

ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 620.178.311

В.М. СУРИН, д-р техн. наук, проф.

профессор кафедры «Инженерная и компьютерная графика»

E-mail: kaftm@bsuir.by

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в реакцию 28.11.2019.

УСТАЛОСТНОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ МЕТОДОМ КАЧАЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЫ

Рассмотрен способ оценки усталостных повреждений при испытании на вибропрочность изделий электронной техники методом качающейся частоты, который является основным при испытаниях на воздействие синусоидальной вибрации и заключается в плавном изменении частоты в заданном диапазоне от нижней до верхней и обратно, чтобы последовательно возбуждались резонансы элементов испытываемого изделия при постоянном задаваемом уровне воздействия. Для оценки повреждений использовали степенное уравнение кривой усталости. Вероятность появления амплитуд отклика на некоторой частоте заменили вероятностью пребывания возбуждения на этой частоте. Использование нормированных относительно собственной частоты f_0 интервалов частотного диапазона позволило исключить влияния разброса значений f_0 элементов изделия при сравнении результатов. Предложена количественная оценка повреждений в дорезонансном, резонансном и зарезонансном интервалах частотного диапазона при рекомендуемых значениях механической добротности и показателя наклона кривой усталости в двойных логарифмических координатах для следующих зависимостей изменения частоты, которые обеспечивают постоянство: времени прохождения резонансной полосы всех элементов изделия; скорости изменения частоты во всем диапазоне; числа колебаний всех элементов изделия в полосе резонанса. Установлено, что влияние частот полосы резонанса на повреждаемость растет с увеличением значений добротности и показателя наклона кривой усталости, ширина полосы резонанса определяется добротностью, наиболее эффективна при испытаниях на вибропрочность зависимость $f(t)$, при которой сохраняется постоянной скорость изменения частоты во всем диапазоне.

Ключевые слова: вибропрочность, синусоидальные колебания, усталостное повреждение, частота колебаний, суммирование повреждений

Введение. Самым распространенным методом стендовых испытаний изделий на вибропрочность [1, 2] является метод качающейся частоты (метод 103-1) при действии синусоидальной вибрации. Он заключается в плавном изменении частоты возбуждения $f(t)$ в заданном диапазоне от нижней частоты f_n до верхней f_v и обратно, чтобы последовательно возбуждались резонансы элементов испытываемого изделия при постоянном во всем диапазоне уровне воздействия. Очевидно, интервалы задаваемого при испытаниях диапазона частот виброн нагружения по-разному влияют на повреждаемость и долговечность испытываемых изделий. Знание влияния на накопление

усталостных повреждений нормированных диапазонов частот нагружения важно как для разработки ускоренных методов испытаний изделий на вибропрочность, так и для повышения показателей надежности изделий путем изменения их собственной частоты при оптимизации параметров (жесткость, масса, геометрия) конструкции.

Разнообразные по конструктивному исполнению элементы изделий представляем в виде линейной механической модели «масса — демпфер — пружина». Временная функция отклика A модели при рассматриваемом нагружении — синусоидальная, с изменяющейся частотой. Амплитуда отклика A в число раз, равное коэффициенту

передачи β , отлична от амплитуды a задаваемого стендом постоянного ускорения. Для установившихся колебаний коэффициент передачи равен [3]:

$$\beta = A(t)/a = 1/\sqrt{(1-Z^2)^2 + Z^2/Q^2}, \quad (1)$$

где $Z = f(t)/f_0$ — нормированная частота, позволяющая исключить влияние разброса значений собственной частоты f_0 элементов изделия при сравнении результатов испытаний; Q — механическая добротность элемента, которая связана [3] с логарифмическим декрементом колебаний δ выражением $Q = \pi/\delta$ и определяется при испытаниях как отношение максимальной амплитуды отклика к амплитуде задаваемого воздействия. Максимального значения коэффициент передачи ($\beta_{\max} = Q$) достигает при резонансе, когда $f = f_0$.

Передаточный коэффициент зависит от Z , добротности и скорости изменения частоты в резонансной полосе, границы которой определяются частотами f_1 и f_2 , при которых амплитуда отклика в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитуды отклика на резонансе. Известно [3, 4], что при повышенных скоростях сканирования частоты возникают нестационарные (не установившиеся) колебания, при которых происходит уменьшение амплитуды отклика, т. е. острота резонансной кривой становится меньше. Полагаем, что в полосе резонанса имеют место установившиеся колебания, а добротность Q не зависит от величины f_0 .

