

На правах рукописи

Акаемов Денис Геннадьевич

**ВИБРОЗАЩИТА ЯЧЕЕК ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ВЫСОКОДЕМПФИРОВАННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ГАСИТЕЛЕМ
КОЛЕБАНИЙ**

Специальность 05.13.05

«Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2002

Работа выполнена во Владимирском государственном университете, на кафедре «Конструирование и технология РЭС»

- Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
Е.Н. Талицкий
- Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор
А.В. Назаров
- кандидат технических наук, профессор
А.Н. Чеканов
- Ведущая организация — Федеральное государственное
унитарное предприятие «НПП Дельта»,
г. Москва

Защита диссертации состоится «16» сентября 2002 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.110.06 в Российском государственном технологическом университете — «МАТИ» им. К.Э. Циолковского по адресу: 125351, г. Москва, ул. Оршанская д.3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАТИ-РГТУ.

Автореферат разослан «11» сентября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Е.В. Метелкин

2002 - А
19065

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Электронно-вычислительная аппаратура (ЭВА) и системы управления (СУ), устанавливаемые на подвижных объектах, в процессе эксплуатации подвергаются интенсивным механическим воздействиям - ударам, вибрациям, линейным перегрузкам, акустическим шумам. Опыт эксплуатации ЭВА аэрокосмического комплекса показывает, что на долю механических воздействий приходится до 60 % отказов. Для ЭВА, устанавливаемой на самолетах и ракетах, наиболее опасны вибрации, особенно если они приводят к возникновению резонансных колебаний таких широко распространенных элементов конструкций ЭВА, как ячейки. Причиной отказов могут являться как механические разрушения элементов конструкций, так и искажения параметров электрических сигналов. Поэтому устранение резонансных колебаний ячеек и других элементов конструкций ЭВА или снижение амплитуды резонансных колебаний (АРК) до допустимого уровня составляют одну из важнейших задач разработки электронных средств, применяемых в условиях интенсивного воздействия вибраций.

Для решения этой задачи применяют частотную отстройку, увеличение демпфирующих свойств конструкции и другие способы. При действии вибрации в диапазоне частот до 500 Гц и выше, характерных для изделий аэрокосмического комплекса, практически единственным способом уменьшения АРК является увеличение демпфирующих свойств, достигаемое введением в конструкцию полимерных демпферов (ПД). Работы по теории и практике таких устройств проводятся в США, Германии, Японии и других развитых странах. В России такие работы применительно к электронным средствам подвижных объектов проводятся во Владимирском государственном университете под руководством профессора Е.Н. Талицкого. Полимерные демпферы могут выполняться в виде внутренних и внешних вибропоглощающих слоев, демпфирующих вставок и ребер. Каждое из указанных устройств позволяет значительно уменьшать АРК ячеек, но имеет определенные недостатки. Так, демпфирующие ребра существенно влияют на увеличение массы ячеек (порядка 20%). Ячейки с внутренними демпфирующими слоями менее технологичны, внешние вибропоглощающие слои ухудшают ремонтпригодность и тепломассобмен ячейки. Демпфирующие вставки используются только для двух параллельно установленных ячеек, имеющих различные частоты собственных колебаний. Практика показывает, что для обеспечения виброзащиты часто приходится одновременно применять несколько способов. Например, виброизоляцию и частотную отстройку или различные виды ПД. Тем не менее далеко не всегда удается эффективно решить задачу виброзащиты, учитывая жесткие

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.Петербург
09 1002 авг 1993

требования к массе и габаритам. Это вызывает необходимость поиска новых решений задачи виброзащиты ЭВА. Одним из них может быть динамический гаситель колебаний с демпфированием (ДГКД), в котором необходимые упругие и демпфирующие свойства обеспечиваются применением специальных вязкоупругих полимеров, часто называемых вибропоглощающими (ВП). Исследование таких ДГКД показали их высокую эффективность при подавлении резонансных колебаний конструкций. Применение ДГКД с размерами и массой, не превышающими 10 % соответствующих показателей защищаемого объекта, позволяет уменьшить амплитуду резонансных колебаний в пять и более раз. Однако эффективному применению ДГКД препятствует нерешенность ряда задач.

