

УДК 621.

И. Н. Овчинников, Н. А. Малахов, С. М. Николаев

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия

E-mail: iovchin@bmstu.ru**ИСПЫТАНИЯ НА ШИРОКОПОЛОСНУЮ СЛУЧАЙНУЮ ВИБРАЦИЮ НА СОБСТВЕННЫХ ПОЛОСАХ СПЕКТРА И ИХ АППАРАТУРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ**

Обнаружено влияние случайной вибрации спектра на долговечность. Введена концепция так называемых полос спектра механических систем. Эти полосы похожи на резонансные частоты механических систем, но проявляются при широкополосной случайной вибрации. «Собственные полосы спектра» колебаний являются тяжелейшими режимами нагрузки, как и резонансные колебания. Смоделировано специальное оборудование для испытания на усталость при тяжелейшем режиме нагрузки.

Ключевые слова: широкополосная случайная вибрация, собственные полосы спектра, механические системы, резонансные колебания, долговечность

I. N. Ovchinnikov, N. A. Malahov, S. M. Nikolaev**TESTS ON BROADBAND RANDOM VIBRATION ON THEIR OWN SPECTRUM BANDS AND THEIR HARDWARE IMPLEMENTATION**

The influence of the random vibration spectrum width on the durability is discovered. The concept of so-called spectrum bands is introduced. These bands are similar to the resonance frequencies of mechanical systems, but they appear under random vibration. Own spectrum bands oscillation are the hardest loading mode as well as resonance oscillations. The special hardware for fatigue test under the hardest loading mode is designed.

Keywords: broadband random vibration, own spectrum bands, mechanical systems, resonance oscillations, durability

Еще в недавние годы основная часть доводки, в том числе и вибропрочности конструкций и двигателей ракетно-космической и авиационной техники, проходила в ходе натурных испытаний. Для проведения ресурсных испытаний современного авиационного двигателя в течение принятой нормы в 5000 часов необходимо порядка 60 цистерн топлива, и раньше ресурсные испытания практически не ограничивались. Стоимость такой продукции оказывалась чрезвычайно высокой, и сейчас взят курс на резкое сокращение количества натурных испытаний, повышение роли расчетных работ и лабораторных испытаний, в том числе лабораторных вибрационных испытаний элементов конструкций.

При испытаниях на вибрацию стоят две основные проблемы:

1. Получение достоверных усталостных характеристик материала при нагрузках, близких к эксплуатационным, исследование виброн нагруженности конструкции и прогнозирование на их основе долговечности объекта испытаний в условиях эксплуатации. Особенно важно качественное проведение испытаний при выборе материала для конструкции.

2. Оценка надёжности и вибропрочности объекта испытаний за заданное время при заданных нагрузках. При этом по завершении испытаний нет достоверных сведений об оставшемся ресурсе объекта, а доводить конструкцию до разрушения, многие из которых уникальны, чрезвычайно дорого.

В настоящее время для лабораторных испытаний используют следующие виды нагружения: гармоническое воздействие (в том числе со сканированием); полигармоническое воздействие; случайное узкополосное воздействие (в том числе со сканированием); случайное широкополосное воздействие; воспроизведение

эксплуатационного спектра. Наиболее эффективны и получили широкое распространение в мировой практике испытания на широкополосную случайную вибрацию (ШСВ).

Международная электротехническая комиссия (МЭК) предъявляет к испытаниям два основных требования: достоверности результатов и их воспроизводимости в различных лабораториях и различным персоналом, которая особенно важна при проведении приёмо-сдаточных испытаний. Требование МЭК по воспроизводимости результатов, по сути, является требованием стандартизации испытательных режимов. За рубежом разработан целый ряд стандартов для испытаний на ШСВ, в том числе внедряемый сейчас в нашей стране [1], в которых предложено использовать достаточно простую, прямоугольную форму спектра, получаемую после «нивелирования» динамики объекта. Такая форма спектра, казалось бы, удобна для воспроизводимости режима. Но номенклатура объектов испытаний очень широка, и все они имеют свои динамические характеристики. Общими рекомендациями, которые изложены в этих стандартах, проблему воспроизводимости результатов испытаний решить окончательно не удалось. Очевидна необходимость учета динамики объекта.

