

ФОРМИРОВАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ МАКСИМАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ МАТЕРИАЛОВ

П.Ю. Бранцевич, И.Н. Овчинников**, В.А. Степнев***

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, кафедра ПОИТ

ул. П.Бровки, д.6, Минск, Беларусь

телефон(ы): + (375 17) 293-88-81; факс(ы): + (375 17) 293-84-75; e-mail: branc@tut.by

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

лаборатория виброиспытаний

2-я Бауманская ул., д.5, Москва, Россия

телефон(ы): + (107 499) 267-02-94; e-mail: iovchin@mx.bmstu.ru

Процесс разработки новых материалов и инструкции предполагает проведение их испытаний на воздействие вибраций. Сократить сроки и снизить затраты на их проведение возможно путем выбора испытательных режимов, обеспечивающих максимальное нагружение. Такие режимы обеспечиваются при формировании случайных воздействии с равномерным спектром в единицах виброперемещения в частотной полосе захватывающей ряд собственных частот конструкции.

Ключевые слова – вибрация, испытания, сигнал, формирование

1 ВВЕДЕНИЕ

Для решения задачи обеспечения требуемых показателей качества и надежности изделий в эксплуатационных условиях специалистам и разработчикам нужна информация, убеждающая их в том, что разработанные материалы, конструкции, технология, установленные правила и режимы эксплуатации обеспечивают выполнение названных показателей.

В значительной степени такую информацию можно получить по результатам испытаний [1]. Одним из важнейших типов испытаний материалов и изделий авиационной и космической техники являются испытания на механические воздействия (вибрацию, удар, линейные ускорения, акустические шумы, давление, комбинированные воздействия). Этим воздействиям материалы, приборы и оборудование авиационной и космической техники подвергаются в большей или меньшей степени на протяжении всего жизненного цикла.

Трудоемкость контрольно-испытательных операций для различных видов техники составляет от 15 до 50% трудоемкости основных операций изготовления. Поэтому автоматизация испытательных и контрольно-измерительных операций, выбор обоснованных режимов нагружения являются важными факторами повышения

эффективности производства. Вместе с тем, стоимость самой системы испытаний, затраты на ее эксплуатацию и обслуживание должны быть такими, чтобы ее применение не приводило к значительному увеличению стоимости выпускаемой продукции.

2 РЕЖИМЫ ИСПЫТАНИЙ

Исторически сложилось разделение механических испытаний на усталостные (с образцами материалов и небольшими элементами конструкций) и вибропрочностные - (с узлами, блоками и агрегатами). Усталостными испытаниями занимаются более 100 лет, (их задача доводить образцы до разрушения) при этом нагрузки всегда использовались одночастотные (моногоармонические) в пределах 1...5 Гц. На вибропрочностных испытаниях, на испытаниях на надежность, которые в массовом порядке в мировой практике стали проводить с конца пятидесятих годов во времена бурного развития аэрокосмической техники, вибровоздействию на заданное время подвергаются машины и приборы, работающие в реальных условиях эксплуатации.

Эксплуатационным нагружением является в основном широкополосная (до нескольких сотен и даже тысяч Гц), узкополосная случайная вибрация и полигармоническая вибрация, поскольку за последние десятилетия резко возросли скорости машин, число оборотов двигателей и т.п. Широкополосное и полигармоническое воздействие достаточно высокой мощности приводит, в отличие от условий нагружения при стандартных усталостных испытаниях, к многорезонансному возбуждению элементов конструкций. При этом на резонансные колебания по первому (основному) тону колебаний накладываются вибрации второго, третьего и т.д. тонов, а также другие, "вынужденные" вибрации. С ростом номера тона (частоты) амплитуды колебаний механических систем резко убывают. Однако напряжения от колебаний на более высоких тонах убывают значительно медленнее, чем амплитуды. При этом достаточно высока вероятность выбросов

(суммирования) случайного процесса по напряжениям, что приводит к значительно более быстрому исчерпанию ресурса долговечности.

Каждому типу спектра вибровоздействия соответствует своя кривая усталости материала, при этом кривые усталости, соответствующие сложным (многочастотным) спектрам, лежат ниже одночастотной кривой усталости, по которой определяется стандартное значение предела усталости материала. В пределе, при времени нагружения равно нулю, все кривые усталости сходятся в точку статического разрушения. Различное расположение кривых усталости объясняется тем, что реакция объекта на каждый спектр нагружения своеобразна, а от реакции, от соотношения амплитуд колебаний по различным собственным формам зависит скорость накопления повреждений, т.е. кривизна усталостной характеристики [2,3].

