

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Техническая диагностика РЭС»  
для студентов направления подготовки 11.03.03  
«Конструирование и технология электронных средств»,  
профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных  
средств» всех форм обучения

Воронеж 2021

УДК  
ББК

**Составители:**

асс. А.С. Костюков  
д-р техн. наук А.В. Башкиров

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Техническая диагностика РЭС» для студентов направления подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», (профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. С. Костюков, А. В. Башкиров. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 29 с.

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS Word 2007 и содержатся в файле TDRES3.pdf

Табл. 11 Ил. 42 Библиограф.: 12

**УДК**  
**ББК**

**Рецензент** - О. Ю. Макаров, д-р техн. наук, проф.  
кафедры конструирования и производства  
радиоаппаратуры ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3**

## **ИСПЫТАНИЕ РЭА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИИ**

### **1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ**

Радиоэлектронная аппаратура (РЭА), устанавливаемая на подвижных объектах — автомобилях, самолетах, ракетах и т.д. — в процессе эксплуатации подвергается интенсивным механическим воздействиям — ударам, вибрациям, линейным перегрузкам, акустическим шумам. Надежность такой РЭА может снижаться в десятки и сотни раз по сравнению с аналогичной аппаратурой, используемой в стационарных условиях. Для многих видов РЭА, например самолетной и ракетной, наиболее опасны вибрационные воздействия, особенно если они приводят к возникновению резонансных колебаний таких широко распространенных элементов конструкций РЭА, как электромонтажные платы. Виброперегрузки, действующие на электрорадиоэлементы (ЭРЭ), увеличиваются при этом в десятки раз, что вызывает значительное возрастание интенсивности отказов как за счет механических разрушений элементов конструкций, так и за счет искажения параметров электрических сигналов. Поэтому устранение резонансных колебаний плат или их снижение до допустимого уровня составляют одну из важнейших задач конструктора самолетной или ракетной РЭА. Решение таких задач требует от него определенных познаний в области теории колебаний и других областях.

### **1. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ**

#### **2.1 Общая характеристика вибраций**

Под вибрацией радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) обычно понимают механические колебательные процессы в ее конструкции. Существует сравнительно много причин

возникновения вибраций. Все их можно разделить на две группы — внутренние и внешние. К внешним относятся, например, неравномерное вращение вала двигателя, деталей трансмиссии или ходовой части, неровности дороги, работа двигателя ракеты, пульсирующие порывы ветра, акустический шум, атмосферная турбулентность, к внутренним — несбалансированность роторов двигателей вентиляторов и др.

Виды вибраций. Реальные вибрации часто являются случайными, имеют сложный вид, и их характеристики с трудом поддаются точному описанию. Для практических целей обычно используются некоторые классические формы — гармоническая, квазигармоническая, широкополосная и узкополосная случайные вибрации, показанные на рисунке 3.1.

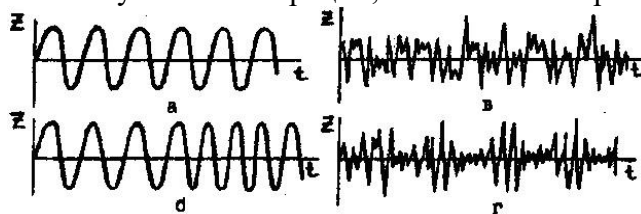


Рисунок 3.1 - Эпюры вибраций: а - гармоническая; б - квазигармоническая; в - случайная широкополосная; г - случайная узкополосная

Гармоническая вибрация сравнительно редко встречается в реальных условиях, например как результат несбалансированности ротора двигателя, но широко используется при лабораторных испытаниях и при анализе. Важно также, что она находит широкое применение для определения динамических характеристик конструкций, которые затем используются при определении реакции системы на более сложные формы вибрации.

Перемещение  $Z(t)$  при гармонической синусоидальной вибрации может быть описано выражением:

$$z(t) = Z_0 \sin \omega \cdot t , \quad (3.1.1)$$

где  $Z_0$  — амплитуда перемещения,  $\omega$  — круговая частота колебаний;  $t$  — время.

Выражения для скорости  $\dot{z}(t)$  и ускорения  $\ddot{z}(t)$  находятся дифференцированием по времени выражения (1.1);

$$\dot{z}(t) = \frac{dz}{dt} = \omega \cdot Z_0 \cos \omega \cdot t = \dot{Z}_0 \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}), \quad (3.1.2)$$

где  $\dot{Z}_0 = \omega \cdot Z_0$  — амплитуда скорости колебаний;

$$\ddot{z}(t) = \frac{d^2z}{dt^2} = -\omega^2 Z_0 \sin \omega \cdot t = -\omega^2 z(t) = \ddot{Z}_0 \sin(\omega \cdot t + \pi), \quad (3.1.3)$$

где  $\ddot{Z}_0 = \omega^2 \cdot Z_0$  — амплитуда ускорения колебаний.

Сравнивая выражения (3.1.1 — 3.1.3), можно заключить, что при синусоидальных колебаниях ускорение опережает по фазе перемещение на угол  $\pi$ , а скорости —  $\pi/2$ . Для описания гармонической вибрации часто используется комплексная форма в виде

$$z(t) = Z_0 e^{i\omega \cdot t}, \quad (3.1.4)$$

так как выражение  $e^{i\omega \cdot t} = \cos \omega \cdot t + i \sin \omega \cdot t$ , также описывает гармонические колебания с циклической частотой  $\omega$ .

