

1575817

На правах рукописи

ЧУПИН Игорь Борисович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЧЕЕК ЭЛЕКТРОННО-
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ
С ДЕМПФИРУЮЩИМИ РЁБРАМИ**

**Специальность: 05.13.05 – элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления**

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**



Владимир 2001

Работа выполнена на кафедре конструирования и технологии радиоэлектронных средств во Владимирском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор Талицкий Е. Н.,
Владимирский государственный университет

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Назаров А. В.,
Московский авиационный институт

1575817

Чупин И.Б.

Моделирование ячеек
электронно-вычислительных
2001 0.00

кандидат технических наук,
профессор Чеканов А. Н.,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Федеральное государственное
унитарное предприятие
«НПП Дельта», г. Москва

14 часов 30 минут на
11.02 в Московском государственном
Баумана по адресу: 107005,

библиотеке МГТУ им. Баумана

1575817

2001 г.

вста

Чупин И.Б.

МГТУ им. Н. Э. Баумана



1575817

Чупин И.Б. Моделирование я

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Электронно-вычислительная аппаратура (ЭВА), устанавливаемая на подвижных объектах — самолётах, автомобилях, ракетах и т. д., в процессе эксплуатации подвергается интенсивным механическим воздействиям. Это приводит к снижению её надёжности. Серьёзную опасность представляют вибрации, которые могут привести к резонансным колебаниям, таких широко распространённых элементов конструкций ЭВА, как ячейки на подложках из электромонтажных плат. Вопросам защиты электронных средств от вибраций посвящены работы В. С. Ильинского, Е. Н. Маквцова, Ю. Н. Кофанова, А. Н. Чеканова и других исследователей.

Применение таких способов защиты ЭВА, как виброизоляция, частотная отстройка при действии вибрации в диапазоне частот до 1000 Гц и выше, что характерно для аппаратуры аэрокосмических систем, не всегда эффективно. Наиболее перспективным методом виброзащиты ячеек является увеличение демпфирования, что приводит к значительному снижению амплитуд резонансных колебаний в широком диапазоне частот. Демпфирование осуществляется за счёт введения в конструкции ячеек элементов (демпферов), выполненных из вибропоглощающих (ВП) полимеров, у которых внутреннее трение в десятки и сотни раз больше, чем у конструкционных материалов. Исследованию этого метода виброзащиты электронных средств посвящены работы Дж. Е. Ружечки, Е. Н. Талицкого, Э. Б. Слободника и других учёных. Одним из наиболее перспективных видов демпферов являются демпфирующие рёбра (ДР). Конструкция полимерных демпферов (ПД) в виде демпфирующего ребра и методы расчёта впервые были предложены Е. Н. Талицким. Разработанная математическая модель ячейки электронного средства (ЭС) с демпфирующими рёбрами позволяет определить демпфирующие свойства и величину уменьшения амплитуд резонансных колебаний в зависимости от параметров конструкций и физико-механических свойств материалов. Однако предложенная математическая модель ячейки имеет ряд особенностей, ограничивающих её применение. Она предназначена только для случая свободного опирания ячейки по контуру, приближённо учитывает жёсткость конструкции ячейки с ДР, что уменьшает точность

получаемых результатов, позволяет рассчитывать характеристики ячеек с ДР только прямоугольного сечения. Вибрации, воздействующие на ЭВА, установленную на подвижных объектах, часто носят случайный характер, имеют широкий спектр действующих частот (от нескольких герц до нескольких килогерц) и могут одновременно возбуждать несколько различных форм резонансных колебаний элементов конструкций. Опубликованные работы не дают рекомендаций по конструктивному исполнению ячеек с ДР при воздействии случайной вибрации, когда может возбуждаться несколько собственных форм колебаний. Таким образом, решение вышеизложенных вопросов является актуальным.

Целью настоящей работы является совершенствование методики проектирования ячеек ЭС с ДР.

Для достижения поставленной цели в работе решаются задачи:

- анализируются вибрационные поля ячейки ЭС при случайном вибрационном воздействии с целью определения мест установки ДР, обеспечивающих их наибольшую эффективность;
- уточняется математическая модель ячейки ЭС с ДР на основе учёта добавочной жёсткости конструкции;
- разрабатывается математическая модель ячейки ЭС с ДР для типовых способов крепления ячейки по контуру;
- исследуются зависимости амплитуд колебаний ячеек с ДР от основных конструктивных параметров ДР;
- разрабатывается математическая модель ячейки ЭС с демпфирующим ребром рационального сечения;
- разрабатываются алгоритмы проектирования ячеек ЭС с ДР.

