

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН. СГЛАЖИВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Дается новое представление о взаимодействии между дорожными неровностями и реальным колесом с пневматической шиной. Представлена новая модель переменного сглаживания; обосновывается ее введение в колебательную систему, эквивалентную автомобилю. Приводятся результаты оценки новой модели в расчетах колебательных систем реальных автомобилей в виде спектральных характеристик; дается сравнение с результатами полигонных испытаний.

Ключевые слова: пневматическая шина, сглаживающая способность, подвеска автомобиля, амплитудно-частотная характеристика, микропрофиль дорог, корреляционная функция, спектральная плотность.

Актуальность. Современные методы математического моделирования и быстродействующие ЭВМ дают возможность эффективно, т. е. полно и точно учитывать влияние поддресоривания на все основные показатели эксплуатационных свойств автомобиля. Но для реализации этих возможностей необходимо, прежде всего, глубокое и реалистичное понимание процессов формирования внешнего воздействия микропрофиля дороги на автомобиль, и особенно в первичном звене колебательной системы – в зоне контакта шины с опорной поверхностью. Важное значение приобретает учет сглаживающей способности шины, поскольку при моделировании динамических процессов внешнее кинематическое возмущение задается в виде случайной реализации натурного микропрофиля. И если эту реализацию не скорректировать сглаживанием в пятне контакта, расчетная модель не будет адекватна натуре, особенно в таких условиях и на таких режимах эксплуатации (мелкие неровности, высокая скорость движения), когда длительность контакта смятого участка шины с поверхностью дороги соизмерима с продолжительностью воздействия на него отдельной неровности.

Относительно собственно микропрофиля дорожных покрытий выход в какой-

то степени найден, так как на дорогах полигона Научно-исследовательского центра по испытаниям и доводке автотехники (НИЦИАМТ) эти профили достаточно стабильны и обеспечивают отработку подвесок автомобилей по нормам прочности и условиям испытаний, а также аттестации и сертификации создаваемой техники согласно стандартным требованиям к виброзащите автомобиля.

Однако достаточно законченных предложений по учету сглаживающей способности пневматической шины в расчетах поддресоривания и колебаний автомобиля пока не сложилось. В большинстве теоретических исследований колебаний автомобиля колеса с пневматическими шинами представляются в виде сосредоточенной массы на пружине, причем, нижний конец пружины имеет точечный контакт с дорогой и в движении точно описывает профиль поверхности.

Известно, что реальный процесс взаимодействия шины с дорожными неровностями значительно отличается от этой модели. Во-первых, начало и окончание взаимодействия шины с неровностями не совпадают с фактическими границами неровностей; во-вторых, взаимодействующие элементы шины оказываются смещенными относительно вертикали, проходящей через ось колеса; в-третьих,

шина в зоне контакта одновременно взаимодействует не с одной, а с несколькими неровностями. И чем «грубее» покрытие (например, булыжная мостовая, грунтовая дорога с наезженной гусеничными машинами колеей и затвердевшей поверхностью или дорога с щебеночным покрытием), тем больше эти отличия, т. е. тем больше сглаживающий эффект пневматической шины. Примерно такой же эффект дает и рост скорости автомобиля даже на обычных асфальтобетонных дорогах.

Необходимость учета сглаживающей способности шины возникла не так давно. Были предложены различные методы учета сглаживающего эффекта пневматических шин, но ни один из них полностью эту проблему не решает [1, 2].

Построение модели. Обобщая особенности взаимодействия реальной шины с неровностями дороги, можно выдвинуть следующие допущения для математического описания новой модели переменного сглаживания:

1) пневматическая шина представляется тонкой, идеально эластичной оболочкой, которая плотно облегает все неровности в зоне пятна контакта;

2) длина пятна контакта шины непрерывно изменяется при ее качении по неровностям и определяется параметрами колебательной системы;

3) ширина пятна контакта при колебаниях колеса принимается постоянной и равной ширине протектора шины;

4) пневматическая шина обладает свойствами сосредоточенной массы с радиально расположенными упругими и демпфирующими связями.

