

И. Н. О в ч и н н и к о в, В. А. С т е п н е в

**О ДОСТОВЕРНОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ
ИСПЫТАНИЙ НА ВИБРАЦИЮ**

Рассмотрены требования к достоверности и воспроизводимости результатов испытаний на вибрацию. Экспериментальное исследование долговечности и виброн нагруженности на 10 детерминированных и случайных режимах, проведенное по специальной методике с новыми датчиками и средствами испытаний, показало, что "эквивалентная" замена случайного нагружения детерминированным модельным режимом при испытаниях на виброн нагруженность некорректна, а при испытаниях на вибропрочность допустима. Представлена структурная схема бесконтактного емкостного датчика деформаций, повышающего достоверность результатов усталостных испытаний.

E-mail: iovchin@mx.bmstu.ru; s54v@mail.ru

Ключевые слова: *вибрация, испытания, долговечность, датчик, деформация, виброскорость, напряжение.*

В последнее время наблюдается резкое увеличение мощности и скорости движения машин, изделий ракетно-космической, авиационной и военной техники и, как следствие, повышение вибрационной нагруженности конструкций из-за возникновения турбулентных течений, флуктуаций давления в двигателях и сил взаимодействия с внешней средой. Указанные факторы порождают детерминированные и случайные вибрации. Более 70 % отказов в технике обусловлены вибрацией, в результате которой происходят усталостные разрушения элементов конструкций, транспортируемых грузов, сбои и поломки электронной техники.

Условия эксплуатации ряда объектов (ракет, космических аппаратов, подводных лодок, самолетов и др.) и нарастающая нехватка металла во всем мире требуют уменьшения массы и металлоемкости конструкций. Поиск разумного соотношения между высокой надежностью и минимумом массы заложен в развитии методов адекватного определения поведения материалов в конструкции при заданных ресурсах и надежности. Этот сложный комплекс вопросов экспериментального и теоретического плана, в первую очередь, включает в себя: 1) определение фактического поведения металла при известных эксплуатационных нагрузках (его структурных и деформационных изменений); 2) выбор критериев, характеризующих поведение металла; 3) проведение испытаний в условиях, близких к эксплуатационным; 4) создание испытательного оборудования, воспроизводящего заданные условия и регистрирующего поведение металла; 5) использование методов математической статистики, позволяющих объективно оценивать результаты опыта; 6) развитие теории усталости; 7) создание

методов диагностики усталостного разрушения и неразрушающего контроля; 8) создание методов прогнозирования долговечности. Настоящая работа в основном посвящена решению вопросов п. 3 и 4.

Повышение качества изделий напрямую зависит от уровня совершенства вибрационных испытаний, которые в течение нескольких десятилетий являются способом контроля долговечности и надежности, т.е. частью технологического процесса. При испытаниях на вибрацию решаются две основные проблемы.

1. Получение достоверных усталостных характеристик материала при нагрузках, близких к эксплуатационным; исследование вибронегруженности конструкции и прогнозирование на их основе долговечности объекта испытаний в условиях эксплуатации.

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

При эксплуатации транспортной техники наиболее распространенным видом нагрузки является широкополосная случайная вибрация.

Международная электротехническая комиссия (МЭК) предъявляет к виброиспытаниям два основных требования: полученные результаты должны быть достоверными и воспроизводимыми в различных лабораториях, что особенно важно при проведении приемо-сдаточных испытаний. При низкой достоверности результатов испытаний воспроизводимость результатов испытаний нереальна.

Вопросы воспроизводимости результатов испытаний рассмотрены в работе [1], где основное внимание уделено использованию динамики объекта при формировании испытательного спектра нагружения. Это позволило решить задачу о реализации тяжелейшего (с точки зрения исчерпания усталостной долговечности и вибронегруженности) режима — единственного, на котором следовало бы проводить испытания [2], — режима ускоренных испытаний. Особенно остро эта проблема стоит при длительной эксплуатации техники в авиации и на транспорте, для конструкций с высоким уровнем вибраций (жидкостные ракетные двигатели), хотя и в других отраслях она также давно актуальна.