Методы исследования.

В процессе выполнения работы применялись аналитические методы классической теории колебаний, механики сплошной среды, физики полимеров, математический аппарат теории вероятностей и математической статистики.

Научная новизна.

В работе получены следующие научные результаты

1. Проведено моделирование и анализ распределения вибрационных полей ячейки ЭС при случайном вибрационном воздействии с целью обеспечения эффективной виброзащиты посредством установки ДР.

2. Разработана уточнённая математическая модель ячейки ЭС с ДР, учитывающая возникновение добавочной жёсткости элементов конструкции.

3. Разработана математическая модель ячейки ЭС с ДР для типовых способов крепления по краям.

4. Разработана математическая модель ячейки с ДР рационального сечения.

Практическая ценность работы.

1. Предложен алгоритм проектирования ячеек ЭС с ДР на основе проведённых исследований и разработанных математических моделей.

2. Предложена рациональная форма сечения ДР.

3. Определены зависимости эффективности демпфирования от основных конструктивных параметров ДР.

4. Даны рекомендации по установке ДР в случае воздействия широкополосной случайной вибрации.

Реализация и внедрение.

Основные результаты работы внедрены в ОАО "Владимирское конструкторское бюро радиосвязи" и учебный процесс кафедры электротехники и электроэнергетики Владимирского государственного университета.

На защиту выносятся.

1. Уточнённая математическая модель ячейки ЭС с ДР, учитывающая возникновение добавочной жёсткости элементов конструкции.

2. Математическая модель ячейки ЭС с демпфирующими рёбрами при типовых способах крепления по краям.

3. Математическая модель ячейки ЭС с ДР рационального сечения.

4. Алгоритм проектирования ячеек ЭС с демпфирующими рёбрами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа изложена на 154 страницах, иллюстрирована 46 рисунками, содержит 14 таблиц. Состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы и приложений.

Во введении обосновывается актуальность работы и ставятся основные задачи.

Первая глава диссертации посвящена объекту и методам исследования, анализу существующей математической модели ячейки с ДР. Объектом исследования, рассматриваемым в работе, является ЭВА, конструктивно выполненная в виде ячеек ЭС.

Среди механических воздействий одним из наиболее опасных и часто встречающихся факторов являются вибрационные нагрузки. Собственные частоты типовых ячеек могут попасть в диапазон частот вынуждающих колебаний, что приводит к резонансам ячеек, а следовательно, к увеличению амплитуд виброускорений. При резонансе амплитуды колебаний могут возрастать более чем в 20 раз, что приводит к превышению предельно допустимых ускорений, действующих непосредственно на электрорадиоэлементы, и отказу аппаратуры. Особый интерес представляет поведение конструкций ячеек ЭС при случайном вибрационном воздействии, так как при этом может возникнуть несколько форм резонансных колебаний с различными частотами, поэтому общие картины распределения полей виброускорений и виброперемещений по площади ячейки будут достаточно сложны.

Для эффективного использования полимерных демпферов, а также для размещения виброчувствительных электрорадиоэлементов (ЭРЭ) необходимо располагать картинами полей виброускорений и виброперемещений по площади платы, поэтому моделирование и анализ поведения конструкций ячеек ЭС при случайном вибрационном воздействии имеют особую актуальность.

Перспективным методом виброзащиты ЭС является увеличение демпфирующих свойств конструкции за счёт использования полимерных демпферов. Метод позволяет снизить резонансные колебания элементов конструкции в широком диапазоне частот, при незначительном увеличении массы и габаритов изделий. Элементы из ВП материалов (демпыеры) могут конструктивно выполняться в виде демпфирующих слоёв, рёбер, вставок. Выбор типа полимерного демпфера (ПД), как правило, зависит от конструктивных особенностей ячеек или блоков ЭВА. Перспективным видом полимерных демпферов являются ДР. Их основные достоинства - это

простота конструкции, возможность применения на уже разработанных конструкциях ячеек электронных средств. Применение ДР не ведёт к ухудшению тепловых режимов ячеек ЭС.