Во-первых, отсутствуют методы расчета ДГКД пластин при действии широкополосной случайной вибрации, которая наиболее точно воспроизводит реальные воздействия (шумы реактивных двигателей, транспортную тряску и т.п.).

Во-вторых, отсутствуют методы учета внутреннего нагрева ВП материалов (ВПМ) при вибрациях, хотя известно, что в материалах с большим демпфированием возможно повышение температуры за счет поглощенной энергии колебаний. Учет этого фактора необходим, так как динамические характеристики ВПМ, а, следовательно, ячеек ЭВА сильно зависят от температуры.

В-третьих, при проектировании ДГКД для защиты от широкополосной случайной вибрации необходима оптимизация их параметров, что требует разработки соответствующих алгоритмов и программ.

В-четвертых, отсутствуют подходы к интеграции методик проектирования ПД в общую архитектуру автоматизированной проектно-производственной среды. Это приводит к заметному увеличению времени проектирования и увеличению себестоимости ЭВА.

Целью работы является решение научно-технической задачи защиты ячеек электронно-вычислительной аппаратуры от широкополосной случайной вибрации высокодемпфированным динамическим гасителем колебаний.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать условия эксплуатации электронно-вычислительной аппаратуры аэрокосмического комплекса, ограничения, накладываемые на конструктивно-технологические параметры аппаратуры различными способами виброзащиты, а также специфические вопросы, возникающие при проектировании полимерных демпферов.

2. Разработать математические модели ячеек электронной аппарату-

ры с ДГКД при случайном вибрационном воздействии.

3. Создать алгоритмы проектирования динамических гасителей колебаний ячеек ЭВА и СУ.

4. Разработать методику исследования диссипативного нагрева демпфирующих материалов и оценить влияние такого нагрева на точность расчетов.

5. Создать автоматизированную систему испытаний ячеек ЭВА на случайное воздействие и оценить адекватность полученных моделей при действии случайной вибрации.

Методы исследований основаны на использовании теории колебаний, динамической теории полимеров, теории теплопроводности и математической физики; статистического и математического моделирования при помощи вычислительной техники. Экспериментальные исследования устройств и процессов, рассматриваемых в работе, проводились с использованием методов теории эксперимента, автоматизации испытаний, цифровой обработки сигналов и теории точности.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Разработаны математические модели ячеек с высокодемпфированным ДГК при случайном воздействии, характерном для условий эксплуатации ЭВА аэрокосмического комплекса.

2. Созданы алгоритмы оптимизации ячеек ЭВА с высокодемпфированным динамическим гасителем колебаний.

3. Разработаны математические модели и методика расчета диссипативного нагрева вязкоупругого материала полимерного демпфера.

4. Создана методика проектирования ячеек ЭВА с ДГКД.

Практическая ценность работы.

1. Разработана конструкция виброзащищенной ячейки ЭВА с высокодемпфированным динамическим гасителем колебаний.

2. Создан пакет прикладных программ проектирования ячеек электронной аппаратуры с ДГКД основой, которого являются, разработанные алгоритмы и математические модели.

3. Разработаны подходы к автоматизации испытаний ячеек ЭВА на случайное вибрационное воздействие, что позволило уменьшить время, необходимое на проведение испытаний, более чем в 3 раза.

Реализация и внедрение. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Конструирование и технология РЭС», а также в ОАО «Владимирское КБ радиосвязи» и использованы при выполнении госбюджетных научно-исследовательских работ Владимирского государственного университета с участием автора.

На защиту выносятся:

1. Математические модели и алгоритмы проектирования высокодемпфированных динамических гасителей колебаний для виброзащиты ячеек электронной аппаратуры, подверженных случайному вибрационному воздействию.

2. Методика определения влияния диссипативного нагрева на динамические характеристики полимерных демпфирующих материалов.

3. Автоматизированная система испытаний на широкополосное случайное вибрационное воздействие.

4. Методика проектирования ячеек электронной аппаратуры с высокодемпфированными ДГК.

