

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛУЧАЙНОГО ВИБРОНАГРУЖЕНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

д.т.н.¹Сурин В.М., к.т.н.²Держинский С.М.

¹УО «Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники», Минск

²УО «Белорусская государственная академия связи», Минск

Введение. Значительная часть изделий в процессе эксплуатации и транспортирования подвергается механическим воздействиям, которые часто являются причиной их отказа. Случайные воздействия можно охарактеризовать как воздействия, в которых перемещающиеся точки совершают нерегулярные циклы движения, никогда не повторяющиеся в точности. Чтобы полностью описать эти воздействия, необходимо бесконечное количество данных об их происхождении.

При оценке действия как периодических, так и случайных нагрузок важной характеристикой является среднеквадратическое (эффективное) значение воздействия

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt},$$

где $x(t)$ – уровень воздействия в данный момент; T – время, используемое для определения среднеквадратического значения. Так как при определении значения σ предусмотрено возведение уровня воздействия в квадрат, считают что эта величина имеет прямое отношение к энергии. Дополнительно используют метод частотного анализа. На основании теоремы Фурье любой периодический процесс можно рассматривать как множество чисто гармонических, т.е. разложить в ряд Фурье. Поэтому частотный спектр периодического воздействия состоит из ряда дискретных линий величин среднеквадратических значений воздействий на гармонических частотных составляющих процесса нагружения. Частотный спектр случайного воздействия является непрерывным. Поэтому для описания случайного нагружения используют среднеквадратичную спектральную плотность

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\sigma^2}{\Delta f},$$

показывающую распределение энергии случайных воздействий в частотном диапазоне Δf . Ее обычно называют функцией спектральной плотности мощности. Поэтому при анализе и задании случайного воздействия на испытательных стендах наиболее эффективным является его представление в виде функции спектральной плотности мощности $S(f)$. Частотный спектр случайного воздействия при использовании в анализирующей или задающей аппаратуре фильтров с постоянной шириной частотной полосы будет прямо пропорционален функции распределения энергии по частотам воздействия.

Реальные случайные нагрузки действуют в широком частотном диапазоне, поэтому основным видом стендовых испытаний на случайные механические воздействия являются испытания на широкополосную случайную вибрацию (ШСВ). Воздействие ШСВ на испытываемое изделие имеет ряд особенностей, основной из которых является одновременное возбуждение всех форм собственных колебаний, попавших в частотный диапазон спектра воздействия.

Измерение, задание и контроль спектральной плотности мощности и среднеквадратического значения виброускорения при нагружении заложены

практически во всех типах задающей и анализирующей аппаратуры случайных вибраций.

Реакция на случайные воздействия является так же случайным процессом. Связь параметров реакции с параметрами воздействия осуществляется через амплитудно-частотную характеристику изделия. В дорезонансной для испытываемых элементов области частот, когда значение собственной частоты испытываемого элемента выше верхней частотной границы ШСВ, реакция повторяет структуру подводимого воздействия. При захвате спектром ШСВ только первой собственной частоты реакция является узкополосным случайным процессом. По мере расширения частотного диапазона ШСВ и захвата второй и третьей собственными частотами элемента в реакции появляются соответствующие частотные составляющие. В результате реакция на случайное воздействие представляет собой сумму узкополосных случайных процессов, а частоты нагружения, близкие к собственным частотам, создают опасные режимы нагружения.

При проведении испытаний необходимо достаточно точно оценивать повреждаемость с учетом влияния различных параметров режимов испытаний. Оценка долговечности при заданном режиме случайного нагружения как на этапе проектирования, так и при эксплуатации актуальна для обеспечения надежности изделий.

При испытаниях на электродинамических стендах воздействием ШСВ реализуется случайный процесс с нулевым средним, контролируемые параметрами являются спектральная плотность мощности и среднеквадратическое (эффективное) значение виброускорений. Воздействие в заданной полосе частот нагружения задается величиной спектральной плотности мощности виброускорения, как правило, постоянного (белый шум) или ступенчато изменяющегося значения, постоянного в каждой частотной полосе фильтра.

