

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

О. Н. Герасимов, А. Ю. Доросинский, М. Н. Березин

## Введение

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) выполняет сложные и ответственные функции в разнообразных внешних условиях воздействия, поэтому изучение влияния внешних воздействующих факторов как на РЭА в целом, так и на входящие в ее состав радиоэлементы представляет собой актуальную задачу в области надежности РЭА.

Аппаратура летательных аппаратов и взрывателей особенно в процессе эксплуатации подвергается значительным механическим воздействиям – вибрации, ударным и линейным нагрузкам, вызывающим большие механические напряжения в отдельных элементах РЭА, что может привести к нарушению нормального режима работы аппаратуры или выходу ее из строя.

Развитие ракетно-космической техники, подвергающейся большим механическим нагрузкам, резко повысило требования к надежности РЭА в целом, а следовательно, и к ее элементам. В реальных условиях эксплуатации РЭА работает почти всегда при некотором комплексе воздействующих факторов, состоящем из механических, климатических и ряда других факторов. Наибольшее количество отказов РЭА приходится на долю механических факторов воздействия, поэтому повышение надежности элементов РЭА именно в этом направлении является важной научно-практической задачей, качество решения которой напрямую зависит от глубины понимания тех механизмов, которые происходят в радиоэлементах при воздействии вибрационных нагрузок.

## Теоретическое описание вибрационных процессов

Вибрации являются одним из основных видов испытаний, на долю которого приходится наибольшее количество отказов РЭА, которая состоит из большого числа изделий электронной техники различного функционального назначения и в общем случае представляет собой колебательную систему, состоящую из множества материальных точек, и, следовательно, имеет большое число степеней свободы. Наиболее общей формой уравнений движения такой колебательной системы является уравнение Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{g}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial g_i} = Q_{i(i=1,2,...,n)},$$

где  $n$  – число степеней свободы колебательной системы;  $i$  – порядковый номер обобщенной координаты;  $g_i$  – обобщенная координата;  $\dot{g}_i$  – обобщенная скорость;  $Q$  – обобщенная сила;  $T$  – кинетическая энергия системы;  $t$  – время.

В каждый момент времени состояние такой системы характеризуется перемещением  $X$  и скоростью  $V$ . С течением времени каждая точка системы будет перемещаться по фазовой плоскости, описывая фазовую траекторию, и гармоническое колебание в рассматриваемом случае будет иметь вид

$$\begin{cases} X = A \sin(\omega t + \varphi); \\ X = A_{\omega} \cos(\omega t + \varphi); \\ W = \omega^2 A \sin(\omega t + \varphi), \end{cases} \quad (1)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний;  $W$  – ускорение.

Кроме скорости и ускорения, синусоидальная вибрация характеризуется еще величиной динамической перегрузки  $U$  (резкостью), определяемой как производная от ускорения по времени без учета фазового угла  $\varphi$

$$U = \omega^3 A \cos \omega t. \quad (2)$$

Динамическая перегрузка характеризует скорость изменения действующей силы (инерции) и является дополнительной характеристикой гармонических вибраций, с помощью которой можно сравнивать режимы вибрационных нагрузок.

Из формул (1) и (2) видно, что амплитуды перемещения, скорости и ускорения и динамической перегрузки связаны между собой следующими соотношениями:

$$A_u = \omega A_\omega = \omega^2 A_v = \omega^3 A,$$

где величина амплитуды перемещения  $A$  в зависимости от заданной перегрузки и частоты определяется по формуле

$$A = \frac{250\Pi}{f^2}.$$

Данная формула представляет собой гиперболическую зависимость амплитуды от частоты. Величина  $\Pi$  – безразмерная вибрационная перегрузка, определяемая выражением

$$\Pi = \frac{A_\omega}{g}.$$

В практике испытаний вибрационные нагрузки подразделяются на низкочастотные ( $f = 5 - 50$  Гц) и высокочастотные. Низкочастотные вибрационные нагрузки вследствие значительной величины амплитуд могут создать в отдельных деталях конструкции изгибные колебания, вызывающие недопустимо большие деформации, которые могут привести к разрушению конструкции. Высокочастотные вибрации вследствие их малых амплитуд (от десятков до долей микрона), но большого числа колебаний могут вызвать явление усталости материала конструкции и появление микротрещин, что приведет к скрытым дефектам и при длительном их воздействии к отказу РЭА.

