

УДК 539.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИИ СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ

© 2013 г. **Н.Н. Берендеев¹, Н.В. Зимин², Н.В. Леонтьев¹,
А.К. Любимов¹, И.А. Смирнов², Е.В. Сторожев²**

¹Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

²ЗАО «Время-Ч», Нижний Новгород

ljubimov@mm.unn.ru

Поступила в редакцию 29.10.2013

Предложена экспериментально-расчетная методика определения демпфирующих характеристик сложных конструкций с использованием вибростенда Star28x, обеспечивающего трехмерное псевдослучайное нагружение, и методов численного моделирования. Приведены результаты исследований для реальной конструкции.

Ключевые слова: вибростенд, трехмерное псевдослучайное нагружение, матрица демпфирования, датчики ускорения, функция мощности спектральной плотности.

Введение

Уравнение колебаний конструкции как линейной распределенной системы можно представить, используя метод конечных элементов (МКЭ), в виде матричного уравнения движения [1, 2]

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$ – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости; $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ – соответственно векторы ускорений, скоростей и перемещений в узлах; $\{F\}$ – вектор приложенных внешних усилий.

Матрица демпфирования определяет диссипацию энергии конструкции. Формально матрицу можно получить аналогично матрицам жесткости и масс, вводя из каких-либо дополнительных предположений константу внутреннего трения и суммируя соответствующие матрицы элементов. Наибольший интерес при анализе поведения силовых конструкций, как правило, представляет влияние на диссипацию энергии сухого трения и гистерезисного (внутреннего) демпфирования. В этом случае матрица демпфирования аппроксимируется линейной комбинацией вкладов сопротивления движению, связанных с двумя матрицами системы – матрицей масс и матрицей жесткости:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (2)$$

где коэффициенты α , β – константы демпфирования Рэлея. Параметр α характери-

зует инерционное демпфирование, а параметр β – конструкционное. Значения параметров требуют определения в каждом конкретном случае.

1. Методика определения демпфирующих характеристик конструкции

Одними из основных параметров, определяющих поведение конструкции в условиях гармонического, случайного или другого динамического воздействия, являются ее демпфирующие характеристики.

Рассмотрим некоторые методики, позволяющие оценить такие характеристики, с учетом их применимости для оценки демпфирующих свойств сложных конструкций.

В основу первой методики положено предположение о том, что демпфирующие характеристики полностью описываются внутренним трением элементов конструкции, связанным с гистерезисными потерями [3], и так называемым конструкционным демпфированием [3], определяемым сухим трением в узлах сопряжения в конструкции. При применении этой методики возникают две проблемы, затрудняющие ее использование. Во-первых, конструкция, как правило, выполнена из различных материалов и для большинства их них отсутствуют сведения о гистерезисных потерях; следовательно, требуются дополнительные эксперименты по определению параметров внутреннего трения в элементах конструкции. Во-вторых, конструкция состоит из большого количества элементов, между которыми присутствуют связи, что делает комбинацию элементов чрезвычайно сложной.

В основу второй методики положен анализ поведения конструкции при вынужденных гармонических колебаниях [3]. По результатам экспериментального исследования колебаний конструкции при заданных воздействиях строится амплитудно-частотная характеристика, на которой выбирается единичный пик, соответствующий резонансу, определяется его ширина на высоте двух третей от высоты пика и по известным соотношениям [3] находится логарифмический декремент затухания. Этот метод эффективен для достаточно простых систем. В случае же сложных систем, состоящих из значительного числа взаимодействующих элементов, ввиду плотного расположения собственных частот часто невозможно выделить уединенный пик, что приводит к серьезным затруднениям при использовании методики.

В основе третьей методики [4] лежит обработка виброграммы конструкции в условиях собственных затухающих колебаний и исследование ее огибающей.

В настоящей работе для определения демпфирующих характеристик сложной конструкции, включающей значительное число взаимодействующих элементов, поведение которой описывается уравнением (1), предлагается расчетно-экспериментальная методика, основанная на совместном применении методов натурального и численного экспериментов.

В основе предлагаемой методики лежат допущения о том, что: во-первых, функция мощности спектральной плотности (МСП), получаемая как отклик конструкции на случайное внешнее воздействие, позволяет оценить собственные частоты конструкции [5, 6]; во-вторых, вид функции МСП определяется уровнем демпфирования в конструкции. Методика с учетом введенных допущений о характере демпфирования в конструкции нацелена на определение величины β в соотношении (2) для конструкции в целом.