В процессе развития методологии виброиспытаний возникали новые проблемы, в том числе проведение эквивалентных испытаний, под которыми понимается замена реальных случайных вибраций испытательным (модельным) детерминированным режимом. За рубежом исследования в этом направлении велись в целях снижения затрат на испытания, так как потребление энергии при случайных вибрациях

возрастает на порядок и более по сравнению с детерминированными вибрациями, а в нашей стране — еще и из-за острого дефицита оборудования для испытаний на случайную вибрацию.

Проблема замены случайного вибровоздействия детерминированным процессом рассматривалась в теоретическом аспекте [3] и с позиций аппаратного воспроизведения процессов [4] и получила определенную поддержку. Было проведено огромное число экспериментальных исследований [5–7], однако, универсального решения этой проблемы найдено не было. Если требования МЭК к воспроизводимости результатов испытаний при гармонических нагрузках удовлетворить не сложно, то степень достоверности результатов таких испытаний при замене случайной нагрузки после проведенных исследований [8] вызывает некоторые сомнения.

Установить степень достоверности результатов эквивалентных испытаний можно по результатам усталостных испытаний на аналогичных режимах, так как надежным критерием эквивалентности является только время до разрушения. Достоверность результатов усталостных испытаний можно повысить, совершенствуя испытательное и измерительное оборудование и методику испытаний, применяя нагрузки, близкие к эксплуатационным [9].

Лабораторные виброиспытания (ЛВИ) проводятся с двумя разными целями: 1) задается режим по виброскорости (ускорению), близкой к эксплуатационной, для выяснения надежности функционирования объекта в течение заданного времени — испытаний на виброн нагруженность; 2) контрольным параметром нагружения является напряжение и тогда в процессе испытаний определяется вибропрочность (долговечность). При этих видах ЛВИ задаются в технических условиях различные параметры, отличаются также и методики испытаний, но есть и общая тенденция — стремление имитировать случайный эксплуатационный спектр виброн нагружения.

Рассмотрим экспериментальные результаты, полученные при разрушении консольно закрепленных образцов из сплава АМгб по методике [9], которая содержала требования к испытаниям и на виброн нагруженность, и на долговечность на детерминированных резонансных режимах № 1(9) и № 2(10) (рис. 1, *а*, *б*), на узкополосных режимах (№ 3 и № 4) (рис. 1, *в*, *г*) и широкополосных случайных режимах № 5, № 6, № 7, № 8 со сплошным спектром (рис. 1, *д*, *е*, *ж*, *з*). Впервые в практике усталостных исследований представлены результаты испытаний на гармоническом и полигармоническом режимах № 9 и № 10, сформированных устройством, поддерживающим заданное значение деформации в процессе испытания. Результаты испытаний на этих режимах существенно отличаются от результатов испытаний на режимах № 1 и № 2 (при постоянном значении виброскорости), полученных