Апробация работы. Основные научные результаты диссертационной работы и ее отдельные положения докладывались на следующих научно-технических конференциях, конкурсах и семинарах:

1. Конкурс на лучший доклад на Всероссийской конференции «Гагаринские чтения». Выступления в 1999 и 2001 гг. отмечены дипломами конференций;

2. Конкурс на лучший доклад на V Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». Выступление отмечено дипломом за первое место;

3. Международная НТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (Владимир, июль 1999 г., август 2001 г.);

4. XXV и XXVII Всероссийские молодежные научные конференции "Гагаринские чтения" (Москва, апрель 1999 и 2001 гг.);

5. 5-я и 6-я Международные научно-технические конференции аспирантов и студентов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, март 1999 и 2000 гг.);

6. Международная научно-методическая конференция «Проектирование и эксплуатация электронных средств» (Казань, июнь 2000 г.);

7. V Всероссийская научная конференция студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» (Таганрог, октябрь 2000 г.);

8. Областные НТК: "Проектирование и применение радиотехнических устройств" (Владимир, май 1997 и 1998 гг.).

Результаты диссертационной работы опубликованы также во Всероссийском научно-техническом журнале «Проектирование и технология электронных средств», учебном пособии и методических указаниях к лабораторным работам по дисциплине «Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры» и сборнике научных трудов преподавате-

лей, сотрудников и аспирантов «Электроника, информатика и управление» (Владимир, 2001 г.).

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации 179 страниц, в том числе: 148 страниц основного текста, иллюстрированных 50 рисунками и 7 таблицами, 14 страниц списка литературы (153 наименования отечественных и зарубежных источников), а также 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные цели и задачи диссертации, научная новизна и практическая ценность результатов диссертации.

В первой главе проводится обоснование и постановка задач диссертации.

На основе анализа условий эксплуатации ЭВА аэрокосмического комплекса показана актуальность разработки средств виброзащиты. Сравнительный анализ существующих на сегодняшний день подходов к решению данного вопроса показал, что единственным приемлемым решением для виброзащиты ячеек ЭВА от широкополосной вибрации является увеличение демпфирующих свойств конструкции. Показано, что в соответствии со спецификой условий эксплуатации наиболее подходят для этого полимерные демпферы. Существующие на сегодняшний день конструкции полимерных демпферов, несмотря на высокую эффективность, существенно ухудшают конструктивно-технологические параметры ЭВА, увеличивая массогабаритные характеристики ЭВА, ухудшая теплообмен и ремонтпригодность защищаемых устройств.

В качестве устройства виброзащиты предложено использовать динамический гаситель колебаний с демпфированием. ДГКД является одной из разновидностей классического динамического гасителя колебаний - представляющей собой тело определенной массы, имеющее упругую связь с защищаемой системой. Установка ДГК позволяет полностью подавить колебания защищаемой системы только на одной частоте, определяемой массой груза и жесткостью упругой связи. Введение демпфирующей составляющей в связь между грузом и защищаемой системой позволяет существенно расширить частотный диапазон эффективности гасителя за счет поглощения энергии колебаний. После этого ДГКД можно рассматривать как демпфер (рис. 1). Проведенный в работе анализ основывался на работах А.М. Алексеева, В.В. Карамышкина, Н.А. Пикулева, А.Ф. Потехина, А.К. Сборовского, В.Ф. Сегаль, В.П. Терских, Б.Г. Коренева, Л.М. Резникова, J.E. Brock, P.M. Lewis, F.E. Reed, J.C. Snowdon, G.V. Warburton и др.

Анализ теории динамических гасителей показал, что отсутствуют методики проектирования ДГКД для ячеек при воздействии случайного вибрационного воздействия. Существующие подходы к проектированию ДГКД для защиты от случайных вибраций не распространяются на пластины и не учитывают специфики условий эксплуатации ЭВА. Как правило, рассматривается вибрационное воздействие с постоянным значением виброперемещения во всем частотном диапазоне. Математические модели, используемые при этом, отличаются высокой вычислительной сложностью, поэтому моделирование и проектирование гасителей должно проводиться с использованием ЭВМ. Основными критериями эффективности применения ДГКД, характеризующими максимум надежности защищаемой системы, являются минимум виброперемещения и/или виброускорения указанной системы.