Расчитанные значения передаточного коэффициента для отдельных точек диапазона испытаний $Z_H - Z_B$ приведены в таблице 1.

Как видно, влияние добротности проявляется на величину передаточного коэффициента только в интервале частот $(0,95 - 1,05)f_0$. При частотах $f_B > \sqrt{2} \cdot f_0$, когда $Z > 1,413$, а передаточный коэффициент становится меньше единицы и резко уменьшается с увеличением частоты, отклик

становится меньше воздействия, испытания проходят в квазиамортизационном режиме нагружения. Поэтому верхнюю частоту диапазона воздействия ограничивают значением $f_B = 1,5f_0$ или $Z_B = 1,5$.

Оценка повреждений. Причиной отказов элементов при испытаниях на вибропрочность является усталостное повреждение. Число циклов до разрушения всегда больше 10^5 [5, 6]. Принимая во внимание условную границу долговечности между мало- и многоциклового усталостью [7], полагаем, что имеет место механизм многоциклового усталости [8]. Для оценки усталостных повреждений использовали степенное уравнение кривой усталости. Считая возникающие в элементах напряжения пропорциональными ускорению отклика, оно имеет вид:

$$(a \cdot \beta)^m N = C, \quad (2)$$

где a — задаваемое стендом ускорение; β — передаточный коэффициент; N — долговечность в циклах при заданной нагрузке; m — показатель наклона кривой усталости в двойных логарифмических координатах, определяемый экспериментально, значения которого возможны от 2 до 20 [9]. Величину C можно отождествить с усталостным повреждением при предельном состоянии.

Повреждение, полученное элементом за одно колебание на разных частотах диапазона испытаний $Z_H - Z_B$ в связи с изменением коэффициента передачи, будет разным. Максимальное повреждение элемент получит на резонансной частоте, когда $\beta = Q$. Известно [10], что при прохождении монотонно возрастающего (понижающего) уровня воздействия получаются повышенные (заниженные) значения долговечностей. Качающаяся частота исключает монотонность, поэтому полагаем, что на возникновение повреждений не влияет последовательность изменения частоты и уровня воспринимаемого ускорения. При оценке повреждений, полученных во всем диапазоне испытаний, воспользуемся линейной гипотезой суммирования [11, 12], согласно которой все повреждения, полученные на всех уровнях вибрационного воздействия, суммируются вне зависимости от их последовательности.

Обозначим время прохождения частотного диапазона $f_H - f_B$ через T , а время прохождения резонансной полосы ΔZ_0 — через Δt_0 .

При испытаниях по данному методу могут быть использованы следующие зависимости изменения частоты возбуждения:

1) экспоненциальная (логарифмическая), когда время прохождения резонансной полосы постоянно ($\Delta t_0 = \text{const}$):

$$f(t) = f_H \exp(k_1 t), \quad (3)$$

где $k_1 = \ln(f_B / f_H) / T$ — коэффициент, характеризующий скорость изменения частоты;

Таблица 1 — Значения передаточного коэффициента β на частотах диапазона испытаний ($Z_H - Z_B$) в зависимости от величины добротности
Table 1 — Values of the transfer factor β at the frequencies of the test range ($Z_H - Z_B$), depending on the quality factor value

$Z = f(t)/f_0$	β			
	$Q = 10$	$Q = 20$	$Q = 50$	$Q = 100$
0,5	1,330	1,332	1,333	1,333
0,9	4,756	5,121	5,239	5,257
0,93	6,096	6,998	7,332	7,384
0,95	7,345	9,220	10,067	10,208
0,975	9,150	14,412	18,837	19,869
1,0	10	20	50	100
1,03	8,357	12,538	15,554	16,190
1,05	6,814	8,683	9,557	9,705
1,1	4,218	4,606	4,735	4,755
1,413	0,990	0,998	1,000	1,000

2) линейная, когда скорость изменения частоты во всем диапазоне постоянна ($df/dt = \text{const}$):

$$f(t) = f_H + k_2 t, \quad (4)$$

где $k_2 = (f_B - f_H)/T$ — скорость изменения частоты, Гц/с;

3) гиперболическая, при которой число колебаний в резонансной полосе для всех элементов изделия постоянно ($\Delta n_0 = \text{const}$):

$$f(t) = f_H / (1 - k_3 t), \quad (5)$$

где $k_3 = k_2 / f_B$ — относительная скорость изменения частоты, с⁻¹.