Для разработки эффективной методики проектирования ячеек ЭС с ДР необходимо использование аналитических методов расчёта. Данные методы наиболее удобны для решения задач синтеза конструкций. Они имеют невысокую вычислительную сложность и позволяют произвести расчёт динамических параметров для различных вариантов конструкций за короткое время.

Существующая математическая модель (ММ) ячейки ЭС с ДР разработана на основе закона сохранения механической энергии. Она позволяет рассчитать собственную частоту ячейки с ДР прямоугольного сечения, показатели уменьшения амплитуд виброускорений и виброперемещений. Особенностью данной модели является то, что она не учитывает изменение цилиндрической жёсткости пластины и жёсткостей ДР на изгиб после их объединения в единую конструкцию. Указанные жёсткости элементов в составе конструкции принимаются равными соответствующим жёсткостям отдельных элементов данной конструкции без учёта их соединения в единое целое, т. е. определяются по формулам (1) и (2):

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (1);$$

$$B = \frac{bH^3E}{12} \quad (2),$$

где E – модули упругости материалов пластины и ДР, H – высота ДР, h – толщина платы, b – ширина ДР, ν – коэффициент Пуассона.

Реальные значения этих параметров будут иными. Это связано с тем, что при объединении нескольких элементов в единую конструкцию происходит смещение нейтральной линии изгиба, поэтому расчёт жёсткостей элементов конструкции по формулам (1) и (2) заведомо приводит к снижению точности математической модели.

Демпфирующее ребро прямоугольного сечения не является оптимальным с точки зрения обеспечения максимальной виброзащиты при минимальной массе изделия.

Существующая математическая модель предназначена только для случая свободного опирания по контуру. Этот способ крепления на практике встречается достаточно редко. Целесообразно, чтобы разрабатываемая математическая модель учитывала и другие способы крепления.

Из вышесказанного видно, что существующая ММ ячейки с ДР нуждается в ряде доработок. Необходимо проведение дополнительных исследований конструкций ячеек ЭС с ДР.

Вторая глава посвящена моделированию конструкций ячеек ЭС при случайном широкополосном вибрационном воздействии с целью обеспечения эффективной виброзащиты посредством установки ДР. Для того чтобы достигался эффект от применения ДР, необходимо, чтобы они проходили через точку максимального прогиба платы по линии наибольшего изгиба, так как в этом случае их деформация будет максимальной, поэтому с целью определения мест для установки ДР необходимо провести анализ распределения вибрационных полей ячейки при случайном широкополосном вибрационном воздействии.

В качестве модели ячейки ЭС выбирается пластина из идеально упругого однородного и изотропного материала с толщиной много меньшей линейных размеров. Для анализа колебаний таких пластин широкое применение находит классическая теория изгиба, основанная на гипотезе прямых нормалей. В соответствии с данной гипотезой уравнение малых поперечных колебаний имеет вид:

$$D \Delta \Delta z + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q, \quad (3)$$

где $z = z(x, y, t)$ – функция прогиба пластины, t – время, q – интенсивность поперечной нагрузки, Δ – оператор Лапласа, h – толщина пластины, ρ – плотность материала пластины, D – цилиндрическая жёсткость пластины.

В уравнении (3) первоначально заложены неточности. Это связано с тем, что реально боковые грани элементарных элементов пластины искривляются при деформации и отклоняются от нормального положения.

Эти процессы имеют малое значение на низких частотах, но с ростом частоты их влияние усиливается, поэтому уравнение (3) оказывается несправедливым для высокочастотных колебаний, когда длина полуволн сопоставима с толщиной пластины. Рядом авторов были получены уточнённые уравнения для изгиба пластин. Их общая идея заключается в том, что по толщине пластины вводятся поперечные компоненты напряжений, обуславливающие искажение формы поперечных сечений. Известно несколько подходов, используемых для определения формы сечений после деформации. Наиболее общий подход основан на применении полиномов Лежандра.