Таким образом, основными характеристиками гармонической вибрации являются амплитуда колебаний (амплитуда перемещения, скорости или ускорения) и частота. Их значения, прежде всего, определяются типом объекта, на котором устанавливается РЭА. Например, к ракетной РЭА часто предъявляется требование нормального функционирования при испытаниях на вибростенде в диапазоне 10-2000 Гц с амплитудой виброускорения до 20-40 g, где g — ускорение силы тяжести.

Квазигармоническая вибрация, имеющая непрерывное изменение частоты, более сложна при аналитическом

изучении. Обычно она возникает в период разгона и торможения механизмов с вращающимися элементами. В настоящем пособии задачи с использованием такого типа вибраций рассматриваться не будут.

Широкополосная случайная вибрация представляет довольно точную идеализацию вибрации объектов, например летательных аппаратов, и часто описывается как нормальный стационарный случайный процесс. Случайный процесс нормальный, если его плотность распределения  $f(x_1, x_2, \dots, x_n, t_1, t_2, \dots, t_n)$  имеет вид нормального закона и стационарный - если закон распределения не изменяется во времени.

Случайный процесс характеризуется математическим ожиданием

$$m_z(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t z(\tau) d\tau$$

и автокорреляционной функцией

$$K(\Delta\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t z(\tau) z(\tau + \Delta\tau) d\tau,$$

которая при  $\Delta\tau=0$  становится равной дисперсии

$$D_z(t) = K(0) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t z^2(\tau) d\tau,$$

определяющей мощностью случайного процесса.

Одной из важнейших характеристик случайного процесса является спектральная плотность дисперсии  $S_z(f)$  (рисунок 3.2), которая связана с дисперсией случайного процесса соотношением

$$D_z = \int_0^{\infty} S_z(f) df. \quad (3.1.5)$$

Учитывая выражение (3.1.5) легко получить формулу для среднеквадратичного значения процесса

$$\sqrt{Z^2} = \sqrt{D_z} = \sqrt{\int_0^{\infty} S_z(f) df}. \quad (3.1.6)$$

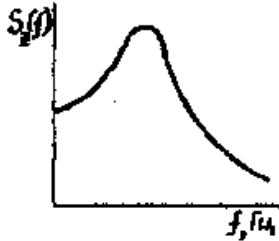


Рисунок 3.2 – Спектральная плотность случайного процесса

В техническом задании на разработку РЭА может быть указано требование обеспечения нормального функционирования при действии случайной вибрации в заданном диапазоне частот с некоторой величиной спектральной плотности ускорения. Диапазон частот может достигать 2-5 кГц, а наиболее типичные значения спектральной плотности лежат в пределах  $0,01 - 1 \text{ г}^2 / \text{Гц}$ .

Узкополосная случайная вибрация обычно возникает как реакция упругих слабодемпфированных систем на широкополосную случайную -вибрацию. На практике часто необходимо определить не только среднеквадратическое значение реакции в соответствии с формулой (1.6), но и ее пиковые значения. Эту задачу можно решить только вероятностно. Для нормального случайного процесса пиковые значения распределены по закону Рэлея:

$$P(Z_n) = e^{-\frac{z_n^2}{2Z^2}}. \quad (3.1.7)$$

Если известны среднеквадратические значения, то легко можно найти, какая часть пиков превысит заданный уровень.

## 2.2 Причины отказов РЭА при действии вибраций

Вибрации РЭА вызывают отказы РЭА как из-за механических разрушений элементов конструкций так и вследствие изменений параметров электрорадиоэлементов и узлов, приводящих к искажениям характеристик сигналов. Можно выделить четыре причины отказов РЭЛ, каждая из которых способна вызывать отказы того и другого характера.

Первая причина заключается в том, что амплитуда перемещения при вибрациях некоторого элемента или группы элементов по крайней мере один раз превысит допустимую величину. В качестве типичных примеров можно привести чрезмерно большое перемещение баллона электронной лампы, вызывающее ее разрушение при соударении с соседними деталями, замыкание контактов реле, короткое замыкание неизолированного провода и т.д.

Вторая причина отказов состоит в том, что амплитуда перемещения превосходит допустимую величину в течение относительно большого промежутка времени. Отказы, возникающие по этой причине, как правило, связаны с искажениями параметров сигналов, которые часто называют виброшумами. Так, например, виброшумы электронных ламп появляются вследствие колебаний катодов прямого накала и витков сеток; дребезжания катода, рамок или траверс сеток в слюдяных изоляторах при наличии люфтов; колебаний электродов, вызванных резонансными колебаниями вспомогательных деталей и узлов; всплесков затухающих колебаний из-за внутриламповых ударов. В объемных резонаторах колебания элементов приводят к циклическим изменениям индуктивно-емкостных связей и, как следствие, к паразитной модуляции сигнала. Частота генератора будет изменяться в соответствии с формулой

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right). \quad (3.1.8)$$



Относительные перемещения электрорадиоэлементов и проводников вызывают изменения паразитных связей в электрических цепях. Колебания волноводов приводят к увеличению скорости затухания электромагнитного поля, а колебания вибратора в прямоугольном волноводе - к появлению паразитной амплитудно-фазовой модуляции.