Предполагается, что конструкционное демпфирование, возникающее вследствие действия сил сухого трения в соединениях при колебаниях конструкции, существ-

венно более значимо, чем демпфирование, создаваемое действием внутреннего трения в материале деталей. В этом случае в соотношении (2) полагаем с достаточной степенью точности $\alpha = 0$.

Введем два параметра, характеризующих пик на функции МСП, соответствующий собственной частоте: параметр ξ , определяющий высоту пика функции МСП, соответствующего собственной частоте, и параметр ζ , определяющий ширину пика в его основании (рис. 1).

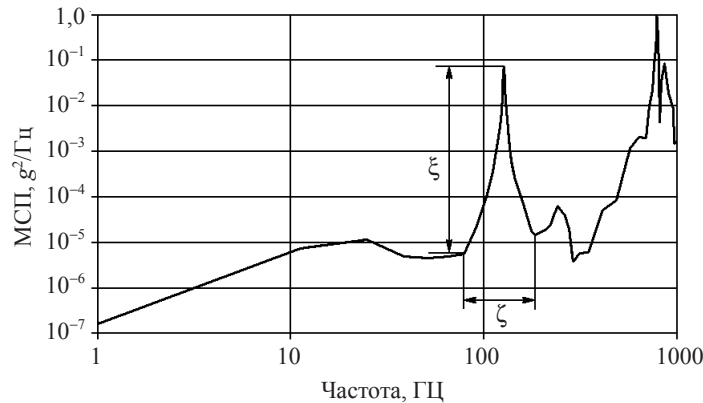


Рис. 1. Параметры, характеризующие влияние уровня демпфирования на функцию МСП

Анализ функций мощности спектральной плотности показал, что уровень демпфирования зависит от величины

$$\vartheta = \frac{\xi}{\zeta}. \quad (3)$$

Предлагаемая расчетно-экспериментальная методика оценки уровня демпфирования сложной конструкции включает в себя следующие этапы:

- экспериментальное определение функций МСП для исследуемой конструкции в конечном числе точек;
- анализ полученных в эксперименте данных, выбор наиболее характерной для рассматриваемой конструкции функции МСП и определение наиболее значимых l пиков, вычисление для них отношений $\vartheta^{\text{экс}j} \{j = \overline{1, l}\}$ согласно выражению (3);
- задание величины области допустимых значений коэффициента β :

$$\beta \in [0, \tilde{\beta}]; \quad (4)$$

- замена непрерывного интервала, определяемого соотношением (4), на его дискретный аналог

$$\{\beta_i \mid i = \overline{1, d}\}, \quad \beta_1 = 0, \quad \beta_d = \tilde{\beta}; \quad (5)$$

- численный анализ конструкции с использованием МКЭ при действии случайной нагрузки с заданными свойствами для каждого из значений $\{\beta_i\}$ дискретного аналога интервала (5) и построение по его результатам функций МСП;

- анализ функций МСП, полученных в численном эксперименте, с целью нахождения пиков, соответствующих собственным частотам; определение для выбранных l пиков из расчетных функций мощности спектральной плотности характеристики $\vartheta_i^j, i = \overline{1, d}$ согласно (3);

- построение полинома $\mathfrak{g} = \mathfrak{g}^j(\beta)$, аппроксимирующего значения отношения (3) для каждого из l пиков;
- построение свертки

$$S_g = \sqrt{\sum_{j=1}^l (\mathfrak{g}^j(\beta) - \mathfrak{g}^{\text{экс}j})^2}; \quad (6)$$

- определение искомого значения коэффициента β^* путем минимизации величины свертки (6):

$$S_g(\beta^*) = \min S_g(\beta).$$

Полученное значение коэффициента β^* используется для определения матрицы демпфирования согласно (2).

2. Результаты экспериментальных исследований

2.1. Вибростенд Star28x. Для экспериментального определения функции МСП конструкции в конечном числе точек использовался вибростенд Star28x. Конструкция стенда обеспечивает случайные колебания рабочего стола с шестью степенями свободы. Возбуждение стола производится восемью пневматическими вибраторами, каждый из которых генерирует псевдослучайное ударное нагружение типа «белого шума» в диапазоне частот от 20 до 6500 Гц. Среднеквадратичное отклонение (СКО) ускорения изменяется в диапазоне от 3 до 30 g. Максимальная масса испытываемой конструкции, закрепляемой на столе, составляет 227 кг.