При равных значениях напряжений нагрузка со сложным спектром является более опасной, чем с одночастотным спектром. Поэтому для достоверной оценки долговечности при реальном, как правило, сложном нагружении необходимо определять значение предела усталости материала при нагрузке, близкой к эксплуатационной.

Многие годы в различных научных школах пытались найти универсальный способ испытаний путем эквивалентной замены эксплуатационного случайного нагружения лабораторным испытательным режимом. Для некоторых частных условий нагружения эквивалентные соотношения определялись, однако общего решения проблемы найдено не было. Сложность создания методики эквивалентности режимов (или доказательство отсутствия таковой) состоит в необходимости проведения большого количества экспериментов до разрушения (только так пока можно установить степень "опасности" режима) по единой методике, исключающей, как минимум, указанные недостатки. Для одной лаборатории это очень длительный и трудоемкий процесс, а различные лаборатории дают трудно сравнимые результаты.

Наиболее трудной и важной проблемой вибротехники является осуществление "тяжелейшего режима" нагружения. Если бы было известно, какое состояние является тяжелейшим, то достаточно провести испытания на этом единственном режиме.

3 ФОРМИРОВАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ МАКСИМАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ

До сих пор единственным известным и достоверным критерием степени опасности вибронагружения, кроме времени до разрушения, представляется формула Райса [4]:

$$N_{\max} = \frac{\sigma_1}{2\pi\sigma} \exp\left(-\frac{c^2}{2}\right),$$

которая определяет число положительных выбросов случайной функции в единицу времени, превышающих уровень c . В соответствии с этой формулой тяжелейшему режиму вибронагружения соответствует максимум средней виброскорости и минимум среднего напряжения,

которое для консольной балки пропорционально перемещению объекта.

Теоретически можно для механической системы найти такую эффективную ширину спектра, которая приводит к оптимальному соотношению (в вероятностном аспекте) амплитуд составляющих колебательного процесса, используя информационные характеристики сигналов и не учитывая затрачиваемую при испытаниях мощность. Опыт экспериментального исследования и моделирования процессов вибронагружения механических систем показывает, что наиболее оптимально нагружать объект в области не большей трех первых собственных частот.

Обнаруженное свойство механической системы иметь «собственные полосы спектра» (полосы пропускания сигнала) и существование тяжелейших режимов вибронагружения в классе широкополосных случайных спектров позволяют решить две важнейшие для практики проблемы:

- 1) воспроизводимость результатов испытаний и стандартизация испытательных режимов;
- 2) проведение ускоренных испытаний.

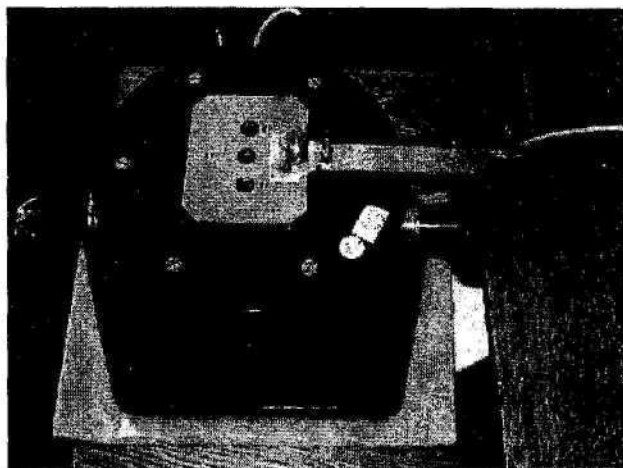


Рис.1. Крепление балки при проведении усталостных испытаний материала

При такой методологии формирования испытательных режимов по критерию максимального нагружения стирается грань между ускоренными и обычными лабораторными испытаниями. Стандартные испытания будут одновременно и ускоренными испытаниями. Это позволит существенно сократить не только время испытаний, но и общее количество испытаний и унифицировать их.

Эффективная ширина спектра широкополосной случайной вибрации - это такая ширина спектра $\Delta f_n^{\text{эф}}$, которой при равных средних значениях напряжения соответствует максимальное значение средней виброскорости и (или) при равных значениях средней виброскорости соответствует минимальное значение среднего напряжения. Индекс n определяет количество собственных частот, на которых происходят достаточно интенсивные ко-

лебания.