При отработке новой техники проводятся испытания различного назначения по своим методикам: на вибропрочность, на надежность, на долговечность, на ремонтпригодность, конструкторско-доводочные и контрольно-выборочные, приемо-сдаточные. Назрела проблема унификации всех видов испытаний. Длительность эксплуатации большинства видов техники остро ставит проблему ускоренных испытаний, которую невозможно решить только увеличением уровня нагрузки, так как при этом может измениться закон накопления усталостных повреждений. Для реализации ускоренных испытаний необходимо решение задачи по формированию «тяжелейшего вибрационного состояния», поставленной достаточно давно в [0]. Здесь сказано: «Если было бы известно, какое состояние является тяжелейшим, то достаточно провести испытания на этом единственном режиме». Сейчас наиболее достоверным физическим параметром, характеризующим степень опасности виброн нагружения, является время до разрушения объекта, поэтому критерий максимального нагружения однозначно определяется долговечностью. И если при гармоническом нагружении нет проблем с воспроизводимостью результатов испытаний, когда тяжелейший режим – резонансный, использующий собственные частоты объекта, то и тяжелейший режим ШСВ, характеризуемый в первую очередь шириной спектра, должен формироваться с учетом динамики объекта.

«Изучение колебаний, как и вообще всех задач механики, должно основываться на эксперименте. Использование всякой теории неизбежно связано с некоторыми специфическими трудностями. Проблема состоит не просто в точности вычислений. Мы никогда не можем быть уверены в том, что не пренебрегли чем-то весьма существенным» [3]. Именно поэтому делался акцент на экспериментальные исследования долговечности и главным образом при ШСВ, которое является наименее изученным, хотя и основным эксплуатационным нагружением.

Использовалась новая методика испытаний [4] и разработанный бесконтактный емкостной датчик изгибных деформаций [5], который, в отличие от тензорезистора при длительном нагружении не накапливает повреждений и не изменяет метрологических характеристик, не разрушается и не отклеивается. Результаты эксперимента для консольной балки (образца) при кинематическом нагружении на десяти режимах (рис. 1) представлены в виде кривых усталости (рис. 2) и впервые в практике

испытаний в виде кривых «вибронгруженности» (рис. 3) – зависимости времени разрушения образца (t_p) от виброскорости (v_{cp}) в опасном сечении (в заделке).

