

УДК 629.331

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ МИКРОПРОФИЛЯ ДОРОГИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

С. М. Огороднов, к. т. н., доц. / С. И. Малев, асп.

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Известно, что движение транспортных средств (ТС, автомобиль) происходит по дорогам со случайными характеристиками микропрофиля. Формируемое микропрофилем возмущение действует на колёса, определяет характер колебаний масс ТС и существенно влияет на его основные эксплуатационные характеристики (тягово-скоростные, топливно-экономические, плавность движения, устойчивость, управляемость и др.).

Автомобиль является сложной колебательной системой, его подрессоренные и непрорессоренные массы могут перемещаться в горизонтальной и вертикальной плоскости, совершать угловые колебания. Аналитические методы исследования динамики колебательной системы предполагают использование расчётных (математических) моделей, учитывающих конструктивные особенности ТС. Сигналом входа для математической модели автомобиля является возмущение микропрофиля $q(t)$, передаваемое на колесо в точке контакта с опорной поверхностью. Вид сигнала входа и способ его формирования зависит от типа математической модели.

Основными элементами, обеспечивающими приемлемый уровень силовых и вибрационных воздействий на ТС со стороны дороги, являются подвеска и шины. При проектировании подвески учитываются требования нормативных документов [1, 2] и решается многофакторная задача оптимизации параметров системы виброзащиты (подрессорирования).

Выбор расчётной модели ТС основан на известных допущениях [3, 4], касающихся независимости продольных и поперечных колебаний автомобиля. В силу особенностей поверхностей автомобильных дорог амплитуды поперечных колебаний ТС существенно меньше амплитуд продольных колебаний, поэтому в практике аналитических исследований считается допустимым использование плоских расчётных моделей, например показанной на рис. 1. Модель состоит из подрессоренной массы M , непрорессоренных масс передней m_1 и задней m_2 подвесок,

упругих C_{11} , C_{21} и демпфирующих k_{11} , k_{12} элементов подвесок. Влияние шины на характер колебательных процессов учитывается с помощью приведённых значений жёсткости C_{12} , C_{22} и коэффициентов демпфирования k_{21} , k_{22} . Воздействие микропрофиля на колёса задней оси формируют с учётом времени запаздывания τ :

$$\tau = (a + b) / v, \quad (1)$$

где τ — время запаздывания воздействия на задние колёса; $(a + b)$ — колёсная база; v — скорость автомобиля.

В микропрофиле содержатся неровности различной длины и высоты, формирующие возмущения разной частоты и мощности. Неровности (ординаты) микропрофиля являются случайной величиной, и представить закон их изменения в виде математической функции — сложная задача. Для формирования возмущения, действующего на колёса автомобиля, могут быть использованы основные характеристики случайных процессов: корреляционная функция и спектральная плотность [3, 4, 5, 6]. Случайные колебательные процессы, исследуемые при проведении натурных испытаний автомобиля или моделируемые

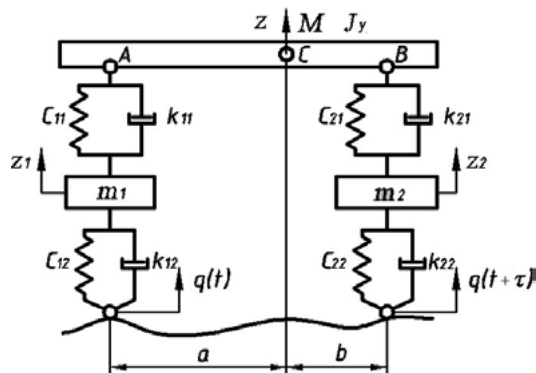


Рисунок 1. Трёхмассовая расчётная модель автомобиля

аналитическими методами, рассматриваются на некоторых промежутках (выборочных реализациях) времени. Спектральные функции этих процессов могут быть получены при обработке аналоговых непрерывных или дискретных сигналов с помощью анализаторов спектра или математических преобразований, например Фурье.

Известные способы измерения ординат микропрофиля [3] сводятся к построению их зависимости от расстояния измерительного участка. Основное отличие этого случайного процесса заключается в том, что частотный состав генерируемого на его основе возмущения меняется при изменении скорости движения ТС. Спектральная плотность микропрофиля дорог по этой причине задаётся функцией дисперсий от путевой частоты дороги, связанной с частотой воздействия дорожных неровностей известными выражениями [3]:

$$\theta = \omega / v = 2\pi f / v = 2\pi / s, \quad (2)$$

где θ — путевая частота; ω — частота воздействия дорожных неровностей; f — циклическая частота; v — скорость автомобиля; s — длина неровности.