Результаты испытаний. Испытания проводили на электродинамическом вибростенде УВЭ 5/10000 с системами управления виброиспытаниями СУВУ-4 и АСУВ-010. Вибростенд имеет следующие характеристики: диапазон частот возбуждения – 5...10000 Гц; грузоподъемность 5 кг; амплитуда перемещений – до 7,5 мм; максимальное ускорение – 450 м/с².

Для определения собственных частот испытываемых образцов применяли систему СУВУ-4, которая позволяет проводить испытания при действии гармонической вибрации с автоматическим поддержанием заданного уровня виброускорения методом качающейся частоты, сущность которого заключается в плавном изменении частоты возбуждения в частотном диапазоне ШСВ от нижней частоты до верхней и обратно. Реакция при прохождении собственных частот элементов резко возрастает из-за возникновения резонанса.

Для задания случайных вибраций использовали систему АСУВ-010. Она позволяет задавать и автоматически поддерживать уровень спектральной плотности ускорения от 0,01 до 10г²/Гц в диапазоне частот возбуждения 1-5000Гц в каждой из 400частотных полос управления, т.е. позволяет формировать гладкий или ступенчатый частотный спектр. В пределах полосы пропускания каждого фильтра обеспечивается постоянный уровень спектральной плотности мощности и осуществляется контроль среднеквадратического значения виброускорения. Воспроизведение спектральной плотности мощности включает в себя процесс деления среднеквадратического значения виброускорения, измеренного в узкой полосе фильтра с шириной полосы пропускания Δf на ширину полосы.

Многоцикловая усталость представляет основной тип повреждения динамически нагруженных элементов конструкций, и при действии случайных вибраций отказы обусловлены многоцикловой усталостью.

При построении расчетных моделей для оценки долговечности используют характеристики уровня и структуры случайных нагрузок – среднего квадратического значения вибровоздействия, ширины спектра и параметра широкополосности β , под которым понимают отношение числа максимумов процесса воздействия к числу пересечений среднего уровня [1].

Связь долговечности со средним квадратическим значением случайной нагрузки рекомендуют представлять в виде степенной зависимости [2; 3], подобной степенному уравнению кривой усталости

$$T\sigma^m = const, \quad (1)$$

где T - время до отказа при неизменном значении σ ; m – параметр, определяемый экспериментально по результатам испытаний при разных уровнях нагружения. Это подтверждается многими экспериментальными данными.

В качестве объектов испытаний были выбраны широко используемые в аппаратуре элементы типа резисторов МЛТ, конденсаторов, которые представляли собой сосредоточенную массу с проволочными выводами из меди или кобальта. Основными моделями крепления испытуемых элементов были: двухопорный закрепленный по краям стержень с сосредоточенной по середине межопорного расстояния массой и консольно закрепленный стержень с сосредоточенной массой на свободном незакрепленном краю. Элементы одного типа испытывали в каждом режиме одновременно партиями по 20-60 штук. Для уменьшения разброса результатов испытаний элементы определенного типа выбирались из одной партии. Крепежные для элементов приспособления, устанавливаемые на столе вибрационного стенда обеспечивали: идентичность заделки выводов элементов испытываемых партий; отклонение уровня ускорения воздействия в различных точках от задаваемого в контрольной точке не более 7%; отсутствие резонанса приспособления в исследуемом диапазоне частот. Система управления поддерживала заданный уровень среднеквадратического значения ускорения для выбранной формы спектра.

Каждую партию испытывали при неизменном режиме воздействия до разрушения выводов всех элементов. Отказы у испытываемых токопроводящих элементов автоматически фиксировали регистратором отказов, позволяющим одновременно контролировать до 100 элементов.

Регрессионный анализ результатов испытаний 80 партий объемом от 20 до 50 элементов каждая показал, что лучше всех соответствует эксперименту из 15 видов функций степенная зависимость (1) связи долговечности T и среднеквадратического значения ускорения. Это подтверждает дисперсионный анализ, вид графиков зависимости $T=f(\sigma)$.

Влияние параметров β исследовано значительно меньше. Экспериментальных данных по влиянию ширины полосы нагружения, структуры спектра практически нет.