С целью определения возможности применения классической теории изгиба к анализу колебаний печатных плат при широкополосном случайном воздействии был проведён расчёт собственных частот для пластин в соответствии с классической теорией изгиба и уточнённой методикой, основанной на использовании полиномов Лежандра. Полученные данные дают основание предположить, что если длина полуволны равна 10 толщинам пластины, то расхождения в значениях собственных частот, полученных в соответствии с классической и уточнённой методиками, не превысят нескольких процентов. Применительно к печатным платам был произведён расчёт собственных частот для случая, когда длина полуволн по длине и ширине равна 10 толщинам пластины. Расчёт проводился для наиболее "худших" случаев типоразмеров печатных плат с точки зрения невозможности применения для анализа их колебаний постулатов классической теории изгиба. Во всех случаях полученные значения существенно выше 5000 Гц, т. е. выходят за диапазон, предъявляемый по вибрациям к ЭС, поэтому было принято решение о нерациональности применения к рассматриваемым процессам уточнённых уравнений.

В соответствии с классической теорией изгиба и гипотезой Сорокина, учитывающей силы неупругого сопротивления, уравнение вынужденных колебаний имеет вид:

$$ph \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + D(1 + j\gamma) \left(\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} \right) = F(x, y, t), \quad (4)$$

где p - плотность материала пластины, h - толщина пластины, $z = z(x, y, t)$ - функция прогиба пластины, t - время, D - цилиндрическая жёсткость, j - чинимая единица, γ - коэффициент механических потерь материала пластины. Для случайного пассивного возбуждения в соответствии с уравнением (4) среднеквадратичное виброускорение и виброперемещение определяются как:

$$\sqrt{v_{m,n}^2(x, y)} = \sqrt{\sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{K_{m,n}^2(x, y) \int(f) g^2}{32 \pi^3 f_{0,m,n}^3 \gamma}}; \quad (5)$$

$$\sqrt{\ddot{v}_{m,n}^2(x, y)} = \sqrt{\sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{K_{m,n}^2(x, y) \int(f) \pi f_{0,m,n} g^2}{2\gamma}}, \quad (6)$$

где $f_{0,m,n}$ - собственные частоты, Гц, $K_{m,n}(x, y)$ - коэффициент формы, g - ускорение свободного падения, $\int(f)$ - спектральная плотность воздействия, γ - коэффициент механических потерь.

В соответствии с формулами (5) и (6) были разработаны алгоритм и программа для определения вибрационных полей пластины (при типовых способах крепления) и проведено соответствующее математическое моделирование (для случаев свободного опирания и жёсткого защемления по контуру). Обработка результатов проводилась следующим образом: формировались координаты $x \in [0, a]$ по длине пластины и $y \in [0, b]$ по ширине пластины. Производился подсчёт суммы виброперемещений пластины по координате $x \in [0, a]$ при фиксированных значениях координаты y (по длине пластины) и по координате $y \in [0, b]$ при фиксированных значениях координаты x (по ширине пластины). Подсчёт производился для случаев возникновения первого резонанса и для одновременного возникновения первых четырёх резонансов. Для случая свободного опирания пластины по контуру результаты представлены на рис. 1 и 2. Значения сумм виброперемещений представлялись в процентном отношении от максимальных значений.

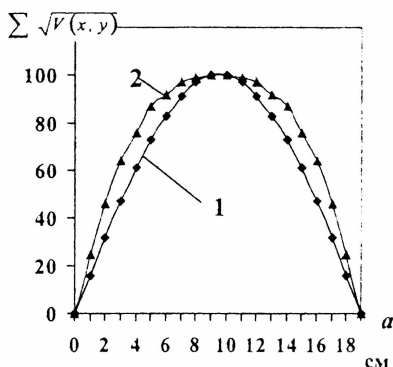


Рис. 1. Виброперемещения по оси
x: 1 – при первом резонансе,
2 – при 1 – 4 резонансах

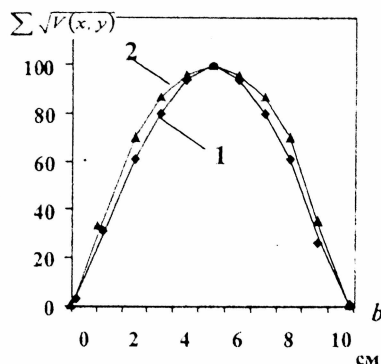


Рис. 2. Виброперемещения по оси
y: 1 – при первом резонансе,
2 – при 1 – 4 резонансах

Из рис. 1 и 2 видно, что при случайном вибрационном воздействии, когда возможно возникновение нескольких форм резонансных колебаний, зона, где значения виброперемещений близки к максимальному, расширяется по сравнению со случаем, когда возбуждается только первый резонанс, то есть площадь для эффективной установки демпфирующих рёбер увеличивается по мере расширения спектра вибрационного воздействия. Это даёт возможность конструктору выбирать места для установки демпфирующих рёбер, преимущественно исходя из конструктивных особенностей ячейки – размещения ЭРЭ, способа закрепления и т.п.