Тогда сглаживающая способность шины математически может быть описана оператором скользящего среднего с переменным интервалом осреднения, изменяющимся в пределах от нуля до максимально возможной под нагрузкой длины пятна контакта, т. е.

$$q_{cr}(l) = \frac{1}{a(l)} \int_{l-a(l)/2}^{l+a(l)/2} q(l) dl, \quad (1)$$

где $q(l)$ – функция исходного микропрофиля; $q_{cr}(l)$ – функция сглаженного микропрофиля.

Поскольку вид функциональной зависимости между длиной пятна контакта a и нормальным прогибом шины h_z во многом определяет качество функционирования модели переменного сглаживания (1) в расчетах эквивалентных систем автомобиля, а исследования этой закономерности ранее не проводились, был реализован эксперимент, направленный на построение эмпирической зависимости $a(h_z)$.

Анализируя результаты экспериментальных исследований, можно утверждать следующее:

1) в качестве длины пятна контакта шины можно использовать ее усредненное (приведенное) значение на постоянной ширине отпечатка, равной ширине протектора;

2) функциональную связь между приведенной длиной пятна контакта и нормальным прогибом шины с высокой степенью достоверности можно описать линейным уравнением вида $a = k_a h_z$.

Последнее утверждение является значимым для дальнейших исследований эквивалентных колебательных систем автомобиля с учетом эффекта переменного сглаживания шин, поскольку не выводит такие системы из класса линейных.

Оценка модели в расчетах. Отработка новой модели сглаживающей способности шины для проверки правильности теоретических положений, принятых при ее математическом описании, а также разработка методов расчетной оценки сглаживающего эффекта осуществлялись на колебательной системе, эквивалентной подвеске автомобиля. Функциональная схема такой колебательной системы представлена на рис. 1.

Как следует из рисунка, традиционная колебательная система, эквивалентная подвеске автомобиля, с целью учета модели переменного сглаживания шины дополнена новым звеном – звеном сглаживания J , которое расположено между до-

рогой и шиной и осуществляет осреднение входного воздействия дороги на переменном интервале. Кроме того, в традиционной системе организована обратная связь от масс колебательной системы к звену сглаживания, отражающая функциональную зависимость параметра осреднения (длины пятна контакта) от выходного параметра системы – нормально-го прогиба шины.

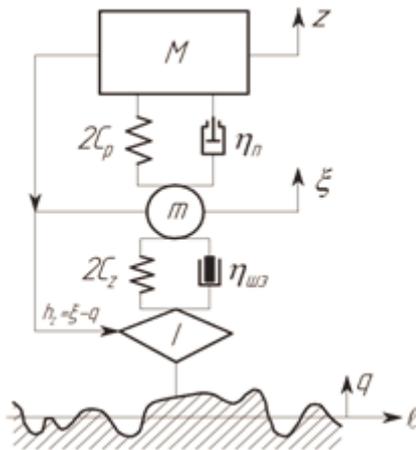


Рис. 1. Функциональная схема колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля, в которой отражены поглощающая и сглаживающая способности шин.

На рис. 1 обозначено: M – приведенная поддрессоренная масса, приходящаяся на подвеску; J – звено переменного сглаживания; $2C_p$ – суммарный коэффициент нормальной жесткости упругих элементов подвески; η_n – коэффициент суммарного сопротивления в подвеске (сопротивление амортизаторов и трение в сочленениях); m – неподрессоренная масса моста, части деталей направляющего устройства и упругого элемента подвески; $2C_z$ – суммарный коэффициент нормальной жесткости пневматических шин; $2H_{ш}, n$ – параметры эллипческо-степенной модели неупругого сопротивления в шинах; z, ξ – вертикальные перемещения поддрессоренной и неподрессоренной масс; q – текущее значение ординат микропрофиля поверхности дороги под осью колес.