Программное обеспечение стенда позволяет задавать историю нагружения, т.е. закон изменения величины СКО с течением времени, осуществляет контроль с помощью датчиков ускорения (ДУ) за точностью реализации программы нагружения, находит численную оценку функции спектральной плотности, выполняет визуализацию реализаций во времени величин ускорения и скорости, а также вычисляет ряд других характеристик. Информация определяется для каждого ДУ. Общее число каналов, к которым подключаются датчики в данной версии стенда, равно четырем. Датчики ускорения DYTRAN модели 3030B4 позволяют проводить измерения в диапазоне частот от 2 до 10000 Гц, резонансная частота датчика 30 кГц, максимальное значение ускорения 1000 g.

2.2. Колебания рабочего стола. Рабочий стол стенда выполнен в виде массивной квадратной металлической плиты размером 711×711 мм с отверстиями для крепления испытываемой конструкции.

С целью изучения характеристик вибрации стола, возникающей под действием вибраторов, на него крепились три датчика, позволяющих проводить измерения в трех взаимно ортогональных направлениях, а также ДУ, контролирующей точность реализации истории нагружения в вертикальном направлении. Направления горизонтальных осей OX , OY были выбраны параллельно сторонам стола, ось OZ – перпендикулярно плоскости стола. История нагружения задавалась в виде постоянного значения СКО, равного 15g, в течение 5 минут.

После проведенных экспериментов [5] получены функции МСП $S_i(\omega)$, реализации процессов изменения величин скорости V_i и ускорения W_i , $i = x, y, z$, для различных точек стола, результаты обработки реализаций процессов изменения величин ускорения методом «падающего дождя».

Функции МСП, полученные для трех осей, имеют четко выраженный пик, что

позволяет сделать вывод об узкополосности случайных процессов, описывающих ускорение стола вдоль осей. Предположение об узкополосности подтверждается также характерной формой реализаций процессов изменения величин ускорения вдоль осей. Обработка реализаций процессов изменения величин ускорений в направлении осей методом «падающего дождя» дает основание для вывода о том, что одномерные функции распределения значений случайного процесса описываются нормальным законом распределения.

Для оценки стабильности получаемых результатов при заданной истории нагружения были выполнены три одинаковых эксперимента. В каждом опыте определялись значения частот, соответствующие максимуму функции спектральной плотности вдоль каждой оси. Все полученные значения находились в интервале от 1257 до 1288 Гц, что подтверждает стабильность результатов. Были проведены эксперименты для случая, когда ДУ в плоскости стола были повернуты на 45° относительно первоначального направления. Результаты последних экспериментов для всех характеристик хорошо совпадают с исходными. Экспериментально показана независимость результатов от длительности интервала нагружения и величины СКО, от точки расположения датчиков ускорения.

Анализ результатов экспериментов [5, 6] позволяет сделать вывод о том, что одномерные случайные процессы, описывающие колебания стола в направлении осей OX , OY , OZ , являются стационарными узкополосными гауссовскими процессами. Этот вывод согласуется с результатами теории случайных процессов о воздействии процесса типа «белый шум» на стационарную линейную систему [1]. При воздействии широкополосного процесса пики получаемой спектральной плотности соответствуют собственным колебаниям системы. Отметим, что для полного описания вибрации стола необходимо использовать понятие многомерного случайного процесса. Случайные одномерные процессы, определяемые в ходе экспериментов, являются его частными случаями.

2.3. Экспериментальная функция МСП конструкции. Исследуемая конструкция массой 23,5 кг (рис. 2) состоит из двух блоков: герметичного блока квантового водородного дискриминатора и негерметичного блока радиотехники.

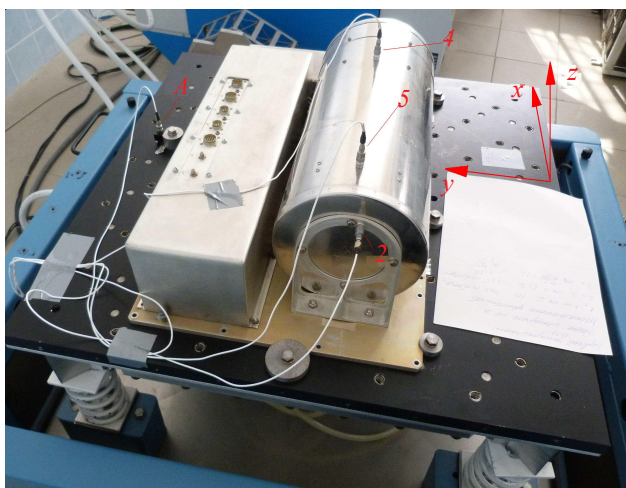


Рис. 2. Расположение на конструкции датчиков ускорений в точках 2, 4, 5; А – управляющий датчик