Ряд задач динамики системы поддрессирования не требует сложной формы представления возмущения микропрофиля.

Простейшие способы моделирования возмущения микропрофиля дороги [5, 6] основаны на детерминистических представлениях и реализуются с использованием простых аналитических зависимостей. При формировании возмущения предполагают, что шина сглаживает очертания неровностей микропрофиля, а опорная поверхность имеет форму синусоидального профиля, симметричного относительно среднего значения. Этим способом моделируется возмущение отдельной единичной неровности дороги при исследовании переходных процессов или в условиях экстремальных нагрузок, например вызывающих пробой подвески или работу амортизатора в клапанном режиме.

Аналитическое выражение функции микропрофиля для единичной неровности задаётся в виде

$$q_i = q_0 (1 - \cos 2\pi / S_0 \cdot s_i) = q_0 (1 - \cos 2\pi v / S_0 \cdot t_i), \quad (3)$$

где S_0 — длина неровности (волны); s_i — текущее значение длины неровности; q_0 — амплитуда синусоиды; q_i — текущее значение высоты неровности; v — скорость движения автомобиля; t_i — текущее время.

Выражение (3) может быть использовано и для формирования непрерывного гармонического возмущения, например при построении амплитудно-частотной характеристики подвески. Являясь одним из простейших способов представления неровностей микропрофиля, выражение (3) не учитывает важной

особенности микропрофиля дорог, заключающейся в корреляции длины (частоты возмущения) и высоты неровностей.

Аналитические исследования динамики колебательных систем ТС в различных условиях движения предполагают моделирование возмущения микропрофиля. Автомобильные дороги в этом случае представляют поверхностями со случайным распределением высот (ординат) неровностей q . Использование массива экспериментально определённых ординат неровностей как функции расстояния в качестве исходных данных для формирования возмущения микропрофиля затруднительно в силу сложности выполнения эксперимента и практического отсутствия данных.

В научной литературе и нормативных документах приведены сведения о значимых характеристиках микропрофиля — корреляционных функциях и спектральных характеристиках различных типов дорог [3, 6, 7]. При моделировании возмущения микропрофиля методами генерирования стационарных случайных процессов с заданными статистическими характеристиками в качестве исходных данных в ряде случаев используются корреляционные функции. Методы основаны на использовании различных вычислительных алгоритмов, обеспечивающих расчёт реализаций дискретных случайных процессов, и отличаются точностью воспроизведения.

Генерирование случайного возмущения микропрофиля дороги в виде числовой последовательности [4] обеспечивает воспроизведение дискретной реализации случайной величины, удовлетворяющей свойствам стационарности, эргодичности, со значениями, распределёнными по нормальному закону, и имеющей корреляционную функцию экспоненциально-косинусного вида. Приближение характеристик моделируемого микропрофиля к его реальному виду обеспечивается корреляцией высот и длин неровностей дороги:

$$R(\tau) = R(0)e^{-\omega_1|\tau|} \cos \omega_2 \tau \quad (4)$$

где $R(\tau)$ — корреляционная функция микропрофиля дороги; $R(0) = \sigma^2$ — дисперсия микропрофиля дороги; v — скорость движения; ω_1, ω_2 — параметры корреляционной функции, характеризующие тип микропрофиля дороги, $\omega_1 = \alpha v, \omega_2 = \beta v$ (например, для булыжной дороги: $\alpha = 0,32, \beta = 0,64$ [1/м], для асфальтовой: $\alpha = 0,22, \beta = 0,44$).

Алгоритм расчёта ординат микропрофиля дороги состоит из нескольких операций: формирования псевдослучайной равномерно распределённой числовой последовательности, формирования из равномерно распределённой числовой последовательности нормально распределённой, получения псевдослучайной число-

вой последовательности с заданными особенностями спектра из нормально распределённой числовой последовательности. Формирование псевдослучайной числовой последовательности с равномерным распределением в интервале $\{0, 1\}$ реализуется стандартным генератором или с помощью рекуррентной процедуры:

$$X_{k+1} = \{(X_k + \pi)5\}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

В качестве начального числа X_0 можно выбрать любую десятичную дробь. В качестве рекуррентной процедуры можно взять и другую трансцендентную операцию.

