

УДК 629.33

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОДВЕСКИ**¹Малеев С.И., ¹Огороднов С.М., ²Степанов Е.В., ³Пинчин А.В.**¹*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, e-mail: sergmaleev91@mail.ru;*²*ОАО НПО «Гидромаш», Нижний Новгород, e-mail: evgeniystepanov1991@yandex.ru;*³*ООО НПФ «Диагностика и сертификация транспорта», Нижний Новгород, e-mail: pinchinav96@gmail.com*

Высокая конкуренция и рост требований, предъявляемых потребителями заставляет производителей уделять особое внимание комфортабельности транспортных средств, в частности показателям плавности хода. Требуемый уровень свойств современного автомобиля может быть достигнут только при совместном учете влияния различных и, иногда, противоречивых условий. Несмотря на то, что сложившиеся способы разработки транспортных средств, основанные на многолетнем опыте и традициях, достаточно хорошо себя зарекомендовали, процесс создания нового автомобиля требует большого количества временных и материальных ресурсов и позволяет лишь приблизительно оценить свойства проектируемого транспортного средства. Повысить эффективность проектирования автомобилей можно за счет применения математического аппарата и специализированного программного обеспечения, разработанного для решения конкретных инженерных задач. Вместе с тем при использовании компьютерных моделей значительно снижается стоимость проектирования, так как уменьшается количество экспериментальных работ, связанных с испытаниями и доводкой автомобиля. В статье рассмотрены различные способы формирования возмущения от дорожной поверхности, а также приведена блок-схема и результаты компьютерного моделирования, связанные с формированием возмущения. Помимо этого, показаны результаты моделирования динамики подвески в среде Matlab/Simulink.

Ключевые слова: угол развала, шина, колесо, качение, скольжение, возмущение, микропрофиль, дорога

ANALYTICAL STUDY OF THE DYNAMICS OF THE SUSPENSION BRACKET**¹Maleev S.I., ¹Ogorodnov S.M., ²Stepanov E.V., ³Pinchin A.V.**¹*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, e-mail: sergmaleev91@mail.ru;*²*JSC SPA «GidroMash», Nizhny Novgorod, e-mail: evgeniystepanov1991@yandex.ru;*³*LLC «SPF «Diagnostics and certification of transport», Nizhny Novgorod, e-mail: pinchinav96@gmail.com*

High competition and growing demands from consumers make manufacturers pay special attention to the comfort of vehicles, in particular indicators of smooth running. The required level of properties of a modern car can be achieved only by taking into account the influence of different and sometimes contradictory conditions. Despite the fact that the existing methods of development of vehicles, based on years of experience and tradition, quite well established, the process of creating a new car requires a large amount of time and material resources and allows only to estimate the properties of the designed vehicle. To increase the efficiency of car design is possible through the use of mathematical apparatus and specialized software designed to solve specific engineering problems. At the same time, when using computer models, it significantly reduces the cost of design, as the number of experimental works associated with testing and debugging of the car decreases. The article describes various ways of forming perturbations from the road surface, as well as the block diagram and the results of computer simulation associated with the formation of perturbations. By passing this, the results of simulation of suspension dynamics in Matlab/Simulink environment are shown.

Keywords: camber angle, tire, wheel, rolling, glide, perturbation, microprofile, road

Подвеска является одним из наиболее ответственных узлов автомобиля, определяющим совокупность эксплуатационных свойств – плавность движения, устойчивость и управляемость, среднюю и максимальную скорость, долговечность ряда деталей и узлов. Вместе с шинами подвеска является основным конструктивным элементом, защищающим автомобиль от динамических воздействий со стороны дороги до уровня, приемлемого в соответствии с требованиями нормативных документов и прочности элементов конструкции. Правильно спроектированная подвеска позволяет снизить расходы на техническое обслуживание и ремонт, расширить эксплуатационные возможности автомобиля.

Вопросы проектирования подвесок автомобилей изучены достаточно подробно, однако выбор оптимального конструктивного варианта с учетом многочисленных факторов, влияющих не только на отдельные показатели, но и в целом на эксплуатационные свойства автомобиля, во многих случаях затруднителен.

