

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 629.33.021:004.94

*В. С. КОНЧАК, С. В. ХАРИТОНЧИК, А. Н. КОЛЕСНИКОВИЧ, С. П. ЛАЗАКОВИЧ,
Ю. И. НИКОЛАЕВ, В. И. ПЕТЬКО, С. В. ХИТРИКОВ*

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕНДОВЫХ И ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 25.12.2010)

Введение. Производство автомобильной техники малыми сериями и «под заказ» требует значительного сокращения сроков на проектирование, испытания и их доводку. Наиболее перспективным в этом случае является метод проектирования на основе отработанных унифицированных узлов и агрегатов. Предполагается, что для проектирования имеется гамма типовых элементов, применение которых позволит создать конструкцию, обладающую необходимыми потребительскими свойствами. Разрабатывается методология проектирования, с помощью которой еще на уровне проработки конструкции можно было бы по характеристикам имеющихся в наличии узлов и агрегатов оценить параметры проектируемого изделия.

Универсальным средством для решения данной задачи является моделирование, которое позволяет имитировать динамическое состояние исследуемого объекта и на уровне модели оценить степень соответствия техническому заданию его параметров. При этом моделируется не только объект в целом, а и те его узлы и системы, которые непосредственно участвуют в имитации интересующих нас качеств. В данной работе рассматривается задача моделирования и исследования конструктивных элементов многоосных автомобилей, обеспечивающих защиту людей и перевозимых грузов от воздействия колебаний, вызванных неровностями дороги. Для построения математической модели механической конструкции необходимы массоинерционные характеристики исследуемого объекта и распределение масс в 3-мерном пространстве, упругодиссипативные свойства элементов подвески, координаты кинематических связей, позволяющих разработать пространственную кинематическую схему взаимодействующих друг с другом узлов и элементов автомобиля. Источником этой информации, как правило, являются конструкторская документация и экспериментальные исследования.

Метод исследования. Моделирование позволяет проводить исследование объекта с использованием методов, отображающих его различные свойства (механические, физические, химические, энергетические и др.), оперируя при этом разработанной моделью с целью получения полезной информации об объекте [1]. Наибольшее распространение получили в настоящее время математические модели, которые легко могут быть реализованы с помощью средств вычислительной техники. Анализ динамики многокомпонентной системы, примером которой и является автомобиль как объект нашего исследования, построен на решении совместных систем дифференциальных уравнений Лагранжа II рода и алгебраических уравнений связей. Модель – это некоторое приближение реального объекта и о ее адекватности можно говорить лишь после проведения сравнительных испытаний, в результате которых оценка контролируемых параметров

модели и объекта совпадает в пределах заданной точности. Поэтому модель будет адекватной реальному объекту лишь после ее верификации. На ранних стадиях проектирования натуральный образец отсутствует и, следовательно, у разработчика отсутствуют и реальные характеристики, описывающие динамику объекта моделирования. Агрегатный принцип конструирования позволяет построить модель объекта из имеющихся уже в библиотеке моделей узлов и агрегатов, верифицированных на этапе их проектирования и доводки.

Модель объекта, построенная способом сборки из верифицированных библиотечных модулей, вполне пригодна для прогнозирования ее динамических характеристик.

Источником информации для верификации моделей сборочных единиц являются их стендовые испытания. Результатом стендовых испытаний должна быть информация (перемещения, скорости, ускорения, напряжения, силовые и моментные функции), измерение и обработка которой позволит получить неизвестные характеристики свойств моделируемого объекта.

Составляющей результата моделирования является функция нагружения, которая в каждом конкретном случае строится с учетом свойств исследуемого объекта и его математического представления. Нагружение виртуального и натурального объекта в режиме вынужденных колебаний должно выполняться однотипными сигналами. Поэтому при разработке схем испытаний необходимо разрабатывать и методы моделирования функций нагружения, совокупность которых будем называть библиотекой функций нагружения.

В зависимости от поставленной задачи для построения объекта исследования могут быть использованы различные программы. Так, например, для моделирования динамики и кинематики многокомпонентных механических систем можно использовать достаточно известный в этой области моделирования пакет MSC.ADAMS.