Математическое описание такой динамической системы, кроме двух линейных дифференциальных уравнений второго

порядка, отражающих динамику двухмассовой колебательной системы, включает также интегральное уравнение с переменными пределами интегрирования (8), отражающее динамику звена сглаживания, и, в общем случае, нелинейное алгебраическое уравнение обратной связи на параметр звена сглаживания. С учетом обозначений рис. 7 система уравнений, описывающих движение масс колебательной системы и функционирование звена сглаживания, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + \eta_n(\dot{z} - \dot{\xi}) + 2C_p(z - \xi) = 0; \\ m\ddot{\xi} + \eta_{ш}(\dot{\xi} - \dot{q}_{сг}) + 2C_z(\xi - q_{сг}) - \\ - \eta_n(\dot{z} - \dot{\xi}) - 2C_p(z - \xi) = 0; \\ q_{сг}(l) = \frac{1}{a(l)} \int_{l-a(l)/2}^{l+a(l)/2} q(l) dl; \\ a(l) = F(h_z). \end{cases} \quad (2)$$

Функциональная зависимость длины пятна контакта от нормального прогиба шины в системе уравнений дана в общем виде, так как использование частных выражений этой зависимости определяется наличием экспериментально подтвержденных значений коэффициентов.

В силу нелинейности и нестационарности оператора звена переменного сглаживания (1) получение достоверных результатов о его функционировании в составе колебательной системы и оценка влияния на подвеску новой модели сглаживающей способности шины возможны только с использованием численных методов анализа.

С этой целью был разработан программный комплекс (рис. 2), который может решать следующие задачи:

1) моделирование случайного микропрофиля испытательных дорог автополигона НИЦИАМТа;

2) моделирование различных колебательных систем, эквивалентных подвеске автомобиля;

3) исследование колебаний систем с учетом эффекта переменного сглаживания шиной неровностей дороги;

4) введение новых моделей и переменных коэффициентов для описания работы элементов колебательной системы;

5) получение статистических характеристик входных и выходных процессов и частотных характеристик звеньев и системы в целом;

6) оценка степени нелинейности звеньев и колебательной системы в целом при вводе новых моделей;

7) оценка точности и адекватности моделируемых процессов и исследуемых колебательных систем.

Весь комплекс состоит из трех блоков. Первый блок, «DOROGA», направлен на моделирование случайного микропрофиля дорог по заданному виду корреляционной функции (реализован метод факторизации).

Во втором блоке комплекса, «TYRE», моделируется колебательное движение элементов подвески с учетом модели переменного сглаживания шиной неровностей смоделированной ранее дороги, а в третьем, «TEST», осуществляются расчет и построение статистических характеристик входных и выходных процессов, частотных характеристик звеньев и системы в целом.