Особенностью практических методов проектирования является их узкая направленность, позволяющая решать отдельные задачи без учета последствий принятых решений на достаточно широкий спектр эксплуатационных свойств автомобиля. Для принятия эффективных конструктивных решений необходима разработка методики проектирования подвески, которая

будет обеспечивать возможность многокритериальной оптимизации параметров и характеристик её функциональных элементов и обеспечивать очевидность принятых решений в отношении их влияния на основные эксплуатационные свойства автомобиля, определяющие безопасность и потребительскую привлекательность автомобиля.

Материалы и методы исследования

На эксплуатационные свойства автомобиля существенно влияют следующие параметры и характеристики подвески.

Жесткость подвески с механическим упругим элементом для многих конструктивных вариантов остается постоянной или меняется дискретно при изменении нагрузки, практически мало влияя на показатели плавности движения.

Демпфирующие свойства амортизатора существенно влияют на показатели плавности движения автомобиля. Обеспечивая гашение относительных колебаний поддресоренных и неподдресоренных масс автомобиля, амортизатор, жестко связанный с несущей системой и неподдресоренной частью автомобиля, способствует передаче дополнительного усилия на кузов.

При проектировании подвески целесообразно оценить возможные интервалы изменения k и степень влияния на величину оптимального значения k_0 параметров: приведенной жесткости подвески – C_n , скорости движения автомобиля – V_a , массы автомобиля – M и средних квадратичных значений неровностей микропрофиля – σ_q .

Относительные перемещения неподдресоренных масс опосредовано влияют на траекторную и курсовую устойчивость автомобиля. Учитывая, что величина нормальной реакции на колесо определяет силу трения (сцепления) колеса с дорогой и зависит от деформации упругого элемента и относительной скорости перемещения поддресоренной и неподдресоренной масс, целесообразно оценить влияние на характер контакта колеса с дорогой характеристик упругих элементов и амортизаторов.

Кинематические характеристики подвески полностью определяются конструктивными особенностями направляющих устройств подвесок. При моделировании динамики автомобиля должно быть учтено влияние деформации упругого элемента подвески на углы установки колес и на колею колес. Динамический анализ кинематических характеристик подвески при моделировании в реальных дорожных условиях позволяет учесть дополнительные факторы и нагрузки, которые могут влиять на показатели устойчивости курсового движения и управляемость автомобиля при экстремальных режимах, например связанных с экстренным торможением или резким поворотом.

Устойчивость подвески как динамической системы может существенно влиять на курсовую устойчивость автомобиля. При неудачном сочетании параметров (масс, размеров, жесткости, демпфирования, моментов инерции) динамической системы, состоящей из подвески в совокупности с поворотным узлом и колесом, в определенных интервалах скоростей движения, в результате управляющего воздействия на колеса возможны их колебания относительно оси поворота, называемые автоколебаниями.

В общем случае, для формирования возмущения от дорожной поверхности необходимо учитывать, что возмущение (входной сигнал) определяется распределением ординат микропрофиля по правой $q_n(t)$ и левой $q_l(t)$ колеям поверхности движения, а расчетная модель автомобиля должна иметь количество входов, соответствующих количеству колес (или пар колес). Для решения широкого круга задач динамики автомобиля могут быть использованы пространственные модели разной степени сложности, например математическая модель, расчетная схема которой представлена на рис. 1. Пространственная модель автомобиля состоит из пяти твердых тел: несущей системы (поддресоренная масса, кузов) и четырех колес (неподдресоренная масса). Кузов соединен с колесами вязко-упругими опорами, обладающими линейными или нелинейными характеристиками. Колеса (шины) автомобиля обладают вязко-упругими свойствами, неподдресоренные массы передней и задней подвесок отнесены к соответствующим колесам. Подобные модели используются для исследования динамики движения колесных машин по опорным поверхностям в прямолинейном или криволинейном движениях [1].