Учитывая, что математическая модель не может отобразить полное сочетание свойств реального объекта, можно говорить лишь об ее адекватности только по контролируемому параметру или свойству. Поскольку предметом настоящего исследования является уровень вибрации, которая возникает вследствие перемещения неподрессоренных и поддрессоренных масс при движении автомобиля по неровностям дороги, то изучаются частотные свойства как у моделей, так и реальных объектов. При этом исследованию подвергаются те узлы и агрегаты автомобиля, которые должны обеспечивать его виброзащитные свойства. Прежде всего, это – шины, подвески и сиденье водителя.

Особую роль в трансляции уровня вибрации от дороги к рабочему месту водителя играет рама автомобиля, на которой фактически закреплены его активные массы и виброгасящие устройства. От свойств рамы, ее жесткости и сопротивления зависит величина перекрестных связей, управляющих процессом взаимного влияния элементов неподрессоренных масс на уровень вибрации в контролируемых точках. Знание собственных частот колебаний перечисленных механических узлов, их фазовых характеристик, передаточных функций, характеристик жесткости и сопротивления позволит уточнить параметры дифференциальных уравнений, описывающих объект моделирования, и повысит объективность прогнозируемых с помощью модели свойств проектируемого автомобиля.

Экспериментальные исследования элементов виброзащитной системы. Экспериментальные исследования виброзащитных устройств большегрузных автомобилей выполнялись на электрогидравлических стендах, которые состоят из устройства нагружения, крепежной плиты, оснастки для установки исследуемого объекта, датчиков, системы гидрорегуляторов для управления подачей потока жидкости в гидроцилиндр, системы моделирования управляющих сигналов, системы управления стендом и информационно-измерительной системы.

В качестве нагружающих устройств были использованы электрогидравлические цилиндры фирмы SHENK, которые укомплектованы высокоточными электрогидравлическими средствами управления потоком жидкости и усилителями мощности, обеспечивающими необходимые режимы нагружения. Процесс моделирования сигналов и управления экспериментальной установкой возлагается на вычислительную машину, а операции измерения реакции объекта и выдачи цифровых последовательностей управляющих сигналов – на устройство связи с объектом, которое в своем составе имеет цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи.

При разработке оснастки для установки объекта исследования на стенд необходимо соблюдать принцип максимального правдоподобия. Следует сохранить координаты приложения сил и измеренных перемещений, их направление, положение равновесия, воздействующую при этом на объект статическую силу и другие физические показатели эксперимента. Управление гидроцилиндрами осуществляется гармоническими и полигармоническими сигналами с дискретно изменяющейся частотой. Обработка полученной информации выполняется по разработанным алгоритмам.

Постановка эксперимента организуется в соответствии с разработанной для конкретного случая схемой, в которой предусматриваются: способы установки исследуемого изделия на стенд и его нагружения; координаты точек приложения сил и крепления датчиков; величины начального позиционирования и приложенных статических сил; исследование адекватности нагружения реального изделия в комплектном автомобиле его математическому представлению в модели.

Стендовые испытания проводятся, как правило, в режиме вынужденных колебаний и только в редких случаях – в режиме свободных колебаний. Если в режиме свободных колебаний исследуются только переходные характеристики объекта, то при вынужденных колебаниях могут быть получены все необходимые для верификации характеристики и свойства. Измерение экспериментальной информации необходимо проводить на установившемся режиме только после затухания переходных процессов.

Установленные датчики силы и перемещения позволяют определить коэффициент жесткости и сопротивления. Для изучения инерционных свойств объекта, устанавливаются датчики ускорений. Датчики напряжений, установленные на элементах конструкции исследуемых объектов, позволяют изучить нагруженность элементов конструкции виброзащитных устройств, а датчики давления – изучить динамику поведения жидкостей и газов в пневмо- и гидроэлементах подвески автомобилей.

Фотографии реальных электрогидравлических стендов, разработанных на основании схем экспериментов авторов статьи и изготовленных специалистами ОАО «Минский завод колесных тягачей» для испытания элементов поддрессоривания автомобиля, показаны на рис.1. Исследование свободных колебаний поддрессоренной массы автомобиля при последовательном импульсном нагружении по каждому колесу ставит своей задачей получение форм собственных колебаний поддрессоренной массы. Результатом эксперимента будет матрица импульсных переходных характеристик, отображающих перемещения поддрессоренной массы в пространстве многомерных колебаний. Методика проведения эксперимента основана на ОСТ 37.001.252–82.