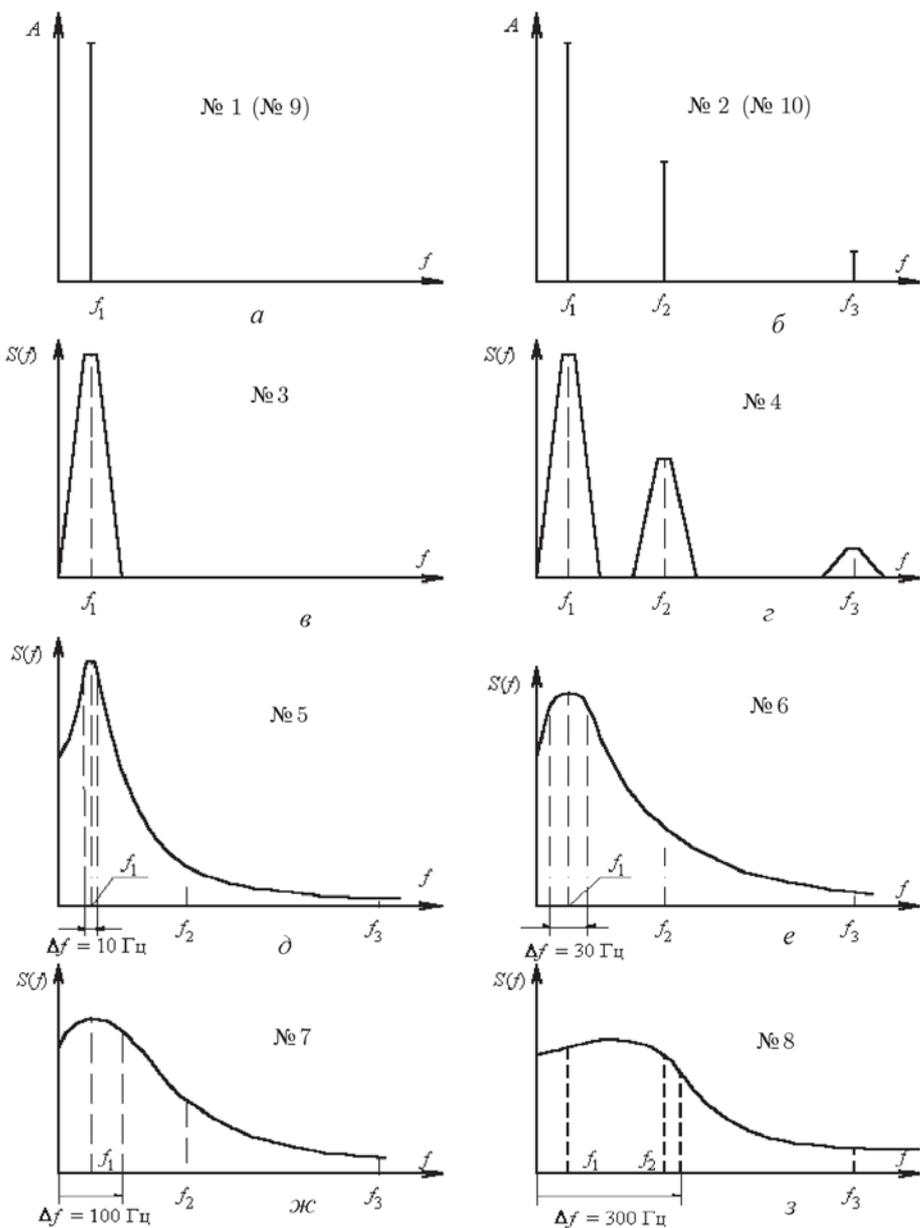


Рис. 1. Амплитудно-частотные спектры испытательных режимов:

A – амплитуда спектра вибровоздействия; f_1, f_2, f_3 – собственные частоты испытываемых образцов; $S(f)$ – спектральная плотность мощности вибровоздействия; Δf – ширина спектра фильтров, формирующих режимы

статистической обработкой замеров деформации. Деформация измерялась бесконтактным емкостным датчиком [10], который в отличие от тензорезистора не деформируется вместе с объектом испытаний и не изменяет свои метрологические характеристики в процессе длительного нагружения. Ряд емкостных датчиков был изготовлен в НИИ физических измерений (г. Пенза). Методика испытаний [9] в отличие

от большинства других не содержит никаких схематизаций случайных процессов.

На базе этого материала проанализируем достоверность результатов эквивалентных испытаний на виброн нагруженность и долговечность.

Испытания на виброн нагруженность. Специально для анализа испытаний на виброн нагруженность впервые в технической литературе представлены аналоги кривых усталости — кривые виброн нагруженности, т.е. зависимости времени до разрушения t_p образцов от виброскорости V_{cp} в опасном сечении испытываемого образца (рис. 2). Использование в качестве характеризующего параметра виброскорости, а не виброускорения объясняется большей информативностью виброскорости [11]. Какой бы из случайных режимов (см. рис. 1, в-з) ни считать эксплуатационным, ни один из детерминированных режимов при близких значениях долговечности не дает значений виброскорости, соизмеримых с виброскоростью при случайном нагружении (см. рис. 2, различие в 3–10 раз). Виброскорость на детерминированных режимах № 1, № 2, № 9 и № 10 практически одинакова, а на случайных и детерминированных режимах будет одного уровня лишь при значительно большей долговечности образцов материала на случайных

