

А.Н. СЕРГИЕНКО, аспирант, НТУ «ХПИ»;

Н.Г. МЕДВЕДЕВ, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;

Б.Г. ЛЮБАРСКИЙ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;

С.Н. БЕЛЯЕВ, ст. преп., НТУ «ХПИ»;

С.В. ШУШЛЯПИН, канд. техн. наук, доц., ХНТУСХ им. П. Василенко,
Харьков

МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ ПРОФИЛЯ ДОРОГИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ С РЕКУПЕРАТОРОМ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАНИЙ

Предложена методика и математическая реализация формирования внешних воздействий на подвеску автомобиля с рекуператором энергии колебаний при моделировании движения по неровностям с заданными законами изменения профиля дороги.

Ключевые слова: методика, неровность, профиль, подвеска, автомобиль, рекуператор, синусоидальный закон, случайный микропрофиль, единичная неровность.

Анализ последних достижений и публикаций. Повышение КПД автомобиля, снижение расхода топлива – весьма актуальная проблема при современном уровне автомобилизации и требований к охране окружающей среды. Одним из направлений решения этой задачи является разработка и совершенствование гибридных схем моторно-трансмиссионных систем автомобилей, а также различных устройств рекуперирования энергии. К таким устройствам относится линейный электромеханический преобразователь (ЭМП), используемый в качестве амортизатора в системе подпрессоривания. Для рационального выбора его параметров, определения вибрационных характеристик машины, оценки эффективности демпфирования и преобразования энергии колебаний в электроэнергию приходится решать задачу о вынужденных колебаниях системы с несколькими степенями свободы.

Колебания автомобиля возникают при движении по неровностям в результате кинематического возбуждения. Параметры этого воздействия определяются характеристиками профиля опорной поверхности (высота неровностей, их знакопеременность относительно некоторого среднего уровня и пр.) можно задавать различными законами, используя детерминированное представление или случайную функцию. Второй подход дает описание неровностей опорной поверхности, более близкое к реальным условиям. Первый вариант позволяет использовать сложные нелинейные модели ходовой системы автомобиля. Кроме этого, известны трассы без твердого покрытия, которые хорошо описываются, например, синусоидальным законом.

Преимущества обоих вариантов можно использовать, построив детер-

минированный профиль как результат статистической обработки измерений различных поверхностей одного типа (асфальтобетон, мостовая, грунтовая дорога, пахота и пр.).

Вопросами математической реализации случайного профиля дороги занимались многие ученые. В частности методики описания случайного профиля дороги и их практические реализации разрабатывали *Хачатуров А.А.* [1], *Ротенберг Р.В.* [2], *Светлицкий В.А.* [3] и др. В указанных статьях авторов подробным образом рассмотрена методика описания случайного микропрофиля дороги, которая сводится к определению *корреляционной функции* и задания *белого шума*. Такой подход значительно сложнее, чем детерминированный. Однако он позволяет моделировать практически любые дорожные условия, необходимые для анализа работы ЭМП-амортизатора.

В работе [4] представлена математическая модель ЭМП-амортизатора, позволяющая с учетом его конструктивных параметров исследовать динамические процессы и рабочие свойства при различных воздействиях неровностей дороги. Математическую модель амортизатора необходимо интегрировать в модель колебательной системы автомобиля. Показатели работы ЭМП-амортизатора определяются характеристиками профиля дороги. Таким образом, задав внешнее возмущение от неровностей дороги, можно оценить работу демпфирования ЭМП-амортизатора и степень преобразования механической энергии колебаний в электрическую энергию.

Выбирая рациональные значения ЭМП-амортизатора, приходится решать противоречивые задачи по обеспечению необходимой плавности хода при высокой степени рекуперации энергии. Важнейшими факторами, определяющими режимы работы ЭМП-амортизатора, являются профиль дороги и скорость движения автомобиля.

Целью работы является определение законов изменения параметров профиля дороги и учет особенностей задания возмущения при оценке эффективности работы ЭМП-амортизатора.

В работе рассматриваются три варианта задания профиля опорной поверхности: синусоидальный закон, случайный профиль и единичная неровность.

Задание синусоидального закона изменения неровностей. Закон описывается формулой (рис. 1)

$$q(t) = A \sin \omega \cdot t ,$$

где $q(t)$ – текущее значение высоты неровности; A – амплитуда неровности, м; $\omega = 2\pi V/a$ – круговая частота кинематического возмущения, c^{-1} ; V – скорость движения автомобиля, м/с; a – период неровности, м; t – время.