Полученные экспериментальные результаты, на основании которых сделано заключение о существовании эффективной ширины спектра, полностью согласуются с формулой Райса и впервые дают ей физическое обоснование в приложении к инерционным объектам.

Одним из условий реализации максимального нагружения при испытаниях изделий на вибрационные воздействия является формирование вибрационных колебаний в контрольной точке, которые имеют равномерный спектр по виброперемещению. Однако практически во всех системах управления испытаниями на вибрационные воздействия задание параметров воздействия осуществляется для единиц виброускорения. Это обусловлено тем, что в контурах управления задействуются пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи, которые отдают электрический сигнал пропорциональный виброускорению. Поэтому при задании требуется осуществлять пересчет параметров виброперемещения в единицы виброускорения.

Предположим, что необходимо сформировать полигармонический сигнал виброперемещения с равномерным спектром в частотной полосе $f_n \div f_k$ с шагом по частоте Δf и мощностью P_S .

Для простоты считаем, что и f_n и f_k кратны Δf . Тогда мощность P_S можно представить в следующем виде:

$$P_S = \sum_{i=j_n}^{i=j_k} s_i^2 = m \cdot s^2, \quad (1)$$

$$\text{где } j_n = \frac{f_n}{\Delta f}, \quad j_k = \frac{f_k}{\Delta f}, \quad m = j_n - j_k + 1;$$

s - среднее квадратическое значение (СКЗ) гармонических составляющих.

СКЗ формируемого сигнала:

$$A_s = \sqrt{P_s} = s \sqrt{m}. \quad (2)$$

Если задается общий уровень СКЗ формируемого сигнала, то СКЗ отдельных спектральных составляющих сигнала виброперемещения можно вычислить как

$$s = \frac{A_s}{\sqrt{m}}. \quad (3)$$

Параметры виброускорения, сформированного таким образом сигнала в единицах виброперемещения, будут определяться следующими выражениями:

$$a_k = (2\pi f_k)^2 \cdot s_k = (2\pi \cdot \Delta f \cdot j_k)^2 \cdot s_k =; \quad (4)$$

$$= (2\pi \cdot \Delta f)^2 \cdot s \cdot j_k^2$$

$$j_k = \frac{f_k}{\Delta f}; \quad (5)$$

$$P_a = \sum_{i=j_n}^{i=j_k} a_i^2 = \sum_{i=j_n}^{i=j_k} ((2\pi \cdot \Delta f)^2 \cdot s \cdot i^2)^2 =; \quad (6)$$

$$= (2\pi \cdot \Delta f)^4 \cdot s^2 \sum_{i=j_n}^{i=j_k} i^4$$

$$A_a = \sqrt{P_a} = \sqrt{\sum_{i=j_n}^{i=j_k} a_i^2} = (2\pi \cdot \Delta f)^2 \cdot s \cdot \sqrt{\sum_{i=j_n}^{i=j_k} i^4}, \quad (7)$$

где a_k, f_k - СКЗ и частота виброускорения k -ой составляющей формируемого сигнала;

P_a, A_a - мощность и СКЗ сигнала в единицах виброускорения.

Выражения (2-7) отражают соотношения общих уровней мощности и СКЗ для вибросигнала, имеющего равномерный спектр в некотором частотном диапазоне для виброперемещения, при его представлении в единицах виброускорения. Они использованы при задании параметров виброиспытательных воздействий для автоматизированной системы управления виброиспытаниями АСУВ-010 [5], которая применялась при проведении экспериментальных исследований.

Примеры параметров виброиспытательных воздействий в проведенных экспериментах, где объектом испытаний являются консольно-закрепленные на столе вибростенда образцы материалов, изготовленные в виде балок (рис. 1.), представлены на рис. 2-8.

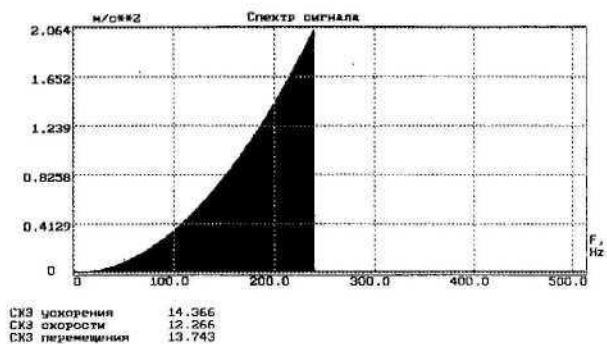


Рис. 2 Спектр вибросигнала в точке задания в единицах виброускорения, частотный диапазон 10-240 Гц