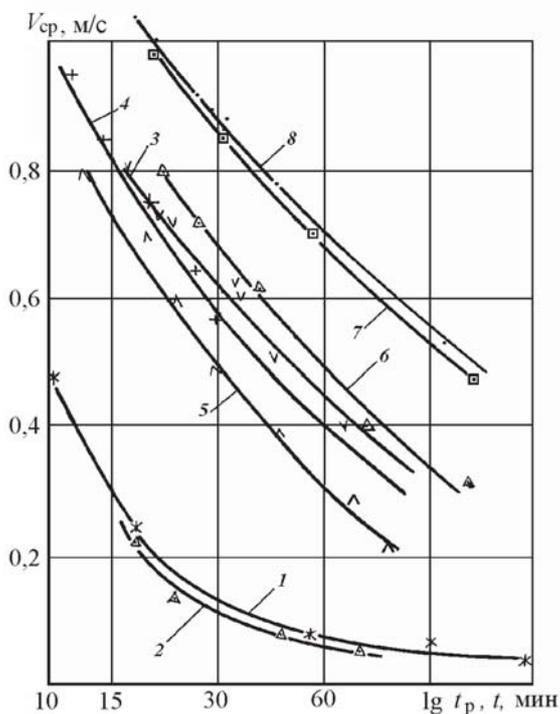


Рис. 2. Зависимости t_p образцов от V_{cp} в опасном сечении балки (кривые виброн нагруженности)

режимах (если кривые 3–8 проэкстраполировать вниз, см. рис. 2). Но в этом случае детерминированный режим будет разрушать объект испытаний намного быстрее (в 5–20 раз), чем эксплуатационный режим. Известны случаи, когда при испытаниях на гармоническую вибрацию происходят разрушения, которых никогда не бывает при эксплуатации.

Полученные кривые вибронегруженности по расположению обратны кривым усталости в смысле опасности режимов (кривые усталости случайных режимов лежат ниже, а кривые вибронегруженности выше детерминированных режимов). При вибрационных испытаниях замена случайных режимов детерминированными не желательна, так как различия значений виброскорости на этих режимах существенно больше, чем напряжений.

При контроле режима по напряжению в объекте результат будет обратным, т.е. при близких значениях напряжений на детерминированных и случайных режимах разрушение на случайных режимах будет происходить значительно быстрее. Здесь мы еще раз сталкиваемся со следующей проблемой: по отдельности ни напряжение, ни виброскорость (тем более — виброускорение) не характеризуют однозначно степень опасности режимов нагружения.

Если случайное вибронегружение заменяется детерминированным режимом, то отношение значений виброскорости уменьшается с увеличением времени до разрушения t_p (табл. 1), так как кривые вибронегруженности для различных режимов в правой части рис. 2 расходятся. Поэтому коэффициент эквивалентности двух режимов по виброскорости не является постоянным:

$$k_{m,n}^3(V_{cp}) = t_p^m(V_{cp})/t_p^n(V_{cp}) = \text{var}, \quad (1)$$

где m и n — номера сравниваемых режимов; $t_p^m(V_{cp})$ и $t_p^n(V_{cp})$ — зависящее от нагрузки время до разрушения образцов материала на режимах с номерами m и n при заданном значении средней виброскорости V_{cp} .

Таблица 1

Отношение значений средней виброскорости V_{cp} при увеличении времени до разрушения образцов t_p для сравниваемых режимов

Номера сравниваемых режимов m и n	Время до разрушения t_p , мин		
	15	30	60
	V_{cp}^m/V_{cp}^n		
9 и 7	0,279	0,142	0,116
9 и 4	0,362	0,216	0,189
4 и 7	0,772	0,659	0,616

Значительное различие значений виброскорости на режимах со случайным и детерминированным спектрами объясняется тем, что в случайном спектре содержится несоизмеримо больше составляющих