Для получения процессов нагружения с различными значениями параметра широкополосности β создавались спектры воздействия, возбуждающие испытуемые образцы на двух первых собственных частотах. В этом случае реакция изделия представляет собой случайный процесс, состоящий из двух узкополосных случайных процессов с центральными частотами f_{01} и f_{02} и средними квадратическими значениями воздействия σ_1 и σ_2 . Такое возбуждение позволяет создавать случайные процессы нагружения с различными значениями параметров β . Его величину в этом случае определяли из выражения [1]:

$$\beta = \frac{\sqrt{(1+\gamma^2)(1+\gamma^2\theta^2)}}{(1+\gamma^2\theta^2)},$$

где $\gamma = \sigma_1/\sigma_2$; $\theta = f_{01}/f_{02}$.

В качестве испытуемых объектов служили жестко закрепленные одним концом в приспособлении на столе вибростенда плоские консольные образцы из меди М2, в

которых возбуждались резонансные изгибные колебания на двух первых собственных частотах. Размеры образцов таковы: длина свободного участка 110, ширина 10 и толщина 2 мм. Для создания опасного сечения размером 4x2 мм в образцах сделаны выборки радиусом 20 мм, расстояние от свободного конца до опасного сечения составляет 100 мм. Средние значения первой и второй собственных частот колебаний образцов были равны соответственно 56 и 410 Гц. Реакцию воздействия на образцах определяли в механических напряжениях. Измерения напряжений в образцах осуществляли с помощью наклеенных в опасном сечении тензодатчиков типа 2Ф КЛА33-100В по показаниям универсального цифрового вольтметра В7-27 и осциллографа Н102. Случайные воздействия создавали в двух полосах, захватывающих собственные частоты колебаний образцов – 40...80 и 350...450 Гц при значениях спектральных плотностей мощности в этих полосах, равных соответственно S_1 и S_2 в $g^2/Гц$.

Предварительно были протарированы с помощью тензомоста ГА-5975 показания тензодатчиков на измерительных приборах при статистическом нагружении испытываемых образцов. Напряжение в опасном сечении рассчитывали по формуле

$$\sigma = \frac{Mu}{w} = \frac{F \cdot l}{(bh^2/\delta)} \text{ МПа} ,$$

где F – груз на образце в Н; l – расстояние от точки приложения груза до опасного сечения в мм; b, h – ширина и толщина опасного сечения в мм. Для каждой полосы частот случайного нагружения строили экспериментальные зависимости изменения напряжения на образце в МПа от воздействия S в $g^2/Гц$

$$\sigma_i = K_i \sqrt{S_i} , \quad (3)$$

где K_i - коэффициент пропорциональности.

Для оценки предельного уровня нагружения, при котором возможно изменение механизма повреждения, т.е. переход от много- к малоциклового усталости предварительно определяли характеристики усталости при регулярном нагружении. Образцы испытывали на резонансной частоте с разными фиксированными уровнями гармонического воздействия. Сравнивая результаты испытаний при разных уровнях нагружения определили: параметр угла наклона степенного уравнения кривой усталости $m=5.28$, предел ограниченной выносливости при $N_\delta = 5 \cdot 10^5$ циклов равен 145 МПа.

Среднее квадратическое (эффективное) значение напряжения, получаемого при возбуждении колебаний образцов в двух полосах частот определяли как

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 . \quad (4)$$

Для всех исследуемых режимов нагружения приняли $\sigma=110$ МПа, что гарантировало многоциклового усталостное повреждение при проведении испытаний.

Планирование испытательных режимов осуществляли следующим образом: задавали режим, т.е. величину β при $\sigma=110$ МПа. Далее из выражения (2) определяли величину γ , т.е. отношение составляющих уровня нагружения, затем из уравнения (4) рассчитывали средние квадратичные значения σ_1 и σ_2 . Спектральные плотности мощности находили используя тарировочные зависимости (3), ранее полученные экспериментально.

Образцы испытывали партиями по 10 штук. Долговечность T принимали в качестве среднего времени до разрушения всех элементов партии.

Режимы испытаний при постоянном значении среднеквадратичного значения напряжения ($\sigma=110$ МПа), разных величинах параметра β и соответствующие им долговечности приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний плоских медных образцов при случайных воздействиях ($\beta \neq const$; $\sigma = const$).