Частота возбуждения в (3)–(5) дана для случая ее увеличения, при ее уменьшении величина t в уравнениях меняется на $(T - t)$. Вероятность появления амплитуд отклика на некоторой частоте f заменим вероятностью пребывания возбуждения на этой частоте, т. е. $dn = f(t) \cdot dt$. Общее число колебаний за время T полуцикла качания при изменениях частоты по (3)–(5) определяется как:

$$\begin{aligned} n_1 &= T \frac{f_B - f_H}{\ln(f_B/f_H)}; \quad n_2 = T \frac{f_B + f_H}{2}; \\ n_3 &= T \frac{f_B \cdot f_H}{f_B - f_H} \ln \frac{f_B}{f_H}. \end{aligned} \quad (6)$$

Нижнюю частоту диапазонов испытаний согласно рекомендациям [2] приняли равной 10 Гц. Количество циклов колебаний за время однократного прохождения диапазона $10 - f_B$ при экспоненциальной (1), линейной (2) гиперболической (3) зависимостях приведено на рисунке 1.

Наибольшее число колебаний дает линейная зависимость изменения частоты, а наименьшее —

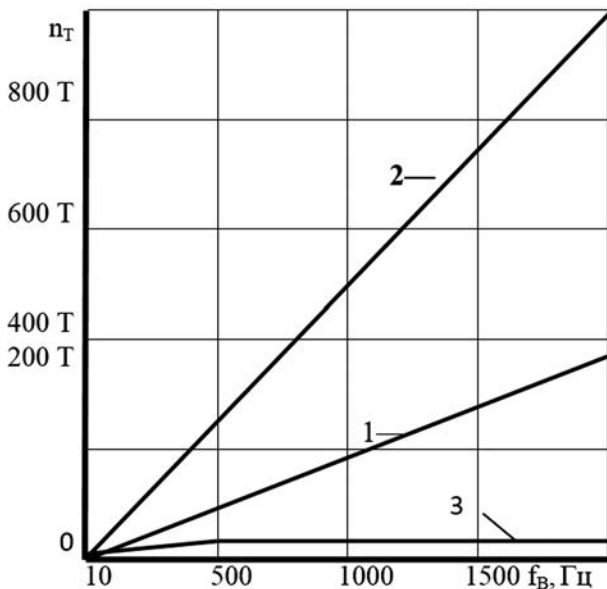


Рисунок 1 — Количество циклов нагружения за время T однократного прохождения интервала частот $10 - f_B$ при экспоненциальной (1), линейной (2) и гиперболической (3) зависимостях

Figure 1 — The number of loading cycles for the time T of a single passage of the frequency interval $10 - f_B$ with exponential (1), linear (2) and hyperbolic (3) dependencies

гиперболическая, и это различие увеличивается с расширением частотного диапазона испытаний. При проведении испытаний на вибропрочность в дорезонансном диапазоне частот ($f_B \leq 0,5f_0$), когда передаточный коэффициент близок к единице и не зависит от добротности элементов изделия, а основной причиной различия накопленных повреждений является число циклов нагружения, наиболее эффективна линейная зависимость изменения частоты.

Повреждение, полученное элементом за время T , т. е. за полуцикл качания, равно:

$$C_T = \int_0^T (a\beta)^m f(t) dt. \quad (7)$$

Для рассматриваемых зависимостей (3)–(5) выражение (7) примет соответственно вид:

$$\begin{aligned} C_{1T} &= Tf_0 a^m \frac{1}{\ln(Z_B/Z_H)} \int_{Z_H}^{Z_B} \beta^m dZ; \\ C_{2T} &= Tf_0 a^m \frac{1}{Z_B - Z_H} \int_{Z_H}^{Z_B} \beta^m Z dZ; \\ C_{3T} &= Tf_0 a^m \frac{Z_B \cdot Z_H}{Z_B - Z_H} \int_{Z_H}^{Z_B} \beta^m dZ/Z, \end{aligned} \quad (8)$$

где $Z_B = f_B / f_0$; $Z_H = f_H / f_0$.

Рассмотрим влияние на накопления усталостных повреждений не только зависимостей изменения частоты, но и отдельных интервалов: дорезонансного $Z_H - Z_1$, резонансной полосы ΔZ_0 и зарезонансного $Z_2 - Z_B$. Нижняя частота была принята 10 Гц, для элемента с $f_0 = 400$ Гц — $Z_H = 0,025$, верхняя ограничена условием $\beta \leq 1$ ($Z_B = 1,5$).