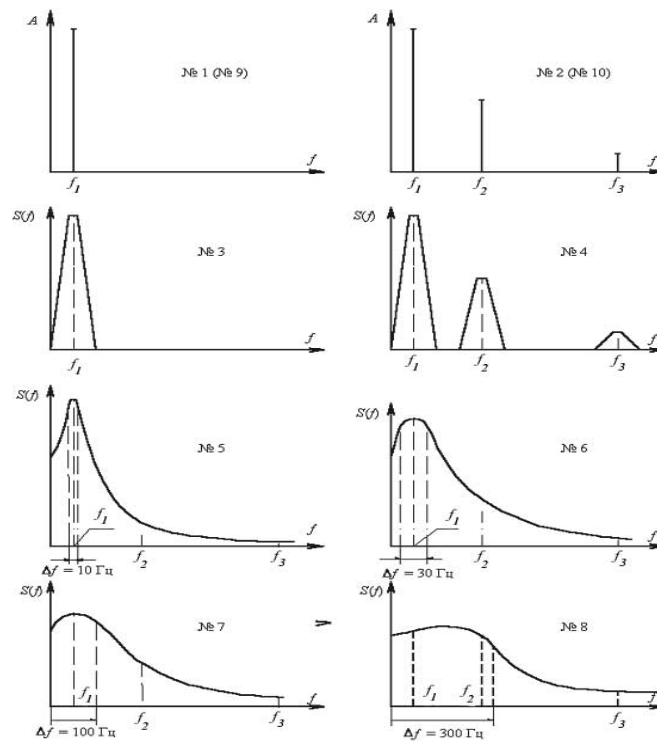


Рис. 1. Амплитудно-частотные спектры испытательных режимов: А – амплитуда вибровоздействия; f_1, f_2, f_3 – собственные частоты образцов; $S(f)$ – спектральная плотность мощности вибровоздействия; Δf – ширина спектра, формирующего режимы фильтров

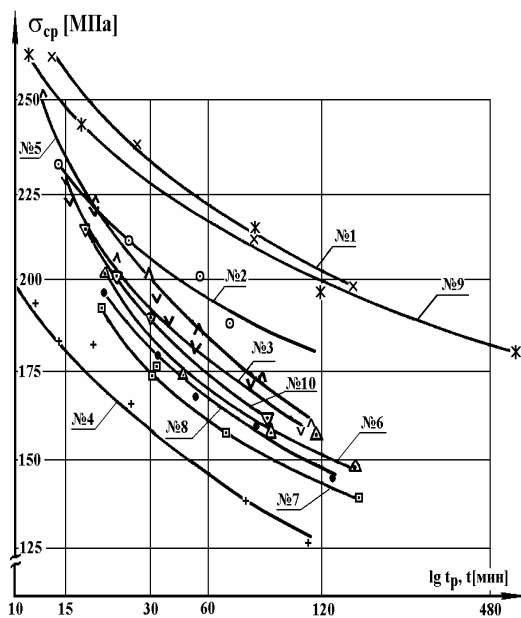


Рис. 2. Кривые усталости образцов для десяти испытательных режимов

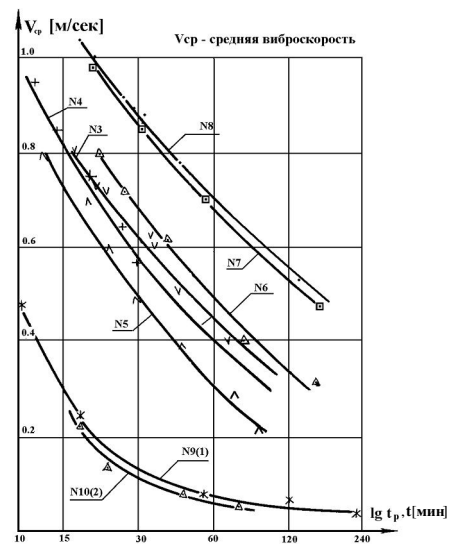


Рис. 3. Зависимости t_p образцов от v_{cp} в опасном сечении балки (кривые «вибронгруженности»)

Перестройка полученных результатов при ШСВ (режимы 5–8) в зависимости среднего напряжения (σ_{cp}) и средней виброскорости от ширины спектра (Δf), выражаемую через логарифм граничной частоты спектра $\lg f_{гр\ n}$, где n – количество учитываемых при колебаниях (заметно возбуждаемых) собственных частот объекта, показала наличие экстремумов в этих зависимостях (рис. 4 и 5) [6].

Проведено также моделирование методом Галеркина кинематического воздействия ШСВ на консольно закрепленную балку в диапазоне шестнадцати первых собственных частот балки [7]. Его результаты аналогичны представленным на рис. 4 и 5 и для трех первых собственных частот иллюстрируются на рис. 6а, 6б, и 6в.