$S_1, g^2/Гц$	$S_2, g^2/Гц$	β	Е, мин
1,15	0	1,0	245
0,90	4,7	2,0	180
0,94	3,8	2,28	167
1,02	2,4	2,71	160
1,04	1,8	3,0	145
1,06	1,4	3,18	136
1,08	1,1	3,44	133

Вид уравнения связи долговечности T с параметром β устанавливали с помощью регрессивного анализа результатов испытаний. Коэффициенты уравнения

$$y = b_0 = b_1 x \quad (5)$$

находили для зависимостей, где в качестве переменных y и x использовали следующие сочетания преобразований

$$y = T, x = \beta; \quad (6)$$

$$y = \ln T, x = \beta; \quad (7)$$

$$y = \ln T, x = \ln \beta; \quad (8)$$

$$y = T, x = \ln \beta; \quad (9)$$

Применение этих преобразований позволило получить коэффициенты линейного, показательного и специального уравнений, а также оценить точность представления экспериментальных данных этими уравнениями. Точность оценивали по величине суммы квадратов отклонений между экспериментальной и теоретической (расчетной) величиной долговечности. Чем меньше эта величина, тем лучше соответствие расчетов с результатом экспериментов.

Таблица 2 – Определение коэффициентов регрессии уравнений связи $T=f(\beta)$ при $\sigma=const$.

Зависимости	b_0	b_1	Уравнение связи	$\Sigma(T_{э} - T_p)^2$
(a)	280.1	-45.13	$T = b_0 + b_1 \beta$	431
(b)	5.72	-0.25	$T = \exp(b_0) \cdot (b_1 \beta)$	156
(c)	5.52	-0.49	$T = \exp(b_0) \beta^{b_1}$	111
(d)	244.44	-90.76	$T = b_0 + b_1 \ln \beta$	66

Результаты расчета приведены в табл. 2. Как видно, наиболее точно описывают эксперимент зависимости (c) и (d). Более удобной для использования в практических расчетах является степенная зависимость (c). В этом случае уравнение связи долговечности с параметрами спектра случайного воздействия с учетом степенной зависимости долговечности от нагрузки (1) можно представить в виде

$$T \sigma^m \beta^n = const, \quad (10)$$

где n – показатель, определяемый экспериментально.

Для проверки предложенного уравнения (10) проведены испытания на режимах, отличных от приведенных в табл. 1. По результатам испытаний определяли параметры уравнения (10). Значения долговечностей, рассчитанных по формуле (10) и полученных экспериментально, представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Сравнение расчетной T_p по формуле (10) и экспериментальной T_3 долговечностей при испытании медных образцов

Режим		$T_3, \text{мин}$	$T_p, \text{мин}$	$\Delta, \%$
$\sigma, \text{МПа}$	β			
135	1,0	130	130	0
110	1,0	245	246	0,4
120	2,28	131	125	4,5
120	3,44	98	102	3,0

Параметр m уравнения (10) определили, сравнив результаты испытаний при одинаковой структуре спектра, т.е. результаты 1-ой и 2-ой партий из табл. 3

$$m = \frac{\ln T_{32} - \ln T_{31}}{\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2},$$

где T_{31}, T_{32} – долговечность образцов соответственно при уровнях воздействия σ_1 и σ_2 . Он равен 3,12, а при действии гармонических вибраций, как отмечено выше, он равен 5,28.

Сравнив результаты испытаний третьей и четвертой партий образцов из табл. 3 определили параметр n , который равен 0,49.

Сопоставление расчетных и полученных экспериментально долговечностей, оценка погрешности Δ определения величины T свидетельствует о возможности использования зависимости (10) для расчета долговечности при случайных воздействиях с учетом не только уровня воздействия, но и параметра широкополосности процесса нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьменко, В.А. Многоцикловая усталость при переменных амплитудах нагружения. /В.А. Кузьменко, И.В. Васинюк, Б.З. Крук/// -К.: Наукова думка, 1986. – 264 с.
2. Дзержинский, С.М. Сравнение режимов стендовых испытаний элементов телекоммуникационных систем на долговечность. / С.М. Дзержинский, В.М. Сурин //Проблемы инфокоммуникаций. / 2016 - № 1 (3). с. 41-45.
3. Дзержинский, С.М. Долговечность электронных элементов, испытываемых на вибропрочность. / С.М. Дзержинский, В.М. Сурин // Проблемы инфокоммуникаций. – 2015- №1 (1). – с. 48-50.