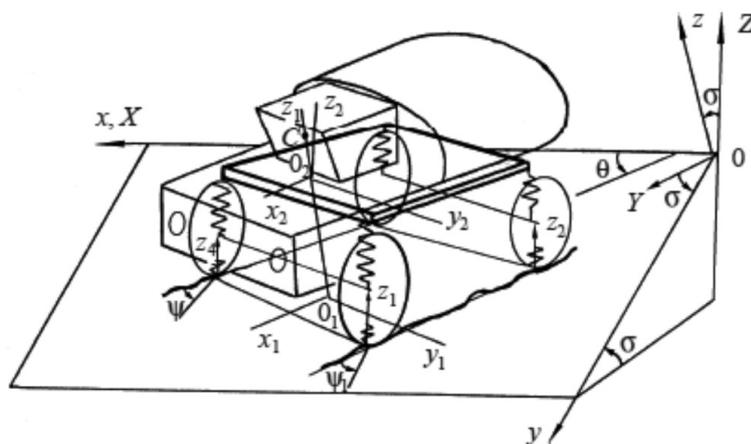


Рис. 1. Пространственная математическая модель колесной машины

При исследовании динамики подвески в качестве считаем, что действующие возмущения в основном формируются характером случайного распределения высот неровностей « q » микропрофиля поверхности дороги. Свойства микропрофиля дороги исчерпывающе описываются известными статистическими параметрами и характеристиками – средним значением ординат m_{cp} , средним квадратическим отклонением q_q или дисперсией ординат D_q и спектральной плотностью дисперсий $S_q(\theta)$.

Исчерпывающей характеристикой любого случайного процесса является спектральная плотность дисперсий. Общепринятыми методами представления неровностей микропрофиля дорожной поверхности как у нас в стране, так и за рубежом являются аппроксимации спектральной плотности дисперсий, характеризующие плотность распределения дисперсии процесса по частотам, содержащую одновременно информацию о частотном и амплитудном составе случайного процесса [2].

В микропрофиле дороги содержатся неровности различной длины, которые могут вызывать возмущения разной частоты. Указанные параметры связаны соотношениями

$$T_{\omega} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{s}{v}, \quad (1)$$

где T_{ω} – время проезда неровности, с; ω – частота воздействия дорожных неровностей, рад/с; v – скорость автомобиля, м/с; s – длина неровности, м.

В практике расчетов целесообразно выбирать интервал длин неровностей (ограничивать максимальную длину неровности) в зависимости от установленного частотного диапазона исследуемого процесса и скорости движения автомобиля. Наиболее длинными неровностями s_{max} можно считать такие, при проезде которых частота воздействия ω_{smax} примерно равна

$$\omega_{smax} = 0,5\omega_0, \quad (2)$$

где ω_0 – собственная минимальная частота колебаний поддресоренной массы.

С учетом выражения (1) циклическая частота колебаний равна

$$f = \frac{v}{s}, \quad (3)$$

где f – циклическая частота, $\omega = 2\pi f$ [с⁻¹].

Например, при собственной минимальной частоте подвески $f_0 = 1$ Гц, проезд наиболее длинной неровности s_{max} должен вызывать возмущение частотой не менее 0,5 Гц. При этом для скорости движения равной 100 км/ч (27,8 м/с) и минимальной длине неровностей 0,4 м, максимальная длина неровности, учитываемой при исследовании динамической системы, должна быть не менее $s = 27,8/0,5 = 55,6$ м, а верхняя граница частотного диапазона возмущений не менее $f_{max} = 27,8/0,4 = 69,5$ Гц (при исследовании с помощью трехоктавных фильтров 63,5 или 80 Гц).

При аналитических исследованиях динамических систем используют понятия частота по времени и частоте дороги (путевая частота), связанные зависимостями

$$\theta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2\pi}{s}, \quad (4)$$

где θ – путевая частота [м⁻¹].

С учетом выражения (4) циклическая частота процесса равна

$$f = \frac{v}{s}, \quad (5)$$

где f – циклическая частота $\omega = 2\pi f$ [с⁻¹].

При расчетах приходится переходить от случайной функции $q(x)$ к случайному процессу $q(t)$ и от спектральной плотности дисперсии путевой частоты $S_q(\theta)$ к спектральной плотности частоты воздействия $S_q(\omega)$, связанных зависимостью

$$S_q(\theta) = v S_q(\omega). \quad (6)$$

Таким образом, для перехода от зависимости $S_q(\theta)$ к $S_q(\omega)$ необходимо изменить масштабы по осям абсцисс и ординат так, чтобы выполнялось соотношение

$$S_q(\omega) = \frac{1}{v} S_q(\theta). \quad (7)$$

Такая замена не влияет на величину дисперсии, определяемую выражением

$$q_c^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_q(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_q \theta d\theta. \quad (8)$$

Ординаты микропрофиля находятся в относительно узком интервале значений, определяемом функцией распределения.