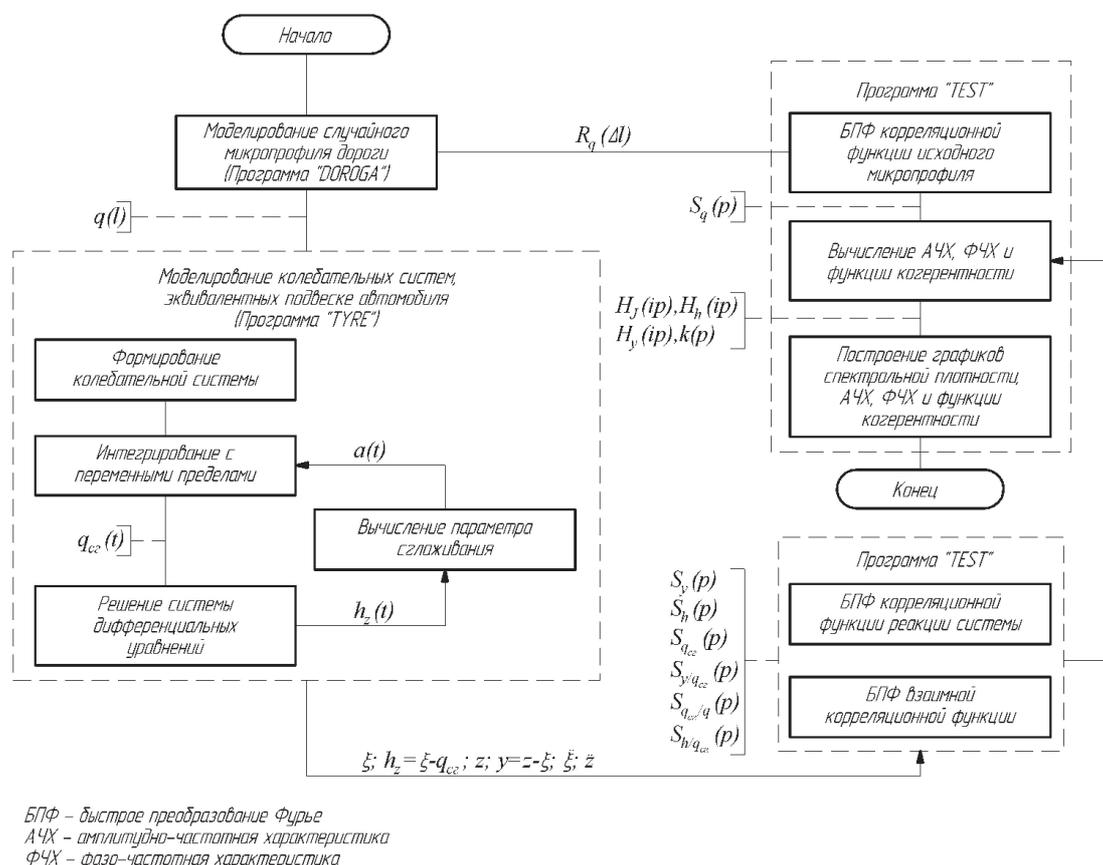


Рис. 2. Блок-схема программного комплекса REKS численного моделирования колебательных систем, эквивалентных подвеске автомобиля, с учетом новой модели переменного сглаживания шины.

Результаты моделирования передней подвески легкового автомобиля ЗИЛ с учетом эффекта переменного сглаживания шин при движении по двум испытательным дорогам представлены на рис. 3.

Знание закономерностей функционирования звена переменного сглаживания открывает возможности для более точного расчета основной характеристики любой системы поддрессоривания – ее передаточной функции.

Разработанная и проверенная на простейших колебательных системах автомобиля модель переменного сглаживания шиной неровностей дороги была реализована в программной системе FRUND отдела главного конструктора САПР автозавода АМО ЗИЛ.

Внедрение новой модели позволило, во-первых, существенно изменить методику формирования возмущающего воздействия дороги, которое осуществляется теперь непосредственно в процессе решения дифференциальных уравнений колебаний моделируемого автомобиля с учетом динамики изменения длины пятна контакта шины; это дало возможность значительно сократить объем оператив-

ной памяти без увеличения времени счета. Во-вторых, введение новой модели в программную систему позволило улучшить сходимость результатов машинных вычислений оценочных параметров поддрессоривания с данными натурных испытаний, и в-третьих, оценить влияние переменного сглаживания на параметры плавности хода исследуемого автомобиля и сравнить их с результатами эксперимента.

Выполнены расчеты средних квадратических отклонений и спектральных плотностей вертикальных перемещений и ускорений в различных точках кузова, сидений, рамы, подвески и колес легкового автомобиля ЗИЛ-4102, автобуса ЗИЛ-325010 и двухосного грузового автомобиля ЗИЛ-4331.