Третья причина отказов заключается в том, что напряжение в некотором элементе хотя *бы* один раз превзойдет допустимую величину к этот элемент либо разрушится, либо в нем возникнут остаточные деформации. В качестве примера можно назвать расслоение многослойных печатных плат, необратимые изменения параметров полупроводниковых приборов и др.

И, наконец, четвертая причина отказов состоит в том, что механические напряжения, недостаточные для разрушения или необратимого изменения параметров за один цикл колебаний, вызывают явления, приводящие к отказам, при длительном действии напряжения. Типичный пример — усталостные разрушения внеш внешних выводов и траверс полупроводниковых приборов, микросхем, резисторов и других элементов. Переменные механические напряжения вызывают также изменения электрического сопротивления полупроводниковых материалов и магнитной проницаемости ферритов, что часто служит причиной недопустимого искажения электрических сигналов в радио технических устройствах.

Как видим, вибрации являются причиной большого количества неисправностей, что приводит к значительному увеличению интенсивности отказов РЭА.

### 2.3 Резонансные колебания элементов конструкций РЭА и способы их устранения

Дестабилизирующее действие вибраций значительно возрастает при возникновении резонансных колебаний

элементов конструкций, т.е. когда частота собственных колебаний конструкции и частота возбуждения примерно совпадают. Амплитуды перемещения, скорости и ускорения при этом значительно увеличиваются и могут превышать в десятки раз амплитуды возмущающего колебания. Особенно опасны резонансные колебания электромонтажных плат, так как амплитуды колебаний могут значительно превзойти уровень, допустимый для ЭРЭ. В качестве примера на рисунке 3.3 (кривая 1) показана зависимость коэффициента усиления колебаний в центре круглой платы ракетного радиовзрывателя по отношению к закрепленным краям. Видно, что на частоте около 150 Гц амплитуда колебаний возрастает в 40 раз по отношению к амплитуде возмущающих колебаний. При амплитуде ускорения возмущающих колебаний всего в 10g на некоторые электрорадиоэлементы будут действовать перегрузки в 400 единиц, что приведет к быстрому их отказу.



Рисунок 3.3 — Виброзащита электронных элементов  
 а — носовая часть ракеты; 1 — корпус ракеты; 2 —  
 электронные элементы;  
 3 — плата; б — частотная характеристика платы; 1 —  
 однородная плата; 2 — плата с антирезонансными слоями

Существует несколько способов устранения резонансных колебаний плат РЭА. Широко распространен способ, заключающийся в смещении спектра собственных частот колебаний конструкции за верхнюю границу диапазона частот возмущающих вибраций (рисунок 3.4). Для полного

устранения резонансных колебаний необходимо, чтобы первая собственная частота колебаний  $F_{01}$  была не менее чем на октаву выше максимальной частоты возмущающих колебаний  $F_в$ , т.е. необходимо выполнение условия  $F_{01}/F_в \geq 2$ .

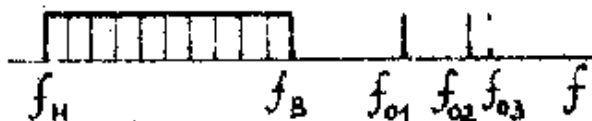


Рисунок 3.4 – рекомендуемое соотношение спектров возмущающих и собственных колебаний

Практически этого стремятся достичь изменением способов крепления, постановкой дополнительных опор и ребер жесткости, увеличением толщины и уменьшением площади конструкции, т.е. в основном повышением жесткости. Если требуется значительно сместить спектр собственных частот в высокочастотную область, то это приводит к необходимости большого увеличения массы и габаритов, что делает этот способ малоприменимым, например для бортовой ракетной радиоаппаратуры, спектр частот вибрационных воздействий у которой достигает нескольких килогерц, а требования к массе и габаритам - жесткие. Поэтому узлы и блоки такой аппаратуры часто полностью заливаются легкими и жесткими пеноматериалами, что в определенной степени позволяет получить желаемый результат, но при этом значительно ухудшается тепловой режим и ремонтпригодность изделий. Способ, основанный на повышении жесткости, целесообразно применять, когда диапазон частот действующих вибраций не превышает 400-500 Гц или когда достаточно снизить резонансные колебания на некоторую, иногда не очень большую, величину. Это характерно для РЭА, у которой преобладают отказы усталостного характера.

Как видно из выражения

$$A = \frac{250n}{f^2}, \quad (3.1.9)$$

где  $A$  - амплитуда колебаний, мм;  $f$  - частота, Гц, небольшое повышение собственной частоты колебаний может существенно уменьшить амплитуду колебаний.

Одним из путей решения проблемы снижения резонансных колебаний является улучшение демпфирующих свойств конструкций, т.е. повышение рассеяния энергии колебаний за счет сил трения. Этого можно достичь включением в конструкции плат специальных антирезонансных покрытий из так называемых вибропоглощающих (ВП) материалов, внутреннее трение которых в десятки и сотни раз больше, чем у конструкционных материалов, например стеклотекстолита. Большое преимущество этого способа в том, что резонансные колебания могут быть снижены в широком диапазоне частот при незначительном увеличении массы и габаритов конструкций. Эффективность этого способа показана на рис. 3.3. Применение платы, состоящей из трех слоев стеклопластика с зажатými между ними тонкими слоями из НИ материала, снизило резонансные колебания в восемь раз.

