

работе представлены результаты моделирования для одного из перекрестков улично-дорожной сети города Таганрога.

Литература

1. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 271с.
2. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды М.: Наука, 1982. 319с.
3. Луканин В. Н., Буслаев А. П., Яшина М. В. Автотранспортные потоки и окружающая среда – 2: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. В. Н. Луканина. – М.: ИНФРА-М, 2001. 646с.
4. Методика расчетов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ автотранспортом на городских магистралях. -М.: НИИАТ, 1997. 54 с.
5. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2000. 779 с.
6. Патанкар С. В. Численные методы решения задач обмена и динамики жидкости Энергоатомиздат, 1984. 152с.

Моделирование плавности хода грузовых многоосных автомобилей

к.т.н. Кончак В.С., к.т.н. Петько В.И., к.т.н. Харитончик С.В., Колесникович А.Н.,
Лазакович С.П., Хитриков С.В., Николаев Ю.И.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Постановка задачи

Переход на рыночные методы реализации выпускаемой продукции значительно расширил ассортимент, в результате чего резко снизилась потребность в выпуске большого числа однотипных транспортных средств, что вызвало сокращение серийного производства. Возникла необходимость в разработке малых серий автомобилей и даже единичных экземпляров, выполняемых по заказам. Такой подход к производству автомобильной техники сильно сократил сроки на проектирование изделий, испытания и их доводку. Наиболее перспективным в этом случае является метод проектирования на основе сборки полнокомплектного транспортного средства из унифицированных узлов и агрегатов. Предполагается, что для проектирования имеется гамма типовых элементов, которые позволят создать конструкцию, обладающую необходимыми потребительскими свойствами. Возникает задача разработки такого подхода к процессу проектирования, который бы позволил еще на уровне проработки конструкции оценить по характеристикам имеющихся в наличии узлов и агрегатов динамические качества изделия.

Современные технологии моделирования позволяют провести достоверную оценку динамических свойств проектируемой механической системы при адекватном отображении всех связей в модели и правильном определении её исходных данных. При этом моделируется не только объект в целом, а и те его узлы и системы, которые непосредственно участвуют в имитации интересующих нас качеств. Конкретно в данной работе рассматривается задача исследования характеристик конструктивных элементов и многоосного автомобиля в сборе, обеспечивающих защиту людей и перевозимых грузов от воздействия колебаний, вызванных неровностями дороги, с использованием их динамических моделей. Следовательно, объектами моделирования и виртуального исследования будут упруго-диссипативные элементы, входящие в состав сборочных единиц автомобиля, которые обеспечивают его виброзащиту, а также модель комплектного автомобиля.

Метод исследования

Моделирование – это исследование объекта с использованием методов, отображающих его различные свойства (физические, химические, энергетические и другие), 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.

Задача исследования автомобиля как колебательной системы связана с решением системы дифференциальных уравнений, основанных на уравнении Лагранжа II рода [2]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial P}{\partial q_i} - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i}, \quad (1)$$

где: T – кинетическая энергия динамической системы, P – потенциальная энергия, R – диссипативная функция, характеризующая рассеивание энергии под действием сил сопротивления, q_i – обобщенная координата.

Подставив в (1) значения энергетических составляющих как функций обобщенных координат, получим систему дифференциальных уравнений движения автомобиля. Каждое уравнение полученной системы содержит коэффициенты жесткости всех упругих элементов (рессор, шин) и коэффициенты затухания. При исследовании плавности хода ставится задача получения энергетических показателей уровня вибрации на рабочем месте водителя, пассажиров или в местах расположения грузов. В случае превышения этого уровня применяют дополнительное поддрессирование, что значительно усложняет объект и его уравнение движения.

