

Министерство образования Российской Федерации  
Владимирский государственный университет  
Кафедра конструирования и технологии радиоэлектронных средств

## Механические воздействия и защита электронных средств

Методические указания к лабораторным работам

Часть 1

Составители:  
Е.Н. Талицкий  
Д.Г. Акаемов  
А.А. Варакин

Владимир 2002

УДК 62.758.2 (075)

Рецензент  
Доктор технических наук, профессор  
Московского государственного авиационного института  
(технического университета)  
*А.В.Назаров*

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Владимирского государственного университета

Механические воздействия и защита электронных средств: Метод. указания к лаб. работам / Владим. гос. ун-т; Сост.: Е.Н. Талицкий, Д.Г. Акаемов, А.А. Варакин. Владимир, 2002. 44 с.

Указания (часть I) включают описания шести лабораторных работ, направленных на изучение студентами методов анализа колебаний конструкций электронных средств и методов их защиты при механических воздействиях. Работы 1-4 написаны Е.Н. Талицким, работа 5 - А.А. Варакиным, работа 6 – Д.Г. Акаемовым.

Предназначены для студентов специальностей 200800 - проектирование и технология радиоэлектронных средств и 220500 - проектирование и технология электронно-вычислительных средств.

Табл. 1. Ил. 16. Библиогр.: 2 назв.

УДК 62.758.2 (075)

## Лабораторная работа №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ БЛОКА РЭА

**Цель работы** – изучение аналитических, экспериментальных и машинных методов определения динамических характеристик систем виброизоляции (СВИ) РЭА.

#### Содержание работы

1. Экспериментальное определение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), коэффициента передачи при резонансе и резонансной частоты блока РЭА на виброизоляторах, коэффициентов жесткости и механических потерь виброизоляторов.
2. Расчет собственных частот колебаний блока РЭА на виброизоляторах при двух плоскостях симметрии, а также АЧХ при вертикальных колебаниях блока в условиях резонанса.
3. Расчет собственных частот колебаний СВИ на ЭВМ при отсутствии плоскостей симметрии.

#### Методические указания

Виброизоляторы применяются для виброизоляции блоков РЭА от источников вибровозбуждения. Принципы виброизоляции наглядно можно иллюстрировать на примере АЧХ системы с одной степенью свободы, показанной на рис.1.1,а.

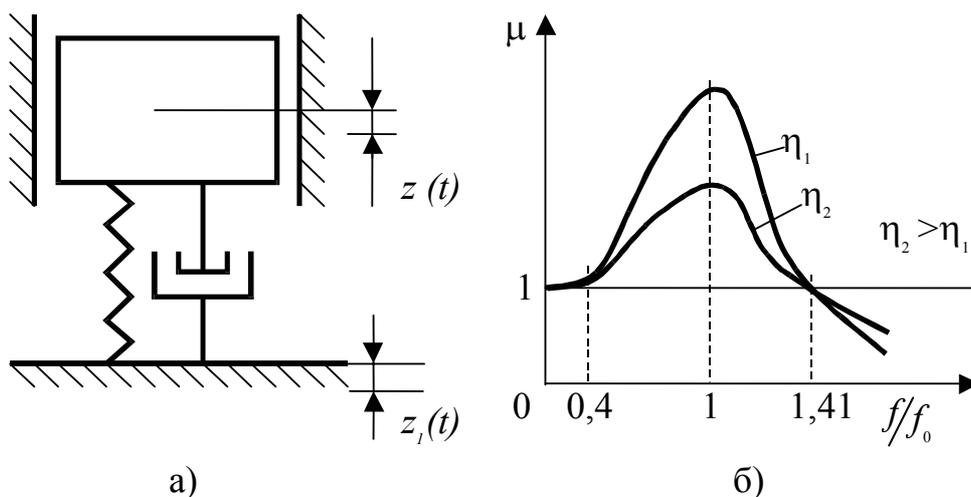


Рис.1.1. Физическая модель системы с одной степенью свободы (а) и ее амплитудно-частотная характеристика (б)

Коэффициент передачи

$$\mu = \frac{Z_0}{Z_{01}} = \sqrt{\frac{1 + \eta^2 f^2}{f_0^2}} / \sqrt{\frac{(1 - f^2/f_0^2)^2 + \eta^2 f^2}{f_0^2}} \quad (1)$$

есть отношение амплитуды виброперемещения системы  $Z_0$  к амплитуде колебаний основания  $Z_{01}$ . В формуле (1)  $\eta$  - коэффициент механических потерь (КМП) системы виброизоляции;  $f_0$  - собственная частота колебаний СА;  $f$  - частота возбуждающих колебаний.

Очевидно, что эффект виброизоляции проявляется, когда  $\mu < 1$ . Из рис.1,б видно, что это условие выполняется только при соотношении частот  $f/f_0 > 1,41$ . Обычно для обеспечения эффективной виброизоляции необходимо, чтобы

$$f/f_0 = 2,5 - 5, \quad (2)$$

т.е. частота собственных колебаний должна быть в 2-4 раза меньше частоты возбуждающих колебаний [1]. Если задается частотный диапазон возбуждающих колебаний, то условие (2) должно выполняться для наименьшей частоты диапазона.

В общем случае блок РЭА, установленный на виброизоляторах, например, как показано на рис.1.2, имеет 6 степеней свободы; три из них обусловлены поступательными движениями блока в направлении осей X, Y, Z и три вращательными вокруг тех же осей. Условие (2) должно выполняться для каждой из шести частот. Поэтому экспериментальное или аналитическое определение собственных частот колебаний блока РЭА на виброизоляторах составляет неотъемлемую часть работы конструктора РЭС.

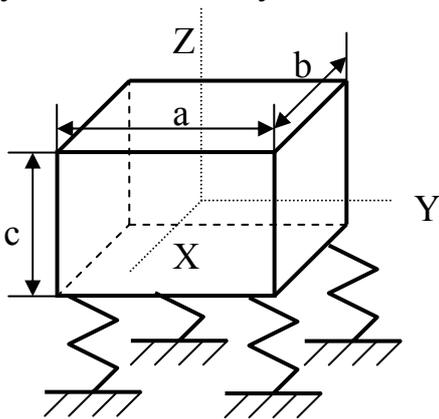


Рис.1.2. Схема блока РЭА на виброизоляторах

Собственные частоты колебаний можно определить, решая систему из шести однородных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих свободные колебания блока РЭА:

$$\begin{aligned}
\beta_{11}\delta_1 + \alpha_{11}\delta_1 + \alpha_{15}\varphi_2 + \alpha_{16}\varphi_3 &= 0 ; \\
\beta_{11}\delta_2 + \alpha_{22}\delta_2 + \alpha_{24}\varphi_1 + \alpha_{26}\varphi_3 &= 0 ; \\
\beta_{11}\delta_3 + \alpha_{33}\delta_3 + \alpha_{34}\varphi_1 + \alpha_{35}\varphi_2 &= 0 ; \\
\beta_{44}\varphi_1 + \beta_{45}\varphi_2 + \beta_{46}\varphi_3 + \alpha_{24}\delta_2 + \alpha_{34}\delta_3 + \alpha_{44}\varphi_1 + \alpha_{45}\varphi_2 + \alpha_{46}\varphi_3 &= 0 ; \\
\beta_{45}\varphi_1 + \beta_{55}\varphi_2 + \beta_{56}\varphi_3 + \alpha_{15}\delta_1 + \alpha_{35}\delta_3 + \alpha_{45}\varphi_1 + \alpha_{55}\varphi_2 + \alpha_{56}\varphi_3 &= 0 ; \\
\beta_{46}\varphi_1 + \beta_{56}\varphi_2 + \beta_{66}\varphi_3 + \alpha_{16}\delta_1 + \alpha_{26}\delta_2 + \alpha_{46}\varphi_1 + \alpha_{56}\varphi_2 + \alpha_{66}\varphi_3 &= 0 ,
\end{aligned} \tag{3}$$

где  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  - смещения центра тяжести блока в направлении осей  $X, Y, Z$  неподвижной прямоугольной системы координат с началом в центре тяжести блока;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  - углы поворота блока относительно тех же осей. Предполагается, что СВИ не обладает демпфированием, смещения блока малые, упругие элементы не обладают массой. Коэффициенты, входящие в систему (3), определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
\alpha_{11} &= \sum_{i=1}^n K_{xi} ; \quad \alpha_{16} = -\sum K_x y ; \quad \alpha_{15} = \sum K_x Z ; \quad \alpha_{45} = -\sum K_z xy ; \\
\alpha_{22} &= \sum K_y ; \quad \alpha_{24} = -\sum K_y Z ; \quad \alpha_{34} = \sum K_z Y ; \quad \alpha_{46} = -\sum K_y xz ; \\
\alpha_{33} &= \sum K_z ; \quad \alpha_{26} = \sum K_y X ; \quad \alpha_{35} = -\sum K_z x ; \quad \alpha_{56} = -\sum K_x yz ; \\
\alpha_{44} &= \sum (K_z y^2 + K_y Z^2) ; \quad \alpha_{55} = \sum (K_x Z^2 + K_z x^2) ; \\
\alpha_{66} &= \sum (K_x y^2 + K_y x^2) ; \\
\beta_{44} &= I_x ; \quad \beta_{55} = I_y ; \quad \beta_{66} = I_z ; \quad \beta_{11} = m ; \quad \beta_{56} = -I_{yz} ; \quad \beta_{46} = -I_{xz} ; \\
\beta_{45} &= -I_{xy} ,
\end{aligned}$$

где  $K_x, K_y, K_z$  - коэффициенты жесткости виброизоляторов в направлении соответствующих осей;  $I_x, I_y, I_z$  - осевые, а  $I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}$  - центробежные моменты инерции;  $x, y, z$  - координаты виброизоляторов;  $n$  - число виброизоляторов.

Осевые моменты инерции  $I_x, I_y, I_z$  для блока в виде параллелепипеда рассчитываются по формулам:

$$I_x = \frac{m}{12}(b^2 + c^2); \quad I_y = \frac{m}{12}(a^2 + c^2); \quad I_z = \frac{m}{12}(a^2 + b^2),$$

где  $m$  – масса блока. Если оси координат – главные центральные оси инерции, то  $I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0$ .