Такие испытания можно провести с помощью специализированных стендов, а при их отсутствии – методом подтягивания и резкого освобождения поддрессоренной массы либо сбрасывания автомобиля с преграды, на которую он предварительно наезжает. При этом для каждого импульсного нагружения

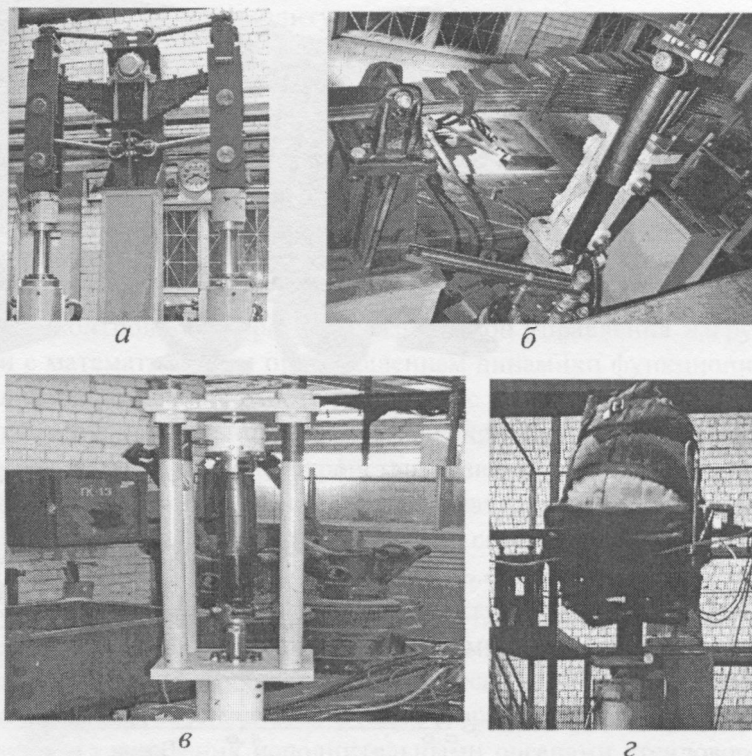


Рис. 1 Фотографии электрогидравлических стендов для испытания элементов поддрессоривания автомобилей: *а* – балансная подвеска; *б* – передняя подвеска; *в* – амортизатор, *г* – сиденье

измеряются свободные колебания подрессоренной массы, как относительные перемещения между рамой автомобиля и ступицей каждого колеса. Полученная информация позволяет построить функцию перекрестных связей, которые возникают в конструкции благодаря наличию упругих свойств рамы автомобиля. Динамические характеристики шин, элементов подрессоривания и рамы обеспечивают адекватное поведение модели автомобиля в процессе моделирования и существенно образом влияют на точность результатов расчетов.