Рассчитанные значения границ $Z_1 - Z_2$ резонансной полосы, вычисленные для разных величин добротности, приведены в таблице 2.

Ширина резонансной полосы ΔZ_0 зависит от добротности, но при любых значениях Q имеет место равенство $\Delta Z_0 = 1/Q$. Значения подинтегрального выражения в зависимостях (8) находили численным методом. Считая величину повреждений в интервале от Z_H до Z_B за 100 %, определили распределение повреждений на интервалах при рекомендуемых значениях Q и m [7, 9]. Для рассматриваемых зависимостей они равны в интервалах, симметричных относительно резонанса. Для интервала $(0,9 - 1,1)f_0$ значения интегралов можно посчитать с достаточной точностью по формуле:

$$J = 1,5 Q^{m-1} m^{-0,56}.$$

Таблица 2 — Значения границ полосы резонанса Z_1, Z_2 в зависимости от добротности

Table 2 — Values of the resonance band boundaries Z_1, Z_2 depending on the quality factor

Q	5	7	10	20	30	50	100
Z_1	0,883	0,920	0,946	0,974	0,983	0,989	0,995
Z_2	1,083	1,064	1,046	1,024	1,016	1,009	1,005

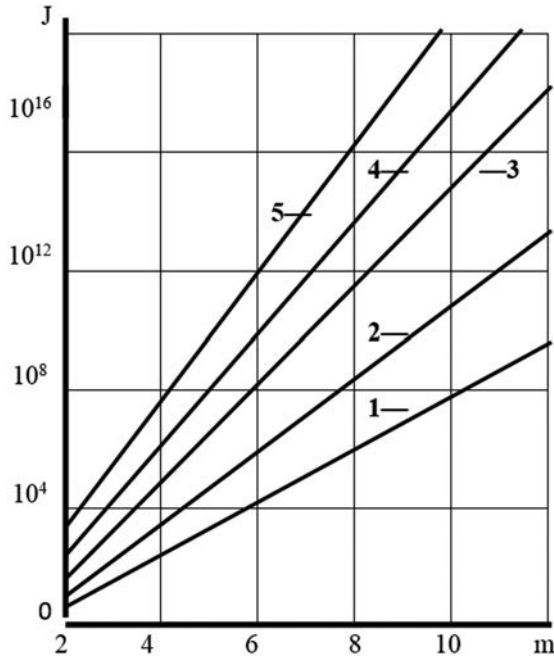


Рисунок 2 — Значения интеграла J , посчитанные для интервала $(0,9 - 1,1)f_0$ при Q : 1 — 10; 2 — 20; 3 — 50; 4 — 100; 5 — 200
 Figure 2 — Values of the integral J calculated for the interval $(0,9 - 1,1)f_0$ with Q : 1 — 10; 2 — 20; 3 — 50; 4 — 100; 5 — 200

Их значения приведены на рисунке 2.

Распределение повреждений в процентах по интервалам частотного диапазона при разных зависимостях изменения частоты приведено в таблице 3.

Отметим, что рассчитанные повреждения в интервале высоких нормированных частот ($Z > 1,5$), когда $\beta < 1$, при условии их учета, не превышают 0,5 % повреждений рассматриваемого диапазона.

Чем выше значения m и Q , тем больше элементы получают повреждений в резонансной полосе. В интервале дорезонансных частот $Z_H - Z_1$ наибольшее относительное накопление повреждений наблюдается при гиперболической зависимости изменения частоты воздействия и наименьшее — при линейной. Противоположно влияние зависимостей $f(t)$ на относительную повреждаемость в интервале частот $Z_2 - Z_B$. В интервале полосы резонанса $Z_1 - Z_2$ влияние первой и второй зависимостей изменения частоты на относительный объем накопленных усталостных повреждений примерно одинаково, менее всего способствует повреждению полоса резонанса при третьей зависимости изменения частоты. Такое влияние можно объяснить разным относительным временем прохождения рассмотренных интервалов и, соответственно, различным числом колебаний в них. Типичные кривые изменения частоты от времени для рассматриваемых зависимостей $f(t)$ представлены на рисунке 3 для элемента с $f_0 = 400$ Гц в интервале $10-600$ Гц $(0,025 - 1,5)Z$. Так, нахождение интервала частот $f_H - 0,5f_0$ требуется при экспоненциальной зависимости время $0,75T$, при линейной — $0,35T$ и при гиперболической — $0,93T$.

Отметим, что при разных зависимостях изменения частоты уровень повреждений, относящийся на интервал $(0,025-0,5)f_0$, очень незначителен.