Если частные решения системы уравнений (3), описывающие установившиеся вынужденные колебания блока, представим в виде:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= A_1 e^{i\omega t}; \quad \delta_3 = A_3 e^{i\omega t}; \quad \delta_5 = A_5 e^{i\omega t}; \\ \delta_2 &= A_2 e^{i\omega t}; \quad \delta_4 = A_4 e^{i\omega t}; \quad \delta_6 = A_6 e^{i\omega t}; \end{aligned} \quad (4)$$

то после подстановки их в систему получим систему однородных алгебраических уравнений. Она будет иметь решения, отличные от нуля, если определитель

$$\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_{.11} - \beta_{11}\omega^2 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{.15} & \alpha_{.16} \\ 0 & \alpha_{.22} - \beta_{11}\omega^2 & 0 & \alpha_{.24} & 0 & \alpha_{.26} \\ 0 & 0 & \alpha_{.33} - \beta_{11}\omega^2 & \alpha_{.34} & \alpha_{.35} & 0 \\ 0 & \alpha_{.24} & \alpha_{.34} & \alpha_{.44} - \beta_{44}\omega^2 & \alpha_{.45} - \beta_{45}\omega^2 & \alpha_{.46} - \beta_{46}\omega^2 \\ \alpha_{.15} & 0 & \alpha_{.35} & \alpha_{.45} - \beta_{54}\omega^2 & \alpha_{.55} - \beta_{55}\omega^2 & \alpha_{.56} - \beta_{56}\omega^2 \\ \alpha_{.16} & \alpha_{.26} & 0 & \alpha_{.46} - \beta_{46}\omega^2 & \alpha_{.56} - \beta_{56}\omega^2 & \alpha_{.66} - \beta_{66}\omega^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (5)$$

Развернув этот определитель, можно получить уравнение шестой степени относительно  $\omega^2$ :

$$A\omega^{12} + B\omega^{10} + C\omega^8 + D\omega^6 + E\omega^4 + F\omega^2 + G = 0,$$

где коэффициенты  $A, B, C, D, E, F, G$  – сложные функции геометрических и физических параметров блока и виброизоляторов. Решение таких уравнений без применения ЭВМ очень трудоёмко, поэтому рассмотрим один из алгоритмов машинного расчёта собственных колебаний.

Известно [2], что определитель типа

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} \quad (6)$$

может быть вычислен по формуле

$$\Delta = a_{11} a_{22}^{(1)} \dots a_{nn}^{(n-1)}, \quad (7)$$

где

$$a_{ii}^{(i-1)} = a_{ii} - \frac{a_{i-1,i} a_{i,i-1}}{a_{i-1,i-1}}. \quad (8)$$

Например,  $a_{22}^{(1)} = a_{22} - \frac{a_{12}a_{21}}{a_{11}}$ . Из сравнения определителей (5) и (6)

очевидно, что  $a_{11} = \alpha_{11} - \beta_{11}\omega^2$ ,  $a_{12} = 0$ ,  $a_{1n} = a_{16} = \alpha_{16}$  и т.д.

Значения собственных частот колебаний, при которых определитель (5) становится равным нулю, находятся следующим образом:

1. Задаётся начальное значение частоты  $f_1$  заведомо меньше собственной частоты колебаний блока РЭА на виброизоляторах, и по формулам (7) и (8) определяется  $\Delta = \Delta_1$ .

2. Начальное значение частоты увеличивается на некоторую величину  $\Delta f_1 = f_1 h$ , и находится новое значение определителя  $\Delta = \Delta_2$ .

3. Проверяется условие  $\Delta_1 \Delta_2 < 0$ . Если оно не выполняется, то частота снова увеличивается на  $\Delta f_2$  и находится  $\Delta = \Delta_3$ . Если условие  $\Delta_2 \Delta_3 < 0$  будет выполняться, то это означает, что собственная частота колебаний находится между  $f_2$  и  $f_2 + \Delta f_2$ . Так как  $\Delta f$  мало, то можно принять, что  $f_{01} = f_2$ .

4. Частота  $f_3$  увеличивается на  $\Delta f_3$  и повторяются пп. 1 – 3. Расчёт ведётся до тех пор, пока не будут определены все шесть частот колебаний.

Для расчёта необходимо подготовить следующие исходные данные: количество виброизоляторов, массу блока, осевые моменты инерции, точность вычислений, центробежные моменты, жёсткости виброизоляторов, координаты виброизоляторов. Размерность всех параметров должна быть представлена в единицах СИ.

В отдельных случаях, когда блок РЭА на виброизоляторах имеет одну, две или три плоскости симметрии, ряд коэффициентов, входящих в исходную систему уравнений, становится равным нулю, и система уравнений существенно упрощается. Так, нетрудно убедиться, что если плоскости  $ZOX$  и  $ZOY$  – плоскости симметрии, то получим:

$$\alpha_{14} = \alpha_{34} = \alpha_{35} = \alpha_{46} = \alpha_{26} = \alpha_{45} = \alpha_{56} = \beta_{45} = \beta_{46} = \beta_{56} = 0,$$

и система уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned} \beta_{11}\delta_3 + \alpha_{33}\delta_3 &= 0; & (a) \\ \beta_{66}\varphi_3 + \alpha_{66}\varphi_3 &= 0; & (b) \\ \beta_{11}\delta_1 + \alpha_{11}\delta_1 + \alpha_{15}\varphi_2 &= 0; & (c) \\ \beta_{55}\varphi_2 + \alpha_{15}\delta_1 + \alpha_{55}\varphi_2 &= 0; & (d) \\ \beta_{11}\delta_2 + \alpha_{22}\delta_2 + \alpha_{24}\varphi_1 &= 0; & (e) \\ \beta_{44}\varphi_1 + \alpha_{24}\delta_2 + \alpha_{44}\varphi_1 &= 0; & (f) \end{aligned} \quad (9)$$

Учитывая решение (4), из уравнения (9,а), предварительно преобразовав его к алгебраическому виду, получим  $\omega_1 = \sqrt{\alpha_{33}/\beta_{11}}$ .

Из уравнения (9,b) найдем вторую собственную частоту колебаний  $\omega_2 = \sqrt{\alpha_{66}/\beta_{66}}$ . Уравнения (9,c) и (9,d) приводятся к алгебраическому уравнению  $\beta_{11}\beta_{55} \omega^4 - (\beta_{11}\alpha_{55} + \beta_{55}\alpha_{11})\omega^2 + \alpha_{11}\alpha_{55} - \alpha_{15}^2 = 0$ , решая которое, найдём частоты  $\omega_3$  и  $\omega_4$ , а уравнения (9,e) и (9,f) – алгебраическому уравнению  $\beta_{11}\beta_{44} \omega^4 - (\beta_{11}\alpha_{44} + \beta_{44}\alpha_{22})\omega^2 + \alpha_{22}\alpha_{44} - \alpha_{24}^2 = 0$ , из решения которого находятся последние из шести собственных частот колебаний –  $\omega_5$  и  $\omega_6$ .

### Методика экспериментального исследования

Лабораторная установка включает электродинамический вибростенд ВЭДС-200, милливольтметр типа ВЗ-38, частотомер ЧЗ-54, два пьезодатчика типа ИС, макет блока РЭА на виброизоляторах. Схема испытаний приведена на рис.1.3. Технические характеристики вибростенда, измерительных приборов, пьезодатчиков и правила работы с ними даны в приложениях 1 и 3.

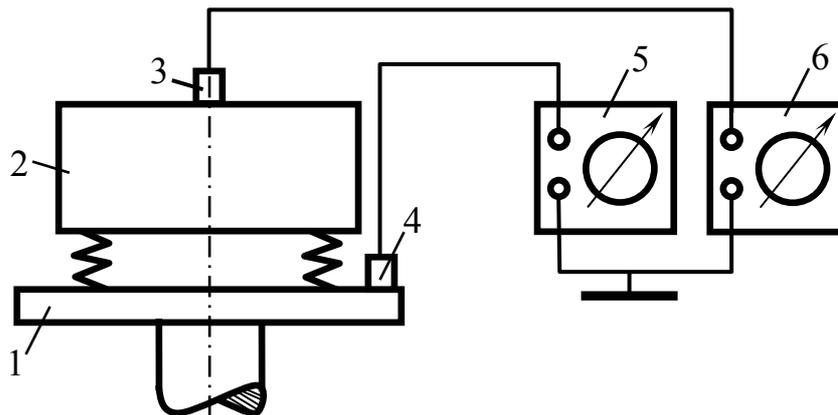


Рис.1.3. Схема испытаний:

1 – вибростол; 2 – блок РЭА; 3,4 – вибродатчики; 5 – измеритель виброускорений вибростенда; 6 – милливольтметр

Определить чувствительность датчика  $v$  в соответствии с методикой, изложенной в прил. 2.

Изменяя частоту вибростенда в диапазоне 20-200 Гц примерно через 10 Гц, измерять напряжения при помощи милливольтметра 6 и по формуле

$$Z = U/v, g$$

рассчитать виброускорение. При измерениях зафиксировать частоту резонанса  $f_0$  и соответствующие ей напряжение на датчике 3, а также частоты, соответствующие уровню 0,707 максимального напряжения на этом датчике.

Рассчитать КПМ системы виброизолятора по формуле

$$\eta = \Delta f_{0,707} / f_0, \quad (10)$$

где  $\Delta f_{0,707}$  – ширина резонансной кривой на уровне 0,707 от максимальной амплитуды.

Жесткость виброизолятора в продольном направлении найдём по формуле

$$K_Z = 4\pi^2 m f_0^2 / n, \quad (11)$$

где  $n$  – число виброизоляторов.

### Задание на подготовку к работе

1. Ознакомиться с методическими указаниями и рекомендуемой литературой.
2. Изучить методику эксперимента и ознакомиться с техническими характеристиками вибростенда, датчиков, милливольтметра и правилами работы с ними.

### Лабораторное задание

1. Провести эксперимент, построить график амплитудно-частотной характеристики блока и зафиксировать частоты, при которых  $Z_0 = Z_{\max}$  и  $0,707 \dot{Z}_{\max}$ . По формулам (10) и (11) определить КПМ и жёсткость виброизоляторов, а по формуле (1) коэффициент передачи при резонансе.
2. Рассчитать шесть собственных частот колебаний блока РЭА на виброизоляторах для случая, когда плоскости  $ZOX$  и  $ZOY$  – плоскости симметрии. Исходные данные для расчета задаются преподавателем.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема испытаний и её краткое описание.
3. Результаты испытаний, оформление в виде таблиц и графиков, расчет коэффициентов  $\eta$ ,  $K_Z$  и  $\mu$  по экспериментальным данным.
4. Исходные данные и расчет собственных частот-колебаний СА с двумя плоскостями симметрии.
5. Исходные данные и результаты расчета на ЭВМ собственных частот колебаний СА, не имеющих плоскостей симметрии.
6. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов.
7. Выводы.

## **Контрольные вопросы**

1. Как определяется амплитудно-частотная характеристика платы, чувствительность датчика?
2. Рассказать об общем принципе определения собственных частот колебаний РЭА.
3. Почему упрощается расчет собственных частот колебаний, если СВЧ имеет плоскости симметрии?