Задание случайного микропрофиля неровности дороги. Во время

движения автомобиля изменение неровностей дороги носит случайный характер.

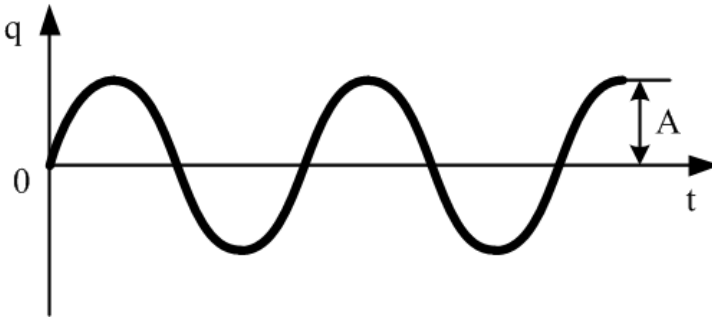


Рис. 1 – Графическое представление изменения неровности дороги по синусоидальному закону.

Случайная функция, описывающая микропрофиль дорожного покрытия, характеризуется корреляционной функцией и *спектральной плотностью*.

Корреляционная функция неровностей дороги описывается аппроксимирующей зависимостью [5]:

$$R(\tau) = D e^{-aV\tau} \cos(\beta V\tau), \tag{1}$$

где D – дисперсия высот неровностей дороги; a, b – коэффициенты корреляции.

Связь между спектральной плотностью случайного процесса и его корреляционной функцией определяется *преобразованием Фурье*:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t) e^{j\omega t} dt. \tag{2}$$

Значения коэффициентов корреляции приведены в табл. 1 [6].

Таблица 1. Значения коэффициентов корреляции

Коэффициент	Вид дороги		
	Асфальтобетон	Мостовая	Грунтовая
a	0,22	0,32	0,47
b	0,44	0,64	0,94

Подставляя (1) в (2), получаем:

$$S(\omega) = D \cdot \left[\frac{2\alpha V (\alpha^2 V^2 + \beta^2 V^2 + \omega^2)}{\omega^4 + 2\omega^2 V^2 (\alpha^2 - \beta^2) + V^4 (\alpha^2 + \beta^2)^2} \right].$$

Движение автомобиля целесообразно рассматривать для 3-х дорог: грунтовой, мощенной булыжником и асфальтобетонной. На рис. 2 приведены

графики корреляционных функций и спектральных плотностей для этих типов дорог при следующих значениях скорости движения автомобиля: $V_1 = 3 \text{ мс}^{-1}$, $V_2 = 6 \text{ мс}^{-1}$, $V_3 = 9 \text{ мс}^{-1}$, $V_4 = 14 \text{ мс}^{-1}$, $V_5 = 17 \text{ мс}^{-1}$. Дисперсия высот неровностей $D = 0,1 \text{ м}^2$.

Далее путём генерации белого шума $\xi(t)$ строится случайная функция $q(t)$, описывающая высоты неровностей, как решение по методу Рунге-Кутты обыкновенного дифференциального уравнения [5]:

$$T_1^2 \ddot{q}(t) + T_2 \dot{q}(t) + q(t) = K_\xi \xi(t), \quad (3)$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени передаточной функции динамического звена, формирующего функцию $q(t)$ при подаче на его вход белого шума $\xi(t)$; K_ξ – коэффициент усиления [6],

$$K_\xi = \sqrt{S(0)}, \quad (4)$$

$S(0)$ – спектральная плотность в нулевой точке, определяемая равенством:

$$S(0) = D \frac{2\alpha}{V(\alpha^2 + \beta^2)}. \quad (5)$$

Постоянные времени для передаточной функции динамического звена определяются соотношениями:

$$T_1^2 = \frac{1}{\omega_p^2} \sqrt{1 - \frac{S(0)}{S(\omega_p)}}; \quad T_2^2 = \frac{2}{\omega_p^2} \sqrt{1 - \frac{S(0)}{S(\omega_p)}} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{S(0)}{S(\omega_p)}} \right], \quad (6)$$