## 2.4 Особенности физико-механических свойств полимеров

Эффективный способ уменьшения резонансных колебаний - включение в конструкции слоев из специальных вибропоглощающих (ВП) материалов, внутреннее трение которых в десятки и сотни раз может быть больше, чем у конструкционных материалов. В качестве ВП материалов могут применяться различные материалы с большим внутренним рассеиванием энергии механических колебаний, но наиболее перспективными с учетом всех факторов (технологических, эксплуатационных и др.) являются полимеры. Особенность полимеров резко выделяющая их из

среды других материалов, - способность в зависимости от скорости приложения силы вести себя как жидкость или как твердое упругое тело, или же одновременно проявлять свойства того и другого.

Эта особенность определяется структурой полимеров, состоящих из длинных цепных молекул участки которых, так называемые звенья, находятся в хаотическом тепловом движении. Прило Приложение внешней силы приводит к некоторой ориентации звеньев в направлении внешней силы. Величина этой ориентации и, следовательно, деформация полимера зависят не только от величины силы, но и от её скорости. Ориентация звеньев связана с преодолением сил межмолекулярного взаимодействия, которые тем слабее, чем энергичнее тепловое движение, т.е. чем выше температура. Эти обстоятельства обуславливают резкую зависимость механических свойств полимеров от скорости (частоты) деформирования и температуры. На рисунке 3.5 приведены типичные зависимости динамического модуля упругости и коэффициента механических потерь полимеров от температуры и частоты колебаний. Можно выделить три зоны (кривые I) - высокоэластического, стеклообразного (или кристаллического) состояния и переходную зону. Каждый аморфный полимер, в зависимости от температуры и частоты колебаний, может находиться а одном из этих состояний (или вязкотекучем). Например, жесткие пластмассы при нормальных, условиях - это полимеры в области стеклообразного или кристаллического состояния, а резины и другие каучукоподобные материалы-полимеры в области высокоэластического состояния. В качестве ВП материалов для антирезонансных слоев могут выбираться не любые полимеры, а только те, физико-механическое состояние которых соответствует переходной зоне, так как при этом полимер имеет максимальные демпфирующие свойства.

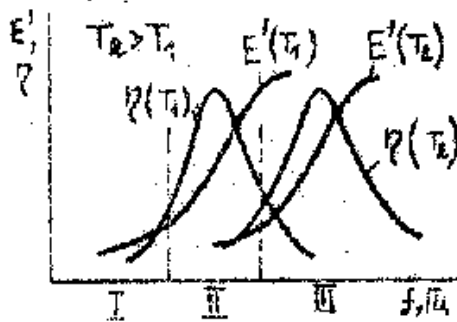


Рисунок 3.5 - Зависимость демпфирующих и упругих свойств полимеров от температуры и частоты

1 – Высокоэластическое состояние;

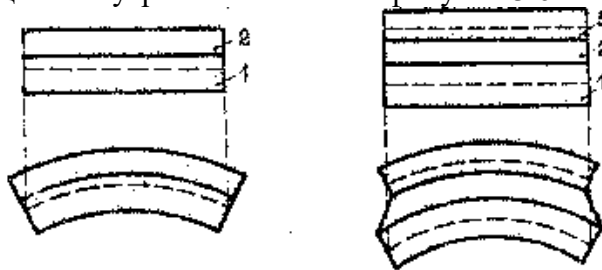
2 – Переходная зона;

3 – Стеклообразное состояние

Видно также, что и упругие и демпфирующие свойства полимеров в этой зоне резко изменяются в пределах  $(10^5 - 10^9) \frac{H}{m^2}$ , а коэффициент механических потерь – от 0,01 до  $1 \div 2$ . При использовании полимеров в качестве ВП материалов необходимо также учитывать смещение переходной зоны по оси температур при изменении частоты колебаний (Рисунок 3.5, кривые 1 и 2).

Схемы конструкций с антирезонансными слоями

Конструкции с антирезонансными слоями можно разделить на две группы: конструкции с внешним ВП слоем и конструкции с внутренним ВП слоем рисунок 3.6.



а

б

Рисунок 3.6 – Схемы вибропоглощающих конструкций

1,3 – несущие слои;

2 – вибропоглощающий слой

Принципиальное их отличие – в типе деформации ВП слоя. В конструкциях с внешним ВП слоем основным типом деформации является растяжение – сжатие ВП слоя, а в конструкциях с внутренним ВП слоем сдвиг. Это обусловлено тем, что модуль упругости ВП материала на несколько порядков меньше модуля упругости материалов несущих слоев и происходит как бы проскальзывание между несущими слоями.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования конструкций того и другого типа показали, что при правильном выборе ВП материала применение слоев всего в несколько десятых долей миллиметра в конструкциях с внутренним ВП слоем позволяет уменьшить резонансные колебания в несколько раз. В конструкциях с внешним ВП слоем такого эффекта удастся добиться, когда толщина ВП слоя в 5 - 10 раз превышает толщину несущего слоя. Однако отсюда не следует делать вывод о неперспективности такого типа конструкций. Применение в качестве ВП материала легких пеноматериалов, наносимых на плату заливкой со стороны электрорадиоэлементов, позволяет добиться необходимого эффекта без существенного увеличения массы и габаритов. Преимуществом этих конструкций является их большая технологичность.

2.2 Модели вибропоглощающих материалов конструкций

Классическая теория упругости имеет дело с механическими свойствами идеально упругих тел, для которых в соответствии с законом Гука

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3.2.1)$$

где  $E$  - модуль упругости материала, напряжение пропорционально деформации  $\sigma$  и не зависит от скорости.