## **Лабораторная работа №2**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАТ РЭА**

**Цель работы.** Изучение аналитических и экспериментальных методов определения динамических характеристик – амплитуд виброускорений при резонансе и резонансных частот электромонтажных плат РЭА.

#### **Содержание работы**

1. Расчет собственных частот колебаний и виброускорений в нескольких точках платы при резонансе.
2. Экспериментальное определение резонансных частот и амплитуд виброускорений платы при резонансе.
3. Расчет поля виброускорений платы на ЭВМ.
4. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов.

#### **Методические указания**

Надежность РЭА, устанавливаемой на подвижных объектах, ракетах и т.д., существенно уменьшается при действии вибрации. Особо опасны резонансные колебания электромонтажных плат РЭА, так как амплитуды вибро смещений и виброускорений в различных точках платы могут возрасти в десятки раз и значительно превзойти допустимые величины. По-

этому для прогнозирования надежности и принятия основных мер виброзащиты необходимо знать динамические характеристики элементов конструкций – коэффициенты передачи при резонансе и собственные частоты колебаний.

С этой целью применяются аналитические и экспериментальные методы определения указанных характеристик. Ввиду большого объема вычислений, если, например, требуется рассчитать амплитуды колебаний во многих точках платы (ее вибрационное поле), применяют ЭВМ.

**Аналитический метод.** При резонансе виброускорение в точке платы с координатами  $x, y$  определяют по формуле

$$\dot{w}_n(x, y) = Z \sqrt{\mu_n^2(x, y) - 1}, \quad (1)$$

где  $Z$  – амплитуда виброускорения в точках крепления платы;  $\mu_n(x, y)$  – коэффициент передачи виброускорения рассчитывается по формуле:

$$\mu_n(x, y) = \sqrt{\frac{K_n^2(x, y)}{\eta_n^2} + 1}, \quad (2)$$

В формуле (2) индекс  $n$  означает номер собственной частоты колебаний,  $\eta_n$  – коэффициент механических потерь (КМП) платы приближенно определяется по формуле

$$\eta_n = 1 / \sqrt{f_n}.$$

Здесь  $f_n$  – циклическая ( $n$ -я) собственная частота колебаний. В формуле (4)  $K(x, y)$  – коэффициент, зависящий от формы колебаний и определяемый выражением

$$K_n(x, y) = \frac{\iint_{(S)} w_n(x, y) ds}{\iint_{(S)} w_n^2(x, y) ds} w_n(x, y), \quad (3)$$

где  $w_n(x, y)$  – базисная функция, соответствующая условиям закрепления платы. Ее можно представить в виде

$$w_n(x, y) = w_i(x) \cdot w_j(y) \quad (3a)$$

где  $w_i(x)$ ,  $w_j(y)$  – базисные (балочные) функции, соответствующие условиям

закрепления платы в направлении осей  $x, y$  и определяемые выражениями:

$$v_i(x) = \sin \lambda_i \xi_x + A_i \cos \lambda_i \xi_x + B_i \operatorname{sh} \lambda_i \xi_x + C_i \operatorname{ch} \lambda_i \xi_x, \quad (4)$$

$$v_j(y) = \sin \lambda_j \xi_y + A_j \cos \lambda_j \xi_y + B_j \operatorname{sh} \lambda_j \xi_y + C_j \operatorname{ch} \lambda_j \xi_y, \quad (5)$$

Здесь  $a, b$  – размеры платы в направлении осей  $x, y$ ;  $\lambda, A, B, C$  – коэффициенты, определяемые с помощью таблицы [1, т. I],  $\xi_x = \frac{x}{a}$ ;  $\xi_y = \frac{y}{b}$  относительные координаты.

С учетом выражения (3а) формулу (3) можно привести к виду

$$K_n(x, y) = K_i(x) \cdot K_j(y); \quad (6)$$

$$K_i(x) = B_i(x)w_i(x) = \int_0^a w_i(x)dx / \int_0^a w_i^2 dx \cdot w_i(x); \quad (7)$$

$$K_j(y) = B_j(y)w_j(y) = \int_0^b w_j(y)dy / \int_0^b w_j^2 dy \cdot w_j(y). \quad (8)$$

Интегралы в выражениях (7,8) находятся с помощью таблицы [1, т. 2].

Собственные частоты колебаний плат рассчитываются по формуле Релея-Ритца

$$f_n = \frac{\alpha_n}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{m}}, \quad (9)$$

где цилиндрическая жесткость

$$D = \frac{EH^3}{12(1-\nu^2)},$$

масса единицы площади платы

$$m = \rho H + m_э.$$

$E, \nu, \rho$  – модуль упругости при растяжении – сжатии, коэффициент Пуассона и плотность материала платы;  $H, a$  – толщина и длина платы,  $m_э$  – масса электрорадиоэлементов, приведенная к единице площади.

Частотный коэффициент  $\alpha$ , зависящий от способа крепления формы платы и номера гармоники, определяется с помощью таблиц [1, т. ПЗ].

## Экспериментальный метод

Лабораторная установка включает электродинамический вибростенд ВЭДС – 10А, милливольтметр типа ВЗ-38, пьезодатчики типа ИС. Схема измерений приведена на рис.2.1. Технические характеристики приборов и вибростенда и правила работы с ними даны в прил. 3. Виброускорения измеряются пьезодатчиками типа ИС, характеристики которых приведены в прил. 1.

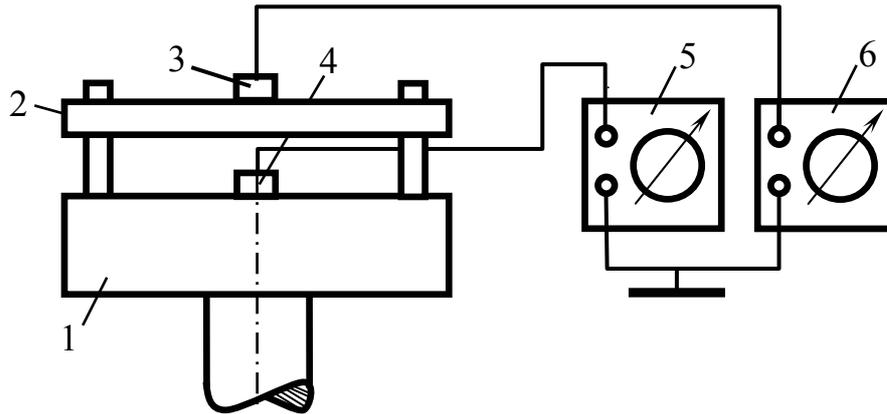


Рис.2.1. Схема испытаний:

1 – платформа вибростенда; 2 – плата; 3,4 – вибродатчики;  
5 – измеритель ускорений вибростенда; 6 - милливольтметр

Так как милливольтметр 6 измеряет напряжение  $u$ , для определения виброускорения используют формулу

$$\ddot{w}(x,y) = u/v, \quad (10)$$

где  $v$  – чувствительность датчика, измеряемая в  $\frac{мВ}{g}$ . Чувствительность датчика 3 определяют по методике, изложенной в прил. 2.

Измеряя частоту вибростенда в диапазоне 50-400 Гц, примерно через 10 Гц измеряют напряжения при помощи вольтметра 6 и по формуле (10) рассчитывают виброускорения  $\ddot{w}(x,y)$ . Ускоре-

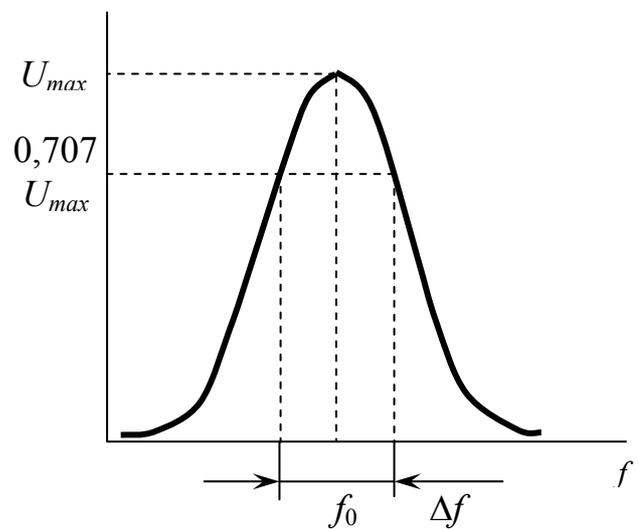


Рис.2.2. Амплитудно-частотная характеристика

ние на платформе вибростенда, измеряемое датчиком 4, поддерживается постоянным. Строится амплитудно-частотная характеристика (рис.2.2) и определяются резонансная частота  $f_0$ , коэффициент передачи при резонансе, коэффициент механических потерь  $\eta$  и параметр  $K(x, y)$  по формулам

$$\eta = \Delta f_{0,707} / f_0, \quad (11)$$

где  $\Delta f_{0,707}$  - ширина резонансной кривой на уровне 0,707 от максимальной амплитуды

$$K(x, y) = \mu(x, y) \cdot \eta. \quad (12)$$

**Расчёт на ЭВМ.** В табл. 2.1 в качестве примера приведены результаты расчета  $\mu(x, y)$  платы на ЭВМ.

Т а б л и ц а 2.1

Результаты расчета вибрационного поля

$\xi_x$	$\xi_y$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,1	3,3	6,0	8,2	9,7	10,2	9,7	8,3	6,1	3,3	1,0
0,2	6,0	11,4	15,6	18,3	19,3	18,3	15,6	11,4	6,1	1,0
0,3	8,2	15,6	21,5	25,2	26,5	25,2	21,5	15,6	8,3	1,0
0,4	9,7	18,3	25,3	29,6	31,2	29,6	25,2	18,4	9,7	1,0
0,5	10,2	19,3	26,5	31,2	32,8	31,2	26,6	19,3	10,2	1,0
0,6	9,7	18,3	25,3	29,7	31,2	29,7	25,3	18,4	9,7	1,0
0,7	8,3	15,6	21,5	25,2	26,6	25,2	21,5	15,7	8,3	1,0
0,8	6,0	11,4	15,6	18,4	19,3	18,4	15,7	11,4	6,1	1,0
0,9	3,3	6,1	8,3	9,7	10,2	9,7	8,3	6,1	3,3	1,0
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

### Задание на подготовку к работе

1. Ознакомиться с методическими указаниями и рекомендуемой литературой.

2. Изучить методику эксперимента и ознакомиться с техническими характеристиками вибростенда, датчиков, милливольтметра и правилами работы с ними.

### Лабораторное задание

1. Рассчитать коэффициент передачи в одной-двух точках платы и резонансную частоту по исходным данным, указанным преподавателем.

2. Провести эксперимент, построить график амплитудно-частотной характеристики платы, рассчитать на основе экспериментальных данных КМП и коэффициент  $K(x, y)$  соответственно по формулам (11 - 12).