Результаты статистического моделирования движения динамических моделей автомобилей представлялись в виде диаграмм спектральной плотности и таблиц средних квадратических значений вертикальных ускорений в различных точках конструкции.

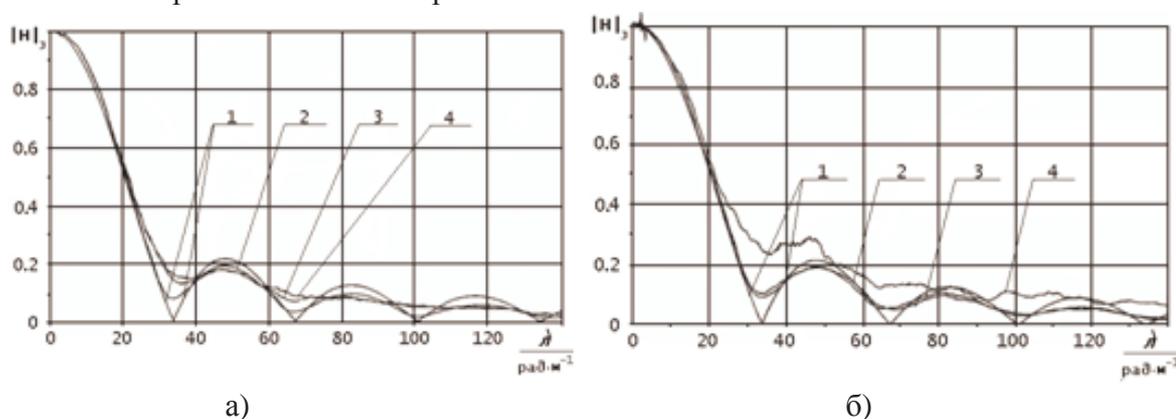


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики звена сглаживания при моделировании движения системы, эквивалентной передней подвеске автомобиля ЗИЛ, по дороге с асфальтобетонным покрытием (а) и булыжной мостовой (б): 1 – при постоянной длине пятна контакта шины ($a = const$); 2, 3, 4 – при переменной длине ($a = var$); а – 2 – $V_a = 10$ км/ч; 3 – $V_a = 80$ км/ч; 4 – $V_a = 120$ км/ч; б – 2 – $V_a = 5$ км/ч; 3 – $V_a = 10$ км/ч; 4 – $V_a = 30$ км/ч.

На рис. 4 – 6 представлены образцы диаграмм с графиками спектральных плотностей, полученных расчетным методом с учетом и без учета сглаживающего эффекта шин и экспериментально, при движении по специальным дорогам автополигона НИЦИАМТа с различными скоростями и степенью загруженности.

Сопоставление расчетных и экспериментальных энергетических спектров колебаний автомобилей дает основание утверждать, что новая модель переменного сглаживания пневматической шины дос-

точно адекватно отражает реальные процессы, происходящие при взаимодействии колеблющегося автомобильного колеса (в составе динамической системы) с микропрофилем неровной дороги, и при включении ее в программную систему статистического моделирования динамики автомобиля дает более достоверные результаты расчетов плавности хода и вибронагруженности элементов конструкции, приближая их к результатам натурных испытаний автомобилей.

