements / Translated from German. *A.L. Karpukhina*; Edited by *G.G. Gridasova*. – Moscow: Mechanical Engineering, 1987. – 288 p.

Поступила (received) 12.02.2015