3. Ознакомиться с методикой расчета динамических характеристик плат на персональном компьютере и провести расчет.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные для расчета и расчеты коэффициента передачи в одной-двух точках платы и первой собственной частоты колебаний.
3. Блок-схема измерений и ее краткое описание.
4. Результаты испытаний, оформленные в виде таблиц и графиков, расчет коэффициентов  $\mu(x, y)$  и  $K(x, y)$  по экспериментальным данным.
5. Исходные данные и результаты расчета вибрационного поля платы на ЭВМ.
6. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов.
7. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Для чего необходимо знать амплитуды колебаний плат и их собственные частоты колебаний?
2. Как рассчитываются собственные частоты колебаний и коэффициенты передачи плат РЭА?
3. Методы определения чувствительности вибродатчиков.
4. Как определяется амплитудно-частотная характеристика платы?

## Лабораторная работа №3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ ПЛАТ РЭА С ДЕМПФИРУЮЩИМ СЛОЕМ

**Цель работы** – изучение методик экспериментального определения и расчета динамических характеристик плат РЭА с демпфирующим слоем.

## Содержание работы

1. Расчет динамических характеристик платы с демпфирующим покрытием для одной точки температурного диапазона.
2. Экспериментальное определение КМП плат до нанесения демпфирующего покрытия.
3. Расчет на ЭЦВМ динамических характеристик плат в широких диапазонах температур и частот.

## Методические указания

Одна из главных причин отказов РЭА, устанавливаемой на подвижных объектах, – вибрации. Дестабилизирующее действие вибраций резко усиливается при возникновении резонансных колебаний электромонтажных плат РЭА и других элементов конструкций. Для устранения резонансных колебаний спектр собственных частот колебаний конструкции необходимо вывести за верхнюю границу диапазона частот возмущающих колебаний. Это достигается повышением жесткости конструкции. Если верхняя граница диапазона частот 500 Гц или более, этот метод часто приводит к недопустимо большому увеличению массы и габаритных размеров изделия. В этом случае используют способ, основанный на применении демпфирующих слоев из специальных вибропоглощающих материалов. Демпфирующий слой может быть внешним или внутренним, т.е. наносится на конструкцию снаружи или помещается между слоями из конструк-

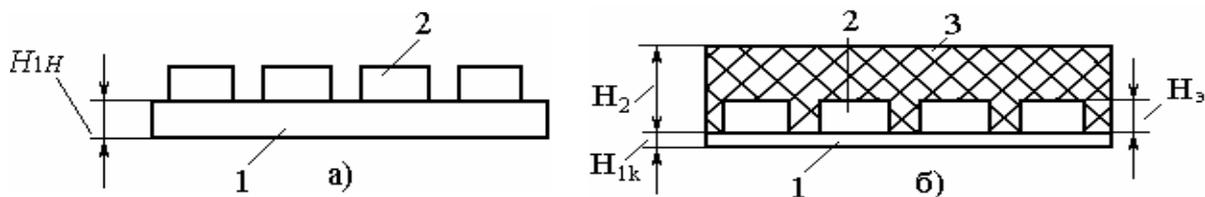


Рис. 3.1. Ячейка РЭА без демпфирующего (а) и с демпфирующим покрытием (б):  
1 – электромонтажная плата; 2 – ЭРЭ; 3 – демпфирующее покрытие

ционных материалов. В этой работе рассматриваются только конструкции с внешним покрытием (рис.3.1). Иногда демпфирующие слои называют антрирезонансными покрытиями (АРП).

Эффективность уменьшения амплитуд резонансных колебаний можно оценить показателями

$$\xi_w = \frac{w_H(x, y)}{w_K(x, y)}; \xi_{\ddot{w}} = \frac{\ddot{w}_H(x, y)}{\ddot{w}_K(x, y)},$$

где  $w_H(x, y)$ ,  $w_K(x, y)$  – амплитуда вибросмещения в точке платы с координатами  $x, y$  соответственно до и после нанесения антрирезонансного покрытия,  $\ddot{w}_H(x, y)$ ,  $\ddot{w}_K(x, y)$  – амплитуда виброускорения.

Эти показатели можно представить в виде [1]

$$\xi_{\ddot{w}}(x, y) = \xi_{\eta}; \quad \xi_w(x, y) = \xi_{\eta} \xi_{Dm},$$

Показатель  $\xi_{\eta}$  учитывает изменение демпфирующих свойств конструкции и рассчитывается по формуле

$$\xi_{\eta} = 1/(1 + \chi A)$$

Показатель  $\chi$  является функцией демпфирующих свойств и определяется по формуле

$$\chi = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_H},$$

где  $\eta_1, \eta_2$  - коэффициенты механических потерь (КМП) конструкционно-го и антрирезонансного слоев;  $\eta_H$  - КМП конструкции до нанесения АРП.

Коэффициент  $A$ , показывающий, какая часть демпфирующих свойств АРП реализуется в конструкции, находится по формуле:

$$A = \frac{e_2 h_2 [3(1 + h_2)^2 + h_2^2 (1 + e_2 h_2)^2]}{(1 + e_2 h_2) [3(1 + h_2)^2 e_2 h_2 + (1 + e_2 h_2)(1 + e_2 h_2^3)]},$$

где относительный модуль упругости АРП  $e_2 = E_2/E_1$ , относительная толщина АРП  $h_2 = H_2/H_{1k}$ .

Если задано ограничение на увеличение массы конструкции при нанесении АРП, а первоначальная толщина платы  $H_{1H}$  конструктором изменяется до величины  $H_{1k}$ , то толщина демпфирующего слоя без учета ЭРЭ

рассчитывается по формуле  $H_{2p} = \frac{\rho_1}{\rho_2} (N h_1 - 1) H_{1k}$ , где  $\rho_1, \rho_2$  - плотности

конструкционного материала и материала АРП соответственно;  $N$  - коэффициент, учитывающий изменение массы конструкции после нанесения АРП; коэффициент изменения толщины платы  $h_1 = H_{1H}/H_{1k}$ .

Показатель  $\xi_{Dm}$  характеризует изменение амплитуды вибро смещения возмущающих колебаний  $Z_0$ , обусловленное изменением собственной частоты колебаний конструкции при нанесении АРП в соответствии с выражением

$$Z_0 = 250 \ddot{Z}_0 / f^2,$$

где  $Z_0$  - амплитуда колебаний, мм;  $f$  - частота, Гц;  $\ddot{Z}_0$  - амплитуда виброускорения, g.

Показатель  $\xi_{Dm}$  рассчитывается по формуле

$$\xi_{Dm} = \frac{h_1^3}{d} \left( \frac{N + m_r / \rho_1 H_{1k}}{1 + m_r / \rho_1 H_{1H}} \right),$$

где  $m_r$  – масса ЭРЭ, приведенная к единице площади.

Коэффициент  $d$ , показывающий относительную жесткость конструкции после нанесения демпфирующего слоя, находится по формуле

$$d = 1 + e_2 h_2^3 + \frac{3e_2 h_2 (1 + h_2)^2}{1 + e_2 h_2}.$$

### Расчет на ЭВМ эффективности АРП

Программа, используемая в настоящей работе, позволяет рассчитывать:

1. Показатели  $\xi_{Dm}, \xi_v, \xi_{\ddot{v}}$  в различных точках диапазона температур и частот колебаний.
2. Суммарную толщину субблока с АРП по формуле

$$H_{\Sigma} = H_{1k} + H_2,$$

где при  $H_2 \leq H_9$

$$H_2 = H_{2p} / K_s,$$

а при  $H_2 > H_9$

$$H_2 = H_9 (1 - K_s) + H_{2p},$$

$K_s$  - коэффициент заполнения ячейки в пределах высоты ЭРЭ антирезонансным покрытием.

3. Средние в диапазонах частот и температур значения коэффициентов  $\bar{\xi}_{\eta}, \bar{\xi}_{Dm}, \bar{\xi}_v$ :

$$\bar{\xi}_{\eta} = \frac{\sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^j \xi_{\eta nm}}{i \times j}; \quad \bar{\xi}_{Dm} = \frac{\sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^j \xi_{Dmnm}}{i \times j}; \quad \bar{\xi}_v = \frac{\sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^j \xi_{vnm}}{i \times j};$$

где  $i, j$  – количество точек температурного и частотного диапазона.

КМП  $\eta_H$  ячейки без АРП находится экспериментально.

**Методика экспериментального определения  $\eta_n$ .** Параметр  $\eta_n$  расчетным путем определить обычно не удастся. Это можно сделать экспериментально, используя формулу

$$\eta = \Delta f_{0,707} / f_0, \quad (1)$$

где  $f_0$  – резонансная частота субблока.

$$\Delta f_{0,707} = f_{max} - f_{min}.$$

Частоты  $f_{max}$  и  $f_{min}$  соответствуют точкам резонансной кривой на уровне  $0,707 \ddot{w}_0$ , где  $\ddot{w}_0$  - ускорение при резонансе в центре платы. Схема испытаний аналогична описанной в лабораторной работе №2 (рис.2.1).

### Порядок расчета

1. Собрать схему измерений в соответствии с рис.2.1 (лаб. раб. №2).
2. Включить в сеть вибростенд и измерительные приборы и прогреть их в течение 30 минут.
3. На частоте 50 Гц, значительно меньше резонансной, определить чувствительность датчика 3 по формуле

$$v = u / \ddot{Z}_0,$$

где  $u$  – напряжение, измеряемое милливольтметром 6, мВ,  $\ddot{Z}_0$  - ускорение в “g” стола вибростенда (задается преподавателем), измеряемое прибором 5.

4. Изменяя частоту вибростенда примерно от 50 до 400 Гц через 10 – 20 Гц (в области резонансного пика 5 Гц), определить виброускорение по формуле ((10), стр. 13). Ускорение стола вибростенда поддерживается постоянным. Найти частоту  $f_0, f_{max}, f_{min}$  (см. рис.2.2 в лаб. раб. №2) и по формуле (1) рассчитать  $\eta_n$ .

### Задание на подготовку к работе

1. Ознакомиться с методическими указаниями и рекомендованной литературой.

2. Изучить методику проведения эксперимента и ознакомиться с техническими характеристиками вибростенда и датчиков, милливольтметра и правилами работы с ними.

### **Лабораторное задание**

1. Провести эксперимент и определить коэффициент  $\eta_H$ .
2. Рассчитать эффективность применения демпфирующего слоя для одной-двух точек температурного и частотного диапазонов по исходным данным, указанным преподавателем.
3. Рассчитать на ЭВМ эффективность (п.2) в температурном и частотном диапазонах.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Исходные данные для расчета эффективности АРП при температуре  $+20^\circ\text{C}$  и частоте, указанным преподавателем.
3. Схема измерений и ее краткое описание.
4. Результаты испытаний.
5. Исходные данные и результаты расчета эффективности АРП на ЭЦВМ, графики  $\xi_{Dm}, \xi_v, \xi_v = \varphi(t^0, f)$ .
6. Сравнение расчета на ЦВМ и вручную.
7. Вывод.