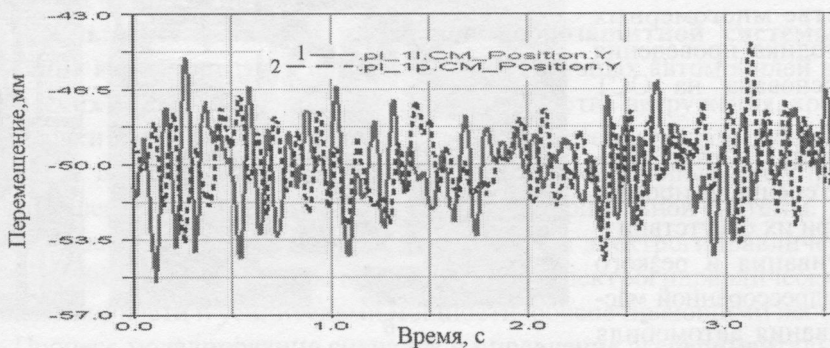
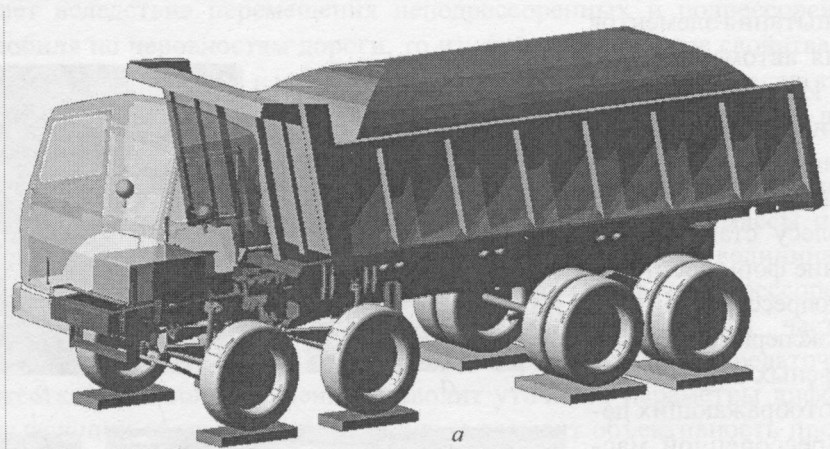
Разработанная полнокомплектная модель автомобиля в среде MSC. ADAMS включает в себя верифицированные по результатам стендовых испытаний модели подвесок многоосного автомобиля, модели подвески кабины и сиденья водителя, разработанную в пакете ANSYS конечно-элементную модель рамы, импортированную в пакет MSC. ADAMS. Визуальное представление этой модели приведено на рис. 2, а, ее исследование осуществлялось в процессе виртуальных испытаний. При нагружении была использована модель профиля дороги типа «бульжник», функция нагружения построена по спектральной характеристике, полученной при измерении неровностей реальной дороги. Графики функции нагружения для двух передних колес приведены на рис. 2, б.

Математические модели элементов виброзащиты основаны на базе дифференциальных уравнений вида [2, 3]

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -r \frac{dy}{dt} - ky + H \sin \omega t,$$

в правой части стоит сумма сил ($-ky$ – упругости, $-r \frac{dy}{dt}$ – сопротивления среды и $H \sin \omega t$ – вынуждающей силы), уравновешивающих силу инерции $m \frac{d^2 y}{dt^2}$.

Упростим исходное уравнение:



б

Рис. 2 Модель четырехосного самосвала: а – визуальное представление модели; б – графики функции нагружения (1 – переднее правое колесо, 2 – переднее левое колесо)

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega_0^2 y - 2\beta \frac{dy}{dt} + f \sin \omega t. \quad (1)$$

Решением уравнения (1) будет функция

$$y(t) = A(\omega) \sin(\omega t + \alpha_1) + A_0 \sin(\omega_0 t + \alpha_0) e^{-\beta t}. \quad (2)$$

Для получения адекватности модели моделируемому объекту необходимо по экспериментальным данным вычислить: $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ – частоту собственных колебаний, β – коэффициент демпфирования (затухания), $A(\omega)$ и A_0 – амплитуды вынужденных и собственных колебаний, α_1 и α_0 – фазы вынужденных и собственных колебаний.

Метод подготовки и проведения эксперимента, описанный выше, предполагает, что функцию вынуждающей силы задают периодической функцией в виде гармоники либо полигармоники, а получаемые при этом колебания конструкции измеряют датчиком перемещений. Амплитуда и фаза установившихся вынужденных колебаний на фиксированной частоте ω вычисляются при подстановке решения (2) в уравнение (1) как

$$A(\omega) = \frac{f(\omega)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}, \quad (3)$$

$$\alpha(\omega) = \arctg\left(-\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right). \quad (4)$$

Если в процессе проведения эксперимента было использовано гармоническое нагружение, то амплитуда и фаза установившихся колебаний легко определяется как результат эксперимента. Однако и в этом случае соотношения (3) и (4) образуют систему нелинейных уравнений относительно неизвестных ω_0 и β , получение решения которой затруднительно. В [4] изложен метод, позволяющий определить частоту собственных колебаний ω_0 и коэффициенты демпфирования β , жесткости k и сопротивления r по амплитудам $A(\omega)$, $f(\omega)$ и фазе α как $\omega^2 = \frac{k}{m}$, $2\beta = \frac{r}{m}$, $k = \frac{f}{A} \cos \alpha$, $r = \frac{f}{A} \sin \alpha$. Полученных в процессе эксперимента параметров достаточно, чтобы верифицировать модель упругого элемента.