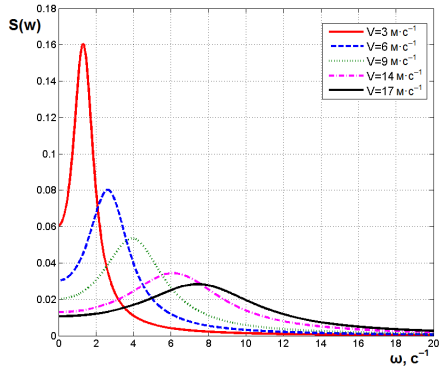
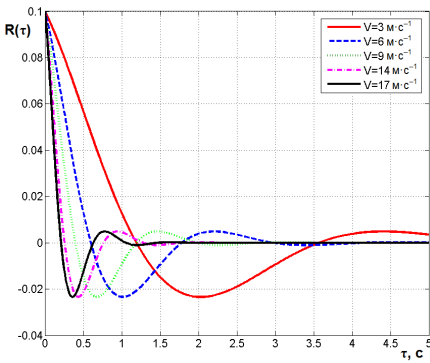
где ω_p – резонансная частота, определяемая по графикам рис. 2; $S(\omega_p)$ – спектральная плотность при резонансе.

Значения постоянных времени и коэффициентов усиления для различных скоростей и типов дорог приведены в табл. 2.

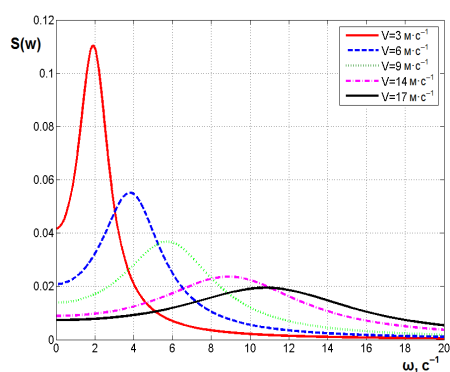
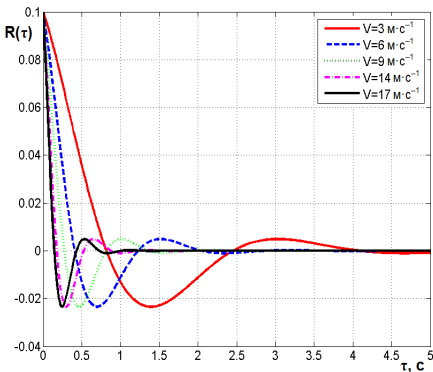
По результатам решения уравнения (3) построена кривая микропрофиля асфальтобетонной дороги (рис. 3).

Построение этой кривой для отрезка $t = 100 \text{ с}$ потребовало работы достаточно мощного компьютера (Intel Core 2 DUO, 2,2 ГГц, 4Gb ОЗУ) в течение 5 часов 42 минут. Введение модели неровности (3) в математическую модель вынужденных колебаний автомобиля вызывает существенный рост времени расчета и снижение его точности, при этом изменение производной профиля приводит к неопределенности решения системы уравнений из-за малого шага и смены ее знака на каждом шаге.

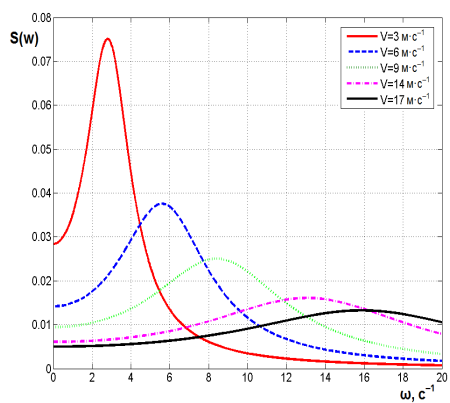
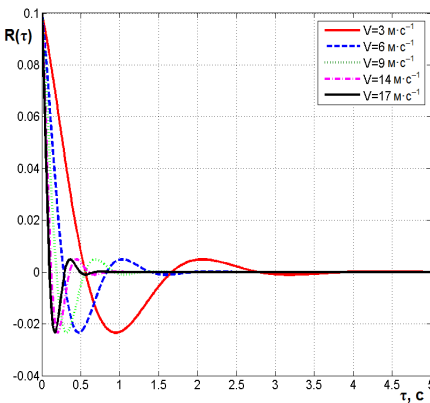
Поэтому для определения параметров движения колебательных масс и показателей работы ЭМП-амортизатора предлагается использовать результаты решения уравнения (3), вводя изменение высоты неровности с дискретностью, близкой по значению шагу интегрирования системы уравнений общей модели.



a



б



в

Рис. 2 – Корреляционные функции и спектральные плотности высот неровностей дорожного покрытия:
a – асфальтобетон; *б* – мостовая; *в* – грунтовая дорога.