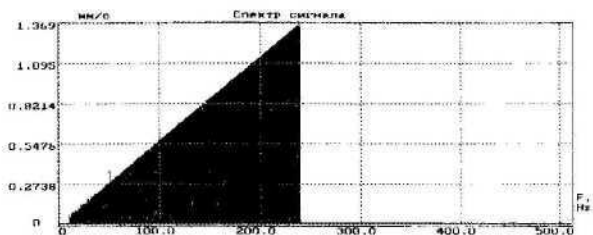


Рис. 3 – Спектр вибросигнала в точке задания в единицах виброскорости, частотный диапазон 10-240 Гц



Рис. 4 – Спектр вибросигнала в точке задания в единицах виброперемещения, частотный диапазон 10-240 Гц

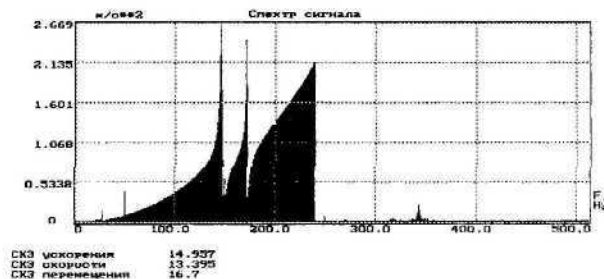


Рис. 5 – Спектр вибросигнала в точке контроля на балке в единицах виброускорения, частотный диапазон 10-240 Гц

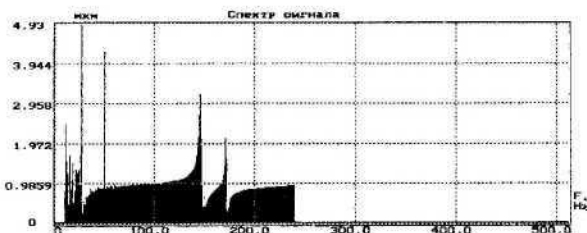


Рис. 6 – Спектр вибросигнала в точке контроля на балке в единицах виброперемещения, частотный диапазон 10-240 Гц

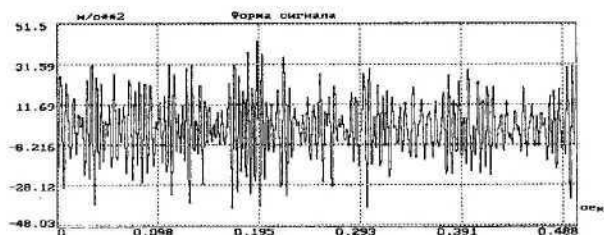


Рис. 7 – Форма вибросигнала в точке контроля на балке в единицах виброускорения, частотный диапазон 10-240 Гц

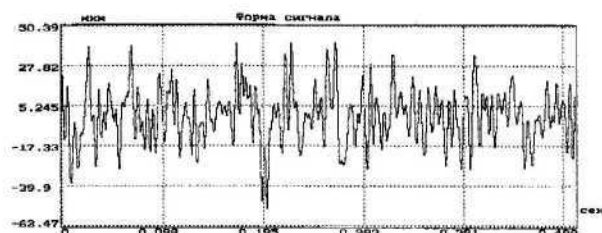


Рис. 8 – Форма вибросигнала в точке контроля на балке в единицах виброперемещения, частотный диапазон 10-240 Гц

Полученные экспериментально результаты показывают, что при перекрытии расширяющейся частотной полосой испытательного воздействия второй резонансной частоты балки происходит существенное увеличение СКЗ виброскорости в контрольной точке, что свидетельствует о получении, в соответствии с формулой Райса, режима максимального нагружения. Это позволяет выбрать эффективную частотную полосу случайных воздействий для проведения усталостных испытаний материала.

Данная работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / О.П.Глудкин, А.Н.Енгальчев, А.И.Коробов, Ю.В.Трегубов. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.
- [2] Гладкий В.Ф. Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата. – М.: Наука, 1984. – 189 с.
- [3] Овчинников И.Н. Виброиспытания, диагностика и прогнозирование усталостного разрушения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 128 с.
- [4] Тихонов, В.И. Выбросы случайных процессов. – М.: Наука, 1970, 392 с.
- [5] Леусенко А.Е., Якубенко А.Г., Бранцевич П.Ю. Автоматизированная система испытаний АСУВ-010 на базе ПЭВМ // Проблемы конверсии, разработка и испытания приборных устройств. Материалы межд. НТК, М., 1993. – с. 153