Аппаратно-программные средства лабораторного комплекса для проведения стендовых испытаний. В условиях стендовых испытаний источниками нагружения могут быть различные исполнительные устройства: гидроцилиндры, электровибраторы, электрические двигатели, тормозные устройства и др., а управляющими устройствами – электронные системы управления и решающие устройства, способные сформировать заданный управляющий сигнал и осуществлять контроль за его выполнением (контроль по обратной связи). Закон управления нагружением формируется в соответствии с математическим представлением динамики функционирования исследуемого объекта и, как было показано в работе [4], связан с решением некоторого дифференциального уравнения или системы дифференциальных уравнений. Ранее для решения таких задач привлекались аналоговые счетно-решающие устройства. Развитие вычислительной техники и теории цифровых методов исследования динамики позволило привлечь к решению задач управления стендовыми испытаниями механических конструкций современные вычислительные комплексы.

Реализация лабораторного комплекса выполнена на основе комплектующих, выпускаемых корпорацией ADVANTECH. Структурная схема лабораторного комплекса многоканального ввода-вывода цифровой информации приведена на рис. 3. Для контроля работоспособности комплекса система укомплектована тестовым программным обеспечением, а также разработанными авторами программными модулями ввода-вывода и управления исполнительными органами стендового оборудования. Технические характеристики плат ввода-вывода представлены в табл. 1.

Разработанный и изготовленный в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси комплекс позволяет осуществлять синхронное и независимое управление 8 нагружающими

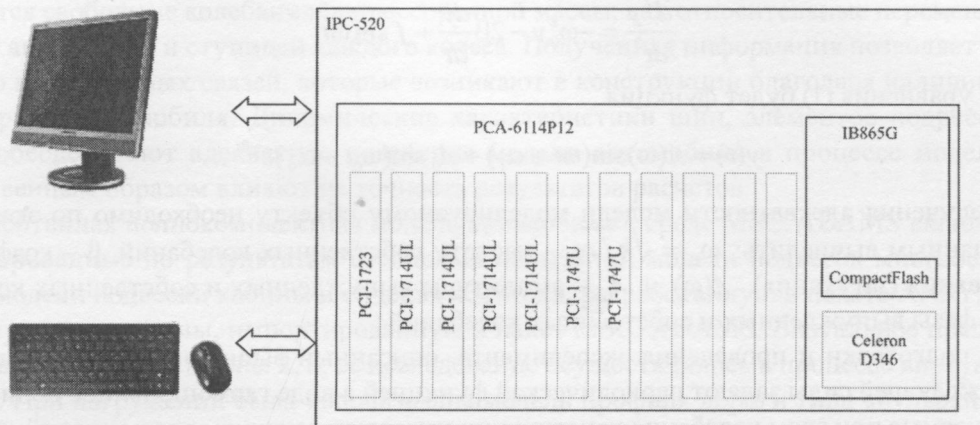


Рис. 3 Структурная схема системы многоканального ввода-вывода

Таблица 1. Характеристики плат ввода-вывода

Параметр	Цифроаналоговый преобразователь PCI-1723	Аналого-цифровой преобразователь PCI-1714UL	Последовательный аналоговый ввод PCI-1747U
Количество каналов	8	4 потенциальных	64 потенциальных / 32 дифференциальных
Выходной сигнал, В	± 10 ; 0...20 мА; 4...20 мА	—	—
Входной сигнал, В	—	± 5 ; 2,5; 1; 0,5	± 10 ; 5; 2,5; 1,25; 0,625; 0...10; 0...5; 0...2,5; 0...1,25
Разрешение	16 разрядов	12 разрядов	16 разрядов
Буфер FIFO, отсчетов	—	8192	1024
Максимальная частота выборки, Гц	—	10 000 000	250 000
Особенности	Режим синхронизации выходов, время установления сигнала 50 мкс, функция сохранения значений на выходах при перезагрузке	Одновременная работа 4 каналов, различные режимы запуска преобразования	Поканально программируемый коэффициент усиления, автокалибровка, программируемая схема запуска

устройствами, синхронное измерение 16 каналов реакции исследуемого объекта на поданное на него воздействие и дополнительно контролировать состояние объекта испытания по 128 каналам.