Формирование нормально распределённой последовательности из равномерно распределённой осуществляют методом нелинейного преобразования, обратной функции распределения. Нормально распределённая случайная величина формируется путём преобразования системы двух независимых равномерно распределённых в интервале $\{0, 1\}$ случайных чисел X_k и X_{k+1} :

$$x[n] = \sqrt{-2\log(X_k)} \sin(2\pi X_{k+1}). \quad (6)$$

Полученная таким способом случайная величина имеет равное нулю математическое ожидание и дисперсию, равную σ_2 . Для получения нормально распределённой числовой последовательности $\xi[n]$ с корреляционной функцией заданного типа используют моделирующий алгоритм, реализуемый в соответствии с видом корреляционной функции.

Использование метода ограничено несколькими причинами. Корреляционные функции дорог имеют особенности [5, 6], в результате устанавливающие высокие требования к точности вычисления. Незначительная ошибка в вычислении корреляционной функции может привести к большим погрешностям при определении спектральной плотности микропрофиля. Кроме того, информация о видах и параметрах корреляционных функций микропрофиля дорог ограничена.

Генерирование случайного возмущения микропрофиля дороги методом формирующего фильтра [8, 9] позволяет реализовать задачу формирования функции микропрофиля как случайного процесса по спектральной плотности его дисперсий. Наиболее значимым нормативным документом, классифицирующим дорожные поверхности, можно считать [7]. В соответствии с классификацией дорожных поверхностей по ISO 8608 профиль дорог характеризуется спектральной плотностью вида

$$\Phi(\Omega) = \Phi(\Omega_0) (\Omega / \Omega_0)^{-\omega}; \quad \Omega = 2\pi / \lambda, \quad (7)$$

где $\Phi(\Omega)$ — спектральная плотность микропрофиля; $\Phi(\Omega_0)$ — спектральная плотность при $\Omega_0 = 1$ рад/м; Ω — волновая (путевая) частота; ω — волнистость (волнообразность), $\omega = 2$; λ — длина волны.

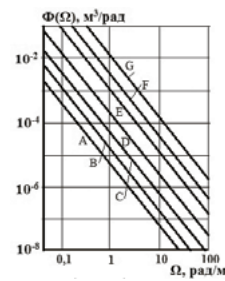


Рисунок 2. Классификация дорожных поверхностей по ISO 8608: A, B, C, D, E, F, G — класс дороги

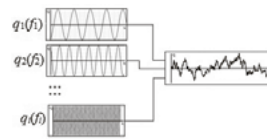


Рисунок 3. Полигармонический метод формирования возмущения микропрофиля

На рис. 2 представлена графическая интерпретация классификации дорожных поверхностей [7].

Для получения дискретных значений ординат микропрофиля как функции времени используется формирующий фильтр. Формирующий фильтр представляет динамическую систему, преобразующую случайный процесс $\omega(t)$ вида «белый шум» в случайный процесс $z_R(t)$ с заданными статистическими характеристиками. Вид (форма) передаточной функции формирующего фильтра определяется в соответствии с аппроксимацией спектральной плотности микропрофиля. Передаточной функции формирующего фильтра соответствует дифференциальное уравнение первого порядка, решение которого может быть выполнено методом блочно-имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB/Simulink. Параметры спектральных плотностей микропрофиля приведены в соответствии с «классом» дороги (очень хорошая, хорошая, средняя, изношенная, сильно изношенная). Несомненное достоинство метода компенсируется неопределённостью свойств дороги за счёт большой разницы уровней неровностей и параметров спектральных плотностей высот микропрофиля в пределах каждого класса.

Моделирование непрерывной функции случайного микропрофиля с помощью ряда или интеграла Фурье описывается в работе [4] как теоретически возможное, если случайная функция имеет ограниченную вариацию и непрерывна. Моделирование случайного возмущения микропрофиля дороги в виде интеграла на практике невозможно.

Спектральная плотность микропрофиля S_q , как и любого случайного процесса, характеризует спектральный (частотный) состав процесса и представляет собой частотную характеристику дисперсий или среднеквадратических значений амплитуд гармоник (амплитудный спектр).