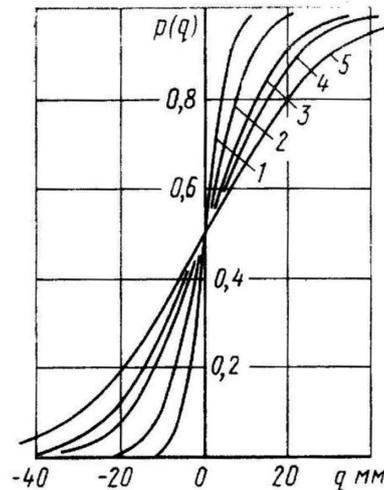


Рис. 2. Функции распределения ординат микропрофиля дорог: 1, 2 – цементобетонных, 3 – асфальтобетонной, 4 – грунтовой, 5 – булыжной

На рис. 2 показаны функции распределения ординат микропрофиля некоторых дорожных поверхностей [3]. Между высотой неровности и её длиной существует статистическая взаимосвязь. Средние квадратические значения ординат микропрофиля для цементно- и асфальто-бетонных покрытий удовлетворительного качества составляют 0,45–1,4 см², для булыжных покрытий в зависимости от вида 2,5–3,3 см². Функции распределения ординат микропрофиля поверхностей автомобильных дорог позволяют

сделать вывод о том, что с вероятностью 90 % среднее квадратическое значение ординат микропрофиля не превышает 12 мм для цементобетонных дорог и 18 мм для асфальтовых, а ординаты микропрофиля находятся в достаточно узких интервалах значений. Вид функций распределения соответствует нормальному закону, в результате может быть использовано известное правило определения практически возможного значения ординаты микропрофиля (вероятность превышения которого составляет не более 0,3 %).

$$q_{\max} \approx 3q_c. \quad (9)$$

При расчетах колебаний автомобиля необходимо моделировать возмущение, создаваемое микропрофилем дороги. Основными способами математического описания параметров микропрофиля дороги являются:

– аналитическое выражение функции единичных неровностей и отдельных гармонических составляющих микропрофиля;

– задание экспериментально определенных ординат неровностей в зависимости от длины пути в виде массива данных;

– генерирование случайного микропрофиля поверхности дороги по статистическим характеристикам.

В настоящее время разработан ряд методов моделирования стационарных случайных процессов с заданными статистическими характеристиками: математическим ожиданием, дисперсией, корреляционной функцией или спектральной плотностью. Методы основаны на построении соответствующего вычислительного алгоритма, обеспечивающего получение реализаций случайных процессов. Методы могут быть классифицированы по степени точности [4]:

– точные методы (метод рекуррентных алгоритмов, дискретизации);

– приближенные (метод формирующего фильтра, скользящего суммирования).

Простейшие способы моделирования возмущения дороги основаны на детерминистических представлениях и реализуются с использованием аналитических зависимостей. Считается, что шина сглаживает очертания неровностей, что позволяет принять допущение о синусоидальной форме профиля неровности, симметричном относительно её среднего значения. Такой способ моделирования возмущения целесообразно использовать для исследования динамики автомобиля с помощью простых математических моделей, обеспечивающих удовлетворительную оценку динамических характеристик в переходном и установившемся режимах на начальных этапах проектной работы. Способ может быть использован и для формирования непрерывного гармонического возмущения.

Моделирование случайного возмущения дороги в виде числовой последовательности предполагает, что в общем случае микропрофиль дороги представляет случайную функцию, подчиняющуюся распределению Гаусса. Генерирование микропрофиля дороги [5] ставит целью получение реализации случайного процесса в виде числовой последовательности ординат функции, удовлетворяющей свойствам стационарности, эргодичности, распределенных по нормальному закону и имеющую корреляционную функцию экспоненциально-косинусного вида.

Алгоритм получения ординат микропрофиля дороги состоит из операций: формирование псевдослучайной равномерно распределенной числовой последовательности, формирование из равномерной

числовой последовательности нормально распределенной, получение псевдослучайной числовой последовательности с заданными особенностями спектра из нормально распределенной числовой последовательности. Для получения псевдослучайной числовой последовательности с равномерным распределением в заданном интервале используется стандартный генератор или рекуррентная процедура.