Программный комплекс состоит из головной интерфейсной программы и четырех подпрограмм, выполняющих следующие функции: моделирование сигналов, обработку экспериментальных сигналов, управление работой с платами ввода-вывода и тарировку датчиков.

Данный программный продукт обеспечивает работу исследовательского комплекса в следующих режимах:

1. Стендовый эксперимент, позволяющий сформировать управляющие сигналы, выполнить управление стендовым оборудованием, измерение экспериментальной информации, ее обработку и получение динамических характеристик исследуемого объекта.

2. Виртуальные испытания, которые должны быть идентичными стендовым испытаниям с разницей лишь в том, что смоделированные сигналы передаются не на устройство вывода информации для управления исполнительных органов стенда, а с помощью интерфейсного модуля передаются в компьютер, на котором под управлением пакета MSC.ADAMS выполняются виртуальные динамические испытания разработанной модели. Полученные результаты виртуального

эксперимента через интерфейсный модуль передаются в головную программу программного комплекса для дальнейшей обработки.

3. При сравнительных испытаниях задействованы одновременно режимы 1 и 2. В этом режиме осуществляется коррекция модели с целью получения результатов, адекватных полученным на стенде.

Для единообразия планирования, подготовки и проведения стендовых испытаний разработаны методики: расчета основных параметров входных и выходных цифровых последовательностей, работы с платой аналогового вывода, работы с платой синхронного ввода, работы с платой последовательного ввода, приведения моделируемых процессов в машинных кодах к физическим величинам и измерения физических величин при использовании плат аналого-цифрового преобразования.

Моделирование функции нагружения для имитации колебаний автомобиля. Описанный выше подход к построению динамических моделей колебательных систем с целью виртуального исследования их характеристик предполагает, что у исследователя имеется в наличии система моделирования функций нагружения для возбуждения виртуальных либо реальных колебаний исследуемой конструкции. При этом необходимо иметь базу данных, содержащую набор тестовых сигналов для описания стандартных профилей, а также набор функций, являющихся типовым решением систем дифференциальных уравнений. В качестве таких функций используются гармонические функции, являющиеся естественным базисом для решения задач установившихся колебаний. Кроме того, тестирование гармоническими функциями нелинейных систем позволяет получить степень нелинейного искажения входного сигнала объектом и построить его оператор. Поэтому генератор функций вынужденных колебаний для стендовых и виртуальных испытаний должен содержать программный модуль генерирования синусоидальных сигналов с различными амплитудой, фазой, частотой и интервалом дискретизации.

Для моделирования реальных профилей дорог применяют полигармонические сигналы, способ построения которых может использовать как детерминированный, так и случайный подход. Простейшим виртуальным профилем, обеспечивающим имитацию воздействия неровностей дороги на модель исследуемого автомобиля, является цифровая последовательность колебательно-го процесса, получаемого при непосредственном измерении микропрофиля реальной дороги. Существует множество способов такого измерения. Одним из наиболее перспективных, по нашему мнению, является метод оптического измерения неровностей, который выполняется относительно некоторого заданного уровня линии горизонта, поддерживаемого автоматически через каждые 10 мм передвижения измерительного прибора, с усреднением ординат вдоль линии сканирования. Такие приборы в настоящее время используются для контроля качества стратегических дорог.

Если измерение проведено относительно левого и правого борта автомобиля, движущегося равномерно (с постоянной скоростью), то полученные в виде цифровой последовательности результаты измерений левой и правой колеи дороги могут быть признаны моделью микропрофиля для двух передних колес. Имитация колебаний других колес, следующих за передними, осуществляется для каждого из них сдвигом последовательности на n отсчетов, где $n = t/\Delta t$, $t = p/v$, p – расстояние между первой осью и каждой из последующих, v – скорость движения автомобиля.