Любая модель – это отображение свойств реального объекта [3], об адекватности которой можно говорить лишь после проведения сравнительных испытаний, когда оценки модели и объекта по контролируемым параметрам совпадают в пределах заданной точности, т. е. после ее верификации. Верификация математических моделей осуществляется путем подстановки в исходные уравнения параметров, полученных по результатам дорожных или стендовых испытаний. Степень точности выполненной верификации определяется величиной погрешности контролируемых выходных параметров, получаемых на модели и в реальном эксперименте.

С другой стороны, на ранних стадиях проектирования натурный образец отсутствует и, следовательно, у разработчика отсутствуют его реальные характеристики, описывающие динамику объекта моделирования. Агрегатный, или модульный, принцип конструирования позволяет построить модель объекта из имеющихся уже в наличии 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, измерение и обработка которой позволит получить неизвестные коэффициенты математического представления моделируемого объекта (перемещения, скорости, ускорения, напряжения, силовые и моментные функции).

Другой 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 необходимо осуществлять в одинаковых условиях. Поэтому при разработке схем испытаний следует разрабатывать и методы моделирования режимов нагружения, совокупность которых будем называть виртуальным полигоном.

Программные средства для моделирования и анализа

Сформулированная в предыдущем разделе задача (1), является классической с точки зрения описания ее законами динамики твердого тела.

Для решения подобных задач динамики многокомпонентных систем существует множество пакетов программ, таких как MSC.ADAMS, SimPACK, LMS Virtual.Lab, Euler, Универсальный механизм и др. Каждый из перечисленных пакетов имеет свои преимущества и

недостатки в решениях конкретных задач. Рассмотрим более подробно программный комплекс MSC.ADAMS.

Программный комплекс MSC.ADAMS, имеющий в базовой комплектации препроцессор, постпроцессор и решатель, конвертирует построенную модель в уравнения движения и решает их численными методами. Кроме того, пакет содержит множество специализированных модулей, каждый из которых позволяет моделировать различные системы автомобиля, самолета, и любых других механизмов и систем. В пакете реализовано несколько методов формализации и решения систем однородных дифференциальных уравнений, что позволяет осуществлять моделирование механизмов различной степени сложности. Следует отметить, что основной решатель ADAMS используется для решения задач, описывающих механику абсолютно твердого тела. Поэтому при моделировании гибких конструкций, таких как рама автомобиля, предусмотрена возможность ввода модальных параметров конструкции, полученных в конечно-элементных пакетах, типа MSC.Nastran, ANSYS и т.д.

Как показал опыт использования пакета, он достаточно надежен для решения задач линейной механики.

Моделирование элементов виброзащиты связано с решением дифференциальных уравнений, полученных на основании второго закона Ньютона

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

решением которых будет функция

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

Для того, чтобы построенная математическая модель была адекватной моделируемому

объекту, по экспериментальным данным необходимо получить: $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ – собственную

частоту колебаний; $\beta = r/2m$ – коэффициент демпфирования (затухания); f и A_0 – амплитуды вынужденных и собственных колебаний соответственно; α_0 и α_1 – фазы собственных и вынужденных колебаний. Алгоритмы вычисления перечисленных параметров получены в [4], а фактическое математическое их представление запишем в виде следующих соотношений:

$$\begin{aligned} k &= \frac{f(\omega_i)}{A(\omega_i)} \cos \alpha_i; \\ r &= -\frac{f(\omega_i)}{A(\omega_i)} \sin \alpha_i; \\ \omega_0^2 &= \frac{f(\omega_i)}{A(\omega_i)} \cos \alpha_i + \omega_i^2; \\ \beta &= -\frac{f(\omega_i)}{A(\omega_i)} \sin \alpha_i; \\ \operatorname{tg} \alpha &= -\frac{r\omega_i}{k}. \end{aligned}$$

Предложенные алгоритмы реализованы в виде программного модуля и используются при обработке экспериментальных данных.