Блоки закреплены на опорной плите с размерами основания 360×629×12 мм и представляют собой сложную систему, содержащую значительное количество взаимодействующих силовых элементов различного вида (тонкостенные оболочки, трехмерные массивные тела и т.д.), которые выполнены из различных материалов. Блок квантового водородного дискриминатора состоит из высоковакуумного узла, содержащего систему формирования пучка атомов водорода (генератор ВЧ, источник водорода, коллиматор, сортирующая магнитная система), и СВЧ-резонатора с размещенной в нем кварцевой накопительной колбой, которая представляет собой цилиндрический сосуд из кварцевого стекла диаметром 60 мм, высотой 194 мм с ножкой, толщиной стенки 0,7 мм. В блок радиотехники входят узел АПЧ, приемник, блок питания, блок управления и телеметрии. Указанные узлы сами по себе являются сложными конструкциями, включающими в себя значительное количество элементов. Демпфирующие характеристики известны только для ограниченного количества материалов установки.

С целью получения функций МСП конструкции были поставлены эксперименты по исследованию отклика конструкции на случайное воздействие. При проведении экспериментов конструкция своим основанием жестко крепилась к столу стенда. Виброизмерения проводились в наиболее характерных точках конструкции при различных ориентациях датчиков ускорений по отношению к координатным осям (направления координатных осей показаны на рис. 2). Функции МСП были получены экспериментально в 16 точках конструкции.

На рис. 2 показаны датчики, расположенные в точках 2, 4, 5. В точке 2 (зона стойки на днище внешней обечайки) датчик ориентирован вдоль оси OX , в точке 5 (зона расположения пружин на верху цилиндрической части внешней обечайки) – вдоль оси OZ , в точке 4 (зона днищ экранов на верху цилиндрической части внешней обечайки) – вдоль оси OZ . Контроль и управление выполняется ДУ, направленным вдоль оси OZ (точка А).

Вид функции МСП случайного процесса нагружения, полученной в эксперименте с ДУ, установленным на рабочем столе и направленным вдоль оси OZ , в двойных логарифмических координатах показан на рис. 3. Эта функция использовалась для задания характеристик внешнего воздействия при выполнении численных экспериментов.

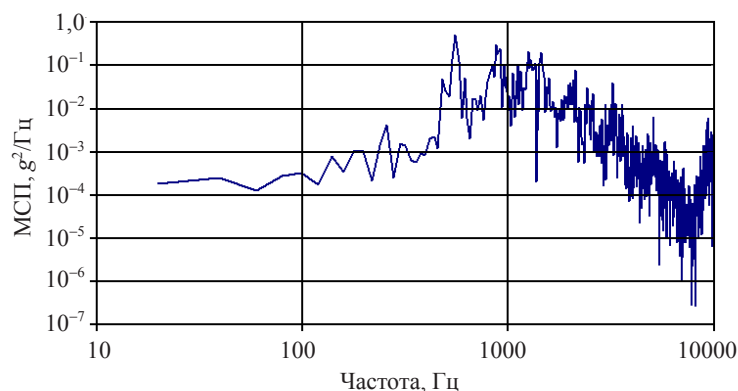


Рис. 3. Функция МСП в двойных логарифмических координатах

Результаты двух натурных экспериментов по определению функции МСП конструкции в точках 2, 4, 5 представлены на рис. 4 и 5.