Другим часто используемым способом дискретного моделирования микропрофилей дороги является их спектральное представление, использующее в качестве исходной информации для моделирования усредненные спектры различных типов дорог. Можно построить дискретный профиль для правой и левой колеи в соответствии с уравнением Райса–Пирсана:

$$y_{\text{пр}}(i\Delta t) = \sum_{k=1}^N A_{\text{пр}}(k) \sin(2\pi k i \Delta t + \varphi_{\text{пр}}(k)), \quad y_{\text{лев}}(i\Delta t) = \sum_{k=1}^N A_{\text{лев}}(k) \sin(2\pi k i \Delta t + \varphi_{\text{лев}}(k)),$$

где $A(k)$ – амплитудно-частотная характеристика дороги, $\varphi(k)$ – равномерно распределенная случайная величина, заданная на интервале $[0, 2\pi)$.

Приведенные выше методы используются, когда все модели виброзащитных элементов автомобиля верифицированы и при сборке комплектной модели могут быть взяты из библиотеки моделей сборочных единиц. Довольно часто возникают случаи, когда модели отдельных сборочных единиц отсутствуют или обладают неполнотой описания своих характеристик из-за сложности их экспериментального получения и других причин. Чаще всего такие трудности при моделировании возникают из-за отсутствия характеристик шин. Поэтому нами разработан метод верификации полнокомплектной модели автомобиля по результатам дорожных испытаний, который позволяет выполнить виртуальные исследования вибронегруженности на рабочем месте водителя при упрощенной модели шин.

Для измерения вибронегруженности конструкции автомобиля в условиях дорожных испытаний на нем необходимо установить датчики: виброускорений на всех ступицах колес, взаимных перемещений между всеми осями и рамой по правому и левому борту, взаимных перемещений между рамой и кабиной в местах крепления элементов поддрессоривания кабины и вертикальных, продольных и поперечных виброускорений на рабочем месте водителя, на сиденье пассажира, на рулевой колонке, на рычагах управления и на полу кабины.

Для проведения эксперимента используются III типа дорог: I – цементно-бетонная динамометрическая дорога со среднеквадратическим значением (СКЗ) неровностей 0,6 см, II – булыжная мощеная дорога без выбоин с СКЗ неровностей 1,1 см, III – булыжник с выбоинами с СКЗ неровностей 2,9 см.

Исследования проведены на четырехосном самосвале МЗКТ-65151 со снаряженной массой 17,3 т и полной массой 39 т. Учитывая, что необходимые исходные данные с реальными динамическими характеристиками шин, установленных на указанном автомобиле, отсутствовали, в качестве исходной информации были использованы виброускорения, измеренные на ступицах колес.

Представим функцию виброускорений в виде ряда Фурье

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \sum_{k=1}^{N/2} (a_k \cos 2\pi k \Delta f i \Delta t + b_k \sin 2\pi k \Delta f i \Delta t).$$

Функцию скорости перемещения ступиц колес определим как

$$\frac{dy}{dt} = \int_0^t \frac{d^2 y}{dt^2} dt = \sum_{k=1}^{N/2} \frac{1}{2\pi k \Delta f} (a_k \sin 2\pi k \Delta f i \Delta t - b_k \cos 2\pi k \Delta f i \Delta t).$$

Функцию перемещений вычислим таким образом:

$$y(t) = \int_0^t \frac{dy}{dt} dt = - \sum_{k=1}^{N/2} \frac{1}{4\pi^2 k^2 \Delta f^2} (a_k \cos 2\pi k \Delta f i \Delta t + b_k \sin 2\pi k \Delta f i \Delta t).$$

Следовательно, дискретная последовательность функции перемещения ступиц колес для стендовых и виртуальных испытаний может быть получена по коэффициентам разложения в ряд Фурье функции виброускорений в соответствии с выражением $\overline{y(t)} = F^{-1}(a'_k + j b'_k)$, где F^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье, а a'_k и b'_k – коэффициенты преобразования, вычисляемые по следующим формулам: $a'_k = -(2\pi k \Delta f)^{-2} a_k$, $b'_k = -(2\pi k \Delta f)^{-2} b_k$.

Об адекватности полученной модели реальному автомобилю судят по величине расхождения энергетических составляющих спектров виброускорений, вычисленных в контрольных точках кабины: на сиденьях, рулевой колонке, рычагах управления и на полу кабины.