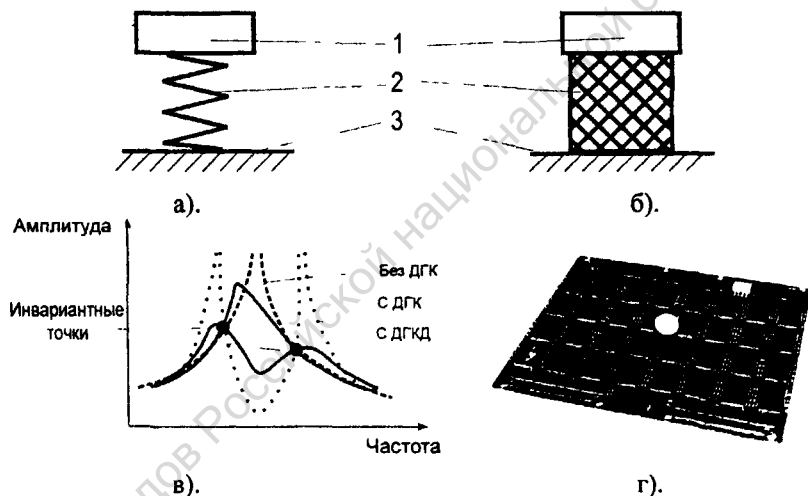


Рис. 1. Динамический гаситель колебаний.

а) классический ДГК (1 – масса, 2 - упругая связь, 3 - защищаемая система); б) динамический гаситель колебаний с демпфированием (1 – масса, 2 - вязкоупругая связь, 3 - защищаемая система); в) АЧХ защищаемой системы; г) ячейка ЭВА с ДГКД.

Использование полимеров в качестве материала для вязкоупругой связи требует проведения исследования влияния поглощенной энергии, трансформирующейся в диссипативный нагрев, на динамические характеристики демпфирующих материалов, зависящие от температуры. Подобные исследования проводились лишь для полимеров, используемых в качестве основы для изготовления демпфирующих слоев, имеющих несколько иные свойства с точки зрения тепловых, деформационных и энергетических характеристик по сравнению с материалами, используемыми в гаси-

телях.

Формализация задачи проектирования ячеек ЭВА с ДГКД основана на учете конструктивных параметров ячеек ЭВА, какими являются информация о конструкции ячейки: материал печатной платы, его вязкоупругие характеристики, масса, размеры и координаты установки ЭРЭ.

Экспериментальная проверка разработанных моделей и алгоритмов проектирования ячеек с ДГКД возможна лишь при испытаниях на случайную вибрацию. Существующее на рынке зарубежное оборудование такого класса отличается сложностью эксплуатации и также высокой стоимостью. Это вызывает необходимость создать автоматизированную систему испытаний ячеек ЭВА на случайное воздействие. Формирующее и регистрирующее оборудование в такой системе реализуется программно-аппаратными средствами современных ЭВМ.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей и решению задачи оптимизации параметров ДГКД ячеек ЭВА и СУ. Рассматриваются различные виды случайного воздействия, особое внимание уделено воздействиям, характерным для аппаратуры аэрокосмического комплекса. Разрабатываются математические модели ячеек с ДГК, на основе которых строятся алгоритмы оптимизации.

Моделирование воздействия случайной вибрации на защищаемый объект основано на рассмотрении защищаемого изделия в качестве системы, имеющей определенную передаточную характеристику, в соответствии с которой каждой реализации внешнего воздействия соответствует реализация состояния защищаемой системы. Оптимизация в таком случае проводится с целью минимизации амплитуды виброперемещения либо виброускорения, параметрами оптимизации в данном случае являются конструктивные параметры гасителя (масса груза, размеры вязкоупругого элемента) и динамические характеристики ВП материала.

Моделирование основывается на представлении ячейки ЭВА с ДГКД в виде системы с распределенными параметрами. Уравнение движения ячейки с гасителем рассматривается в виде

$$m_0 \frac{\partial^2 z_{\eta}}{\partial t^2} + D(1 + j\eta) \left(\frac{\partial^4 z_{\eta}}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z_{\eta}}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z_{\eta}}{\partial y^4} \right) - \frac{m\omega^2 z_{\eta}}{1 - m\omega^2 K_r (1 + j\eta_r)} \delta(x - x_0, y - y_0) = P_k(x, y, t) \quad (1)$$

где m_0 - масса единицы площади ячейки; $D = EH^3 / 12(1 - \sigma^2)$ - цилиндрическая жесткость; E - динамический модуль Юнга материала основания ячейки; H - толщина основания ячейки; σ - коэффициент Пуассона ма-

териала основания ячейки; η - КМП материала основания ячейки; $z = z(x, y, t)$ - виброперемещение ячейки в точке с координатами (x, y) ; x_2, y_2 - координаты установки гасителя; m - масса груза гасителя; K_r - коэффициент упругости гасителя; Z - амплитуда относительных перемещений точки платы с координатами x_2, y_2 ; $P_k(x, y, t)$ - сила, действующая на плату со стороны корпуса; δ - дельта-функция.