Третья глава посвящена разработке математических моделей ячейки с ДР. При разработке ММ ячейки с ДР, учитывающей возникновение добавочной жёсткости для случая свободного опирания по контуру платы, входящая в состав ячейки с ДР (рис. 3), представляется как балка с сечением $b \times h$ (рис. 4) в плоскости сечения, перпендикулярной OX , и как балка с сечением $a \times h$ в плоскости сечения, перпендикулярной OY .

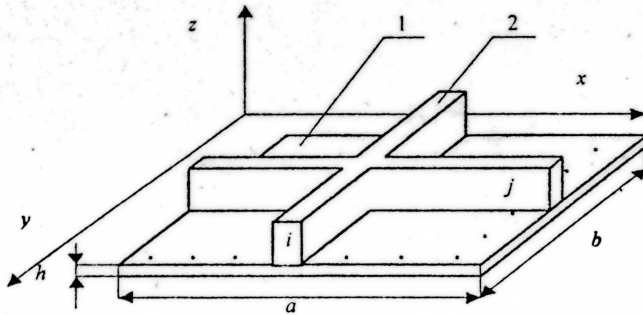


Рис. 3. Ячейка РЭС с ДР:
1 – плата; 2 – ДР

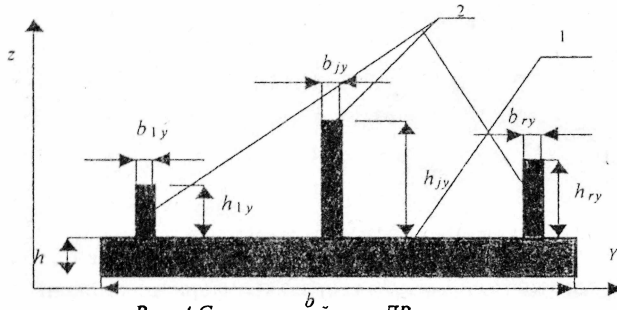


Рис. 4. Сечение ячейки с ДР плоскостью,
перпендикулярной ОХ: 1 – плата; 2 – ДР

Для определения изгибной жёсткости сечения (рис. 4) от балки, выполненной из материалов с различными модулями упругости, осуществляется переход к балке преобразованного сечения с постоянным модулем упругости (рис. 5). Значения b'_j определяются по формуле

$$b'_{jy} = \frac{b_{jy} E_{jy}}{E_{np}} \quad (j = 1, 2, 3 \dots r), \quad (7)$$

где b'_j – толщина ДР, E_{jy} – модуль упругости материала ДР, $E_{np} = E/(1 - \nu^2)$, E – модуль упругости материала пластины.

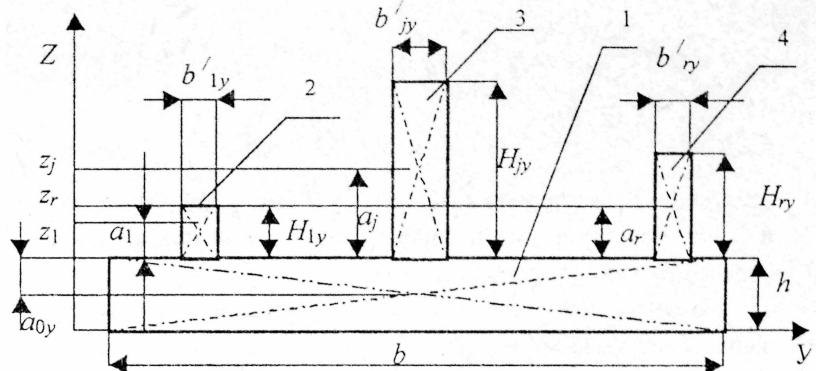


Рис. 5. Преобразованное сечение:

1 - элемент 1; 2 - элемент 2; 3 - элемент 3; 4 - элемент 4

Определяется изгибная жёсткость для сечения рис. 5 и осуществляется обратный переход от балки к пластине, т. е. определяются цилиндрическая жёсткость пластины (8) и изгибные жёсткости ДР (9) в составе конструкции.