В соответствии с правилами октавного анализа вычисление амплитудно-частотной характеристики в контрольных точках выполняется с использованием следующего алгоритма. Разложим функцию ускорения, измеренную в заданной контрольной точке кабины, в ряд Фурье по гармоническим составляющим. Коэффициенты разложения получим из соотношения $\overline{S}_y = a(\omega_k) + j b(\omega_k)$.

Спектр мощности на заданной частоте ω_k по определению вычисляется как $G(\omega_k) = a_y(\omega_k)^2 + j b_y(\omega_k)^2$. Ординату усредненного в полосе частот спектра мощности определим в соответствии с выражением

$$\bar{G}(\omega_p) = \sum_{P_{\text{низш}}}^{P_{\text{высш}}} \frac{G(\omega_k)}{P_{\text{низш}} - P_{\text{высш}} + 1},$$

а среднее квадратическое отклонение находится таким образом: $\sigma_l = \sqrt{\bar{G}(\omega_p)}$, где p – номер полосы усреднения, ω_p – средняя в полосе частота в герцах.

Параметры полос усреднения, построенных в соответствии с правилами октавного анализа, приведены в табл. 2. Длина реализации 8192 ординаты. Число отсчетов на гармонику высшей частоты равно четырем.

Т а б л и ц а 2. Полосы усреднения для выполнения октавного анализа

№ полосы	Параметры полос усреднения, Гц	Средняя в полосе частота f_l , Гц	Номера граничных отсчетов	Число ординат спектра в полосе
1	0,7 – 1,4	1,0	7 – 14	8
2	1,4 – 2,8	2,0	14 – 29	16
3	2,8 – 5,6	4,0	29 – 57	29
4	5,6 – 11,2	8,0	57 – 115	59
5	11,2 – 22,4	16,0	115 – 229	115
6	22,4 – 44,1	31,5	229 – 458	230
7	44,1 – 88,2	63,0	458 – 917	460
8	87,5 – 175	125,0	917 – 1824	918

Верификация математических моделей выполнена на основе результатов, полученных в процессе натуральных или стендовых испытаний. Степень точности верификации определялась величиной погрешности контролируемых параметров, получаемых на модели.

Заключение. В результате проделанной работы выделены основные этапы технологии моделирования, включающие в себя: исследование динамических характеристик упруго-диссипативных элементов автомобиля, разработку компьютерных моделей упруго-диссипативных элементов, проведение виртуальных и сравнительных испытаний с целью верификации моделей упруго-диссипативных элементов, сборку виброзащитных узлов и проведение их стендовых, виртуальных и сравнительных испытаний, поузловую разработку динамических сборочных единиц автомобиля, сборку полнокомплектной модели автомобиля, проведение виртуальных испытаний полнокомплектной модели с целью получения прогнозных характеристик вибронгруженности и сравнение их с заданием на разработку и усовершенствование конструкции по результатам моделирования. На примере исследования виброзащитных устройств большегрузного автомобиля показаны этапы подготовки и проведения стендовых экспериментов, необходимые требования к средствам управления и измерения, а также алгоритмы обработки экспериментальной информации.

Литература

1. Жук Д. М., Кузьмик П. И., Маничев В. Б. и др. Системы автоматизированного проектирования / Под ред. И. П. Норенкова. Мн., 1988.
2. Ротенберг Р. В. Подвеска автомобиля и его колебания. М., 1960.
3. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний: 2-е изд. М., 1980.
4. Кончак В. С., Колесникович А. Н., Лазакович С. П., Хитриков С. В. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 2. С. 20–25.

V. S. KONCHAK, S. V. KHARYTONCHYK, A. N. KALESNIKOVICH, S. P. LAZAKOVICH, Yu. I. NIKOLAEV,
Y. I. PETKO, S. V. HITRIKOV

MODELLING TECHNOLOGY OF FLUCTUATION DYNAMICS OF TRUCKS WITH USE OF PHYSICAL AND VIRTUAL TESTS

Summary

The modelling technology of dynamics of fluctuations for multicomponent systems is described. It is shown on an example of working out of dynamic model of a truck. Model assemblage was carried out with use of certain models of units of the vehicle verified by the results of bench tests. The technique of preparation of initial data for modeling of vibroprotective truck units is stated. The basic source of the information in this case are physical tests.