Классическая гидродинамика описывает течение жидкостей, поведение которых при деформации определяется законом Ньютона

$$\sigma_{\tau} = b \frac{d\gamma}{dt}, \quad (3.2.2)$$

где  $b$  - коэффициент динамической вязкости, предполагающий пропорциональность между напряжением сдвига  $\sigma_{\tau}$  и скоростью деформации  $\frac{d\gamma}{dt}$ .

В действительности не существует идеально упругих твердых тел и идеально вязких жидкостей, поведение которых абсолютно точно описывается указанными законами. Все реальные материалы в той или иной мере обладают как упругими, так и вязкими свойствами. Для упрощения решения практических задач часто прибегают к некоторой идеализации, т.е. если существенно преобладают упругие свойства, то тело считают "чисто" упругим, если вязкие - то "чисто" вязким. Материалы, у которых упругие и вязкие свойства соизмеримы получило название вязкоупругих. Свойства вязкоупругости наиболее ярко выражены у полимеров в переходной зоне, где коэффициент механических потерь  $\eta$  имеет наибольшую величину (рисунок 3.5).

Для описания вязкоупругих материалов применяется ряд моделей, из которых простейшие модели Максвелла и Фохта показаны на рисунке 3.7. Связь между напряжением и деформацией для этих моделей представляется в виде



$$\frac{d\sigma}{dt} = E_1 \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma E}{b}; \quad (3.2.3)$$

- для модели Максвелла

$$\sigma = E_1 + b \frac{d\varepsilon}{dt}; \quad (3.2.4)$$

- для модели Фохта

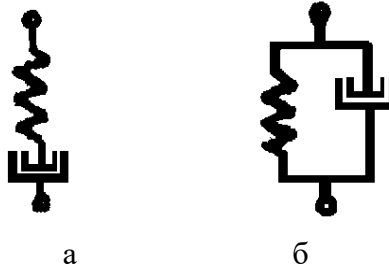


Рисунок 3.7 - Модели вязкоупругих тел  
а – модель Максвелла; б - модель Фохта

Если напряжение изменяется по гармоническому закону, то у вязкоупругих тел наблюдается сдвиг фаз между напряжением и деформацией (рисунок 3.8).

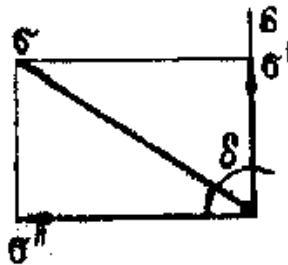


Рисунок 3.8 – Векторная диаграмма

На рисунке 3.8 видно, что напряжение можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$\sigma = \sigma^I + i\sigma^II. \quad (3.2.5)$$

Составляющая напряжения  $\sigma^{\perp}$  совпадает по направлению с деформацией и как известно из теории колебаний, связана с упругой энергией тела, вторая составляющая  $\sigma^{\parallel}$ , опережающая деформацию на  $90^\circ$ , связана с энергией, теряемой системой (энергией потерь). Пусть деформация описывается выражением

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 e^{j\omega \cdot t}, \quad (3.2.6)$$

тогда для модели Фоха (3.2.4) получим

$$\sigma = E_1 \mathcal{E} + ib\omega \mathcal{E}, \quad (3.2.7)$$

и соответственно

$$\sigma^{\perp} = E_1 \mathcal{E}; \quad \sigma^{\parallel} = b\omega \mathcal{E}. \quad (3.2.8)$$

Величины

$$E^{\perp} = E_1; \quad E^{\parallel} = b\omega, \quad (3.2.9)$$

получили название динамического модуля упругости  $E^{\perp}$  и модуля потерь  $E^{\parallel}$ . Из диаграммы и формул (3.2.7-3.2.9) получим

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{b\omega}{E^{\perp}} = \frac{E^{\parallel}}{E^{\perp}}. \quad (3.2.10)$$

Это выражение по форме совпадает с выражением для коэффициента потерь (формула 3.2.11) при  $\omega = \omega_0$ .

$$\eta = \frac{b\omega_0}{k}, \quad (3.2.11)$$

где  $\omega_0$  - собственная частота контура  
 $k$  - коэффициент жесткости.

Для модели Максвелла можно получить

$$E^{\perp} = \frac{E_1 \omega^2 b^2}{E_1^2 + b^2 \omega^2}; \quad E^{\parallel} = \frac{E_1^2 \omega b}{E_1^2 + b^2 \omega^2}; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{E_1}{b \omega};$$

В общем случае ни одна из указанных моделей не описывает достаточно точно поведение вязкоупругих материалов. Поэтому часто используют модель стандартного линейного тела, имевшего две разновидности, показанные на рисунке 3.9, но и они не описывают частотно-температурную зависимость свойств вязкоупругих тел. Наиболее точны модели, состоящие из набора, вязкоупругих пружин с различными константами вязкости и упругости. Использование кроме этого принципа суперпозиции Больцмана. Предполагающего, что действие каждой деформации не зависит от других, позволяет отразить и частотно-температурную зависимость вязкоупругих тел при различных видах нагружения. Анализ колебаний такого «больцмановского тела» приводит к сложной математической задаче, включающей решение интегро-дифференциального уравнения с частными производными.