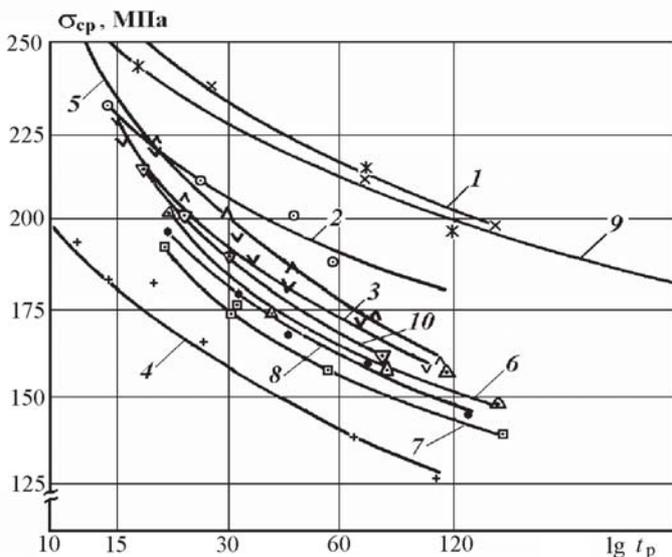


Рис. 3. Кривые усталости для десяти испытательных режимов

на различных частотах, чем в детерминированном. Кинетическая энергия каждой частотной составляющей случайного спектра передается объекту, поэтому его виброскорость, характеризующая кинетическую энергию, столь высока.

Отметим, что имитация случайного вибровоздействия детерминированным не дает возможности сделать достоверное заключение о вибронадежности объектов при вибрационных испытаниях.

Испытания на долговечность. В исследованиях по эквивалентной замене одного режима другим [5–7] получали две кривые усталости для двух режимов в узком диапазоне нагружения, что позволяло найти коэффициент перехода от конкретного случайного режима к гармоническому. Анализ десяти кривых усталости (рис. 3) позволил рассмотреть этот вопрос более объективно.

Представленные кривые усталости практически эквидистантны и при времени до разрушения, близком к нулю, будут стремиться к временному сопротивлению материала $\sigma_{вр}$. При уменьшении нагрузки различия долговечности возрастают, что иллюстрирует табл. 2, в которой приведено отношение значений времени до разрушения на режимах № 1 и № 8 при равных значениях напряжения.

Аналогичная тенденция наблюдается и на всех остальных режимах. Поэтому коэффициент эквивалентности двух режимов по напряжению

$$k_{m,n}^3(\sigma) = t_p^m(\sigma)/t_p^n(\sigma) = \text{var}, \quad (2)$$

где $t_p^m(\sigma_{cp})$ и $t_p^n(\sigma_{cp})$ — время до разрушения образцов материала на соответствующем режиме при заданном значении среднего напряжения σ , зависящее от нагрузки или напряжения.

**Отношение времени до разрушения на
режимах № 1 и 8**

σ_{cp} МПа	196	188	181
t_p^1/t_p^8	9,4	12,6	19

На режимах с разными типами спектров при равных значениях среднего напряжения наблюдаются еще большие различия долговечности. Так, для $\sigma_{cp} = 158$ МПа отношение $t_p^1/t_p^4 = 90$, поэтому назначение испытательного режима и его длительности при ЛВИ должны быть обоснованы.

Поскольку коэффициенты эквивалентности режимов по виброскорости (1) и напряжениям (2) не являются постоянными для различных значений соответствующих параметров и времени до разрушения образцов, можно считать, что единого эквивалентного перехода от одного режима к другому не существует. Эквивалентный переход от режима к режиму при равной долговечности можно проводить лишь для конкретного уровня нагрузки. Следует отметить, что значение напряжения, принятое в настоящей работе за меру вибронапряженности, однозначно характеризует долговечность лишь в пределах одного режима нагружения. Пока испытания проводились только при гармоническом воздействии описание нагружения через напряжения было достаточным. При случайном процессе для большей информативности необходимо ввести и виброскорость.

Вибронагруженность и долговечность (см. рис. 2 и 3) на случайных и детерминированных режимах различаются в десятки раз. При этом может измениться физический процесс накопления повреждений [12].

Для разных типов случайных спектров результаты вибровоздействия также различаются, хотя и не в такой степени. При времени разрушения образцов $t_p = 30$ мин виброскорость на режиме № 4 на 33,5 % меньше, чем виброскорость на режиме № 7 (соответственно 0,575 м/с и 0,865 м/с). На режиме № 4 достичь виброскорости 0,865 м/с можно, увеличивая уровень нагружения. В этом случае время разрушения образцов ($t_p^4 = 14$ мин) на режиме № 4 в 2 раза меньше, чем на режиме № 7. Следовательно, на режимах со спектрами различной формы при близких значениях виброскорости значительно различаются долговечности образцов, и наоборот.