Полученная таким способом случайная величина будет иметь равное нулю математическое ожидание и дисперсию, равную σ^2 . Для получения нормально-распределенной числовой последовательности $\xi[n]$ с корреляционной функцией заданного типа используют моделирующий алгоритм, зависящий от вида корреляционной функции, реализуемый в соответствии с определенным алгоритмом. Моделирование случайного возмущения микропрофиля дороги рядом Фурье основано на предположении, что случайная функция $q(s)$, имеющая ограниченную вариацию и непрерывная, может быть представлена в виде суммы тригонометрического ряда Фурье, состоящего из бесконечного множества гармонических составляющих функций. Ряд, состоящий из синусоидальных и косинусоидальных составляющих функций с амплитудами θ_{1n} и θ_{2n} дает наименьшую ошибку и является наилучшим приближением к функции $q(s)$. С увеличением числа суммируемых членов ряда « n » точность представления функции увеличивается. Ряды Фурье позволяют использовать амплитудные спектральные диаграммы для определения дисперсии D_q . Использование рядов Фурье целесообразно для аналитического представления обособленных и групповых неровностей произвольной формы. Моделирование случайного возмущения в виде интеграла на практике возможно только при определенных допущениях в отношении количества гармонических составляющих случайного процесса, которое не может быть бесконечным. Генерирование случайного возмущения микропрофиля дороги методом формирующего фильтра основано на возможности формирования функции микропрофиля как случайного процесса по спектральной плотности его дисперсий. Наиболее значимым нормативным документом, классифицирующим дорожные поверхности, можно считать ISO 8608 [5]. Аппроксимации спектральной плотности дорожного воздействия зависят от угловой частоты процесса $\Psi(\omega)$. Для получения дискретных значений высоты микропрофиля в зависимости от времени при установленном шаге дискретизации, необходимо построить формирующий фильтр – динамическую систему, преобразующую случайный процесс $\omega(t)$ вида «белого шума» в случайный процесс $z_R(t)$ с заданными статистическими характеристиками. Вид (форма) передаточной функции формирующего фильтра определяется в соответствии с аппроксимацией спектральной плотности профиля дорожного полотна.

Результаты исследования и их обсуждение

Реализация вышеуказанной задачи выполняется методом блочного имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB/Simulink. На рис. 3 приведена блок-схема разработанной модели. Блок Band-Limited White Noise (генератор белого шума) служит для создания шумового

сигнала с заданной мощностью, равномерно распределенной по частоте. Генератор характеризуется мощностью шума Noise Power, эталонным временем Sample time и числом Seed, служащим для инициализации генератора случайных чисел. Генератор фактически является квантователем непрерывного сигнала, представляющего белый шум.

На рис. 4 представлен пример графической интерпретации результатов моделирования возмущения микропрофиля.

Авторами предложен метод генерирования случайного возмущения микропрофиля дороги по его спектральной плотности методом суммирования гармонических составляющих, базирующийся на известных представлениях о возможности представления случайного процесса с заданными характеристиками суммой гармонических составляющих. Подобная форма представления случайного возмущения микропрофиля дороги используется в некоторых работах по исследованию динамики подвески [6]. При решении практической задачи формирования непрерывного случайного возмущения в виде суммы гармонических составляющих в настоящей работе предлагается учитывать корреляцию амплитуд волн дорожных

неровностей с их длинами, выявляемую с помощью характеристики спектральной плотности дисперсии микропрофиля. При моделировании возмущения используют спектральные характеристики микропрофиля, полученные любым из известных методов [2–6]. Частоты гармонических составляющих случайного процесса возмущения могут выбираться на линейной шкале с заданной степенью дискретизации или соответствующими центральным частотам октавных или третьоктавных диапазонов. Амплитуда гармонической составляющей определяется в соответствии со значением дисперсии для заданного частотного диапазона спектральной характеристики.