При оценке суммарного повреждения на всех частотах диапазона $f_H - f_B$ с захватом резонансной полосы прежде всего нужно учитывать время про-

Таблица 3 — Распределение накопленных повреждений в процентах по интервалам частотного диапазона при экспоненциальной (C_1), линейной (C_2) и гиперболической (C_3) зависимостях изменения частоты
 Table 3 — Distribution of accumulated damages in percentage over frequency range intervals with exponential (C_1), linear (C_2) and hyperbolic (C_3) frequency variation dependencies

m	Q	$Z_H - Z_1$			$Z_1 - Z_2$			$Z_2 - Z_H$			$(0,9 - 1,1)f_0$		
		C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3
2	10	40,8	35,2	53,1	30,2	31,5	24,9	29	33,3	22	72,0	75,3	59,8
	20	27,4	24,0	35,7	50,7	51,8	45,8	21,9	24,2	18,5	85,1	87,2	77,4
	50	12,7	11,2	16,9	76,3	76,9	73,2	11	11,9	9,9	94,2	95	90,2
4	10	25,4	23,9	27,1	54,7	55	54,2	19,9	21,1	18,7	95,1	95,1	95
	20	9,3	8,8	9,6	82	82,3	82,2	8,7	8,9	8,2	99,5	99,5	99,5
	50	1,05	1,0	1,1	97,8	97,8	97,8	1,15	1,2	1,1	100	100	100
6	10	17,8	17	18,5	68,7	68,2	68,4	13,5	14,1	13,1	100	100	100
	20	3,6	3,5	3,7	92,8	92,7	92,7	3,6	3,8	3,6	100	100	100
	50	—	—	—	100	100	100	—	—	—	100	100	100
8	10	13	12,3	13,6	77,5	77,7	77,2	9,5	10	9,2	100	100	100
	20	1,5	1,5	1,5	97	97	97	1,5	1,5	1,5	100	100	100
	50	—	—	—	100	100	100	—	—	—	100	100	100
10	10	10	9,3	10,1	82,9	83,6	83,4	7,1	7,1	6,5	100	100	100
	20	0,6	0,6	0,6	98,7	98,7	98,7	0,7	0,7	0,7	100	100	100
	50	—	—	—	100	100	100	—	—	—	100	100	100

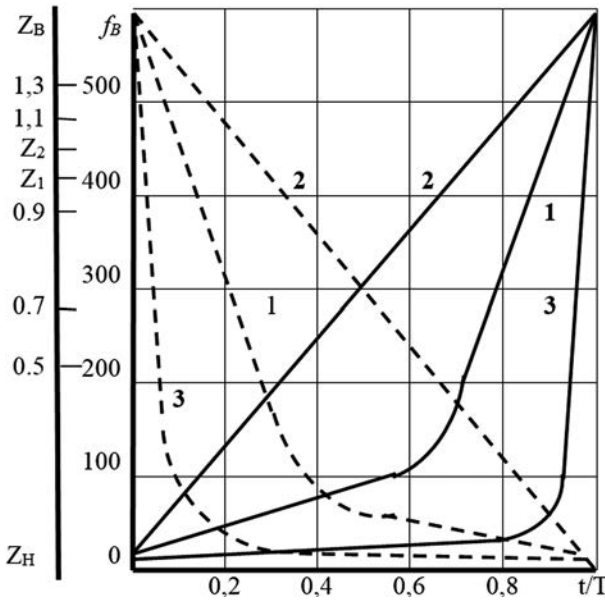


Рисунок 3 — Изменение частоты по времени в диапазоне 10–600 Гц при экспоненциальной (1), линейной (2) и гиперболической (3) зависимостях: — — прямой ход от f_H к f_B ; -- — обратный ход от f_B к f_H
Figure 3 — Frequency change over time in the range of 10–600 Hz with exponential (1), linear (2) and hyperbolic (3) dependencies: — — forward stroke from f_H to f_B ; -- — reverse stroke from f_B to f_H

хождения Δt_0 резонансной полосы, которое для рассматриваемых зависимостей соответственно равно:

$$\Delta t_{01} = \frac{T}{Q \ln(Z_B/Z_H)}; \Delta t_{02} = \frac{T}{Q(Z_B - Z_H)}; \Delta t_{03} = \frac{TZ_B \cdot Z_H}{Q(Z_B - Z_H)}. \tag{9}$$