Основные требования к модельному режиму испытаний состоят в наибольшем соответствии его эксплуатационному нагружению:

- 1) по частотному диапазону (число возбуждаемых собственных частот объекта должно быть одинаковым);
- 2) по характеру воздействия (детерминированному или случайному);

3) по форме спектра (испытательные спектры должны иметь в области собственных частот объекта идентичную форму).

Так, на режимах, удовлетворяющих этим требованиям (№ 3 и № 5, № 6 и № 7, № 7 и № 8), параметры нагружения в исследованном диапазоне различаются в 1,2–1,8 раза, что можно считать допустимым при имитации вибровоздействия.

Анализ показал, что эквивалентная замена детерминированным режимом случайного вибровоздействия при испытаниях на вибронагруженность некорректна, а при испытаниях на долговечность допустима; достоверность результатов выше при использовании полигармонических режимов. При этом в настоящее время коэффициент эквивалентности можно достоверно назначить только по результатам экспериментов.

Емкостный датчик деформаций. Получить достоверные результаты испытаний невозможно без применения соответствующих датчиков. Традиционное применение акселерометров не позволяет найти истинные значения деформации. Применение тензорезисторов ограничено их невысокой долговечностью. Наилучший вариант для усталостных испытаний — применение емкостного датчика деформации, который измеряет деформации бесконтактным способом, что позволяет ему сохранять неизменными свои характеристики вплоть до разрушения образца. Конструктивно датчик состоит из опорной пластинки, испытываемого образца и измерительного модуля.

Измерительный модуль работает следующим образом. С генератора импульсов на емкостный датчик поступает меандр с частотой 160 кГц. Сигнал поступает на верхнюю обкладку измерительной емкости, являющуюся испытываемым образцом. Сигнал, снятый с нижней обкладки датчика (опорной пластинки), поступает на усилитель заряда. Амплитуда усиленного сигнала пропорциональна емкости датчика. Далее сигнал выпрямляется на диодном выпрямителе. Для уничтожения несущей частоты и постоянной составляющей сигнал пропускается через фильтр нижних частот с частотой среза 3 Гц и фильтр верхних частот с частотой среза 2 кГц, затем он усиливается до требуемого уровня.

Для компенсации нелинейности измерительного канала, а также для реализации режима автокалибровки оптимальным будет применение микроконтроллера со встроенными АЦП и ЦАП. Одними из самых подходящих для реализации данной задачи являются малопотребляющие микроконтроллеры серии MSP430 фирмы Texas Instruments. Эти микроконтроллеры низкого энергопотребления сочетают в себе высокую производительность и возможность большого выбора периферийных устройств.

Также одним из современных подходов к построению датчиков является реализация гальванически развязанного интерфейса

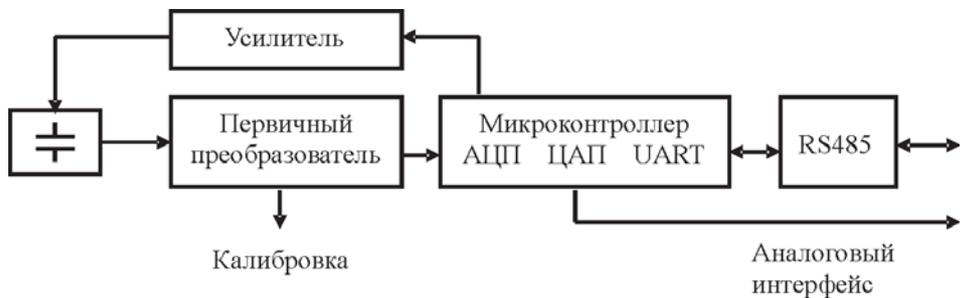


Рис. 4. Структурная схема цифрового датчика деформации

RS-485. Частота выдачи 16-разрядных отсчетов сигнала может достигать 50 кГц при темпе передачи данных 1 Мбит/с. Наличие гальванической развязки интерфейса позволяет значительно снизить уровень шума. Введение гальванической развязки предполагает наличие гальванически развязанного источника питания, что вполне реализуемо на современной элементной базе.