### **Контрольные вопросы**

1. Каким показателем оценивается эффективность демпфирующего слоя?
2. В чем заключается основной принцип расчета показателя эффективности демпфирующего слоя.
3. Рассказать о методике эксперимента.
4. Дать общую характеристику конструкции с демпфирующими слоями.

## Лабораторная работа №4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** изучение методики определения динамических характеристик вибропоглощающих материалов.

#### Содержание работы

1. Экспериментальное определение параметров резонансных колебаний образцов.
2. Расчет динамических свойств вибропоглощающих материалов.
3. Анализ полученных результатов.

#### Методические указания

Значения динамических характеристик вибропоглощающих (ВП) материалов – коэффициента механических потерь (КМП) и динамического модуля упругости (ДМУ) – необходимы для определения эффективности конструкций с демпфирующими слоями. Так как эти характеристики в ТУ на материалы в настоящее время отсутствуют, часто приходится проводить специальные испытания для их определения. Применяются методы свободных колебаний, распространения упругих волн, сдвига фаз и другие [1]. Большое распространение из-за простоты экспериментальной установки, возможности проводить испытания в диапазоне температур и частот нашел *метод резонансных колебаний консольно закрепленного образца*. Образец может выполняться полностью из исследуемого материала или составным, когда на стальную основу (стержень) наносится исследуемый материал (рис. 4.1).

Обычно образцы второго типа, которые используются в настоящей работе, применяются для исследования материалов с небольшими значениями модулей упругости. В этом случае динамические характеристики (КМП и ДМУ) определяются по величине изменения ширины резонансной кривой  $\Delta f_{0,707}$  и резонансной частоты образца  $f_0$  (рис. 4.2).

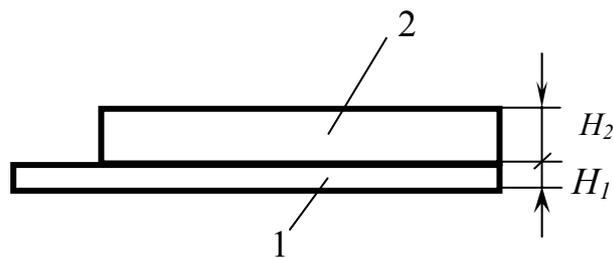


Рис.4.1. Образец для испытаний:

1 – стальная линейка, 2 – исследуемый материал

В основу метода положены следующие соображения. КМП стального консольно закрепленного образца  $\eta_n$  можно представить в виде:

$$\eta_n = \eta_3 + \eta_1,$$

где  $\eta_3$  – составляющая КМП, обусловленная трением в заделке,  $\eta_1$  составляющая КМП, обусловленная «внутренним трением» в материале стального стержня. После нанесения исследуемого материала КМП двухслойного образца  $\eta_\Sigma$  будет определяться выражением:

$$\eta_\Sigma = \eta_n + \frac{\eta_2}{1 + B_1/B_2},$$

где  $\eta_2$  – КМП исследуемого материала,  $B_i$  ( $i=1;2$ ) – составляющая жесткости на изгиб образца, обусловленная  $i$ -м слоем.

Учитывая, что жесткость на изгиб образца  $B=B_1+B_2$ , после несложных преобразований получим:

$$\eta_2 = \frac{\eta_\Sigma - \eta_n}{1 + B_1/B}. \quad (1)$$

Коэффициенты механических потерь  $\eta_\Sigma$  и  $\eta_n$  можно найти экспериментально по ширине резонансной кривой (рис.4.2), используя формулу:

$$\eta = \frac{\Delta f_{0,707}}{f_0}, \quad (2)$$

где  $f_0$  – резонансная частота,  $\Delta f_{0,707}$  – ширина резонансной кривой на уровне 0,707 от максимальной амплитуды.

Отношение  $B_1/B$  можно найти экспериментально, используя формулу Релея-Ритца для собственной частоты колебаний. Для «чистого» стального образца и стального образца с исследуемым материалом формулы соответственно имеют вид:

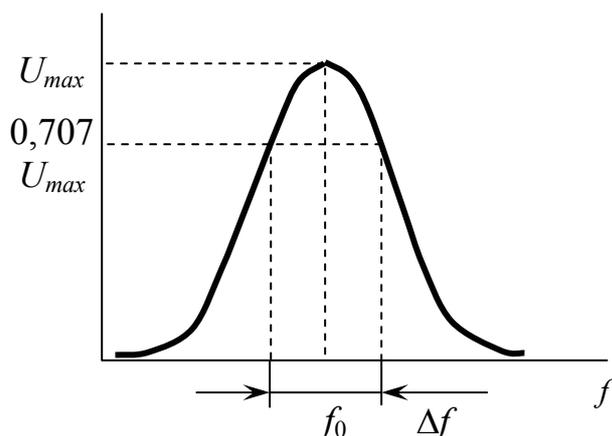


Рис.4.2. Резонансная кривая

соответственно имеют вид:

$$f_1 = \frac{\alpha}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{B_1}{m_1}};$$

$$f = \frac{\alpha}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{B}{m}}.$$

Из этих формул легко получить

$$B_1/B = (f_1/f)^2 \cdot m_1/m. \quad (3)$$

Собственные частоты  $f_1$ ,  $f$  и массы  $m_1$ ,  $m$  определяются экспериментально. Динамический модуль упругости исследуемого материала можно

найти, используя формулу для относительной жесткости двухслойного образца:

$$\nu = \frac{B}{B_1} = 1 + e_2 h_2^3 + \frac{3e_2 h_2 (1 + h_2)^2}{1 + e_2 h_2}, \quad (4)$$

где  $e_2 = \frac{E_2}{E_1}$ ;  $h_2 = \frac{H_2}{H_1}$ ;  $E_i, H_i$  – модуль упругости и толщина материала  $i$ -го слоя соответственно. Из формулы (4) после несложных преобразований получим:

$$E_2 = E_1 \frac{\frac{B}{B_1} - 1}{4h_2 + 6h_2^2 + 4h_2^3 - \frac{B}{B_1} h}. \quad (5)$$

Все параметры, входящие в правую часть выражения (5), находятся экспериментально. Для стали можно принять  $E_1 = 2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>.

### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из устройства для возбуждения и регистрации колебаний консольного образца, генератора звуковой частоты ГЗ-34, милливольтметра ВЗ-38 и осциллографа С1-19Б (рис.4.3). Принцип работы установки заключается в следующем: на катушку электромагнитного возбуждителя колебаний 3 с генератора ГЗ-34 подается синусоидальное напряжение. Изменяя частоту этого напряжения, можно найти частоту  $f$ , при которой будут наблюдаться

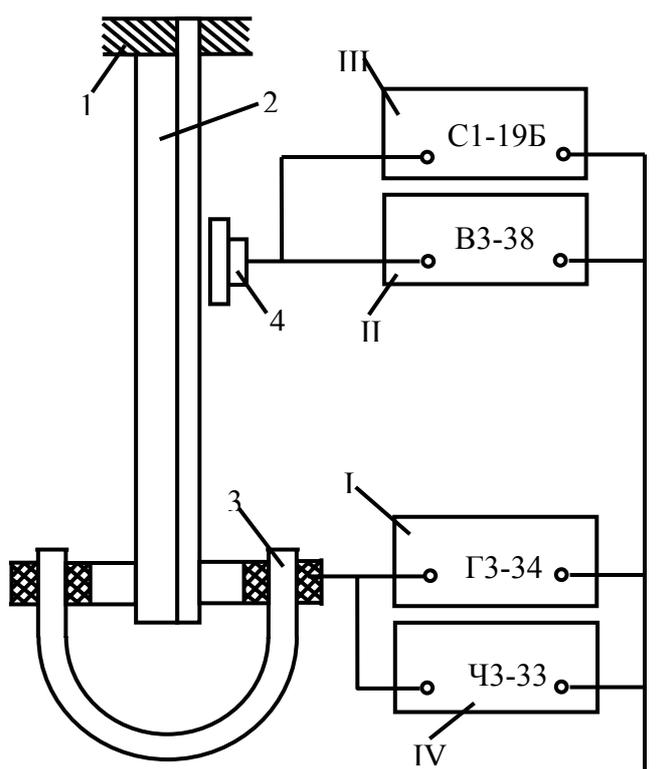


Рис.4.3. Блок-схема экспериментальной установки:

- 1 – держатель образца; 2 – образец;
- 3 – возбуждатель колебаний; 4 – датчик;
- I – звуковой генератор; II – милливольтметр;
- III – осциллограф; IV – частотомер

резонансные колебания образца 2. При этом напряжение, регистрируемое датчиком 4 (телефонный капсюль) и милливольтметром ВЗ-13, будет максимальным. Это напряжение визуально можно наблюдать при помощи осциллографа.

Порядок проведения работы:

1. Включить измерительные приборы и дать им прогреться в течение 30 минут.

2. Закрепить на зажиме 1 стержень (металлическая линейка), длина свободного конца должна быть 90 мм.

3. Установить зазор между линейкой 2 и датчиком 4 примерно 2 мм и, вращая датчик вокруг своей оси, добиться минимума напряжения, показываемого милливольтметром ВЗ-38. Частота генератора при этом должна равняться 100 Гц, напряжение 30 В.

4. Изменяя частоту генератора, установить режим резонансных колебаний образца ( $f_0 = 40$  Гц). Для точной настройки в резонанс пользоваться ручкой точной настройки генератора ГЗ-34. Записать  $U_{\max}$  и  $f$ , Гц.

5. Изменяя частоту генератора, найти частоты  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$ , при которых напряжение будет равняться  $0,707 U_{\max}$  (рис.4.2).

6. Рассчитать  $\eta$  по формуле  $\eta_{\text{н}} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0}$ .

7. Пункты 4-6 проделать каждому члену бригады и найти

$$\bar{\eta}_{\text{н}} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{\text{н}i}}{n},$$

где  $n$  – число членов бригады.

8. Закрепить на зажиме линейку с ВП материалом и повторить пункты 3-7. В результате будет определено  $\bar{\eta}_{\Sigma}$ . При установке линейки необходимо, чтобы ВП материал находился на противоположной к датчику стороне линейки.

9. По формуле (1) используя формулу (3), определить  $\eta_2$ .

10. По формуле (5) рассчитать  $E_2$ .

11. Повторить пункты 2-10 для второго резонанса ( $f = 250$  Гц).