На основе решения уравнения (1) методом спектральных представлений получено выражение для дисперсии виброперемещения ячейки

$$D[z_{\Pi}(x, y, t)] = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} W_k(x, y) W_j^*(x, y) \langle z_{\Pi_j} z_{\Pi_k} \rangle, \quad (2)$$

в котором $\langle z_{\Pi_j} z_{\Pi_k} \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} S_{P_j P_k}(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} L(\omega_k) * L^*(\omega_j)}$,

$$L(\omega_k) = m_0 \left(-\omega^2 + (1 + j\eta)\omega_{0rs}^2 - \frac{K_r(1 + j\eta_r)m\omega^2}{K_r(1 + j\eta_r) - m\omega^2} \frac{\delta(x - x_2, y - y_2)}{m_0} \right),$$

$S_{P_j P_k}(\omega)$ - взаимная спектральная плотность обобщенных сил, определяемая следующим образом:

$$S_{P_j P_k}(\omega) = \frac{1}{v_k^2 v_k^2 S_n S_n} \iint S_{P_k}(x, y; x', y'; \omega) W_j(x, y) W_k(x', y') dx dy dx' dy',$$

где $S_{P_k}(x, y; x', y'; \omega)$ - временная спектральная плотность возмущающего воздействия, определяемая по формуле $S_{P_k}(x, y; x', y'; \omega) = \Psi(\omega) \exp(-\alpha \xi - \beta \zeta)$, в которой $\Psi(\omega)$ - действительная неотрицательная функция частоты, α и β - действительные неотрицательные числа или функции частоты, $\xi = x' - x$, $\zeta = y' - y$, $v_k^2 = m_0 W_k$, S_n - площадь платы.

Оптимизация ДГКД при этом сводится к минимизации дисперсии виброперемещения и/или ускорения ячейки.

Разработанная математическая модель справедлива и в случае, когда на ячейку в различных ее участках установлено несколько гасителей. В таких случаях в уравнении движения рассматриваемой системы выражение

$$\frac{m\omega^2 z_{\Pi}}{1 - m\omega^2 / K_r(1 + j\eta_r)} \delta(x - x_2, y - y_2)$$

заменяется суммой по всем гасителям $\sum_{i=1}^n \frac{m_i \omega^2 z_{\Pi}}{1 - m_i \omega^2 / K_{r_i}(1 + j\eta_{r_i})} \delta(x - x_{2i}, y - y_{2i})$, где n - число гасителей

лей.

Соотношения (2) получены в общем виде, а их решения существенно зависят от вида вибрационного воздействия. На основе полученного подхода разработана математическая модель свободно опертой по контуру прямоугольной ячейки с ДГК, при случайном вибрационном воздействии с постоянной амплитудой виброперемещения.

Граничные условия для пластины в уравнении (1) принимают вид $z = \partial^2 z / \partial x^2 = 0$ ($x = 0, x = a$), $z = \partial^2 z / \partial y^2 = 0$ ($y = 0, y = b$).

Вибрация, действующая на ячейку со стороны корпуса, характеризуется временной спектральной плотностью $S_{p_k}(\xi; \zeta; \omega) = S \exp(-\alpha|\xi| - \beta|\zeta|)$.