Роль стендовых и дорожных испытаний и примеры их реализаций

Важным этапом при решении задачи моделирования технических объектов является

исследование адекватности разработанной модели реальному объекту, т.е. его верификация. Источником для верификации моделей сборочных единиц являются стендовые испытания реальных конструкций. Учитывая, что реальный объект значительно богаче и разнообразнее модели, можно говорить лишь об адекватности ее только по контролируемому параметру или свойству. Так как предметом исследования является уровень вибрации, которая возникает вследствие перемещения неподрессоренных и поддрессоренных масс при движении автомобиля по неровностям дороги, предметом исследования как у моделей, так и реальных объектов будут частотные свойства исследуемых колебательных объектов. При этом исследованию будут подвергаться те узлы и агрегаты автомобиля, которые должны обеспечивать его виброзащитные свойства. Прежде всего, это – шины, подвески и сиденье водителя. Поэтому исследование с помощью стендового оборудования собственных частот колебаний перечисленных механических узлов, их фазовых характеристик, передаточных функций, коэффициентов жесткости и сопротивления перемещению позволит уточнить математическое представление объекта. Важную роль в трансляции уровня вибрации от дороги к рабочему месту водителя играет рама автомобиля, на которой фактически закреплены активные его массы и виброгасящие устройства. От свойств ее жесткости и демпфирования зависит величина перекрестных связей, управляющих процессом взаимного влияния элементов неподрессоренных масс на уровень вибрации в контролируемых точках.

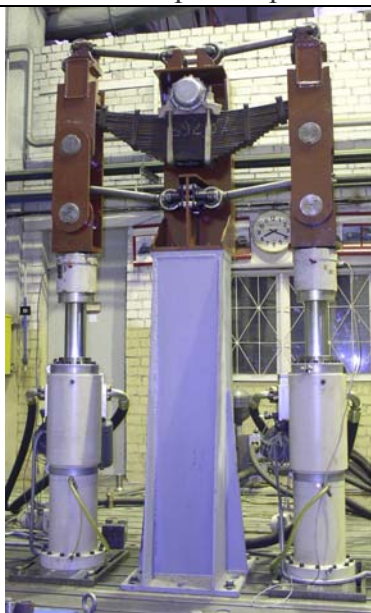
Экспериментальные исследования виброзащитных устройств большегрузных автомобилей выполняются на электрогидравлических стендах, которые состоят из устройства нагружения, крепежной плиты, оснастки для установки исследуемого объекта, датчиков, системы гидрорегуляторов для управления подачей потока жидкости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

В качестве нагружающих устройств нами использованы электрогидравлические цилиндры фирмы «SHENK», которые укомплектованы высокоточными электрогидравлическими средствами управления потоком жидкости и усилителями мощности. Процесс моделирования сигналов и управления экспериментальной установкой выполняет вычислительная машина, а операции измерения реакции объекта и выдачи цифровых последовательностей управляющих сигналов – устройство связи с объектом, которое в своем составе имеет цифро-аналоговые и аналогоцифровые преобразователи.

При разработке оснастки для установки объекта исследования на стенд необходимо соблюдать принцип максимального правдоподобия, для чего следует сохранить координаты приложения сил и перемещений, их направление, положение равновесия, величину статического напряжения и другие физические показатели эксперимента.

Управление гидроцилиндрами осуществляется полигармоническими сигналами с дискретно изменяющейся частотой. Обработка полученной информации осуществляется по разработанным алгоритмам.

Исследование свободных колебаний поддрессоренной массы автомобиля с импульсным возбуждением по каждому колесу (последовательно) осуществляется при натурных испытаниях и ставит своей задачей получить передаточные характеристики колебаний с учетом жесткости рамы. Результатом вычисления будет функция матриц, отображающая вертикальные перемещения колеса в пространственные колебания поддрессоренной массы. Как правило, такие испытания проводятся с помощью специализированных стендов. При отсутствии таких испытаний проводят методом подтягивания поддрессоренной массы либо сбрасывания с преграды, на которую автомобиль предварительно наезжает. При этом для каждого импульсного нагружения измеряются свободные колебания поддрессоренной 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.