В реальных условиях эксплуатации РЭА ряда объектов вибрации не являются регулярными и носящими синусоидальный характер. В действительности они всегда имеют случайный характер, поэтому, например, имитация окружающих условий эксплуатации РЭА летательных аппаратов приводит к необходимости проведения испытаний на воздействие случайной вибрации, которая в зависимости от ширины спектра частот подразделяется на широкополосную и узкополосную.

Узкополосная случайная вибрация занимает сравнительно небольшой участок частот и при его уменьшении вид воздействий имеет форму биений, поэтому для определения его статических характеристик требуются реализации большой длительности.

Широкополосная случайная вибрация определяется как суммарное воздействие нескольких узкополосных вибраций и в общем случае случайные вибрации являются пространственными вибрациями, раскладывающимися по трем координатным осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , и тогда случайные вибрации рассматриваются как случайные функции одного аргумента – текущего времени  $t$ . Такие процессы не могут быть описаны какой-либо определенной функциональной зависимостью  $g(t)$ . Вместе с тем задание одних только дискретных значений  $g$  в различные моменты времени является обычно недостаточной и удобной характеристикой процесса, поэтому более полные и удовлетворительные характеристики даются параметрами, устанавливаемыми теорией вероятностей и математической статистики.

Математическое ожидание или среднее значение функции  $X(t)$  по ансамблю

$$E[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} X_p(x, t) dx,$$

где  $p(x, t)dx = P(x - dx < x(t) < x)$  – одномерный закон распределения вероятности случайной величины  $x(t)$ .

Среднеквадратическая спектральная плотность вибрации определяется выражением  $R_x(\theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) d\omega = E[x^2]$ , а спектральная плотность  $S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$ .

Основной целью испытаний ИЭТ на воздействие вибрационных нагрузок является определение способности изделий противостоять разрушающему действию вибрации, а также определение их способности выполнять свои функции при сохранении критериальных параметров годности в пределах требований, установленных НТД на данные изделия. Для приближения достоверности испытаний к реальным условиям эксплуатации РЭА в настоящее время нашел широкое применение метод качающейся частоты при испытании на вибрационные нагрузки. Удобство данного метода испытаний заключается в том, что при логарифмическом изменении частоты вибрации возможно непосредственно с помощью пьезодатчиков, электретных датчиков и других приборов определить резонансные частоты отдельных элементов изделия, а также всего изделия в целом во всем диапазоне частот. Кроме того, данный метод позволяет определить амплитуды, возникающие на резонансных частотах.

### ***Механизмы разрушения конструкционных материалов изделий электронной техники при воздействии вибрационных нагрузок***

При воздействии вибрационных нагрузок, имеющих широкий диапазон частот, в РЭА могут возникнуть изгибные, поперечные, продольные и поверхностные волны, которые распространяясь по материалу конструкции, возбуждают виброшумы в радиоэлементах и электронных приборах. Кроме того, воздействие вибрации существенным образом развивает и ускоряет процессы разрушения, связанные с наличием отслоений, трещин и т.д. Даже те элементы изделий, дефекты которых в обычных условиях не проявляются, могут оказаться крайне чувствительными по отношению к слабым вибрациям (точечная сварка и др.)

Технические материалы, на первый взгляд кажущиеся однородными, всегда содержат большое количество дефектов различного происхождения и самых разнообразных размеров. На субмикроскопическом уровне это вакансии включения в почти правильной структуре материала, дислокации, поры. На микроскопическом уровне наблюдается разброс в ориентации, размерах и свойствах частиц, образующих материал. На микроскопическом уровне различны уже свойства материала ввиду неоднородности большого масштаба.

При действии циклически изменяющихся напряжений, создаваемых вибрацией, наблюдается явление усталости материалов. На усталостную прочность материала оказывают существенное влияние два фактора: повторность нагрузки и фактор времени.