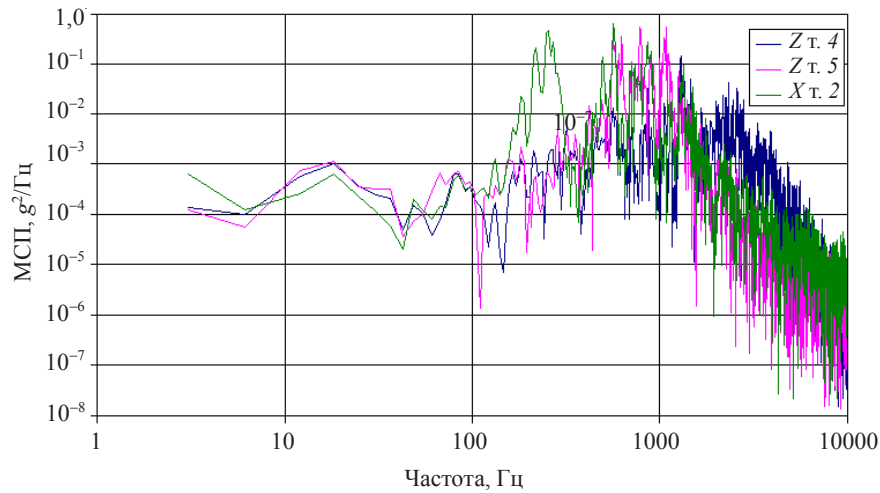


Рис. 4. Функции МСП для точек 2, 4 и 5 при управлении по оси OZ (эксперимент 1)

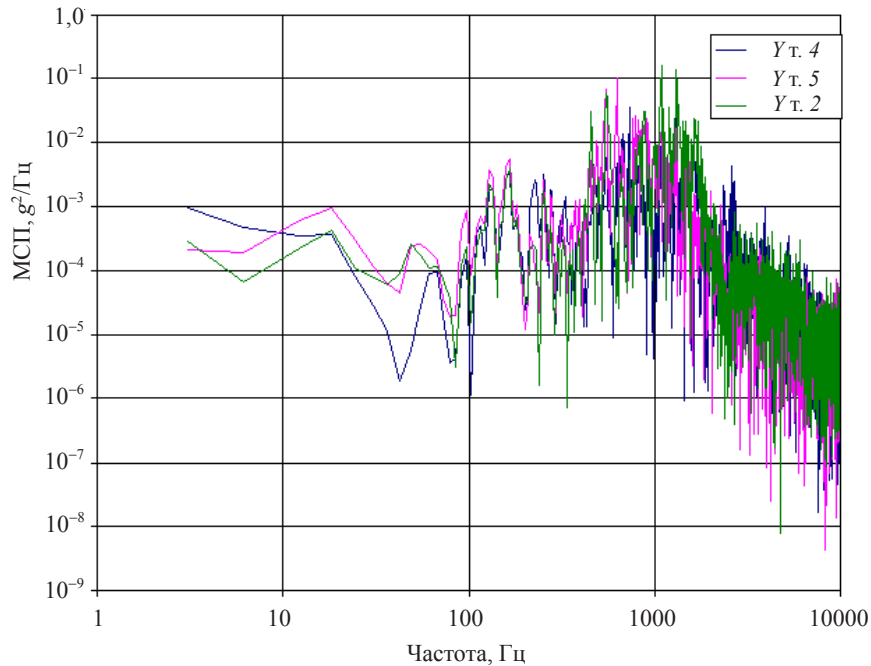


Рис. 5. Функции МСП для точек 2, 4, 5 при управлении по оси OZ (эксперимент 2)

Обработка и анализ результатов, полученных при проведении экспериментов, позволили в дальнейшем выбрать функции МСП, наиболее подходящие для определения демпфирующих характеристик.

2.4. Оценка демпфирующих характеристик конструкции. Для определения демпфирующих характеристик конструкции в соответствии с предложенной методикой были выполнены численные эксперименты с использованием МКЭ. К конструкции прикладывалось случайное воздействие в жесткой заделке опорной плиты. Такое случайное воздействие имело функцию МСП, показанную на рис. 3. Интервал (5) изменения коэффициента β принимался равным $[0, 0,1]$, дискретные значения

коэффициента β в (6) имели значения 0; 0,01; 0,05; 0,1. Указанный набор значений коэффициентов выбирался в соответствии с рекомендациями стандартов [7–9]. В соответствии с выбранными значениями выполнялись численные эксперименты.

На рис. 6 показаны для точки 2 (см. рис. 2) расчетные значения функции МСП в направлении оси OX при различных величинах коэффициента собственного трения. Воздействие задавалось в направлении оси OZ . На рисунке также приведена функция МСП в точке 2, полученная экспериментально.