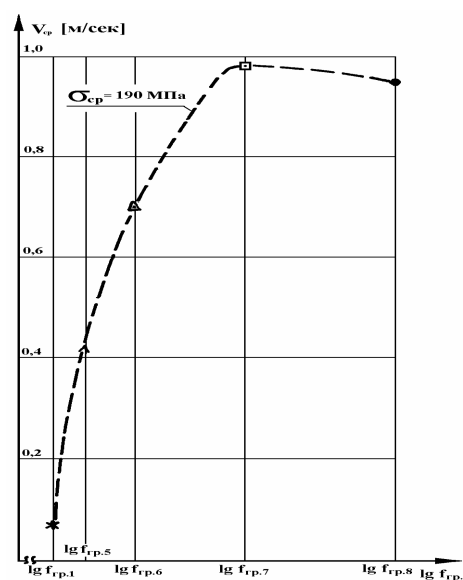
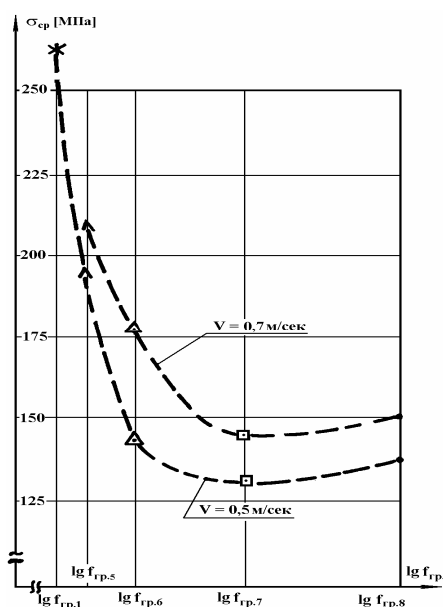


Рис. 4. Зависимость σ_{cp} от Δf при постоянной средней виброскорости

Рис. 5. Зависимость v_{cp} от Δf при постоянном среднем напряжении

На рис. 6а показана АЧХ консольной балки. На рис. 6б представлены по три спектра равной мощности несколько отличающихся шириной и, естественно, амплитудой, достаточно интенсивно возбуждающих балку в области первых двух и первых трех собственных частот, сформированные системой управления вибратором в месте закрепления балки. На рис. 6в показаны изменения среднего напряжения и средней виброскорости в заделке балки в зависимости от ширины спектра внешнего воздействия. При некоторой ширине этого спектра (для наглядности это средний спектр, рис. 6б) виброскорость имеет максимум, а напряжение – минимум. Эта картина повторяется при охвате спектром вибровоздействия первых двух, трех и т.д. собственных частот балки.

Полученный результат (рис. 6в) можно трактовать, как существование у механических систем «собственных полос спектра» (полос пропускания сигнала – термин радиотехники), в смысле чувствительности к вибровоздействию аналогичных собственным частотам, но проявляющимся при нагружении ШСВ. Поскольку «собственные полосы спектра» и «эффективная ширина спектра», обнаруженная в эксперименте, имеют идентичные экстремумы средних напряжений и виброскорости в зависимости от граничной частоты спектра нагружения, эти термины можно считать

равнозначными. Эффективную ширину спектра, которой соответствует тяжелейший по долговечности режим в заданной частотной области нагружения, можно обозначить, как $\Delta f_n^{\text{эф}}$, где $n \geq 2$.