а)



в)



б)



г)

Рис. 1. Электрогидравлические стенды для испытания элементов поддрессоривания автомобилей:

а) рессоры передней подвески автомобиля; б) балансиры задней подвески автомобиля; в) амортизаторы; г) пружины системы поддрессоривания кабины

Наличие динамических характеристик шин, элементов поддрессоривания и рамы обеспечивают завершение математического описания колебательных свойств автомобиля.

На рисунке 2 представлен результат моделирования многоосного самосвала в пакете MSC.ADAMS и «собранного» из верифицированных моделей рамы, элементов подвески мостов, кабины и сидения водителя.

Методы моделирования функции нагружения

Описанный выше подход к построению динамических моделей колебательных систем с целью исследования виброн нагруженности на рабочем месте водителя и пассажира предполагает, что у исследователя имеется в наличии система моделирования режимов нагружения для возбуждения виртуальных либо реальных колебаний исследуемых конструкций. Такая система должна содержать набор средств для моделирования набора функций, являющихся

типовым решением систем дифференциальных уравнений. В качестве таких функций чаще всего используются гармонические функции, являющиеся естественным базисом для решения задач установившихся колебаний. Тестирование гармоническими функциями нелинейных систем, позволяет определить вид 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 различной амплитудой, фазой, частотой, и временем дискретизации.

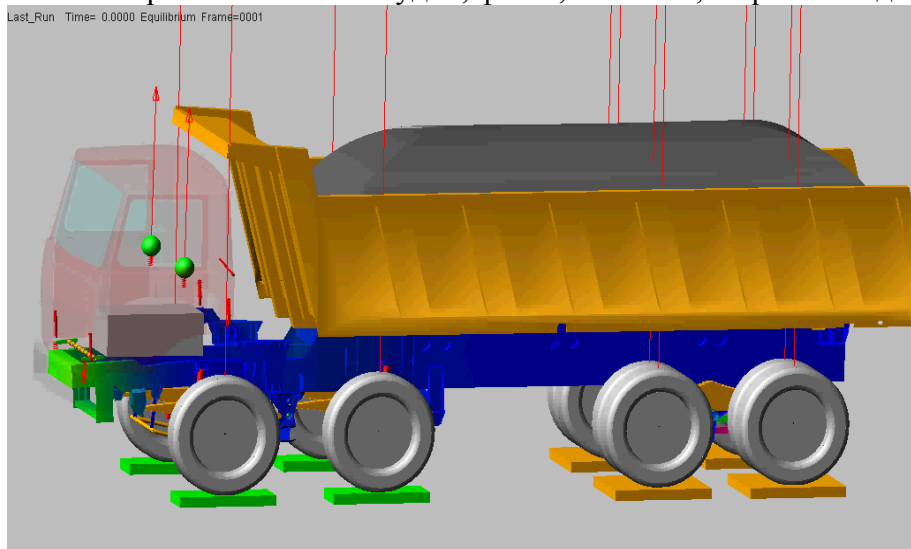


Рис. 2. Динамическая модель многоосного самосвала в процессе виртуальных виброиспытаний

Кроме того, для моделирования различных тестовых типовых профилей, имеющих на испытательных полигонах («спящий полицейский», шведская брусчатка) разработан ряд функции реализующих их.

Для моделирования реальных профилей дороги используют полигармонические сигналы, способ построения которых может быть как детерминированный, так и случайным.

При этом в качестве исходных данных для построения виртуальной дороги используются оценки спектральной плотности мощности $G(\omega_k)$ неровностей моделируемого профиля и скоростной режим, при котором были проведены измерения. Тогда случайная реализация из ансамбля может быть получена в соответствии с выражениями:

$$x_l(i\Delta t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{G(\omega_k)} \sin(\omega_k i\Delta t + \xi_{lk})$$

для колеи по левому борту,

$$x_p(i\Delta t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{G(\omega_k)} \sin(\omega_k i\Delta t + \xi_{pk})$$

для колеи по правому борту.