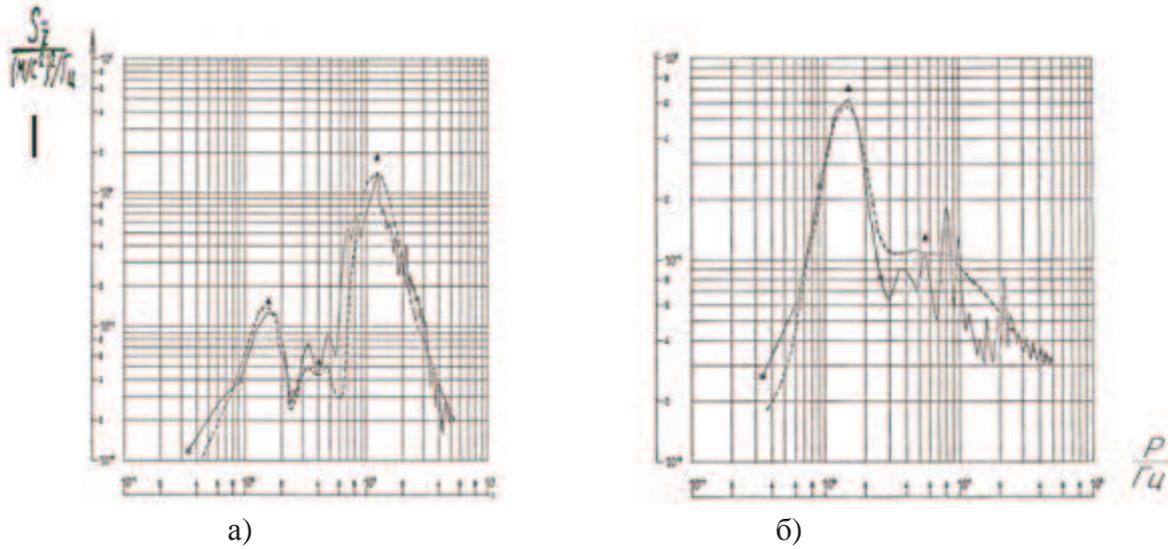


Рис. 10. Спектральные плотности вертикальных ускорений на левом лонжероне рамы грузового автомобиля ЗИЛ-4331 при движении по булыжной дороге ровного замощения со скоростью 30 км/ч с грузом 6 т: а – над передним мостом; б – над задним мостом; - - - - эксперимент; ———— расчет с учетом сглаживающей способности шины; ▲-▲ – без учета.

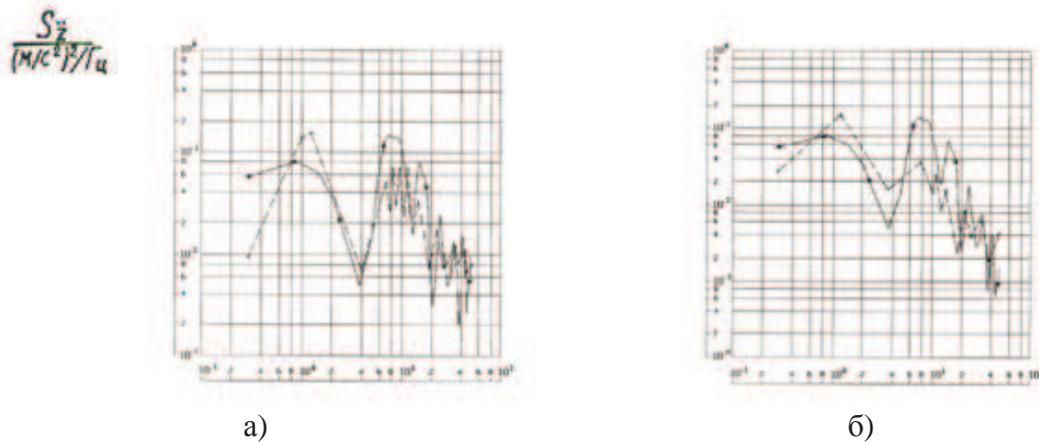


Рис. 5. Спектральные плотности вертикальных ускорений легкового автомобиля ЗИЛ-4102 при движении со скоростью 100 км/ч по булыжной дороге ровного замощения: а – на переднем правом сиденье; б – на кузове под сиденьем; ———— расчет; - - - - эксперимент.