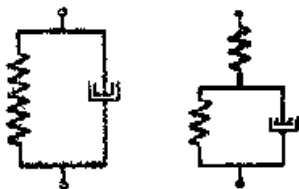


Рисунок 3.9 – Модели стандартного линейного тела

Использование модели Фохта в сочетании с частотно-температурными зависимостями параметров  $E^1$  и  $\eta$  эквивалентно описанию конкретного вязкоупругого материала при помощи более сложной модели. Именно такой подход нашел в настоящее время широкое распространение на практике.

### 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ ПЛАТ РЭА С АНТИРЕЗОНАНСНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

## 1.1 Свойства вибропоглощающих материалов и способы их модификации

В качестве ВП материалов необходимо использовать полимеры, физико-механическое состояние, которое соответствует области перехода от высокоэластического к стеклообразному состоянию. Динамический модуль упругости и коэффициент механических потерь полимера в переходной зоне могут изменяться на несколько порядков (см. рисунок 2.1). Кроме того, положение переходной и ее ширина на оси температур для полимеров различны и зависят от частоты колебаний.

С другой стороны, большинство типов РЭА, устанавливаемой на подвижных объектах, используются в диапазоне температур, который часто достаточно широкий, и воздействующая вибрация может иметь диапазон до нескольких килогерц. На рисунке 3.10 показаны температуры диапазона эксплуатации некоторой РЭА ( $t_{min}$ ,  $t_{max}$ ) и свойства трех материалов в переходной зоне при минимальной и максимальной частотах

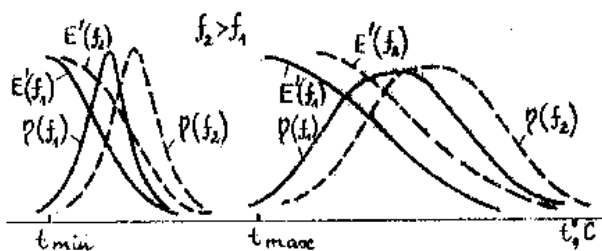


Рисунок 3.10 - Положение переходной зон для двух полимеров

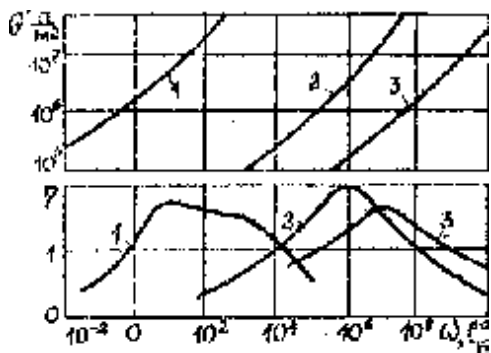
Видно, что максимум коэффициента механических потерь у первого материала совпадает с температурным диапазоном эксплуатации, но быстро уменьшается, и на краях температурного диапазона такой материал уже не будет вибропоглощающим. Второй материал имеет значительно

более широкую переходную зону, но она не совпадает с температурным диапазоном эксплуатации. Отсюда следует важный вывод: в качестве вибопоглощающих материалов могут использоваться полимеры, физико-механическое состояние которых в температурном диапазоне эксплуатации РЭА соответствует области перехода от высокоэластического к стеклообразному состоянию, и эта область имеет достаточную ширину. Следовательно, для правильного выбора ВП материала радиоконструктор должен располагать зависимостями динамического модуля упругости и коэффициента механических потерь  $\eta$  от температуры, и частоты. В настоящее время ведутся специальные работы по разработке ВП материалов.

Рассмотрим факторы, которые влияют на свойства полимеров и могут быть положены в основу создания таких материалов.

#### Химическое строение

В качестве примера влияния химического строения на положение и ширину переходной зоны на оси частот на рисунке 3.11 даны зависимости динамического модуля сдвига  $G'$  и коэффициента потерь  $\eta$  от частоты приведенные к  $100^\circ\text{C}$ , для трех полимеров и Н-алкимертакрилатов, эфирные группы которых соответственно содержат 2,4 и 12 атомов углерода. Как видно, с увеличением дайны боковых групп переходная область сдвигается в сторону высоких частот почти на шесть порядков по логарифмической шкале частот. Наблюдается также некоторое изменение ширины переходной зоны.



1-Этил; 2 – Гексил; 3 - Додecilетакрилат

Рисунок 3.11 – Влияние химического строения полимера на переходную зону

### Сополимеризация

В качестве примера на рисунке 3.12 показаны зависимости  $E'$  и  $\eta$  от температуры для сополимера винилхлорида и 2-этил-гексил-акрилата при различных их весовых соотношениях. Видно, что при сополимеризации наблюдаются две сложные переходные зоны приводящие к расширению температурного диапазона, в котором наблюдаются значительные величины коэффициента потерь  $\eta$ . Этот способ позволяет также смещать переходную зону в другой температурный диапазон.