Дисперсия ординат микропрофиля в пределах выделенного частотного диапазона вычисляется в зависимости от формы представления (метода определения) спектральной плотности по соответствующим формулам. Частота гармонического возмущения может приниматься равной начальной или средней частоте выделенного диапазона, амплитуда синусоидальной волны неровности рассчитывается в соответствии с выражением

$$q_0 = 1,43q_c \quad (10)$$

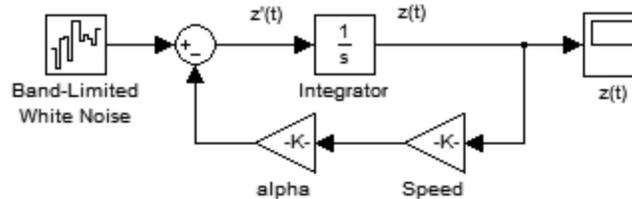


Рис. 3. Блок-схема Simulink-модели

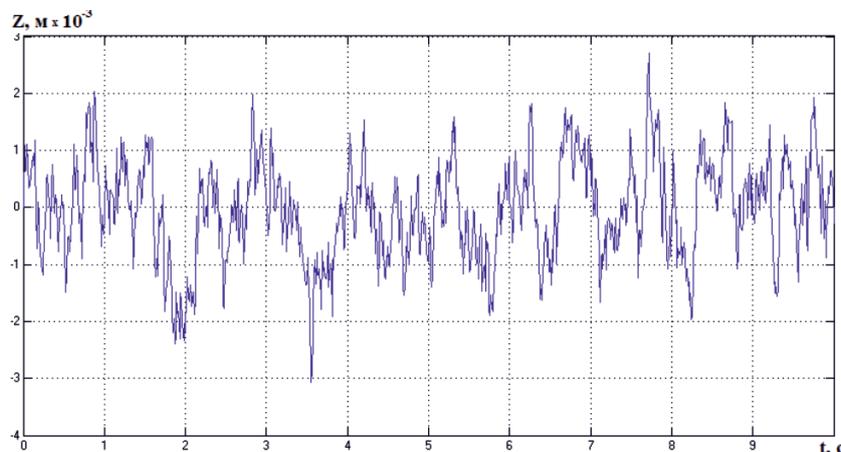


Рис. 4. Случайный процесс воздействия микропрофиля, $V=60$ км/ч, тип дороги – изношенность средняя

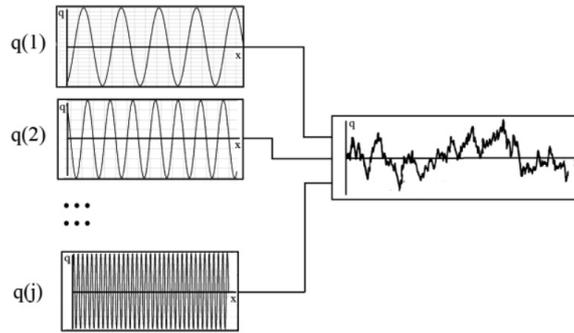


Рис. 5. Схема моделирования возмущения микропрофиля дороги

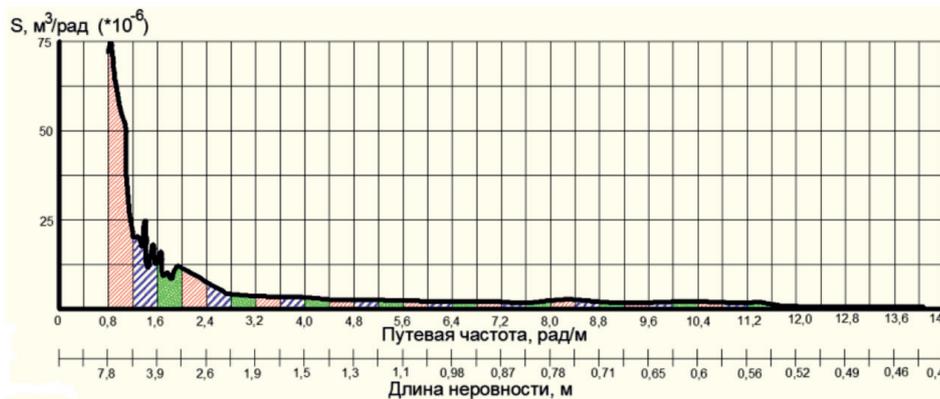


Рис. 6. Спектральная плотность булыжной дороги ровного замощения

На рис. 5 показана схема формирования возмущения от микропрофиля дорожной поверхности с использованием метода суммирования гармонических составляющих процесса. График характеристики дисперсии ординат микропрофиля как функции длины волны (неровности) разбивается на составляющие с кратными интервалами путевой частоты или длины волны.