### **Задание на подготовку к работе**

1. Ознакомиться с методическими указаниями по проведению работы и рекомендуемой литературой.
2. Подготовить таблицу для записи результатов эксперимента и расчета.
3. Ознакомиться с техническими характеристиками измерительных приборов, используемых в работе, и правилами работы с ними.

### **Лабораторное задание**

1. Провести испытание одного ВП материала (по указанию преподавателя) в соответствии с «Методическими указаниями».
2. Рассчитать динамические характеристики ВП материалов.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной установки и расчетные формулы.
3. Результаты эксперимента и расчета.
4. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие применяются способы устранения резонансных колебаний?
2. Что понимается под коэффициентом потерь?
3. Как влияет коэффициент потерь на колебания конструкций РЭА ?
4. Каковы особенности методики эксперимента?
5. Как зависит динамический модуль упругости и коэффициент потерь от температуры и частоты колебаний?

## Лабораторная работа №5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ ПЛАТ С ДЕМПФИРУЮЩИМИ ВСТАВКАМИ

**Цель работы** - изучение методик экспериментального определения и расчета динамических характеристик плат РЭА с демпфирующими вставками (ДВ).

#### Содержание работы

1. Расчет собственных частот колебаний и коэффициентов передачи платы при резонансе.
2. Экспериментальное определение динамических характеристик плат РЭА без демпфирующей вставки и с применением демпфирующей вставки.
3. Оптимизация параметров ДВ.
4. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов.

#### Методические указания

Одним из перспективных методов снижения амплитуды колебаний при резонансе считается применение демпфирующих вставок (ДВ), устанавливаемых между параллельно расположенными ячейками РЭС.

Классический способ применения ДВ, описанный в [1], состоит в установке ДВ между параллельно расположенными ячейками (рис.5.1).

Механика процесса заключается в следующем: при резонансных колебаниях ячеек, между которыми находится ДВ, в последней возникают продольные деформации растяжения-сжатия. КМП такой конструкции, связанной демпфирующей вставкой, рассчитывается формулой:

$$\eta = \frac{\Delta W_1 + \Delta W_B + \Delta W_2}{W_1 + W_B + W_2} = \frac{\eta_1 \cdot W_1 + \eta_B \cdot W_B + \eta_3 \cdot W_2}{W_1 + W_B + W_2},$$

где  $\Delta W_1$ ,  $\Delta W_2$ ,  $\Delta W_B$  – потери энергии в платах и вставке;  $W_1$ ,  $W_B$ ,  $W_2$  – максимальные энергии колебаний в ячейках и вставке.

Так как коэффициент механических потерь (КМП) вибропоглощающего полимера (ВП) значительно превышает КМП конструкции, то в соответствии с формулой (1) КМП конструкции значительно увеличится. Это

приведет к уменьшению амплитуд резонансных колебаний. Значительное уменьшение амплитуд будет наблюдаться только при выполнении следующих условий:

- 1) КМП ВП вставки должен быть большим;
- 2) Деформации вставки должны быть значительными.

Для выполнения второго условия ячейки должны иметь различные собственные частоты колебаний, так как в противном случае резонанс плат наступит одновременно, их колебания будут синхронными и деформации вставки, а, следовательно, и потери энергии  $\Delta W_B$  минимальными.

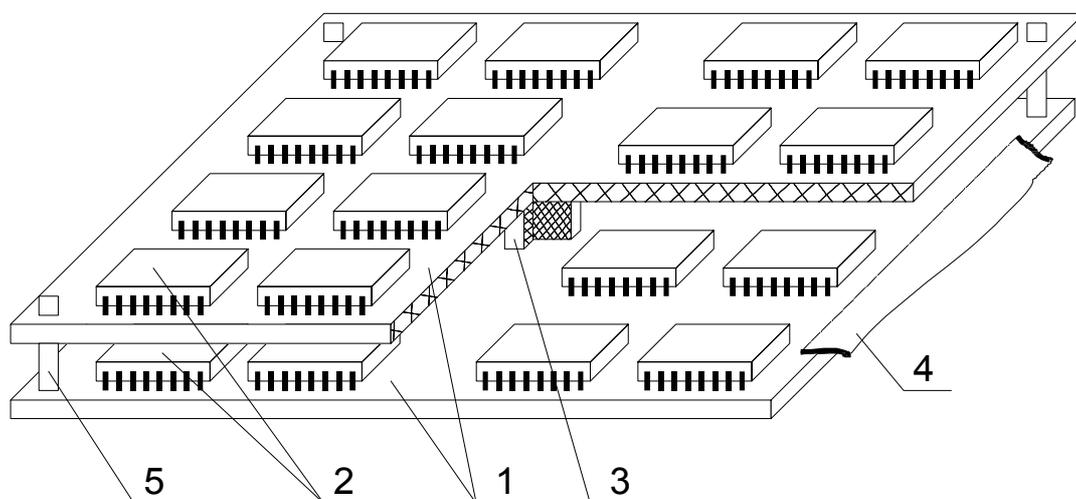


Рис.5.1. Конструкция ячеек радиоэлектронной аппаратуры с демпфирующей вставкой, расположенной между ними:

1 – плата; 2 – ЭРЭ; 3 – ДВ; 4 – элементы коммутации; 5 – элементы крепления ячеек

Физическая модель конструкции ячейки РЭА с ДВ выбирается из следующих соображений [1].

Причиной отказов РЭА часто являются резонансные колебания ячеек на основной, первой собственной частоте. Возникающие при этом амплитуды виброперемещений приводят к усталостным явлениям в выводах ЭРЭ и других элементов конструкции и, как следствие, к отказам. Поэтому во многих случаях достаточно иметь модель, пригодную для анализа динамического поведения конструкции только в области первого резонанса, что позволяет представить реальную конструкцию в виде системы всего лишь с двумя степенями свободы. Методики приведения распределенных параметров ячеек к сосредоточенным описаны в [1, с.198].

В этой модели  $m_i$ ,  $k_i$ ,  $\eta_i$  ( $i = 1, 2$ ) – сосредоточенные в центре ячейки масса, жесткость и КМП  $i$ -й платы;

$k_d$ ,  $\eta_d$  – коэффициенты жесткости и КМП демпфера.

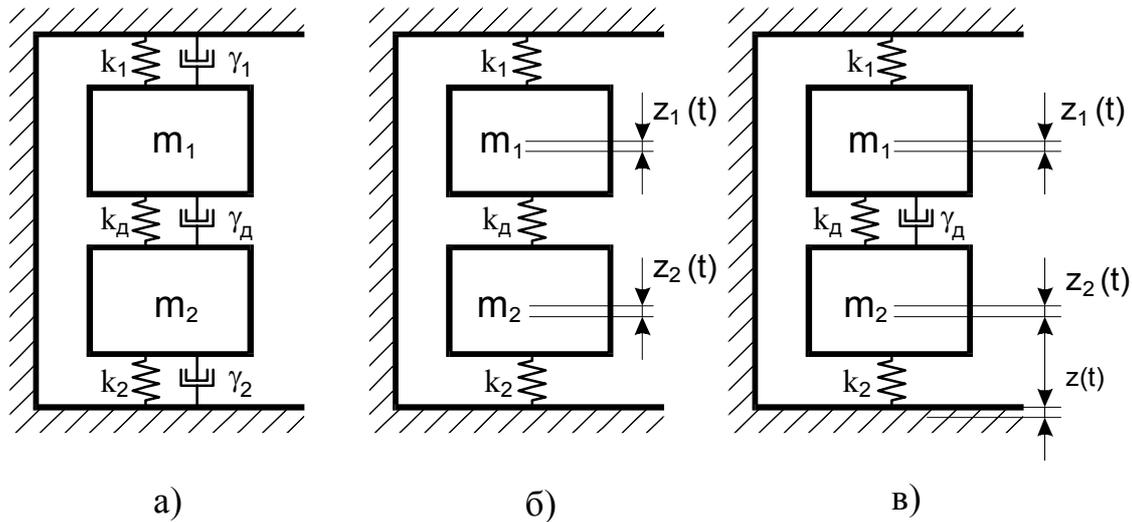


Рис.5.2. Модели ячеек РЭС с демпфирующей вставкой

При определении собственных частот колебаний демпфирующими свойствами конструкции можно пренебречь ( $\eta_1 = \eta_2 = \eta_d = 0$ ) и модель примет вид, показанный на рис.5.2,б. На основании этой модели уравнения движения масс  $m_1$  и  $m_2$  примут вид [1]

$$\begin{cases} m_1 \ddot{Z}_1 + k_1 Z_1 + k_d (Z_1 - Z_2) = 0; \\ m_2 \ddot{Z}_2 + k_2 Z_2 + k_d (Z_2 - Z_1) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Определяя коэффициент передачи при резонансе, демпфирующие свойства плат можно не учитывать ввиду их малости ( $\eta_1 = \eta_2 = 0$ ), и модель будет иметь вид, показанный на рис.5.2,в. В этой модели диссипативные силы в соответствии с моделью Сорокина представляются как часть силы упругости и, соответственно, зависят от величины жесткости демпфирующей вставки. Уравнения вынужденных колебаний масс  $m_1$  и  $m_2$  при кинематическом (внешнем) возбуждении системы, показанной на рис.5.2,в, имеет вид [1]

$$\begin{cases} m_1 \ddot{Z}_1 - k_1 (Z_0 - Z_1) + k_d (1 + i\eta)(Z_1 - Z_2) = 0; \\ m_2 \ddot{Z}_2 - k_2 (Z_0 - Z_2) - k_d (1 + i\eta)(Z_1 - Z_2) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Системы дифференциальных уравнений (2) и (3) решаются исходя из гармонического закона колебания масс

$$\begin{cases} Z_1 = Z_1(t) = Z_{10} \sin \omega t; \\ Z_2 = Z_2(t) = Z_{20} \sin \omega t. \end{cases} \quad (4)$$

Подробный вывод формул для расчета собственных частот колебаний (СЧК) и коэффициентов передачи (КП) при резонансе приведен в [1].

В решение систем уравнений (2), (3) входит значение жесткости демпфирующей вставки, которая находится по формуле [1],

$$k_{\text{Д}} = \frac{ES}{H}, \quad (5)$$

где  $E$  – модуль упругости материала ДВ;

$H$  – высота вставки;

$S$  – площадь сечения ДВ в направлении, перпендикулярном действию силы.

Подбирая величину жесткости ДВ  $k_{\text{Д}}$ , можно получить минимальное значение коэффициентов передачи той или иной ячейки. Наиболее часто требуется уменьшить амплитуды резонансных колебаний обеих ячеек  $\mu_1 = \mu_2$  (рис. 5.3).