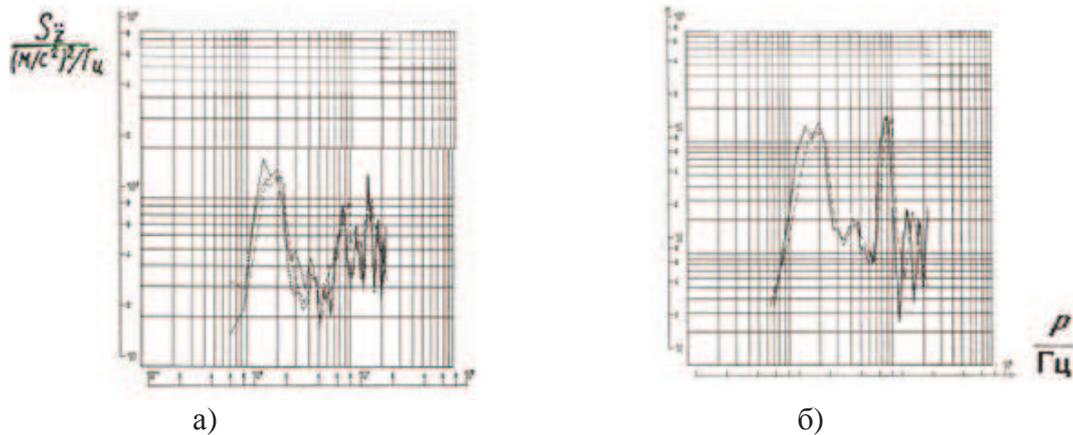


Рис. 6. Влияние сглаживающей способности шин на спектральные плотности вертикальных виброускорений порожнего автобуса ЗИЛ-325010 при движении по ровному булыжнику со скоростью 60 км/ч: а – на раме под опорой двигателя; б – на полу кузова над опорой двигателя; — — — расчет без сглаживания микропрофиля шины; х х х х – расчет с учетом сглаживания; - - - - эксперимент.

Оценка модели в экспериментах. Экспериментальные исследования сглаживающей способности автомобильных шин осуществлялись по двум направлениям. Основной задачей первого направления исследований было построение траекторий оси колеса с испытуемыми шинами при качении по искусственным неровностям синусоидального профиля с использованием нового испытательного оборудования кафедры автомобильного транспорта БрГУ для последующего их сопоставления с расчетными траекториями, полученными при помощи программного комплекса REKS.

Для второго направления экспериментальных исследований основной задачей было построение спектральных характеристик колебаний различных точек ходовой части полнокомплектных автомобилей, оборудованных испытуемыми шинами, при движении по специальным испытательным дорогам автополигона НИЦИАМТа (г. Дмитров) для последующего сопоставления с расчетными спектральными характеристиками, полученными с использованием программной системы FRUND, доработанной при включении новой модели поглощающего эффекта шин.

Объектами натурных испытаний являлись серийный образец грузового двухосного автомобиля ЗИЛ-4331 и опытные образцы легковых автомобилей высшего класса ЗИЛ-4102 и ЗИЛ-41041, оснащенные, в том числе, шинами 245/70HR16 модели И-241 «Гранит», LR70-17GL и LR78-15SAR, параметры упругих, поглощающих и сглаживающих свойств которых определены в ходе экспериментальных исследований с использованием нового испытательного комплекса [3].

Образец диаграммы энергетических спектров, получаемых по результатам экспериментальных заездов по испытательным дорогам автополигона, приведен на рис. 7.

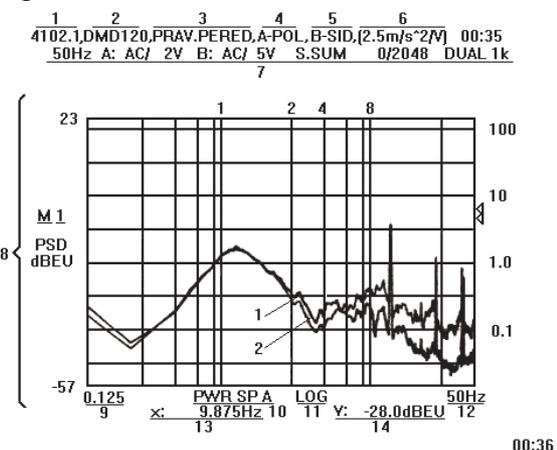


Рис. 7. Спектральные плотности колебаний легковых автомобилей, полученные по резуль-

татам ходовых испытаний: спектры виброускорений ЗИЛ-4102.1 при движении со скоростью 120 км/ч по ДМД; 1 – на переднем правом сиденье; 2 – на полу под сиденьем.