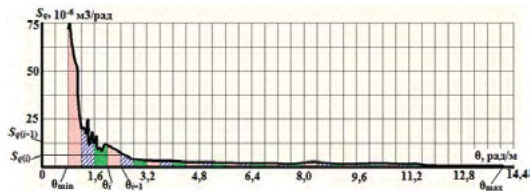


Рисунок 4. Спектральная плотность булыжной дороги ровного замощения

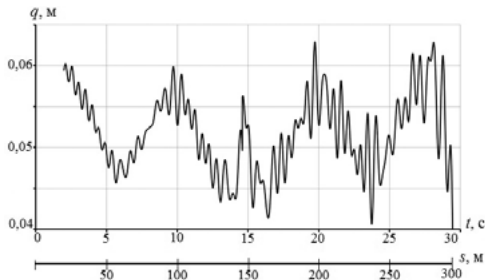


Рисунок 5. Модель микропрофиля булыжной дороги ровного замощения, $v = 10$ м/с

Моделирование микропрофиля дороги суммой гармонических функций возможно, если амплитуда и частота каждой гармоники определяются в соответствии с заданной характеристикой спектральной плотности микропрофиля. Известно, что площадь под кривой спектральной плотности эквивалентна дисперсии случайного процесса и может рассматриваться как сумма дисперсий выделенных частотных интервалов. При определённых допущениях аппроксимация микропрофиля как случайного процесса возможна в виде ограниченной суммы гармонических составляющих с определёнными частотами и амплитудами (полигармонический метод) (рис. 3). Для реализации метода частотный диапазон $(\theta_{min}, \theta_{max})$ спектральной характеристики (рис. 4) разбивается на отрезки — равные или соответствующие октавным или 1/3-октавным интервалам. Дисперсия в пределах каждого из выделенных интервалов определяется как площадь, ограниченная кривой функции S_q . Без большой погрешности участок кривой спектральной плотности в пределах выделенного интервала можно считать линейным. Площадь выделенной части спектральной характеристики равна дисперсии D_j гармонической составляющей с путевой частотой θ_j :

$$D_j = (S_{q(i)} + S_{q(i+1)}) / 2(\theta_{i+1} - \theta_i); \theta_j = (\theta_i + \theta_{i+1}) / 2, \quad (8)$$

где D_j — дисперсия спектральной плотности интервала частоты $\{\theta_i, \theta_{i+1}\}$; $S_{q(i+1)}, S_{q(i)}$ — значения спектральной плотности, соответствующие граничным значениям интервала; θ_j — среднее значение путевой частоты интервала $\{\theta_i, \theta_{i+1}\}$.

С учётом выражения (2) частотный состав возмущения определяется выражением

Таблица 1. Массив исходных данных

θ_1	f_1	$S_{q(1)}$	D_1	q_1	A_{q1}
θ_2	f_2	$S_{q(2)}$	D_2	q_2	A_{q2}
...
θ_j	f_j	$S_{q(j)}$	$D_{(j)}$	q_j	A_{qj}
θ_{j+1}	f_{j+1}	$S_{q(j+1)}$	$D_{(j+1)}$	q_{j+1}	A_{qj+1}
...
θ_{n-1}	f_{n-1}	$S_{q(n-1)}$	$D_{(n)}$	q_n	A_{qn}
θ_n	f_n	$S_{q(n)}$	—	—	—

$$f_j = (\theta_i + \theta_{i+1}) v / 4\pi. \quad (9)$$

Среднеквадратическое значение ординат микропрофиля и амплитуда гармоники для заданного интервала путевой частоты равны

$$q_j = \sqrt{D_j}; A_{qj} = 1,43q_j \quad (10)$$

где q_j — среднеквадратическое значение ординат микропрофиля для заданного интервала путевой частоты; A_{qj} — амплитуда гармонической функции.

В результате расчёта параметров гармонических составляющих формируется массив исходных данных при заданной скорости движения v (табл. 1).

Моделирование микропрофиля дороги реализовано с помощью Simulink-модели. Подробное описание модели не приводится, так как её структура не является единственным способом решения поставленной задачи. Время моделирования возмущения должно быть достаточным для формирования стационарного процесса исследуемых параметров колебательной системы. Стационарность исследуемых процессов определяется опытным путём, в результате оценки текущих среднеквадратических значений параметров. Для трёхмассовой модели автомобиля (рис. 1) и при заданном типе возмущения микропрофиля случайный процесс изменения вертикальных ускорений над осью переднего колеса становится практически стационарным по истечении 40... 60 секунд. Стационарность процесса установлена по значению коэффициента вариации, изменяющегося не более чем на 10 % при увеличении размера реализации.

На рис. 5 показана модель микропрофиля булыжной дороги ровного замощения, реализованная в соответствии с описанным методом.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0006 от 12 февраля 2013 года (Постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218).

Экспериментальные исследования выполнены с использованием измерительного оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».