В работе [1] показывается, что эффективность применения демпфирующих вставок возрастает, если собственные частоты колебаний параллельно расположенных ячеек отличаются в 2 и более раз. Чтобы добиться таких результатов, необходимо изменять либо размеры плат (что недопустимо в профессиональных конструкциях, так как размеры блоков стандартизированы), либо толщину печатных плат, либо массу элементов, расположенных на печатных платах, либо способы крепления ячеек в блоке. Иногда все эти меры являются неприемлемыми из-за конструктивных или функциональных требований.

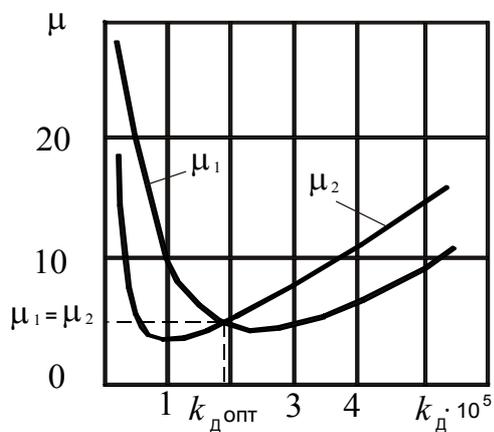


Рис.5.3. Зависимость коэффициентов передачи ячеек от жесткости ДВ

Принципиально ДВ могут применяться и для одной ячейки, если вторую заменить конструкцией типа балки, как показано на рис. 5.4.

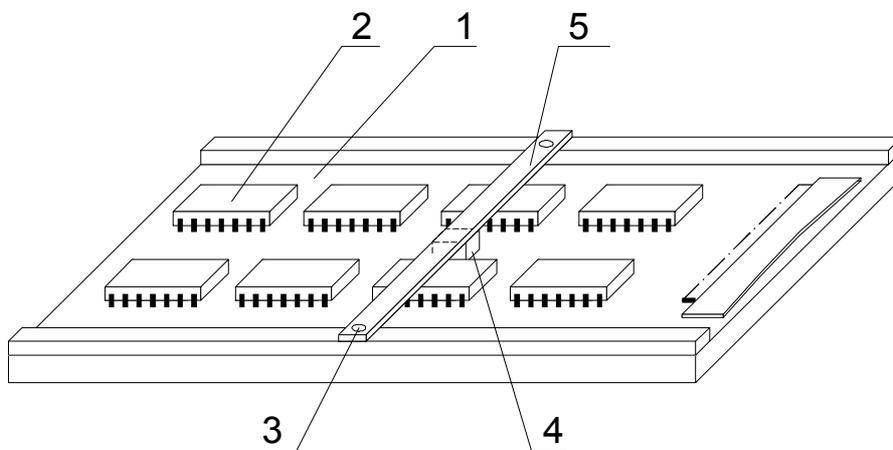


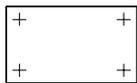
Рис.5.4. Конструкция ячейки электронной аппаратуры с ДВ и дополнительным элементом в виде балки:  
1 – плата; 2 – ЭРЭ; 3 – элементы крепления балки;  
4 – демпфирующая вставка; 5 – балка

Достоинством такой конструкции является возможность максимального уменьшения коэффициента передачи ячейки путем подбора такого соотношения жесткостей ячейки, балки и демпфирующей вставки, при котором большая часть энергии колебаний будет приходиться на балку и меньшая – на ячейку. Оптимизацию параметров демпфирующей вставки следует вести из условия минимального коэффициента передачи одной платы  $\mu_{1\min}$  (рис.5.4).

### Задание на подготовку к работе

1. Ознакомиться с методическими указаниями и рекомендуемой литературой.
2. Изучить методику проведения эксперимента и ознакомиться с техническими характеристиками вибростенда и датчиков, милливольтметра и частотомера и правила работы с ними.

## Значения приведенных параметров конструкции

Вид элемента	Габаритные размеры, мм	Способ крепления сторон	Параметр	Ед. изм.	Приведенные параметры
Ячейка №1	160×100×1.5		Жесткость	Н/м	200000
			Масса	кг	0.04
			КМП	-	0.05
Ячейка №2	160×100×1.5		Жесткость	Н/м	60000
			Масса	кг	0.04
			КМП	-	0.05
Доп. элемент (балка)	110×12×0.6		Жесткость	Н/м	30000
			Масса	кг	0.03
			КМП	-	0.05

**Лабораторное задание**

1. Рассчитать динамические характеристики ячеек РЭС с применением ДВ по исходным данным, указанным преподавателем.
2. Провести эксперимент по определению динамических характеристик ячейки РЭА без демпфирования и с применением ДВ.
3. Провести оптимизацию параметров ДВ на основе компьютерного моделирования.

**Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Исходные данные и результаты расчетов СЧК и виброускорений при резонансе ячейки с ДВ.
3. Результаты испытаний по определению динамических характеристик ячейки без ДВ и с применением ДВ.
4. Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных данных.
5. Результаты оптимизации параметров ДВ.
6. Выводы.

**Контрольные вопросы**

1. В чем заключается механика колебаний ячеек с ДВ.
2. Математическая модель ячейки с ДВ.
3. Определения параметров ДВ.
4. Особенности конструкций ячеек с ДВ.

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЯЧЕЕК РЭА С ДИНАМИЧЕСКИМ ГАСИТЕЛЕМ КОЛЕБАНИЙ (ДГК)

**Цель работы** – изучение теоретических и экспериментальных методов проектирования ДГК для ячеек ЭС.

#### Содержание работы

1. Расчет первой собственной частоты ячейки ЭС.
2. Определить параметры динамического гасителя колебаний для ячейки ЭС и коэффициент передачи ячейки с ДГК.
3. Экспериментальное исследование ячейки с установленным ДГК.
4. Компьютерное моделирование ячейки с ДГК при помощи вычислительной техники.

#### Методические указания

Среди наиболее распространенных демпфирующих устройств электронных средств следует отметить применение демпферов на основе полимерных вибропоглощающих материалов. Одним из таких устройств является динамический гаситель колебаний с демпфированием (ДГКД). Классический гаситель колебаний представляет собой груз, соединенный с защищаемой системой посредством упругой связи, например пружиной (рис.6.1). Принцип действия его состоит в следующем: при возникновении колебаний защищаемой системы с частотой, равной частоте настройки гасителя, гаситель также начинает колебаться, при этом фаза его колебаний отличается от фазы возбуждающих колебаний на  $180^\circ$ , следствием чего становится нулевое значение амплитуды колебаний защищаемой системы. Такой ДГК эффективен лишь на частоте настройки. Очевидно, что такой ДГК непригоден для виброзащиты ячеек электронных средств, поэтому для виброзащиты ячеек ЭС используют модернизированный ДГК, в котором упругий элемент изготовлен из полимерного вибропоглощающего материала (рис. 6.2). Применение ДГК с демпфированием позволяет значительно уменьшить амплитуды резонансных колебаний и во многих случаях довести их до уровня, не превышающего допустимый в достаточно широком диапазоне частот.

Эффективность уменьшения амплитуды резонансных колебаний можно оценить разницей значения коэффициентов передачи платы до и после установки ДГК. Для решения этой задачи целесообразно ячейку, яв-

ляющуюся системой с распределенными параметрами, привести к системе с сосредоточенными параметрами по методике, изложенной в [1, с.198]. Коэффициент передачи платы можно определить, решив систему дифференциальных уравнений движения двухмассовой системы:

$$\begin{cases} m\ddot{z} + b(\dot{z} - \dot{z}_0) + k(z - z_0) - b_1(\dot{z}_1 - \dot{z}) - k_1(z_1 - z) = 0; \\ m_1\ddot{z}_1 + b_1(\dot{z}_1 - \dot{z}) + k_1(z_1 - z) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Решение этой системы представляется в виде

$$\mu = \sqrt{\frac{(v^2 - \Omega^2) + (\Omega v \eta_1)^2}{(\Omega v \eta_1)^2 ((\Omega^2 - 1) + M \Omega^2)^2 + (M v^2 \Omega^2 + (1 - \Omega^2)(\Omega^2 - v^2))}} \quad (2)$$

где  $v = \frac{\omega_1}{\omega_0}$ ;  $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$ ;  $M = \frac{m_1}{m}$ ;  $\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$ ;  
 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ;  $\eta = \frac{b\omega_0}{k}$ ;  $\eta_1 = \frac{b_1\omega_1}{k_1}$ ;

$k_1, k$  – коэффициенты жесткости гасителя и ячейки соответственно;  
 $m_1, m$  – массы груза и ячейки соответственно;  
 $b_1, b$  – коэффициенты вязкости гасителя и ячейки соответственно.

1. Собственная частота колебаний ячейки ЭС определяется по формуле Релея-Ритца

$$f_n = \frac{\alpha_n}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (3)$$

где цилиндрическая жесткость

$$D = \frac{EH^3}{12(1 - \sigma^2)}$$

масса единицы площади платы

$$m = \rho h + m_3,$$

где  $E, \sigma, \rho$  – модуль упругости при растяжении-сжатии, коэффициент

Пуассона и плотность материала платы,  $H$ ,  $a$  – толщина и длина платы,  $m_3$  – масса электрорадиоэлементов, приведенная к единице площади.

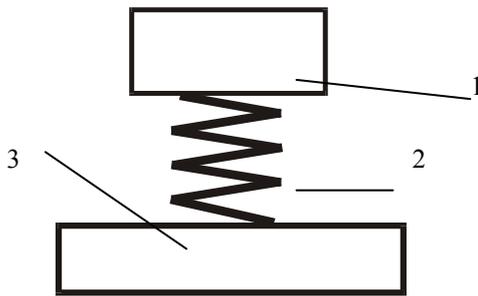


Рис. 6.1. Классический динамический гаситель колебаний (1 – груз, 2 – пружина, 3 – защищаемая система)

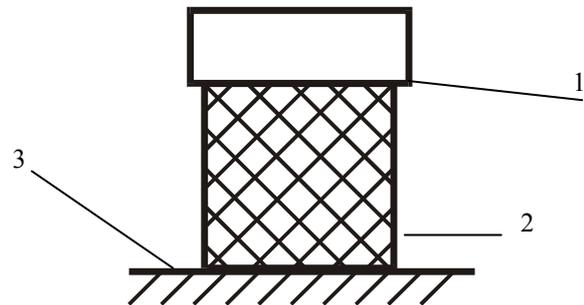


Рис. 6.2. Динамический гаситель колебаний с демпфированием (1 – груз, 2 – вязкоупругий элемент, 3 – защищаемая система)

Частотный коэффициент  $\alpha$ , зависящий от способа крепления, формы платы и номера гармоники, определяется с помощью таблиц [1, т.ПЗ].