Форму колебаний пластины представим в виде $W_k(x, y) = \sin \frac{r\pi x}{a} \sin \frac{s\pi y}{b}$. Спектральную плотность прогиба определим по формуле:

$$S_z(x, y; x', y'; \omega) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} S_{z_{Pm,n^2 Pr,s}}(\omega) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{r\pi x'}{a} \sin \frac{s\pi y'}{b}, \quad (3)$$

где взаимные спектральные плотности перемещений находятся по формуле

$$S_{z_{Pm,n^2 Pr,s}} = \frac{S_{Pm,n Pr,s}(\omega)}{L_{r,s}(\omega) * L_{m,n}^*(\omega)}. \text{ При вычислении ряда (3) суммирование}$$

ведется только по формам колебаний, частоты которых соответствуют диапазону рассматриваемого случайного воздействия $\omega_{mn} \leq \omega_{\max}$, где ω_{\max} - верхняя частота диапазона случайного воздействия.

Взаимные спектральные плотности возмущающего воздействия

$$S_{Pm,n Pr,s}(\omega) = \frac{S}{\rho^2 h^2} I_{mr}(\omega) J_{ns}(\omega).$$

Дисперсия виброперемещения пластины определяется

$$D = \frac{S}{\rho^2 h^2} I_{mr}(\omega) J_{ns}(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\omega}{L_{r,s}(\omega) * L_{m,n}^*(\omega)} = 2\pi \gamma \frac{S}{\rho^2 h^2} I_{mr}(\omega) J_{ns}(\omega) \left(\sum_{i=1}^2 \text{res}'_{\omega_{n_i}} + \sum_{i=1}^2 \text{res}'_{\omega_{r_i}} \right),$$

где вычеты определяются в соответствии с соотношениями

$$\begin{aligned} \text{res}'_{\omega_{11}} &= \frac{(K_r(1 + j\eta_r) - m\omega_{11}^2)(K_r(1 - j\eta_r) - m\omega_{11}^2)}{2\omega_{11}(\omega_{12}^2 - \omega_{11}^2)(\omega_{B1}^2 - \omega_{11}^2)(\omega_{B2}^2 - \omega_{11}^2)}, \\ \text{res}'_{\omega_{12}} &= \frac{(K_r(1 + j\eta_r) - m\omega_{12}^2)(K_r(1 - j\eta_r) - m\omega_{12}^2)}{2\omega_{12}(\omega_{11}^2 - \omega_{12}^2)(\omega_{B1}^2 - \omega_{12}^2)(\omega_{B2}^2 - \omega_{12}^2)}, \\ \text{res}'_{\omega_{B1}} &= \frac{(K_r(1 + j\eta_r) - m\omega_{B1}^2)(K_r(1 - j\eta_r) - m\omega_{B1}^2)}{2\omega_{B1}(\omega_{11}^2 - \omega_{B1}^2)(\omega_{12}^2 - \omega_{B1}^2)(\omega_{B2}^2 - \omega_{B1}^2)}, \end{aligned}$$

$$res' = \frac{(K_r(1 + j\eta_r) - m\omega_{B2}^2)(K_r(1 - j\eta_r) - m\omega_{B2}^2)}{2\omega_{B2}(\omega_{A1}^2 - \omega_{B2}^2)(\omega_{A2}^2 - \omega_{B2}^2)(\omega_{B1}^2 - \omega_{B2}^2)}$$

Кроме приведенных в диссертационной работе получены соотношения, позволяющие рассчитать дисперсии виброперемещения и виброускорения ячейки ЭВА с ДГКД при случайных вибрационных воздействиях, спектральная плотность которых определяется соотношением

$$S(\omega) = \frac{(2S/\pi)\alpha(\alpha^2 + \beta^2)}{(\omega^2 - (\alpha^2 + \beta^2))^2 + 4\alpha^2\omega^2},$$

где S - дисперсия случайного воздействия, α - константа, характеризующая ширину и закон изменения спектральной плотности, β - характерная частота. Указанное соотношение наиболее часто используется для аппроксимации спектральной плотности возмущающего вибрационного воздействия.

Таким образом, расчет характеристик вибрации определенной точки ячейки ЭВА с ДГКД состоит из следующих этапов: расчет параметров ячейки ЭВА как системы с распределенными параметрами; определение возбуждаемых форм колебаний; расчет распределения возмущающего воздействия по поверхности платы; определение значений полюсов и вычисление интегралов, определение дисперсии (2).