В ряде работ [1], [2] отмечается, что при воздействии динамической знакопеременной нагрузки происходит деформация сдвига кристаллитов вдоль определенных плоскостей скольжения, что может привести вследствие различной их ориентации к пластической деформации, по мере роста которой происходит упрочнение материала и может достичь такого состояния, когда кристаллиты под действием постоянной нагрузки уже не будут деформироваться пластически, а произойдет лишь упругая деформация. При циклическом нагружении распространение пластической деформации характеризуется волновым процессом, скорость которого определяется по динамической диаграмме напряжение – деформация как

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}},$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$  – модуль упругости материала в пластичной области.

В связи с тем, что пластическая прочность материала понижается по мере увеличения степени деформации, при дальнейшем воздействии циклической знакопеременной нагрузки приведет к образованию субмикроскопических трещинок, расположенных вдоль определенных линий или полос скольжения. Трещины усталости распространяются не по всему объему изделия, под-

вергающемуся циклическим напряжениям, а только по одному из сечений, в котором она проходит по наиболее слабым элементам материала, в большинстве своем имеющим неоднородную структуру, следовательно, в этом сечении концентрируется наибольшее местное напряжение.

Исследования по распространению усталостных трещин, проведенные Фростом, показали, что напряжение, необходимое для распространения усталостной трещины, уменьшается по мере роста трещины и для ряда материалов подчиняется эмпирической зависимости [3]

$$\sigma^3 l = c,$$

где  $\sigma$  – циклическое напряжение, необходимое для развития трещины длиной  $l$ ;  $c$  – постоянная.

В пластичных металлах пластические деформации не позволяют местным напряжениям превзойти величину предела текучести данного металла и способствуют тем самым на стадиях, близких к разрушению, более равномерному распределению напряжений по каждому сечению.

Одной из основных характеристик материала при воздействии на него циклических нагрузок является циклическая вязкость, которая не является постоянной величиной, так как зависит от величины циклических напряжений и от нарастания числа циклов напряжения; эти изменения циклической вязкости, характеризуемые изменением петли гистерезиса, позволяют констатировать в металле под действием циклических нагрузок наличие одновременно протекающих двух факторов:

- фактора упрочнения, за который принимается наклеп и механическое старение материала, вызываемые его пластической деформацией;
- разупрочняющего фактора, за который принимаются остаточные напряжения в кристаллитах и между кристаллитами.

Ход всякого усталостного процесса материала зависит от сравнительной интенсивности обоих факторов, меняющихся по мере нарастания числа циклов нагружения и их частоты. Степень влияния частоты нагружения на характеристики усталостной прочности материала зависит от материала, характера нагружения, уровня напряжений (отношения максимального напряжения цикла к пределу упругости), наличия концентраций напряжения, окружающей среды, температуры. На рис. 1 даны факторы, на которые влияет частота нагружения материала.