Влияние величины Δt_0 как основной в накоплении повреждений подтверждают соотношения, полученные при сравнении зависимостей (8) и (9):

$$\frac{C_{2T}}{C_{1T}} = \frac{\Delta t_{02}}{\Delta t_{01}} = \frac{\ln(Z_B/Z_H)}{Z_B - Z_H}, \tag{10}$$

$$\frac{C_{2T}}{C_{3T}} = \frac{\Delta t_{02}}{\Delta t_{03}}; \frac{C_{1T}}{C_{3T}} = \frac{\Delta t_{01}}{\Delta t_{03}}.$$

При испытаниях в узких диапазонах частот, захватывающих резонанс, не превышающих по ширине $0,3f_0$ и симметричных относительно резонансной частоты, рассматриваемые зависимости не влияют на повреждаемость, а зависимости, представленные на рисунке 3 для таких диапазонов, приближаются к прямым линиям. Влияние зависимостей изменения $f(t)$ на повреждение увеличивается с расширением диапазона нормированных частот.

Результаты испытаний. Полученные выше зависимости проверили на электродинамическом стенде УВЭ-5/10000 грузоподъемностью 5 кг с диапазоном частот возбуждения 5–10 000 Гц и максимальным ускорением воздействия 450 м/с². Структурная схема системы испытаний представлена на рисунке 4. Режим испытаний задают

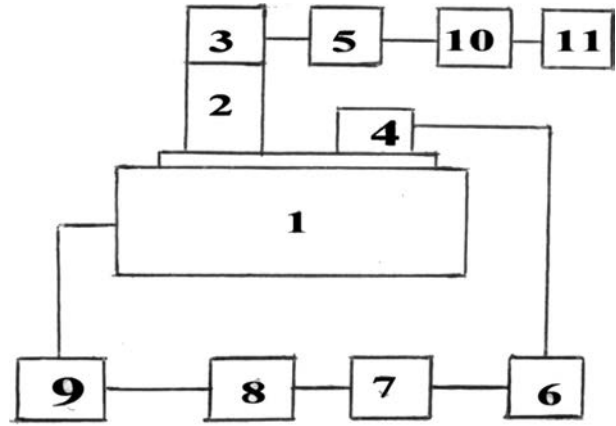


Рисунок 4 — Структурная схема системы испытаний: 1 — вибростенд; 2 — приспособление с испытываемыми элементами; 3, 4 — ВИП; 5, 6 — усилители сигналов; 7 — СУВУ; 8 — усилитель мощности; 9 — согласующее устройство; 10, 11 — измерительные приборы
Figure 4 — Structural scheme of the test system: 1 — vibration machine; 2 — device with the tested elements; 3, 4 — vibration measuring transducer; 5, 6 — signal amplifiers; 7 — superordinate control system; 8 — power amplifier; 9 — matching device; 10, 11 — measuring devices

с помощью системы управления стендом СУВУ4 (15УС-10⁴-002), которая обеспечивает постоянный задаваемый уровень воздействия на столе стенда, автоматическую развертку частоты в установленном диапазоне (5–10 000 Гц) по экспоненциальной или линейной зависимостям изменения частоты с задаваемой скоростью (1–100 Гц/с), а также измерение частоты с погрешностью 2 % и измерение ускорения с погрешностью 4 %.

На столе вибростенда устанавливается виброизмерительный преобразователь (ВИП) для связи с СУВУ, а также приспособление с испытываемыми элементами и ВИП для связи с измерительными приборами. В качестве виброизмерительных преобразователей использовали пьезоэлектрические акселерометры ИС-313А и бесконтактные датчики ускорений с электростатическим принципом действия, где одной из обкладок конденсатора является испытываемый элемент, в качестве измерительных приборов использовали цифровой вольтметр В7-27 и частотометр ЧЗ-32.

Испытывали резисторы МЛТ-1, закрепленные по схеме центрально нагруженного стержня с расстоянием 49 мм между жестко закрепленными концами ($f_{0,ср} = 440$ Гц), партиями по 12 штук при ускорении в 16g с экспоненциальной и линейной зависимостями изменения частоты в диапазонах $(0,1 - 1,5)f_0$ и $(0,5 - 1,5)f_0$. Скорость развертки частоты принимали при экспоненциальной зависимости, равной одной октаве в минуту, а при линейной — подбирали из условия равенства времени прохождения диапазона $Z_H - Z_B$. Используя соотношения (10) рассчитали, что повреждения, полученные при линейной зависимости изменения частоты, должны быть в 1,84 раза при испытании в интервале $(0,1 - 1,5)f_0$ и в 1,097 раз при испыта-

нии в интервале $(0,5 - 1,5)f_0$ больше повреждений, полученных при испытаниях с экспоненциальной зависимостью.