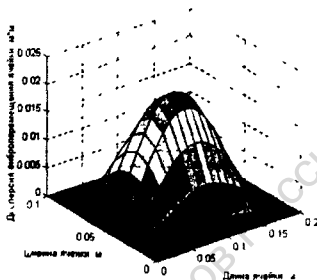


Рис. 2 Дисперсия виброперемещения ячейки без ДГКД (D_0)

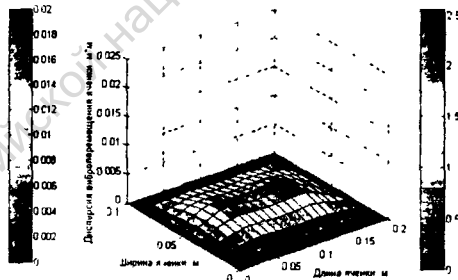


Рис. 3 Дисперсия виброперемещения ячейки с ДГКД (D)

При оптимизации параметров ДГКД с использованием разработанных подходов могут быть решены следующие задачи: минимизация дисперсии отклонений ячейки может производиться как для конкретной точки с определенными координатами, так и для участков на плате (на которых, например, могут быть расположены наиболее чувствительные к воздействию вибрации электронные компоненты) и т.п. Указанные подходы к оптимизации динамического гасителя колебаний реализованы в виде программ с использованием градиентного метода оптимизации. Результатом

решения задачи оптимизации является значение параметров гасителя: массы груза, жесткости и коэффициента потерь вязкоупругой связи. На рис. 2 представлена дисперсия виброперемещения ячейки без ДГКД, а на рис. 3 - дисперсия виброперемещения ячейки с ДГКД, параметры которого определены с использованием разработанных методик. В указанном случае применение ДГКД позволило добиться снижения дисперсии виброперемещения ячейки в 9,6 раза.

В третьей главе разработаны математические модели и экспериментальная методика для изучения влияния диссипативного нагрева на вязкоупругие свойства материала. Построена математическая модель процесса диссипации колебательной энергии демпфером и теплообмена демпфера с окружающей средой. Разработана методика, совмещающая исследование вязкоупругих свойств материала и величины диссипативного нагрева в демпфере. Создана методика проектирования высокодемпфированных динамических гасителей колебаний с учетом диссипативного нагрева демпфера.

На основе исследования энергетических процессов в демпфере получена формула для определения величины поглощаемой энергии.

$$D_2 = \pi \eta k \xi^4 F_0^2 (1 - \xi^2)^2 + \eta^2,$$

где k - жесткость демпфера, η - коэффициент механических потерь, $\xi^2 = m \omega^2 k$, F_0 - амплитуда возмущающего воздействия.

Энергия D_2 , поглощаемая в системе, определяет тепловую мощность, частично выделяемую демпфером в окружающую среду, частично идущую на его нагрев. Величину нагрева в таком случае можно найти, построив тепловую модель ДГКД.

Определение перегрева проводилось на основе тепловой модели образца. Дифференциальное уравнение теплопроводности для данного случая примет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_d}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v(x, y, z, \tau),$$

где t - температура; τ - время; λ_d - коэффициент теплопроводности материала демпфера; c - коэффициент теплоемкости материала демпфера; ρ - плотность материала демпфера; x, y, z - соответствующие оси координат; q_v - объемная плотность теплового потока.

Решение данного уравнения находилось исходя из следующих соображений. Демпфер рассматривается как параллелепипед с внутренним равномерно распределенным по объему источником энергии, объемная плот-

ность которого постоянна и определяется по формуле $q_v = P/abh$, где P - выделяемая тепловая мощность, зависящая от энергии D_2 , a - длина демпфера, b - ширина демпфера, h - высота. Граничные условия определялись условиями теплообмена демпфера с окружающей средой.

Решение указанного уравнения, принимает вид:

$$t(x, y, z) = \frac{q_v}{2\lambda} \left(\frac{\lambda a}{\alpha_B} + \frac{a^2}{4} - x^2 \right) \left[1 - \Omega_y \frac{\text{ch}(B_y y)}{\text{ch}(B_y b/2)} \right] f_z,$$

где α_B коэффициент конвективного теплообмена;

$$\Omega_i = \left[1 + \frac{\lambda B_y}{\alpha_B} \text{th} \left(\frac{B_i b}{2} \right) \right]^{-1}; \quad B_i^2 = \frac{2\alpha_B \psi_i}{\lambda a}; \quad \psi_i = (1 + \alpha_B a / 6\lambda_i)^{-1}; \quad (i = x, y);$$

$$f_z = 1 - \Omega_z \frac{\text{ch} b_z z}{\text{ch}(b_z a/2)}; \quad \Omega_z = \left[1 + \lambda_z b_z \text{th} \left(\frac{b_z h}{2} \right) \right]^{-1}; \quad b_z^2 = 2(\alpha_B b \psi_x + \alpha_B a \psi_y) / \lambda a b.$$

С помощью полученных соотношений проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния поглощенной энергии колебаний на вязкоупругие характеристики демпфирующего материала.