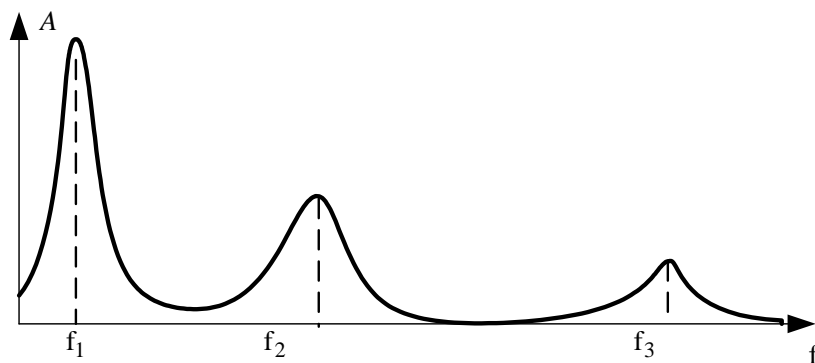


Рис. 6а. АЧХ объекта испытаний

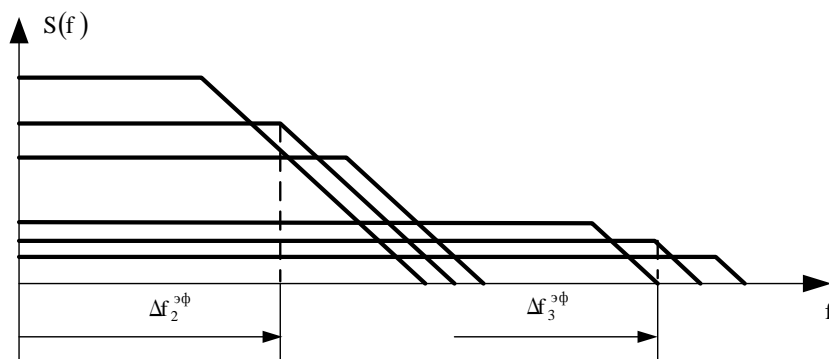


Рис. 6б. Спектральная плотность внешнего воздействия

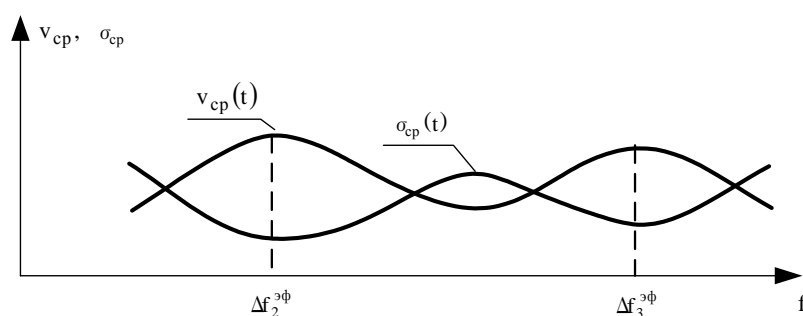


Рис. 6в. Параметры реакции объекта испытаний

Существование «собственных полос спектра» механических систем подтверждается и теоретическим исследованием [8].

Таким образом, тяжелейший режим ШСВ (собственные полосы спектра) в заданной частотной области можно найти, варьируя шириной спектра, аналогично нахождению резонансного режима, когда варьируется значение частоты нагружения. Аппаратурное формирование такого режима имеет специфические особенности.

Для реализации тяжелейшего режима виброн нагружения разработан комплекс специальной аппаратуры:

- 1) модуль управления вибростендом;
- 2) импульсный усилитель мощности;
- 3) емкостной датчик деформации [5];
- 4) оптический датчик перемещений.

Также в состав аппаратуры входит промышленный электродинамический вибростенд. Модуль управления вибростендом предназначен для формирования практически всех используемых режимов усталостных испытаний (рис. 7).