Предельное состояние резисторов фиксировали по разрушению их медных проволочных выводов. Для сравнения использовали медианы долговечностей в минутах испытываемых выборок. Долговечность резисторов, испытанных в диапазоне 50–660 и 230–660 Гц при линейной зависимости изменения частоты в 2,05 и 1,2 раза была соответственно меньше долговечности при испытаниях с экспоненциальной зависимостью.

Большее по сравнению с расчетной влияние на повреждаемость линейной зависимости изменения $f(t)$ можно объяснить тем, что меньшее время прохождения резонансной полосы при экспоненциальной зависимости уменьшает не только количество колебаний с наибольшими амплитудами, но и величину этих амплитуд.

Выводы. 1. Использование нормированных относительно резонанса интервалов частоты возбуждения позволило количественно оценить их влияние на вибропрочность изделий, что важно как при создании надежных изделий (уход от резонанса за счет изменения жесткости конструкции), так и при выборе режимов ускоренных испытаний на вибропрочность.

2. Добротность влияет на коэффициент передачи воздействия и усталостное повреждение только в интервале частот $(0,95 - 1,05)f_0$. Это позволяет при испытании методом фиксированных частот во всем диапазоне (метод 103-2) рассматривать в качестве расчетной модель изделия как совокупность параллельно соединенных элементов, имеющих одинаковую добротность и разные собственные частоты.

3. Линейная зависимость изменения частоты возбуждения наиболее эффективна при испыта-

ниях на вибропрочность, особенно в диапазоне дорезонансных частот.

Список литературы

1. Бегларян, В.Х. Механические испытания приборов и аппаратуры / В.Х. Бегларян. — М.: Машиностроение, 1990. — 223 с.
2. Комплексная система испытания качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний: ГОСТ 20.57.406-81. — Введ. 01.01.82. — Минск: Госстандарт; М.: Изд-во стандартов, 1982. — 165 с.
3. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. — М.: Высш. шк., 1980. — 408 с.
4. Голоскоков, Е.Г. Нестационарные колебания деформируемых систем / Е.Г. Голоскоков, А.П. Филиппов. — Киев: Наук. думка, 1977. — 339 с.
5. Сурин, В.М. Усталостная долговечность при действии синусоидальной и случайной вибраций / В.М. Сурин, С.М. Дзержинский // Вестн. НАН РБ, Сер. физ.-техн. наук. — 2008. — № 8. — С. 38–42.
6. Дзержинский, С.М. Долговечность электронных элементов, испытываемых на вибропрочность / С.М. Дзержинский, В.М. Сурин // Проблемы инфокоммуникаций. — 2015. — № 1. — С. 62–65.
7. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. — М.: Машиностроение, 1985. — 220 с.
8. Сурин, В.М. Сравнение режимов стендовых испытаний на вибропрочность / В.М. Сурин, С.М. Дзержинский // Вестн. машиностроения. — 2008. — № 10. — С. 22–25.
9. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости: ГОСТ 25.504-82. — Введ. 01.07.83. — Минск: Госстандарт; М.: Изд-во стандартов, 1982. — 81 с.
10. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования: ГОСТ 25.507-85. — Введ. 01.07.86. — Минск: Госстандарт; М.: Изд-во стандартов, 1985. — 31 с.
11. Дзержинский, С.М. Исследование модели «слабого звена» статистическим моделированием / С.М. Дзержинский, В.М. Сурин // Проблемы инфокоммуникаций. — 2015. — № 2. — С. 48–50.
12. Гаденин, М.М. Исследование повреждаемости и долговечности конструкций при одно и двухчастотных режимах нагружения на основе деформационных и энергетических подходов / М.М. Гаденин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2017. — № 6; Т. 83. — С. 44–51.

SURIN Vitaliy M., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department “Engineering Graphics”

E-mail: kaftm@bsuir.by

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Received 28 November 2019.