$$D_y = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{a_{0y}^2 hE}{1-\nu^2} \quad (8) \quad K_{jy} = \frac{b_{jy} H_{jy}^3 E_{jy}}{12} + a_j^2 H_{jy} b_{jy} E_{jy} \quad (9)$$

Аналогично определяются цилиндрическая жёсткость пластины и жёсткости ДР в плоскости сечения, перпендикулярной ОУ (10, 11).

$$D_x = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{a_{0x}^2 hE}{1-\nu^2} \quad (10) \quad K_{ix} = \frac{b_{ix} H_{ix}^3 E_{ix}}{12} + a_i^2 H_{ix} b_{ix} E_{ix} \quad (11)$$

Математическая модель ячейки с ДР, учитывающая возникновение добавочной жёсткости, разрабатывается на основе закона сохранения механической энергии. Определяются максимальные потенциальные и кинетические энергии плиты и ДР:

$$\Pi_{p \max} = \left(\frac{K_{xi} \pi^4}{4b^3} \sum_{i=1}^r \sin^2 \left(\frac{\pi x_i}{a} \right) + \frac{K_{yj} \pi^4}{4a^3} \sum_{j=1}^p \sin^2 \left(\frac{\pi y_j}{b} \right) \right) W_0^2; \quad (12)$$

$$\Pi_{п \max} = \frac{\pi^4 ab}{8} \left(\frac{D_x}{a^4} + \frac{2D_{xy}}{a^2 b^2} + \frac{D_y}{b^4} \right) W_0^2; \quad (13)$$

$$T_{п \max} = \frac{p h a b}{8} \omega^2 W_0^2; \quad (14)$$

$$T_{p \max} = \frac{\omega^2}{4} \left[\sum_{i=1}^p Q_i \sin^2\left(\frac{\pi x_i}{a}\right) + \sum_{j=1}^r Q_j \sin^2\left(\frac{\pi y_j}{b}\right) \right] W_0^2, \quad (15)$$

где $D_{xy} = \frac{D_x + D_y}{2}$, Q_i, Q_j - массы ДР, параллельных осям X и Y соответственно, x_i, y_j - координаты ДР, p, r - количество ДР, параллельных осям X и Y соответственно, ρ - плотность материала пластины, W_0 - амплитуда колебаний, $\omega = 2\pi f$ - круговая частота.

В соответствии с формулами (12 - 15) определяется квадрат собственной частоты ячейки с ДР:

$$f_k^2 = \frac{\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{D_y}{a^4} + \frac{2 D_{xy}}{a^2 b^2} + \frac{D_x}{b^4} \right) + \frac{1}{b^3} \sum_{i=1}^p K_{ix} \sin^2\left(\frac{\pi x_i}{a}\right) + \frac{1}{a^3} \sum_{j=1}^r K_{jy} \sin^2\left(\frac{\pi y_j}{b}\right)}{\sum_{i=1}^p Q_i \sin^2\left(\frac{\pi x_i}{a}\right) + \sum_{j=1}^r Q_j \sin^2\left(\frac{\pi y_j}{b}\right) + \frac{\rho h a b}{2}} \quad (16)$$

Показатель использования материала ДР:

$$A = \frac{1}{1 + \frac{\Pi_{n \max}}{\Pi_{p \max}}} \quad (17)$$

Показатели уменьшения амплитуд виброускорений и виброперемещений:

$$\xi_{\ddot{w}} = 1 + \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_n} A, \quad (18) \quad \xi_w = \xi_{\ddot{w}} \frac{f_k^2}{f_n^2}, \quad (19)$$

где η_1 - КМПИ материала ДР, η_2 - КМПИ материала платы, η_n - КМПИ ячейки до установки ДР, f_n - собственная частота ячейки до установки ДР, f_k - собственная частота ячейки с ДР.

На основе разработанной модели были определены зависимости показателей уменьшения амплитуд виброускорений и виброперемещений от высоты и модуля упругости материала ДР.