Результаты и выводы. На основании последовательно выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы и заключения.

1. Модель переменного сглаживания, построенная путем идеализации пневматической шины абсолютно упругой оболочкой, при взаимодействии с неровностями дороги и аналогии этого процесса с функционированием узкополосного фильтра отражает динамику длины пятна контакта при движении и колебаниях автомобиля.

2. Новая модель сглаживающей способности шины проявляется в существенном изменении амплитудно-частотной характеристики звена переменного сглаживания, характер которой определяется параметром модели – переменной длиной пятна контакта и зависит от скорости движения автомобиля и дисперсии ординат микропрофиля дороги. Изменение АЧХ звена происходит от одного предельного состояния при нулевой скорости, когда она описывается по закону характеристики звена постоянного сглаживания, к другому, близкому к отрыву шин от опорной поверхности дороги, когда она описывается уравнением огибающей.

3. Разработанный программный комплекс численного моделирования колебаний подвески позволил:

– моделировать случайный микропрофиль испытательных дорог автополигона НИЦИАМТа по заданному виду корреляционных функций;

– исследовать колебания систем, эквивалентных подвеске автомобиля, с учетом эффекта переменного сглаживания шиной неровностей дороги;

– получать статистические характеристики входных и выходных процессов и частотные характеристики звеньев и системы в целом;

– оценивать степень нелинейности элементов колебательной системы по виду функции когерентности;

– оценивать точность и адекватность моделируемых процессов.

4. Разработанные для программной системы FRUND автозавода АМО «ЗИЛ» компьютерные программы позволили ввести новую модель переменного сглаживания шиной неровностей дороги в процесс формирования возмущающего воздействия случайного микропрофиля испытательных дорог (стандарт предприятия) и моделирования динамики движения и колебаний сложных систем, эквивалентных «объемному» автомобилю с упругими рамами и кабинами (кузовами).

5. Проведенные ходовые испытания грузового и легкового автомобилей ЗИЛ на специальных дорогах автополигона НИЦИАМТа позволили получить оценочные параметры и характеристики колебаний в виде диаграмм энергетических спектров и таблиц средних квадратических отклонений вертикальных ускорений и относительных перемещений в различных точках конструкции автомобилей.

6. Сопоставление расчетных и экспериментальных характеристик колебаний грузового и легкового автомобилей при взаимодействии с микропрофилем испытательных дорог автополигона показало вполне удовлетворительную сходимость энергетических спектров вертикальных ускорений и относительных перемещений как по уровню, так и по частотам проявления резонансных зон, особенно в области низкочастотных колебаний. Учет сглаживающего эффекта шины, согласно новой модели, приводит к снижению уровня расчетных спектральных характеристик на 6-10 %, приближая их к экспериментальным.

Литература

1. Яценко Н. Н. Поглощающая и сглаживающая способность шин. М.: Машиностроение, 1978. 132 с.

2. Рыков С. П. Моделирование и оценка поглощающей и сглаживающей способности пневматической шины в расчетах подвески, плавности хода и поддресоривания автомобиля. Братск : БрГТУ, 2004. 124 с.

3. Рыков С. П. Экспериментальные исследования поглощающей и сглаживающей способности пневматических шин : Испытательный комплекс, методики проведения экспериментов и обработки результатов. Братск : БрГТУ, 2004. 322 с.