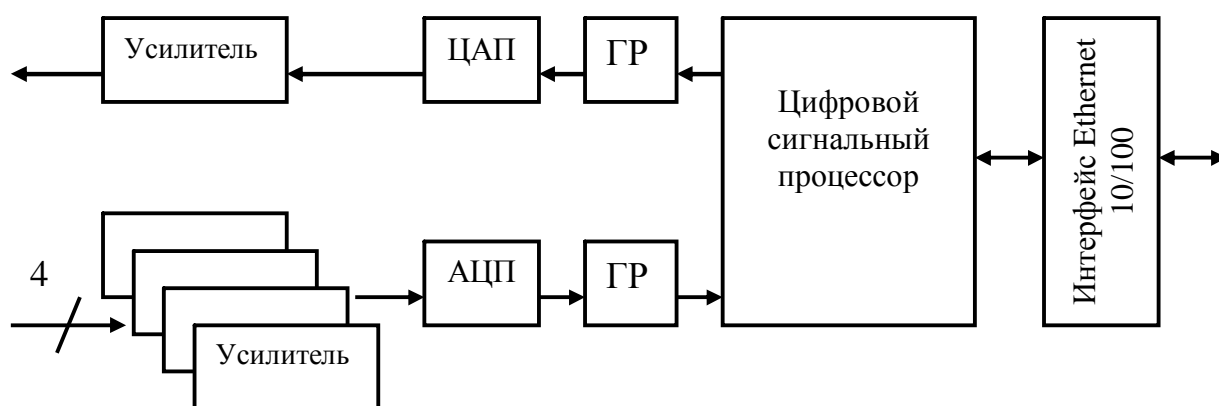


Рис. 7. Блок схема системы управления виброиспытаниями: АЦП – аналогоцифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ГР – гальваническая развязка

Модуль позволяет производить генерацию различных видов управляющих сигналов (синусоидальный, полигармонический, случайный сигнал с заданным спектром), а также измерять параметры деформации и перемещения образца в режиме реального времени.

В модуле управления используется цифровой сигнальный процессор серии С6722 фирмы Texas Instruments. Модуль имеет четыре измерительных канала и один задающий. Все каналы имеют рабочий диапазон напряжения ± 10 В. Частота дискретизации определяется сложностью алгоритма генерации и обработки сигнала и составляет 20 КГц. Входы и выходы модуля гальванически развязаны, что позволяет свести к минимуму воздействие помех на измерительные цепи. Для связи с ЭВМ предусмотрен сетевой интерфейс Ethernet 10/100. Применение сетевого интерфейса позволяет организовывать удаленные рабочие места операторов, а также объединять несколько модулей при помощи локальной вычислительной сети.

Модуль управления кроме известных режимов осуществляет режим самовозбуждения на резонансных частотах объекта, что позволяет избавиться от принудительной подстройки частоты возбуждающего воздействия при изменении собственных частот объекта из-за изменения его жесткости, вызванной накоплением усталостных повреждений.

В режиме синусоидальной вибрации производится генерация синусоидального воздействия на одной из резонансных частот образца. В процессе испытаний периоди-

чески производится измерение амплитуды и фазы сигнала деформации, а также производится автоматическая подстройка частоты управляющего воздействия по критерию заданной амплитуды сигнала деформации.

В режиме полигармонической вибрации производится генерация суммы синусоидальных воздействий на нескольких резонансных частотах образца. Для поиска резонансных частот предусмотрена функция измерения АЧХ испытуемого образца.

В режиме ШСВ генерируется воздействие с ограниченным по частоте и изменяющимся по ширине спектром, в том числе, с сохранением заданной мощности спектра. Для реализации данного режима используется два способа формирования воздействия: Фурье фильтрация широкополосного случайного сигнала и псевдослучайный полигармонический сигнал. Первый способ заключается в формировании случайного сигнала при помощи генератора случайных чисел с равномерным распределением. Далее производится прямое быстрое преобразование Фурье (БПФ), ограничение спектра сигнала на нужной частоте и обратное БПФ. Второй способ подразумевает суммирование большого числа гармонических составляющих со случайными начальными фазами в заданной полосе частот. Этот способ превосходит первый по потребляемым вычислительным ресурсам.

С целью экономии ресурсов ЭВМ для реализации синтеза первичных гармонических воздействий и многочисленных цифровых фильтров исследована возможность использования рекуррентного цифрового моделирования систем порождающих дифференциальных уравнений. При этом использовался аналитико-числовой метод собственных функций, а также способ ускоренного определения реакции динамической системы в виде М-модели (многомерной) [9].

М-модель, в отличие от соотношений классической дискретной фильтрации, базируется на уравнениях состояния вместо уравнения «вход-выход». В результате обеспечивается значительно более высокая точность моделирования и инвариантность к величине шага дискретности по времени.