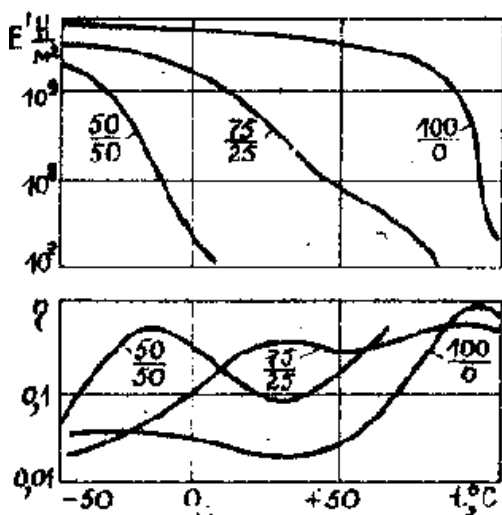


Рисунок 3.12 – Влияние сополимеризации на переходную зону

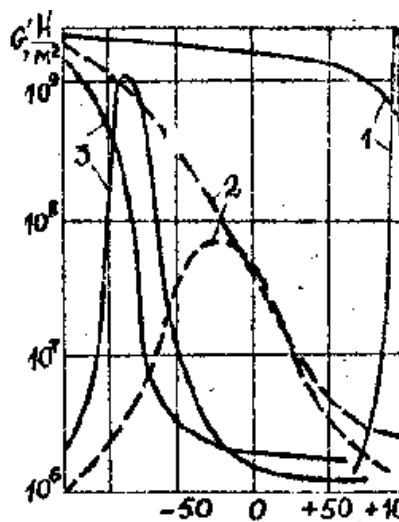
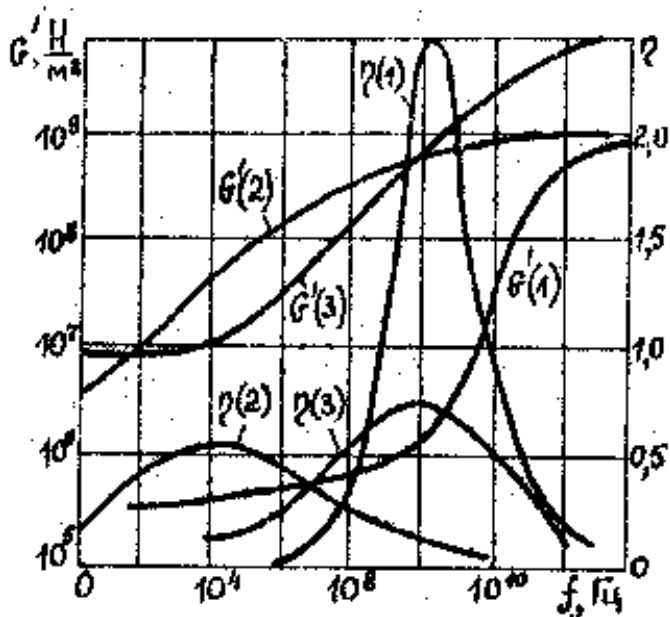


Рисунок 3.13 – Влияние пластификации на переходную зону. Концентрация полимера: 1 – 100%; 2-60,7%; 3-40,8%

### Пластификация

В отличие от сополимеризации пластификация не приводит к образованию химических связей между полимером и растворителем. Введение пластификатора снижает силы когезии между макромолекулами полимера, вследствие чего ослабляется межмолекулярное взаимодействие. Это эквивалентно уменьшению частоты или повышению температуры. В качестве примера влияния пластификации на рисунке 3.13 показаны зависимости  $G'$  и  $\eta$  от температуры, измеряемые при частоте 2 Гц, для поливинилхлорида, пластифицированного диэтилсукцинатом. Как видно, пластификацией можно добиться значительного смещения и расширения переходной зоны.

Наполнение и вулканизация влияние твердых наполнителей и вулканизации показано на рисунке 3.14. Видно, что эти факторы также существенно влияют на механические, динамические свойства полимеров. Исследования физико-механических свойств полимеров показали, что на положение и ширину переходной зоны влияют также степень полимеризации и молекулярный вес. Характеристики некоторых вибропоглощающих полимеров, которые могут быть использованы при конструировании РЭА, приведены в табл. 7—9 приложения.



1 – невулканизированная; 2 – вулканизированная; 3 – вулканизированная с наполнением

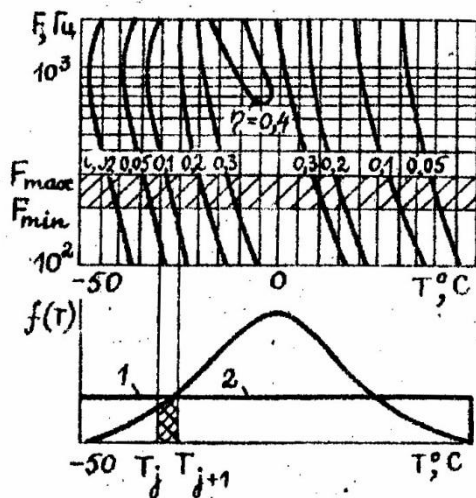
Рисунок 3.14 – Влияние наполнения и вулканизации на переходную зону



## 2.1 Оценка эффективности, вибропоглощающих конструкций

Из выше сказанного, очевидно, что коэффициент механических потерь конструкции будет значительно изменяться в температурном диапазоне эксплуатации изделия. В качестве примера на рисунке 3.6, показан контурный график зависимости коэффициента трехслойной конструкции от температуры и частоты. В качестве вибропоглощающего материала использован полиизобутилен, характеристики которого приведены в табл. 8. приложения.

Видно, что в интервале температур от  $-50$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  демфирующие свойства изменяются примерно в двадцать раз. Аналогичные зависимости характерны и для других ВП конструкций и мате материалов. Возникает вопрос, какое значение коэффициента потерь принимать в качестве показателя эффективности ВП элементов конструкций радиосистем. Ответ на него будет различным в зависимости от последствий отказа.