Таблица 2. Значения постоянных времени T_1, T_2 и коэффициента усиления K_ξ формирующего динамического звена

Скорость	Вид дороги		
	асфальтобетон	мостовая	грунтовая
3 мс^{-1}	$T_1 = 0,776 \text{ с}$ $T_2 = 0,441 \text{ с}$ $K_\xi = 0,246$	$T_1 = 0,641 \text{ с}$ $T_2 = 0,301 \text{ с}$ $K_\xi = 0,204$	$T_1 = 0,531 \text{ с}$ $T_2 = 0,206 \text{ с}$ $K_\xi = 0,169$
6 мс^{-1}	$T_1 = 0,548 \text{ с}$ $T_2 = 0,219 \text{ с}$ $K_\xi = 0,174$	$T_1 = 0,455 \text{ с}$ $T_2 = 0,151 \text{ с}$ $K_\xi = 0,144$	$T_1 = 0,375 \text{ с}$ $T_2 = 0,103 \text{ с}$ $K_\xi = 0,119$
9 мс^{-1}	$T_1 = 0,448 \text{ с}$ $T_2 = 0,147 \text{ с}$ $K_\xi = 0,142$	$T_1 = 0,371 \text{ с}$ $T_2 = 0,101 \text{ с}$ $K_\xi = 0,118$	$T_1 = 0,306 \text{ с}$ $T_2 = 0,069 \text{ с}$ $K_\xi = 0,097$
14 мс^{-1}	$T_1 = 0,359 \text{ с}$ $T_2 = 0,094 \text{ с}$ $K_\xi = 0,114$	$T_1 = 0,298 \text{ с}$ $T_2 = 0,065 \text{ с}$ $K_\xi = 0,0945$	$T_1 = 0,246 \text{ с}$ $T_2 = 0,044 \text{ с}$ $K_\xi = 0,078$
17 мс^{-1}	$T_1 = 0,326 \text{ с}$ $T_2 = 0,078 \text{ с}$ $K_\xi = 0,1034$	$T_1 = 0,27 \text{ с}$ $T_2 = 0,054 \text{ с}$ $K_\xi = 0,0857$	$T_1 = 0,223 \text{ с}$ $T_2 = 0,036 \text{ с}$ $K_\xi = 0,0708$

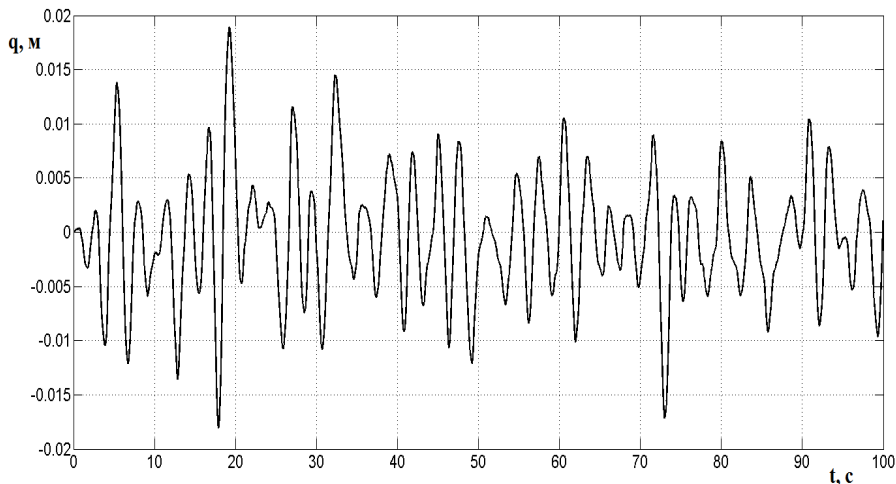


Рис. 3 – Реализация случайного микропрофиля асфальтобетонной дороги.

Задание единичного закона изменения неровности дороги. Единич-

ную неровность (рис. 4) зададим зависимостями

$$\begin{cases} q = 0, & \text{при } t < t_1, t > t_2; \\ q = A, & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \end{cases} \quad (7)$$

где A – высота неровности, м; $t_2 - t_1$ – время прохождения неровности, с.