Также в состав аппаратуры входит импульсный усилитель мощности, который предназначен для возбуждения колебаний электродинамического вибростенда (рис. 8).

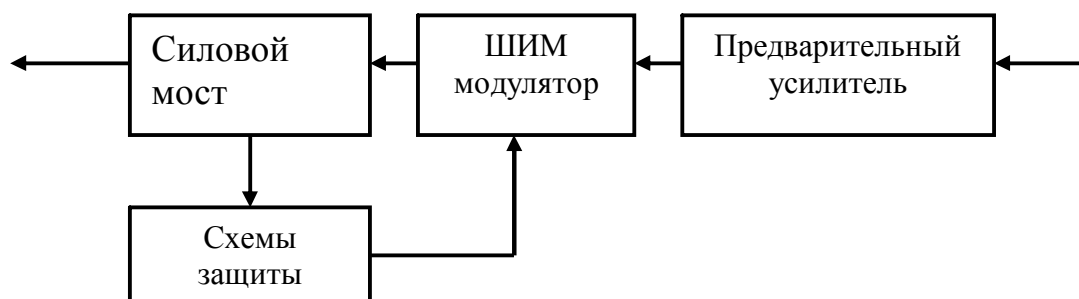


Рис. 8. Блок-схема импульсного усилителя мощности

Выходная мощность усилителя на нагрузке 4 Ом составляет 200 Вт. Диапазон частот составляет 5 Гц – 5 КГц. В данном усилителе в качестве ШИМ модулятора применен маломощный усилитель D класса, который управляет силовым мостом на полевых транзисторах. Срабатывание схем защиты происходит при кратковременном превышении тока нагрузки порогового значения.

Аппаратура разработана с целью обеспечения максимальной гибкости задания режимов испытаний и проведения измерений, что позволяет обеспечить формирование

тяжелейшего режима виброн нагружения, предназначенного для решения проблем воспроизводимости, унификации и ускорения испытаний на вибрацию.

Таким образом, существование «собственных полос спектра» механических систем подтверждается теоретическим и экспериментальным исследованиями и моделированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Испытания на воздействие случайной широкополосной вибрации с использованием цифровой системы управления виброиспытаниями // ГОСТ Р 51502–99 (Международный стандарт МЭК 60068–2–64–93).

2. Вибрация в технике: Справочник в 6 томах / Под ред. В. Н. Челомея. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 5. Измерения и испытания. Под ред. М. Д. Генкина. 1981. – 496 с.

3. Бишоп Р. Колебания. – М.: Наука, 1979. – 160 с.

4. Овчинников И. Н. Методика испытаний при сложном вибрационном нагружении. – Заводская лаборатория, 1986. – № 10. – С. 69–74.

5. Овчинников И. Н. Емкостной датчик для измерения изгибных деформаций // Приборы и системы управления. – 1995. – № 3. – 25 с.

6. Арутюнов С. К., Колесников К. С., Овчинников И. Н. Закономерности усталостного разрушения при случайном вибрационном нагружении // Машиноведение. – 1985. – № 1. – С. 81–86.

7. Арутюнов С. К., Овчинников И. Н. Моделирование нагружения механических систем широкополосным случайным воздействием / Сб. трудов международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин» (Самара, 2003). – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 1. – С. 45–49.

8. Ovchinnikov I. N. The usage of “transparency frequency bands” of mechanic systems for standardization of tests to random vibration. Proceedings 12 International Congress on Sound and Vibration, Lisbon, Portugal, 11–14 July, 2005.

9. Малахов Н. А. Алгоритмическое и программное обеспечение эффективной цифровой фильтрации на основе аналитико-числового метода собственных функций / Труды VI Международного симпозиума «Интеллектуальные системы» (Саратов, 2004). 2004. – С. 154–157.

Поступила в редколлегию 10.06.2016 г.