Структурная схема усовершенствованного датчика деформации приведена на рис. 4. Датчик содержит первичный преобразователь (усилитель заряда), усилитель сигнала возбуждения одной из обкладок, микроконтроллер и интерфейс RS485, а также гальванически развязанный источник питания.

Датчик имеет три выхода: цифровой (RS485), аналоговый и выход сигнала калибровки. По цифровому интерфейсу осуществляются как выдача сигнала, так и управление режимами работы датчика. Сигнал на аналоговом выходе дублирует сигнал на цифровом интерфейсе. Выход сигнала калибровки используется для проведения калибровки датчика в статическом режиме. Этот сигнал поступает непосредственно с усилителя заряда и содержит постоянную составляющую. Тарировочная характеристика датчика хранится во flash-памяти микроконтроллера и заменяется при смене образца.

Выводы. 1. Эквивалентная замена детерминированным режимом случайного вибровоздействия при испытаниях на вибронагруженность некорректна, а при испытаниях на долговечность допустима.

2. Наиболее достоверные результаты усталостных испытаний дает применение бесконтактного емкостного датчика деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О в ч и н н и к о в И. Н. Тяжелейший режим широкополосной случайной вибрации // Машиностроение и инженерное образование. – 2006. – № 3. – С. 38–54.
2. В и б р а ц и я в технике: Справочник в 6 т. / Под ред. В.Н. Челомея. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 5. Измерения и испытания / Под ред. М.Д. Генкина. – 1981. – 496 с.
3. К о л о в с к и й М. З. О замене случайного вибрационного воздействия полигармоническим процессом // Изв. АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение. – 1963. – № 2. – С. 93–101.

4. Система управления вибрационными испытаниями при полигармоническом силовом возбуждении / Н.И. Дехтяренко и др. // Виброметрия. – 1973. – С. 149–154.
5. Костин В. И., Сундуков Е. В. Об эквивалентности синусоидальной и несинусоидальной узкополосной нагрузок // Проблемы прочности. – 1976. – № 7. – С. 78–83.
6. Баженков А. М., Пулькис К. С., Рогова Е. В. Оценка эквивалентности методов вибрационных исследований транспортных двигателей // Тез. докл. на науч.-технич. совещании по проблемам прочности двигателей. – Л.-М., 1977. – С. 6–7.
7. Имитация и компенсация эксплуатационной вибрации / Под ред. Я.С. Урецкого. – М.: Машиностроение, 1996. – 198 с.
8. Арутюнов С. К., Колесников К. С., Овчинников И. Н. Закономерности усталостного разрушения при случайном вибрационном нагружении // Машиноведение. – 1985. – № 1. – С. 81–86.
9. Овчинников И. Н. Методика испытаний при сложном вибрационном нагружении // Заводская лаборатория. – 1986. – № 1. – С. 69–74.
10. Овчинников И. Н. Емкостной датчик для измерения изгибных деформаций // Приборы и системы управления. – 1995. – № 3. – С. 25.
11. Вильнер П. Д. Виброскорость как критерий вибрационной напряженности упругих систем // Проблемы прочности. – 1970. – № 9. – С. 42–45.
12. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / В.А. Кузьменко, Л.Е. Матохнюк и др. – Киев: Наук. думка, 1979. – 335 с.

Статья поступила в редакцию 17.03.2010



Игорь Николаевич Овчинников родился в 1941 г., в 1965 г. окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, начальник лаборатории виброиспытаний НИИ конструкционных материалов и технологических процессов (НИИ КМ и ТП) МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ по вибрационной и усталостной прочности, измерениям, прогнозированию ресурса долговечности.

I.N. Ovchinnikov (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1965. D. Sc. (Eng.), head of laboratory of vibration tests of Research Institute of Structural Materials and Technological Processes of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 80 publications in the field of vibration and fatigue strength, measurements, prediction of useful life.



Владимир Александрович Степнев родился в 1982 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г. Ассистент кафедры “Системы и сети” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор пяти научных работ в области программирования и автоматизации.

V.A. Stepnev (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Assistant lecturer of “Systems and Networks” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications in the field of programming and automation.