На рис. 6 показана спектральная плотность булыжной дороги ровного замощения полигона «Березовая пойма». Частота каждого из выделенных интервалов соответствует частоте одной из гармонических составляющих. Текущие значения ординат гармонической составляющей возмущения могут задаваться с помощью аналитического выражения функции микропрофиля характерной синусоидальной формы.

$$q = q_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi}{S_0} s \right) = q_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi v}{S_0} t \right). \quad (11)$$

Для вывода выражений коэффициента демпфирования и динамической жесткости шины необходимо составить дифференци-

альное уравнение затухающих колебаний масс системы. В рассматриваемой колебательной системе энергия колебаний масс расходуется на работу против сил сопротивления и сил внутреннего трения в шине.

Считаем, что сила сопротивления, действующая при колебаниях, пропорциональна скорости

$$F_c = -rv, \quad (12)$$

где r – коэффициент сопротивления; v – вектор скорости.

На рис. 7 показана модель микропрофиля булыжной дороги ровного замощения, реализованная в соответствии с описанным методом. Сравнение результатов моделирования и реальных замеров показало правомерность применения данного метода [8].

В результате расчетов с использованием модели автомобиля (рис. 1) и модели неровностей микропрофиля булыжной дороги ровного замощения получены случайные процессы вертикальных ускорений на лонжероне автомобиля над осью передних колес (рис. 8) и нормальной реакции на переднем колесе (рис. 9) [9].