FATIGUE DAMAGE TO PRODUCTS DURING TESTING BY THE METHOD OF THE SWEEP FREQUENCY

A method for assessing fatigue damage during vibration testing of electronic products by the sweep frequency method is considered, which is the main method when testing for the effects of sinusoidal vibration and consists in smooth frequency changing in a given range from lower to upper and vice versa, so that the resonances of the elements of the tested product are sequentially excited at a constant set exposure level. To assess the damage, the power equation of the fatigue curve has been used. The probability of the appearance of response amplitudes at a certain frequency was replaced by the probability of excitation being at this frequency. The use of frequency range intervals normalized with respect to the natural frequency f_0 made it possible to exclude the influence of the scatter of the values f_0 of the product elements when comparing the results. A quantitative assessment of damage in the pre-resonance, resonance and extra-resonance frequency range intervals is proposed for the recommended values of

mechanical quality factor and the slope of the fatigue curve in double logarithmic coordinates for the following frequency variation dependencies that ensure constancy of: the transit time of the resonance band of all elements of the product; the rate of change of frequency over the entire range; the number of oscillations of all elements of the product in the resonance band. It was established that the influence of the frequencies of the resonance band on the damageability grows with an increase in the quality factor and the slope of the fatigue curve, the width of the resonance band is determined by the quality factor, the dependence $f(t)$ is the most effective in vibration tests, at which the rate of frequency change remains constant over the entire range.

Keywords: vibration resistance, sinusoidal vibrations, fatigue damage, oscillating frequency, damage summation

References

1. Beglaryan V.Kh. *Mekhanicheskie ispytaniya priborov i apparatury* [Mechanical tests of devices and equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 223 p.
2. State Standard 20.57.406-81. *Kompleksnaya sistema ispytaniya kachestva. Izdeliya elektronnoy tekhniki, kvantovoy elektroniki i elektrotekhnicheskoy. Metody ispytaniy* [Complex quality testing system. Products of electronic engineering, quantum electronics and electrotechnical products. Test methods]. Minsk, Gosstandart Publ., Moscow, Standartov Publ., 1982. 165 p.
3. Biderman V.L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy* [Theory of mechanical vibrations]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 408 p.
4. Goloskokov E.G., Filippov A.P. *Nestatsionarnye kolebaniya deformiruemyykh sistem* [Unsteady oscillations of deformable systems]. Kiev, Naukovaya dumka Publ., 1977. 339 p.
5. Surin V.M., Dzerzhinskiy S.M. Ustalostnaya dolgovechnost pri deystvii sinusoidalnoy i sluchaynoy vibratsiy [Fatigue durability under the action of sinusoidal and random vibrations]. *Vestsi Natsyyanalnay akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series], 2008, no. 8, pp. 38–42.
6. Dzerzhinskiy S.M., Surin V.M. Dolgovechnost elektronnykh elementov, ispytyvaemykh na vibroprochnost [Durability of electronic elements tested for vibration resistance]. *Problemy infokommunikatsiy* [Problems of infocommunications], 2015, no. 1, pp. 62–65.
7. Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. *Raschety detaley mashin i konstruktsey na prochnost* [Calculations of machine parts and structures for strength]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 220 p.
8. Surin V.M., Dzerzhinskiy S.M. Sravnenie rezhimov stendovyykh ispytaniy na vibroprochnost [Comparison of modes of bench tests for vibration resistance]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 2008, no. 10, pp. 22–25.
9. State Standard 25.504-82. *Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody rascheta kharakteristik soprotivleniya ustalosti* [Calculations and strength tests. Methods of calculation of fatigue resistance characteristics]. Minsk, Gosstandart Publ., Moscow, Standartov Publ., 1982. 81 p.
10. State Standard 25.507-85. *Raschety i ispytaniya na prochnost v mashinostroenii. Metody ispytaniy na ustalost pri ekspluatatsionnykh rezhimakh nagruzheniya. Obshchie trebovaniya* [Calculations and strength tests in mechanical engineering. Methods of fatigue tests under operational loading conditions. General requirements]. Minsk, Gosstandart Publ., Moscow, Standartov Publ., 1985. 31 p.
11. Dzerzhinskiy S.M., Surin V.M. Issledovanie modeli “slabogo zvena” statisticheskim modelirovaniem [Study of the “weak link” model by statistical modeling]. *Problemy infokommunikatsiy* [Problems of infocommunications], 2015, no. 2, pp. 48–50.
12. Gadenin M.M. Issledovanie povrezhdaemosti i dolgovechnosti konstruktsey pri odno i dvukhchastotnykh rezhimakh nagruzheniya na osnove deformatsionnykh i energeticheskikh podkhodov [Study of damage and durability of structures at one and two-frequency loading modes on the basis of deformation and energy approaches]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of materials], 2017, vol. 83, no. 6, pp. 44–51.