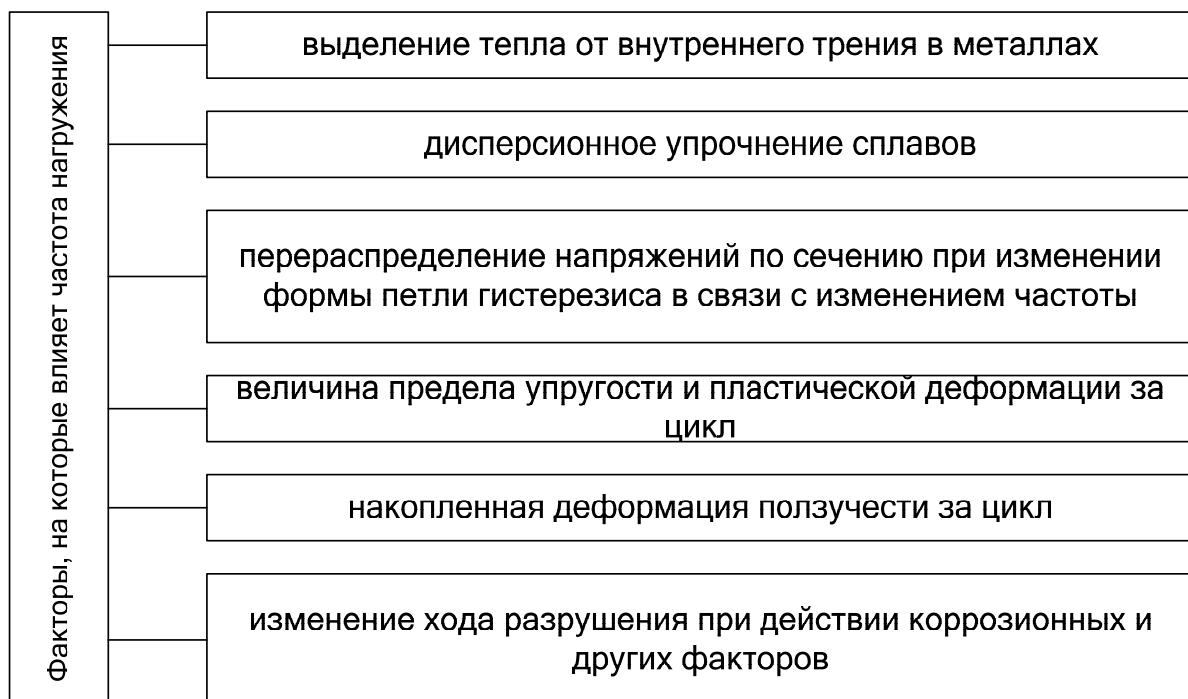


Рис. 1. Влияние частоты нагружения

При высоких частотах нагружения (порядка 10000 Гц) в ряде случаев наблюдается снижение циклической прочности, которое, как правило, связывают с разупрочняющим влиянием само-

разогрева деформируемого материала и его долговечность в единицах времени, несмотря на значительно более низкую амплитуду напряжения  $\sigma$ , примерно на три порядка ниже, чем при низкой частоте и высокой амплитуде [4].

При воздействии низкочастотной вибрации накопления повреждений происходят лишь от ползучести материала, а характер кривой усталости металлов зависит от условий воздействия (температура, среда, размер детали и т.д.) и может изменяться для данного материала в широких пределах.

### **Оценка долговечности деталей**

При анализе изделий электронной техники наибольший интерес представляет оценка долговечности алюминиевых материалов и сплавов, так как именно они в основном используются при изготовлении наружных элементов конструкции.

При достаточно плавных периодически изменяющихся напряжениях вычисление долговечности деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, определяется [5] по формуле

$$[\lg N] = \frac{1}{n} \left[ \lg N_{-1} \frac{\sigma_m - \sigma}{\sigma_m - \sigma_{-1} K_1 K_2 K_3 K_4} \right],$$

где  $n$  – коэффициент запаса прочности;  $K$  – коэффициент при испытании образца на изгиб с вращением;  $K_2$  – коэффициент при испытании точечных образцов на консольный изгиб с вращением;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий зависимость абсолютных размеров образца от площади поперечного сечения;  $K_4$  – коэффициент, учитывающий концентрацию напряжений в опасном сечении;  $N_{-1}$  – число циклов нагружений при симметричном цикле опасных напряжений, соответствующее точке перелома усталостной кривой;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости опасных напряжений при симметричном цикле для гладких образцов.

Влияние частоты на долговечность при максимальном напряжении цикла меньшим предела упругости при прямоугольном и синусоидальном цикле определяется отношением

$$(N_{p1} / N_{p2}) (f_1 / f_2)^{n/\lambda + 1} \text{ при } f_1 > f_2,$$

где  $N_{p1}$  – число циклов до разрушения при частоте  $f_1$ ;  $N_{p2}$  – число циклов до разрушения при частоте  $f_2$ ;  $n$  – число приложенных циклов принимается равным единице или двум;  $\lambda$  – коэффициент упрочнения.

Случайная вибрация, представляющая собой спектр определенных частот, некоторые из которых могут совпадать с резонансными частотами элементов РЭА и при непродолжительном воздействии привести к выходу из строя по тем или иным признакам. Обычно воздействующие вибрации имеют широкий и в то же время равномерный спектр, что позволяет с хорошей для практики точностью считать случайный процесс нормальным или Гаусовским, а интенсивность отказов при воздействии случайной вибрации определить по формуле

$$\lambda = \frac{\sigma_Y}{2\pi\sigma_Q} e^{-\left(g_0 - M\{Q\}^2 / 2\tau^2 Q\right)}.$$

Отсюда вероятность повреждения изделий электронной техники при наличии в их элементах резонансных частот будет пропорциональна числу имеющихся резонансных частот в данном диапазоне.