2. После того как рассчитана собственная частота колебаний ячейки, можно определить параметры гасителя. Очевидно, что настроечная частота гасителя должна быть равна собственной частоте колебаний платы. Как известно из теории упругости, частота колебаний груза, установленного на

некий вязкоупругий элемент, определяется по формуле  $f = \sqrt{\frac{ES}{hm_{\Gamma}}}$ , где  $E$ , модуль упругости материала,  $S$  – площадь поперечного сечения,  $h$  – высота демпфирующего элемента,  $m_{\Gamma}$  – масса груза.

Масса гасителя определяется исходя из существующей номенклатуры, при этом учитывают, что оптимальное значение соотношения  $\frac{m_{\Pi}}{m_{\Gamma}}$  лежит в пределах от 5 до 50. Таким образом, зная значение частоты, массы груза и модуля упругости демпфирующего материала можно определить соотношение высоты и площади поперечного сечения демпфирующего элемента

$$\frac{h}{s} = \frac{E}{m_{\Gamma} f^2}. \quad (4)$$

Наиболее прост в изготовлении демпфирующий элемент, имеющий в поперечном сечении квадрат. Поэтому дальнейший расчет производится следующим образом: задается один из параметров демпфирующего элемента высота или длина (ширина) и подставляется в выражение (4), по ко-

торому вычисляется второй параметр. На основе полученных результатов определяются параметры гасителя и в соответствии с формулой (2) рассчитывается коэффициент передачи ячейки.

3. Вибрационные испытания проводятся на лабораторной установке, схема которой показана на рис.6.3. Для проведения испытаний необходимо получить у преподавателя макеты ячеек с ДГК и без ДГК. Подготовить экспериментальную установку к работе. Включать оборудование в сеть можно только после проверки преподавателем правильности сборки установки.

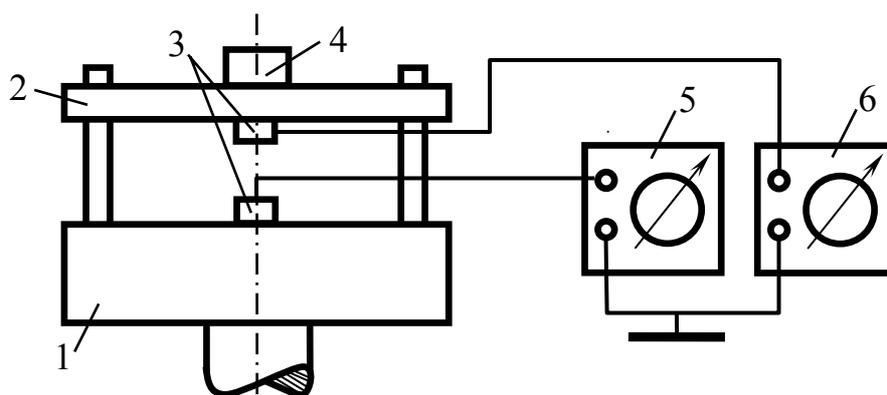


Рис.6.3. Схема экспериментальной установки:

- 1 – платформа вибростенда; 2 – ячейка; 3 – вибродатчики; 4 – ДГКД;  
5 – измеритель ускорений вибростенда; 6 милливольтметр

Вначале определяется зависимость коэффициента передачи ячейки без гасителя от частоты. Измерения проводятся в частотном диапазоне, указанном преподавателем. Показания милливольтметра пересчитываются в единицы измерения виброускорения. Плавно изменяя частоту вибростенда, необходимо зафиксировать в заранее приготовленной таблице значение виброускорения. После проведения испытаний ячейки без ДГК необходимо разобрать макет для того, чтобы закрепить на нем ячейку с гасителем. И повторить исследования ячейки теперь уже с ДГК.

4. Исследование АЧХ ячейки с ДГК при помощи ЭВМ. При помощи разработанной в системе MatLab программы можно проводить исследования влияния параметров гасителя (масса, жесткость, коэффициент механических потерь) на АЧХ ячейки. Для запуска программы в командной строке MatLAB необходимо набрать *gasitel* и нажать на кнопку «Ввод». Целью моделирования является определение оптимальной настройки ДГК для ячейки. Оптимальной настройкой ДГК называется такая, при которой АЧХ ячейки минимальна.

### **Порядок выполнения работы**

1. Провести расчет ДГК для ячейки, указанной преподавателем.
2. Измерить АЧХ ячейки без гасителя.
3. Измерить АЧХ ячейки с гасителем.
4. Построить теоретические и экспериментальные графики зависимости амплитуды колебаний ячейки от частоты.
5. Провести моделирование ячейки с ДГК на ЭВМ.
6. Сравнить результаты экспериментального, теоретического и машинного моделирования ячейки с ДГК и сделать выводы.

### **Задание на подготовку к работе**

1. Ознакомиться с теорией ДГК для ячеек ЭС.
2. Составить таблицы для записи результатов измерений АЧХ.
3. Рассчитать зависимость коэффициента передачи ячейки от частоты на основе данных, выданных преподавателем.
4. Ознакомиться с особенностями использования в вибрационных исследованиях пьезоэлектрических датчиков виброускорения.

### **Лабораторное задание**

Исследовать АЧХ ячейки ЭС теоретическими и экспериментальными методами, а также при помощи машинного моделирования.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Характеристики ячейки: размеры, масса, параметры материала.
3. Расчет собственной частоты колебаний ячейки.
4. Определение параметров гасителя.
5. Расчет коэффициента передачи ячейки с ДГК на различных частотах.
6. Результаты испытаний ячейки без гасителя и с установленным ДГК.
7. Результаты компьютерного моделирования.
8. Сравнение результатов испытаний и компьютерного моделирования.
9. Выводы.

### **Контрольные вопросы.**

1. Чем вызвана необходимость виброзащиты ячеек ЭС?
2. Что такое динамический гаситель колебаний?
3. Опишите различия между классическим ДГК и ДГК с демпфированием, приведите АЧХ систем, защищенных ДГК.
4. Опишите методику настройки ДГК.
5. Что называется оптимальной настройкой ДГК?

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Основные технические характеристики пьезодатчиков

Характеристика	Тип пьезодатчика	
	ИС –313А	ИС – 318
1. Коэффициент преобразования (чувствительность), мВ/g	0,5 – 1,5	2 – 5
2. Частотный диапазон, Гц	50 – 40000	50 – 5000
3. Емкость, пФ	1000	1500
4. Коэффициент поперечного преобразования, %	2	2
5. Диапазон температур, °С	-90 - +50	-50 - +50
6. Масса, г	12	00

### Приложение 2

#### Определение чувствительности пьезодатчика

В лабораторных работах 1-3 до начала эксперимента необходимо определить коэффициент преобразования (чувствительность) пьезодатчика методом сравнения с образцовым пьезодатчиком. Для этого испытываемый и образцовый датчик, который подключен к измерителю виброускорений, входящему в состав стойки стенда, устанавливаются на вибростоле.

Поддерживая амплитуду виброускорения стола  $Z$ ,  $g$ , постоянной (ее величина задается преподавателем), в диапазоне частот от 90 до 400 Гц (примерно через 10-20 Гц) при помощи милливольтметра ВЗ-6, ВЗ-38 или другого аналогичного прибора измерять электрическое напряжение  $u$  на

испытываемом датчике. По формуле  $v = u / Z, \frac{mV}{g}$  рассчитать чувствительность датчика на разных частотах.

Краткие описания и методика работы с вибростендом ВЭДС-10А и  
радиоизмерительными приборами

**ВИБРОСТЕНД ВЭДС-10А**

**Назначение**

Вибростенд ВЭДС-10А предназначен для испытаний изделий на вибрационные прочность и устойчивость. В состав стенда входят вибратор ВЭДС-10А и усилитель СУПВ-0,1А с фильтром.

**Технические данные**

1. Толкающая сила, максимальная, кгс	
- без фильтра	10
- с фильтром	5
2. Диапазон частот, Гц	5 - 5000
3. Максимальная амплитуда вибросмещения, мм	6
4. Масса испытываемых изделий, кг	
- без фильтра	1,9
- с фильтром	0,6
5. Коэффициент нелинейных искажений кривой виброускорения, %, не более	8
6. Питание	сеть 220В; 50 Гц

**Принцип работы**

Механические колебания стола вибратора, совпадающие с его вертикальной осью и возникающие в результате взаимодействия переменного тока подвижной катушки с постоянным магнитным полем электромагнита, передаются изделию и вибродатчику, закрепленным на столе.

Электрический сигнал с пьезодатчика, пропорциональный виброускорению, поступает на блок измерения вибрации.

## **Подготовка стенда к работе к методика работы с ним**

1. Внешним осмотром проверить исправность всех составных частей вибростенда и правильность соединения их между собой. Особое внимание обратить на заземление вибратора и усилителя.
2. Поставить ручку "Регулировка уровня" в крайнее левое положение, а ручку фильтра - в положение "Испытательный режим - 5 Гц".
3. Последовательно включить блок измерения вибрации, генератор, усилитель, блок питания катушки подмагничивания.
4. Проверить режим работы усилителя – стрелка прибора должна находиться в красном секторе.
5. Установить нужную частоту колебаний на генераторе и, плавно поворачивая ручку «регулировка уровня», задавать необходимое виброускорение по прибору блока измерения вибрации.

Примечание:

1. Перед переключением диапазона частот "ручку" повернуть влево до отказа.
2. Выключение вибростенда производится в обратной последовательности.

## **Библиографический список**

1. Талицкий Е.Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 2001. 256 с.
2. Приборы и системы для измерения вибраций, шума и удара: Справ. В 2 кн. / Под. ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 1978.

## Оглавление

<i>Лабораторная работа №1</i> Исследование и расчет систем виброизоляции блока РЭА .....	3
<i>Лабораторная работа №2</i> Исследование динамических характеристик электромонтажных плат РЭА .....	10
<i>Лабораторная работа №3</i> Исследование динамических характеристик электромагнитных плат РЭА с внешним демпфирующим слоем .....	15
<i>Лабораторная работа №4</i> Определение динамических характеристик вибропоглощающих материалов.....	21
<i>Лабораторная работа №5</i> Исследование динамических характеристик электромонтажных плат с демпфирующими вставками.....	26
<i>Лабораторная работа №6</i> Исследование ячеек РЭА с динамическим гасителем колебаний .....	32
Приложения .....	37
Библиографический список .....	39

---

### МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ Методические указания к лабораторным работам

Составители

ТАЛИЦКИЙ Евгений Николаевич  
АКАЕЛОВ Денис Геннадьевич  
ВАРАКИН Алексей Александрович

Редактор-корректор Е.П. Викулова  
Верстальщик Е.Г. Радченко

ЛР № 020275. Подписано в печать 02.12.02.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.  
Печать офсетная. Усл.-печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,45. Тираж 100 экз.

Заказ

Редакционно-издательский комплекс  
Владимирского государственного университета.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.