ММ ячейки с ДР для произвольных сочетаний типовых способов крепления (жёсткое защемление, свободное опирание, свободный край) разрабатывается на основе принципа сохранения механической энергии. При этом форма колебаний определяется следующим образом:

$$W = W(x, y, t) = W(x, y)\cos(\omega t), \quad (20)$$

где $W(x, y)$ – собственная форма колебаний, $W(x, y)$ определяется как

$$W(x, y) = W(x)W(y), \quad (21)$$

где $W(x)$ и $W(y)$ базисные функции. Определяются максимальные кинетические и потенциальные энергии платы и ДР и по формулам (18, 19) определяются показатели ячейки с ДР, приводятся результаты расчётов для различных способов крепления (жёсткое защемление по контуру, жёсткое защемление по двум противоположным сторонам при двух свободных других и др.).

Эффективность от применения ДР зависит от величины его деформации, т. е. от потенциальной энергии ДР. В свою очередь, потенциальная энергия изгиба зависит от жёсткости ДР. Наиболее рациональной формой сечения с точки зрения максимальной изгибной жёсткости и минимальной массы ребра является двутавр, поскольку ДР и плата ячейки представляют собой единую конструкцию, было предложено выполнить ребро в виде балки двутаврового сечения. Ячейка с ДР такой формы и её сечение показаны на рис. 6 и 7.

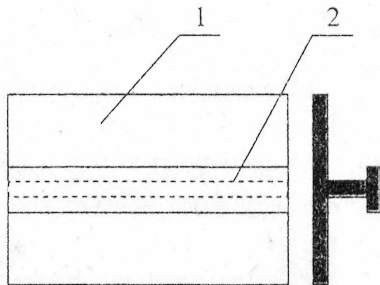


Рис. 6. Ячейка с ДР: 1 – плата; 2 – ДР

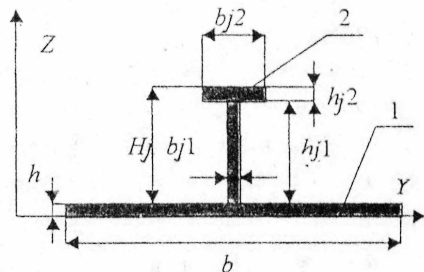


Рис. 7. Сечение ячейки с ДР

ММ ячейки с ДР рационального сечения разрабатывается аналогично ММ ячейки ДР прямоугольного сечения. Особенностью является то, что жёсткость ДР определяется по формуле

$$K_j = K_1 + K_2, \quad (22)$$

где K_1 – жёсткость элемента ДР высотой $hj1$, K_2 – высотой $hj2$ (рис. 7). Рассчитанные жёсткости элементов конструкции позволяют по формулам (12 – 15) определить энергии этих элементов, а по формулам (18, 19)

показатели ячейки с ДР рационального сечения. В соответствии с разработанной ММ был произведён расчёт параметров ячейки с ДР рационального сечения. На основании результатов расчёта можно заключить, что применение ДР рационального сечения позволяет добиться аналогичных характеристик виброзащиты по сравнению с ребром прямоугольного сечения, но при меньшей массе. В приведённом расчёте переход от прямоугольного сечения к рациональному позволил снизить массу ДР более чем на 16 %.

В четвёртой главе выполняется проверка адекватности ММ и экспериментальных результатов, разрабатывается алгоритм проектирования ячеек с ДР при заданных гармоническом и случайном воздействиях.

С целью получения данных, необходимых для расчёта по разработанным ММ, были проведены испытания материала, использованного для изготовления ДР. Испытания проводились методом резонансных колебаний консольно закреплённого стержня. Данный метод позволяет испытывать материалы с высокими вибропоглощающими свойствами и получил широкое распространение на практике. В результате проведённых испытаний были определены модуль упругости и коэффициент механических потерь материала ДР.

Испытания на гармоническое вибрационное воздействие проводились с использованием установки, основной частью которой служил стенд ВЭДС – 200А. Для ячейки с ДР прямоугольного сечения, свободно опертой по контуру, результаты испытаний и расчётов сведены в таблице. f_{p1} , $\xi_{\ddot{w}p1}$ – собственная частота и показатель уменьшения амплитуд виброускорений, полученные в результате расчёта по существующей математической модели. f_{p2} , $\xi_{\ddot{w}p2}$ – собственная частота и показатель уменьшения амплитуд виброускорений, полученные в результате расчёта по разработанной математической модели, учитывающей возникновение добавочной жёсткости элементов конструкции. В ходе проведения испытаний ячейка с ДР трижды перезакреплялась на вибрационном столе стенда, соответственно были определены три собственные частоты и три показателя уменьшения амплитуд виброускорений. На основе полученных данных были

рассчитаны f_3 , ξ_{w3} – средние значения собственной частоты и показателя уменьшения амплитуд виброускорений.