### **Выводы**

Проведенные исследования показали, что при испытании на воздействие вибрационных нагрузок характерными отказами изделий электронной техники являются:

- разрушение конструкции вследствие недостаточной прочности;
- облом выводов;
- нарушение сварных и паяных соединений.

При этом наиболее популярным видом дефекта является облом выводов, который связан, большей частью с наличием резонансных явлений, возникающих при их большой длине или наличии дефектов материала (надсечки, раковины, включения, микротрещины).

Комплексный подход к оценке результатов вибрационных испытаний позволяет выявить причины отказов и разработать комплекс мер по обеспечению повышения качества изделий.

### **Библиографический список**

1. Сборник статей / под ред. К. Нитцше. – М. : Металлургия, 1967. – 452 с.
2. Терентьев, В. Ф. Циклическая прочность металлических материалов : учеб. пособие / В. Ф. Терентьев, А. А. Оксогов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
3. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. – М. : Машиностроение, 2004. – 784 с.
4. Школьник, Л. М. Методика усталостных испытаний / Л. М. Школьник. – М. : Металлургия, 1978. – 304 с.
5. Карпушин, В. Б. Вибрация и удары в радиоаппаратуре / В. Б. Карпушин. – М. : Советское радио, 1971. – 344 с.

#### **Герасимов Олег Николаевич**

начальник военного представительства,  
Министерство обороны РФ  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: gera0502@mail.ru

#### **Доросинский Антон Юрьевич**

кандидат технических наук, ведущий инженер,  
специальное конструкторское бюро,  
ОАО «Электромеханика»  
(440052, Россия, г. Пенза, ул. Гоголя, 51/53)  
E-mail: antik\_r13@mail.ru

#### **Березин Максим Николаевич**

главный инженер  
ООО НПП «Сонар»  
(440004, Россия, г. Пенза, ул. Центральная, 1В)  
E-mail: maximber@mail.ru

**Аннотация.** Обоснована целесообразность повышения вибрационной устойчивости радиоэлектронной аппаратуры. Дано теоретическое описание процессов, происходящих в конструктивных элементах радиоэлектронной аппаратуры при вибрационных воздействиях. Рассмотрены теоретические вопросы влияния вибрации и ударов на конструкционные материалы и изделия радиоэлектронной аппаратуры. Описан способ оценки долговечности деталей. Исследованы механизмы отказов изделий электронной техники в процессе воздействия повышенных механических нагрузок. Описаны механизмы разрушения конструкционных материалов изделий электронной техники при воздействии вибрационных нагрузок.

**Ключевые слова:** механическая нагрузка, вибрация, электронная техника, изделие, аппаратура.

#### **Gerasimov Oleg Nikolayevich**

head of the military mission,  
The Ministry of defense RF  
(440026, 8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

#### **Dorosinskiy Anton Yur'evich**

candidate of technical sciences, lead engineer,  
special design bureau,  
Electromechanica factory  
(440052, 51/53 Gogolya street, Penza, Russia)

#### **Berezin Maksim Nikolaevich**

chief engineer  
RPE "Sonar"  
(440004, 1V Tsentral'naya street, Penza, Russia)

**Abstract.** The expediency of improving the vibration stability of electronic equipment. The theoretical description of processes occurring in the structural components of electronic equipment in vibration influences. The article considers theoretical questions of the impact of vibration and shocks on structural materials and articles of electronic equipment. The described method of estimating the durability of components. We investigated the mechanisms of failure of electronic devices in the process of exposure to elevated mechanical loads. Describes the failure mechanisms of structural materials of electronic devices when exposed to vibration loads.

**Key words:** mechanical stress, vibration, electronics technique, product, equipment.

**УДК 54.08**

**Герасимов, О. Н.**

**Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники** / О. Н. Герасимов, А. Ю. Доросинский, М. Н. Березин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 37–42. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-6.