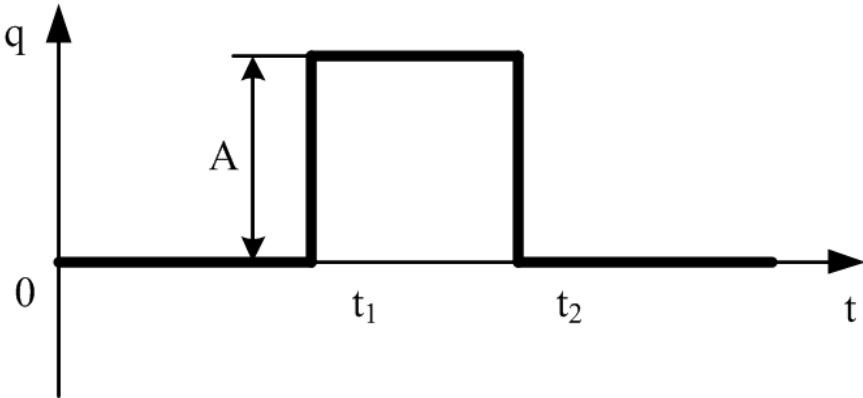


Рис. 4 – Графическое представление единичной неровности дороги.

В процессе решения выбираются следующие параметры неровностей:

1. Для синусоидальной неровности дороги:
 - период повторения неровности $a = (0,5 \dots 4)L$ ($L = 2,2$ м – база машины, $a = (1,1 \dots 8,8)$ м);
 - амплитуда неровности $A = (0,05 \dots 0,15)$ м;
 - скорость движения $V = 3, 6, 9, 14, 17$ м/с;
2. Для случайного микропрофиля неровности дороги:
 - скорость движения $V = 3, 6, 9, 14, 17$ м/с;
 - дисперсия высот неровностей $D = 0,1$ м²;
3. Для единичной неровности дороги:
 - период повторения неровности $a = (0,5 \dots 4)L$, $L = 2,2$ м;
 - амплитуда неровности $A = 0,05 - 0,15$ м;
 - скорость движения V задавалась равной 3, 6, 9, 14, 17 м/с;
 - время начального отрезка $t_{START} = 1$ с;
 - время конечного отрезка t_{END} определялось по формуле

$$t_{END} = t_{START} + \frac{0,5}{V}.$$

– продольный размер неровности определялся, исходя из реальных дорожных условий движения автомобилей и скорости движения.

Выводы. Рассмотренные варианты задания неровностей охватывают широкий спектр реальных опорных поверхностей. Представленные математические реализации законов изменения неровностей целесообразно использовать при моделировании вынужденных колебаний автомобиля, оснащенного ЭМП-амортизатором, а также для оценки показателей работы этого амортизатора как устройства демпфирования колебаний и преобразования механической энергии в электрическую.

Список литературы: 1. *Хачатуров А.А., Афанасьев В.Л., Васильев В.С. и др.* Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель. Под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 536 с. 2. *Ротенберг Р.В.* Подвеска автомобиля. Изд. 3-е, переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с. 3. *Светлицкий В.А.* Случайные колебания механических систем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с. 4. *Сергиенко А.Н.* Математическая модель электромеханического преобразователя для электроамортизатора транспортного средства / А.Н. Сергиенко, Б.Г. Любарский, Н.Е. Сергиенко // *Электротехника і електромеханіка*. Науково-практичний журнал. – 2012. – №6. – С. 61-65. 5. *Мазманишвили А.С.* Построение случайных поверхностей движения объектов бронетанковой техники. / А.С. Мазманишвили, Т.Е. Александрова. Системы вооружения и военная техника. – Харьков: ХУПС, 2012. – № 1(29). – С. 68-71. 6. *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.

Поступила в редколлегию 08.05.2013

УДК 629.027, 621.313, 629.069, 629.3.014

Методика задания неровностей профиля дороги при моделировании подвески автомобиля с рекуператором энергии колебаний / А.Н. Сергиенко, Н.Г. Медведев, Б.Г. Любарский, С.Н. Беляев, С.В. Шушляпин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №37 (1010). – С. 185 – 192. Бібліогр.: 6 назв.

Запропоновано методику і математична реалізація формування зовнішніх впливів на підвіску автомобіля з рекуператором енергії коливань при моделюванні руху по нерівностях із заданими законами зміни профілю дороги.

Ключові слова: методика, нерівність, профіль, підвіска, автомобіль, рекуператор, синусоїдальний закон, випадковий мікропрофіль, одинична нерівність.

The technique and mathematical implementation of external influences on the formation of car suspension with heat recovery energy vibrations in the simulation on roughness's with specified laws change the profile of the road.

Key words: methods, roughness, profile, suspension, car, heat exchanger, the sine law, random microprofile, single roughness.