Результаты расчётов и испытаний

Существующая ММ		Разработанная ММ		Результаты испытаний	
f_{p1} Гц	ξ_{wp1}	f_{p2} Гц	ξ_{wp2}	f_3 Гц	ξ_{w3}
303	1,40	389	1,91	374	1,96

Из представленной таблицы видно, что разработанная модель обладает существенно более высокой точностью по сравнению с исходной. Аналогично проводились испытания для ячейки с ДР при типовых способах крепления по краям (жёсткое защемление по контуру, жёсткое защемление по двум противоположным сторонам при двух свободных других и т. д., всего было проведено испытаний для шести различных способов закрепления ячейки) и для ячейки с ДР рационального сечения при способе крепления - свободное опирание по контуру.

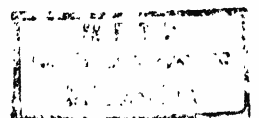
Проверка адекватности математических моделей и экспериментальных результатов проводилась с использованием критерия Фишера. На основании полученных данных разработанные модели можно считать адекватными с доверительной вероятностью 90 %.

Полученные математические модели и результаты проведённых исследований позволили разработать алгоритмы проектирования ячеек с ДР для заданного гармонического и случайного вибрационных воздействий. Основными этапами алгоритмов проектирования являются выбор материала ДР, анализ вибрационных полей ячейки (для заданного случайного воздействия), разработка вариантов конструкций ячеек с ДР, определение коэффициентов передачи ячеек с ДР (с использованием разработанных математических моделей).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты

1. Определён отклик ячейки на случайное широкополосное воздействие, что позволяет эффективно использовать ДР для виброзащиты при данном воздействии.



2. Предложена математическая модель ячейки с ДР, учитывающая добавочную жёсткость элементов конструкции, для случая свободного опирания по контуру, обладающая более высокой точностью по сравнению с существующей.

3. Предложена математическая модель ячейки с ДР для случая типовых креплений по краям.

4. Предложена рациональная форма сечения ДР и разработана математическая модель ячейки с ДР данного сечения.

5. Разработан алгоритм проектирования ячеек, виброзащищённых ДР.

Основные публикации по работе

1. Талицкий Е. Н., Чупин И. Б. Защита печатных плат при действии широкополосной случайной вибрации // Проектирование и применение радиотехнических устройств: Тез. докл. молодых специалистов.- Владимир, 1998. - С. 56.

2. Чупин И. Б., Талицкий Е. Н. Уточнённая математическая модель ячейки с демпфирующими рёбрами // Электроника, информатика и управление: Сб. науч. тр. - Вып. 1. Владимир, 2000. С. 169 –175.

3. Чупин И. Б. О возможности применения гипотезы Кирхгофа – Лява при анализе колебаний ячеек электронных средств // Электроника, информатика и управление: Сб. науч. тр. - Вып. 2. Владимир, 2000. - С. 80 – 85.

4. Чупин И. Б., Талицкий Е. Н. К расчёту ячеек с демпфирующими рёбрами // Проектирование и эксплуатация электронных средств: Тез. докл. междунар. науч.-метод. конф. – Казань, 2000. – С.91 – 94.

5. Чупин И.Б., Акаемов Д.Г., Талицкий Е.Н. Исследование колебаний ячеек электронных средств при воздействии широкополосной случайной вибрации // Перспективные технологии и средства передачи информации: Тез. докл. 3-й Междунар. науч.-техн. конф./Под ред. А. Г. Самойлова –Владимир, 1999. - С. 168 – 171.

6. Чупин И. Б. Математическая модель ячейки электронных средств, виброзащищённой демпфирующими рёбрами // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах: Материалы междунар. науч.-практ. конф. - Новочеркасск: НАБЛА, 2000. - Ч. 6. - С. 28 – 32.

Чупин

ЛР № 020275 от 13.11.96. Подписано в печать 14.09.01.
Формат 60×84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1, 16. Уч.-изд. л. 1, 36. Тираж 100 экз.

Заказ *293-01 г.*

Владимирский государственный университет.

Подразделение оперативной полиграфии

Владимирского государственного университета.

Адрес университета и подразделения оперативной полиграфии:

600000, Владимир, ул. Горького, 87.