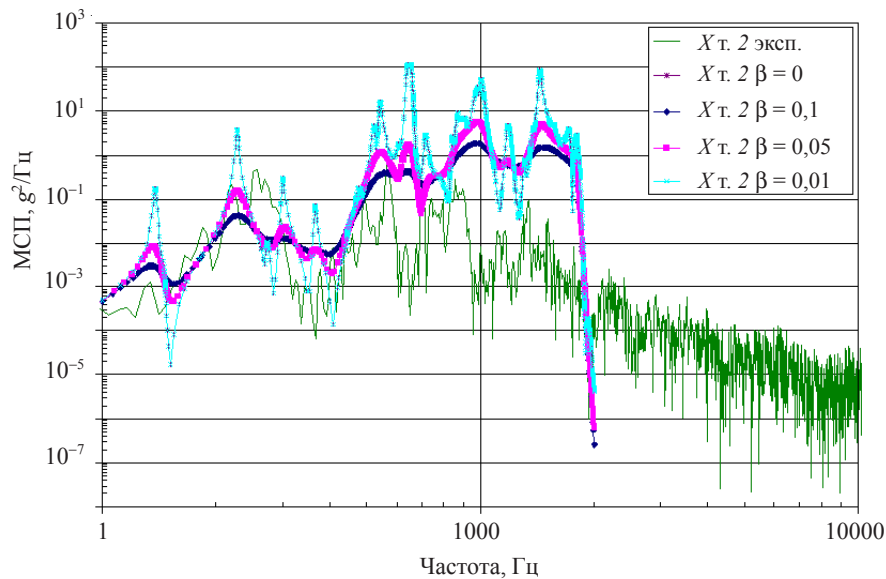


Рис. 6. Функции МСП для точки 2 в направлении оси OX при управлении по оси OZ

На основе анализа полученных результатов (см. рис. 4–6) была получена свертка S_{θ} . С использованием процедуры *lsqnonlin* пакета MATLAB, в которой реализованы алгоритмы Гаусса – Ньютона и Левенберга – Марквардта [10, 11], был найден минимум свертки. Данному минимуму соответствует искомый коэффициент собственного трения в конструкции $\beta^* = 0,0497$.

Отметим, что значения величины β^* , определенные с использованием экспериментальных данных для других точек конструкции, отличались от указанной на величину не более 10%. Полученные значения коэффициента демпфирования соответствуют рекомендуемым [7] значениям для сложных конструкций.

Заключение

Рассмотрены основные этапы реализации предложенной расчетно-экспериментальной методики определения демпфирующих свойств сложных многокомпонентных конструкций. Выполнена оценка демпфирующих свойств для сложной конструкции, показавшая эффективность предлагаемой методики.

Список литературы

1. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1981. 351 с.
2. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1982. 447 с.

3. Вибрации в технике: Справочник в 6 т. / Ред. совет В.Н. Челомей (предс.). Т. 6: Защита от вибраций и ударов / Под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. 456 с.
4. Вибрации в технике: Справочник в 6 т. / Ред. совет В.Н. Челомей (предс.). Т. 2: Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. М.: Машиностроение, 1979. 351 с.
5. Берендеев Н.Н., Жидков А.В., Любимов А.К. Экспериментально-расчетная методика определения собственных частот конструкции // Вестник Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского / Н.Новгород: Изд-во ННГУ. 2010. №1. С. 144–151.
6. Любимов А.К. Определение собственных частот конструкции с использованием трехмерного случайного воздействия // Вестник Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского / Н.Новгород: Изд-во ННГУ. 2011. №4(2). С. 214–216.
7. ГОСТ Р 53190-2008 (МЭК 60088-2-81:2003) Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра. 25 с.
8. ГОСТ 30630.1.8-2002 (МЭК 60068-2-57:1989) Методы испытания на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий: Испытания на воздействие вибрации с воспроизведением заданной акселерограммы процесса. 16 с.
9. MIL-STD-810F. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests. 2000. 539 p.
10. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. Matlab 7: Программирование, численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 752 с.
11. Каханер Д., Моулер К., Нэй С. Численные методы и программное обеспечение. М.: Мир, 2001. 575 с.

DAMPING CHARACTERISTICS DEFINITION OF STRUCTURES WITH COMPLEX NATURE

N.N. Berendeyev, N.V. Zimin, N.V. Leontyev, A.K. Lyubimov, I.A. Smirnov, E.V. Storozhev

The experimental-calculation technique of complex structures damping characteristics definition with use of the Star28x vibrostand, providing three-dimensional pseudorandom loading, and the numerical modeling methods is suggested. The results of the analysis for structure are given.

Keywords: vibrostand, 3D pseudorandom loading, damping matrix, acceleration transducer, power spectral density.