Здесь $\omega_k = 2\pi k\Delta f$, Δf – дискретность по частоте, Δt – дискретность по времени, ξ_{lk} – массив равномерно распределенных в интервале $(0; 2\pi)$ случайных чисел. Для левого и правого борта выбираются два разных, статистически независимых массива случайных чисел.

Возможен вариант, когда измеряют длину неровностей. Тогда переход к временному представлению осуществляется через скорость перемещения измерительной аппаратуры вдоль дороги.

Если измерение проводится на автомобиле, который оборудован шинами с неизвестными характеристиками, а при построении модели автомобиля характеристики шин не заданы, то исходными данными могут быть ускорения, измеренные в процессе натурных испы-

таний на осях всех колес. Перемещение ступиц колес по полученным ускорениям вычисляются следующим образом. Разложим функцию ускорения в ряд Фурье:

$$\overrightarrow{a(k\Delta\omega) + jb(k\Delta\omega)} = F \frac{d^2 y}{dt^2}.$$

Коэффициенты Фурье–преобразования функции перемещений пересчитываются по коэффициентам $a_k(\omega)$ и $b_k(\omega)$ в соответствии с формулой

$$a'_k(\omega) + jb'_k(\omega) = -\frac{1}{k^2 \Delta\omega^2} a_k - \frac{1}{k^2 \Delta\omega^2} b_k,$$

а функция перемещения будет определена как

$$\overrightarrow{y(i\Delta t)} = F^{-1}(\overrightarrow{a'_k + jb'_k}).$$

Используя $y(i\Delta t)$ по каждому из колес как перемещение ступиц, получим модель вибронегативности, адекватную реальной дороге.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо осуществить:

- моделирование используемых для данного класса автомобилей узлов шасси автомобиля МЗКТ;
- стендовые испытания тех же узлов;
- виртуальные испытания моделей;
- верификацию моделей;
- сравнительные испытания.

Выводы

В результате работы установлено, что исследование систем поддрессирования многоосных автомобилей на базе виртуальных испытаний дает положительный эффект при сборке полнокомплектной динамической модели системы поддрессирования или всего транспортного средства из верифицированных на основе стендовых испытаний моделей подсистем, узлов или отдельных элементов составляющих данную полнокомплектную модель. Верификация моделей отдельных узлов, или подсистем ведется на основании корректировки динамических свойств отдельных узлов модели по результатам стендовых испытаний их натурных образцов. Стендовые испытания натурных образцов являются неотъемлемой частью процесса моделирования и необходимы для изучения реальных динамических свойств объекта с целью адекватного отображения их в модели. В рамках машиностроительного предприятия стендовые испытания отдельных узлов необходимы для наращивания базы данных по всему ассортименту комплектующих, что в дальнейшем позволит в кратчайшие сроки проводить широкий спектр виртуальных испытаний на базе верифицированных моделей.

Литература

1. Жук Д.М., Кузьмик П.И., Маничев В.Б. и др. По ред Норенкова И.П. Системы автоматизированного проектирования, кн.9. Иллюстрированный словарь. Мн., «Высшая школа», 1988, 159 с.
2. Ротенберг Р.В.. Подвеска автомобиля и его колебания. МашГиз, М., 1960, 356 с.
3. Трудоношин В.А., Пивоварова В.Н.. Системы автоматизированного проектирования, кн.4. Математические модели технических объектов. Мн., «Высшая школа», 1988, 159 с.
4. Кончак В.С., Колесникович А.Н., Лазакович С.П., Хитриков С.В. Методы определения динамических характеристик упругих элементов подвески по экспериментальным данным. Известия НАН Беларуси, серия физ-техн.наук, № 2, Мн., 2008, С.20–25.

Поршневой двигатель с внутренней рекуперацией энергии выхлопных газов

д.т.н. проф. Глейзер А.И.

Тольяттинский государственный университет

Проблема сокращения расхода топлива автомобильным транспортом является чрезвычайной