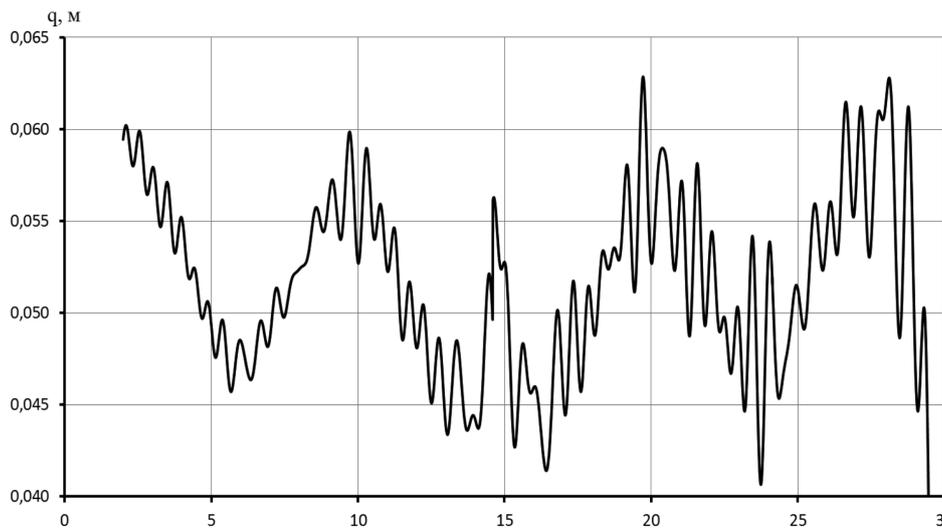


Рис. 7. Модель микропрофиля бульжной дороги ровного замощения

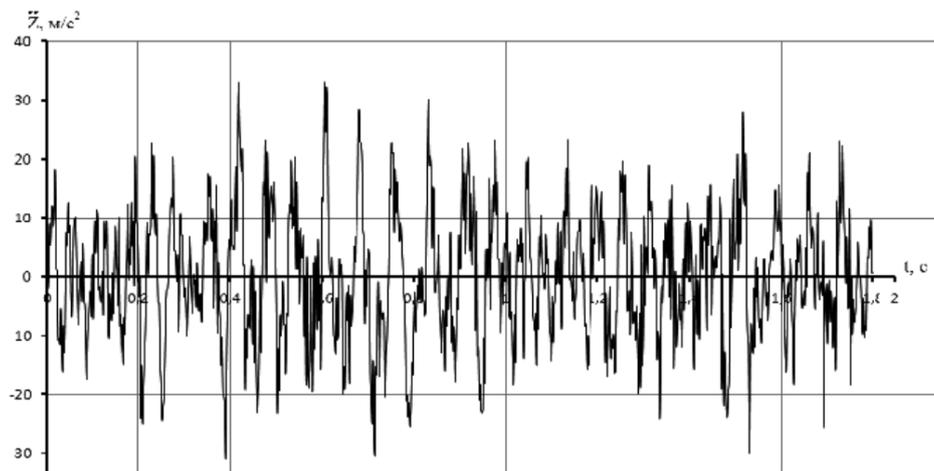


Рис. 8. Вертикальные ускорения на лонжероне, ровный бульжник, скорость 30 км/ч

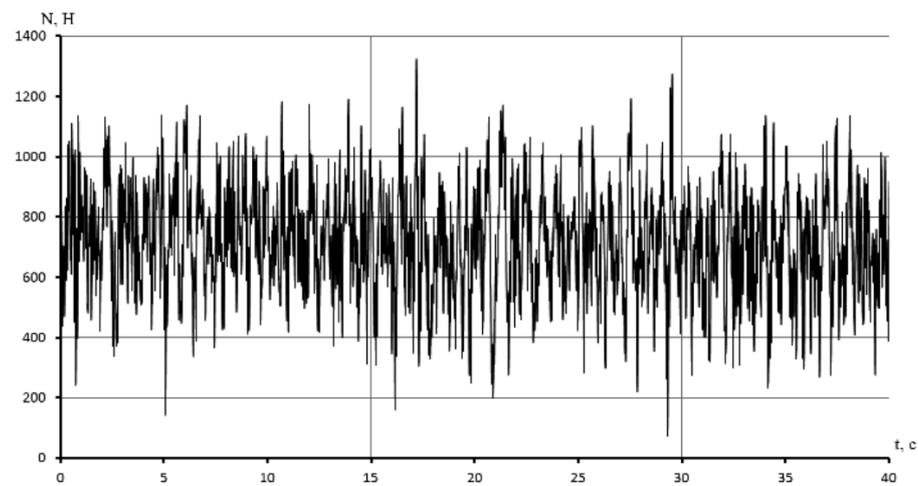


Рис. 9. Нормальная реакция на переднем колесе, ровный бульжник, скорость 30 км/ч

Заключение

В результате проделанной работы можно сделать вывод о высокой эффективности использования компьютерного моделирования при анализе динамики подвески. Однако особое внимание следует уделить формированию возмущения от дорожной поверхности. Предложенный в данной статье способ отличается от остальных тем, что в его основе лежит реальная спектральная характеристика дороги (бульжник ровного мощения). Основной задачей для дальнейшего исследования является получение данных характеристик для других типов дорог.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства безопасных экспортноориентированных автомобилей ГАЗ с элементами автономного управления и возможностью интеграции с электроплатформой на базовых компонентах российского производства» по договору № 03.G25.31.0270 от 29.05.2017 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Барахтанов Л.В., Котляренко В.И., Манянин С.Е., Соколов И.А. Моделирование взаимодействия колесной машины с грунтом // Журнал автомобильных инженеров. 2011. № 2 (67). С. 26–28.
2. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / Под ред. А.А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. 535 с.
3. ГОСТ 12.1.012 – 90. Вибрационная безопасность. Общие требования / Госкомитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. М.: Изд-во стандартов, 1990. 46 с.
4. Мусарский Р.А. Математические модели колесных экипажей: учеб. пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2009. 164 с.
5. Огороднов С.М., Малеев С.И. Моделирование возмущения микропрофиля дороги при исследовании колебательных процессов транспортных средств // Журнал автомобильных инженеров. 2017. № 5 (106). С. 36–39.
6. Полотно пути транспортно-технологических машин: учебник / Под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева, 2014. 447 с.
7. Кравец В.Н. Теория автомобиля (учебное пособие) // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 5–2. С. 223–225.
8. Редкозубов А.В., Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Беляков В.В. Результаты замеров микропрофиля дорожно-грунтовых оснований, предназначенных для движения транспортно-технологических машин // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 10–2. С. 409–412.
9. Огороднов С.М., Малеев С.И., Мошков П.С., Торопов Е.И. Экспериментальные исследования динамики подвески лёгкого коммерческого автомобиля // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=18459> (дата обращения: 06.05.2019).