а – контурный график; б – плотность распределения;  
1 – равномерный закон; 2 – нормальный закон

Рисунок 3.15 – Контурный график зависимости коэффициента потерь от температуры и частоты, плотность распределения температур

Если отказ системы недопустим, эффективность ВП покрытий целесообразно оценивать по минимально возможной в условиях эксплуатации системы величине коэффициента потерь  $\eta_{min}$ . При этом необходимо, чтобы  $\eta_{min}$  был не меньше значения, при котором резонансные колебания конструкции приводят к отказам и неустойчивости сигналов системы. Невыполнение этого условия будет означать, что разрабатываемая конструкция заведомо не удовлетворяет требованиям технического задания.

Если в основу оценки системы положен общий экономический эффект от применения изделий данного типа, то ВП конструкцию целесообразно оценивать по среднему в условиях эксплуатации системы значению коэффициента потерь  $\eta_{cp}$ . Пусть, например, система работает в условиях, при которых  $\eta < \eta_{cp}$ . Это приведет к увеличению количества отказов по сравнению со средним значением, увеличению стоимости эксплуатации и снижению экономического эффекта, но эта же система или другие системы этого типа могут применяться и в более благоприятных условиях, когда  $\eta > \eta_{cp}$ , что обеспечит повышение экономического эффекта по сравнению со средней величиной. Пригодной следует считать такую конструкцию, у которой средний коэффициент потерь не меньше величины, при которой достигается положительный экономический эффект.

Остановимся на методике определения рекомендуемых показателей эффективности. Величина  $\eta_{min}$  может быть найдена непосредственно из контурного графика или же расчетом двух значений  $\eta$  при минимальной температуре и максимальной частоте, а также максимальной температуре и минимальной частоте и выбором наименьшего значения. При

определении  $\eta_{cp}$  необходимо знать собственные частоты колебаний конструкции, а также вероятностное распределение температур в заданном интервале (рисунок 3.15,б). Каждая из собственных частот колебаний будет изменяться в некотором интервале, что обусловлено температурной зависимостью модуля упругости ВП материала.

Будем считать, что наиболее опасны колебания на первой собственной частоте, которая лежит в интервале от  $f_{min}$ , до  $f_{max}$  (см. рисунок 3.15,а). Разобьем заштрихованную область на несколько подобластей и определим  $\eta_{cp}$ , используя формулу

$$\eta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i p(\eta_i)}{\sum_{i=1}^n P(\eta_i)},$$

где  $\eta_i$  — величина коэффициента потерь в  $i$ -м интервале,  $P(\eta_i)$  — коэффициент веса, равный вероятности того, что  $\eta = \eta_i$ , и определяемый по формуле

$$P(\eta_i) = \int_{T_j}^{T_{j+1}} f(T) dT$$

или как площадь фигуры под кривой распределения на рассматри рассматриваемом интервале. Здесь  $T_j$  и  $T_{j+1}$  - температуры в начале и в конце температурного интервала. Величину  $\eta_i$  можно приближенно определять из контурного графика или рассчитывать для средней частоты и средней температуры каждого интервала.

Как видно, изрис 3.15,а. Собственная частота значительно меньше влияет на величину коэффициента потерь, чем температура. Поэтому если отказы могут вызываться не только первым, но и последующими резонансами, в качестве,  $f_{min}$  целесообразно принимать минимально возможное значение первой собственной частоты

колебаний, а  $f_{max}$ — верхнюю границу диапазона собственных частот.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малинский В.Д. Контроль и испытание радиоаппаратуры. - М.: Энергия. 1970. - 336с.
2. Глудкин О.П., Черняев В.Н. Технология испытания микроэлементов радиоэлектронной аппаратуры и интегральных микросхем: Учеб. Пособие. - М.: Энергия, 1980.- 360с.
3. Испытание радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование /Под ред. А.И.Коробова: Учеб. Пособие. - М.: Радио и связь, 1987. - 272с.
4. Грудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1991. –336 с.
5. Резиновский А.Л. Испытание на надежность радиоэлектронных комплексов. – М.: Радиосвязь, 1985. – 165 с.
6. Ефремов Г.С. БД Забегалов. Испытание РЭА на надежность. Планирование и оценка показателей. - Горький, 1974,- 44с.
7. Бродский М.А. Аудио-и видеоманитофоны.-Мн., 1995,-476с.
8. Игнатович В.Г., Митюхин А.И. Регулировка и ремонт бы товой радиоэлектронной аппаратуры. -Мн., 1993,-367с.
9. Надежность технических систем: Справочник/ Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
10. Надежность автоматизированных систем управления: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Я.А. Хетагурова. – М.: Высшая школа, 1979. – 287 с.
11. Кейзман В. Б. Оценка и обеспечение надежности радиоэлектронной аппаратуры: Учеб.пособие. – Воронеж: ВПИ, 1987 – 82 с.
12. Основы расчетов по статической радиотехнике. А.М. Заездный. – М.: Связь, 1969. – 447 с.

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА РЭС

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Техническая диагностика РЭС»  
для студентов направления подготовки 11.03.03  
«Конструирование и технология электронных средств»  
(профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных  
средств») всех форм обучения

Составители:

Костюков Александр Сергеевич  
Башкиров Алексей Викторович

Компьютерный набор А.С. Костюков

Подписано к изданию  
Уч.-изд. л.

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14