Практические исследования и проверка результатов теоретических изысканий проводились с использованием методики исследования демпфирующих свойств материала с учетом диссипативного нагрева. Для определения динамических характеристик демпфирующего материала измерялись амплитуды колебаний груза и основания, а также разность фаз между ними. Температура измерялась непосредственным введением внутрь демпфера датчика температуры, размеры датчика выбирались таким образом,

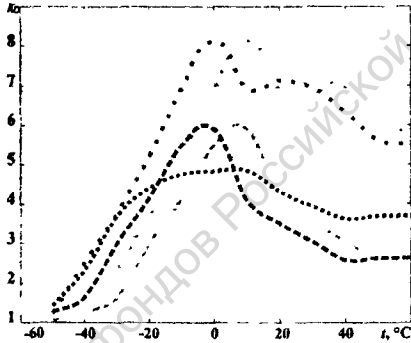


Рис. 4. Зависимость коэффициента уменьшения дисперсии прогиба пластины с ДГКД от температуры.
 ---- ППУ-1ШВ, ППУ-92,
 ППЭ-Р3005.

чтобы свести к минимуму влияние последнего на вязкоупругие свойства демпфера (отношение объема экспериментального образца к объему демпфера порядка 0,002).

Результаты исследований приведены в таблице 1.

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента уменьшения дисперсии виброперемещения геометрического центра ячейки с ДГКД $K_D = D_0 D$ от температуры для трех вибропоглощающих материалов (— без учета внутреннего нагрева; — с учетом нагрева).

Таблица 1.

ВПМ №	Виброускорение	Номер опыта					Среднее значение	Теоретическое значение
		1	2	3	4	5		
ППУ-1ШВ	3g	294,2	294,3	294,4	294,3	294,5	294,4	293
	5g	294,6	294	294,4	293,5	295	294,3	296
	8g	300,1	299,5	300	299,8	300,3	299,4	300
ППУ-92	3g	293,5	293,5	293,5	293,7	293,8	293,6	294
	5g	298,0	300,4	296,5	300,5	299	298,9	298
ППЭ-Р3005	3g	291	291,1	291,1	291	291	291,4	291
	5g	294,6	297	293,5	294,7	296,5	295,6	295
	8g	297,6	297,1	297,6	296,3	297,6	297,4	297

На основе разработанных в работе моделей и алгоритмов с учетом влияния диссипативного нагрева разработана методика проектирования ячеек ЭВА с ДГКД. Исходные данные проектирования: условия эксплуатации ЭВА, предельно допустимые значения виброперемещений для элементов, расположенных на ячейке; ограничения на массогабаритные характеристики ДГКД и координаты его расположения; номенклатура имеющихся вибропоглощающих материалов.

Алгоритм проектирования ячеек ЭВА с ДГКД

1. Исследование условий эксплуатации и расчет начальных параметров ячейки ЭВА.

2. Исследование имеющихся в наличии вибропоглощающих материалов с целью определения динамических характеристик и влияния на них диссипативного нагрева.

3. В зависимости от результатов анализа пункта 1 проводится оптимизация гасителя в соответствии с критериями, определенными в исходных данных.

4. В случае невозможности решения задачи оптимизации могут быть даны рекомендации по подбору материала с требуемыми характеристиками либо по подбору другого способа виброзащиты.

5. Определение конструктивных параметров и координат установки ДГКД.

Разработаны подходы к интеграции представленной методики в процесс проектирования ячейки ЭВА. На основе описанного подхода создан

пакет прикладных программ, позволяющих проводить моделирование ячеек с ДГК.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований ячеек с ДГК при случайном воздействии. Проведена оценка адекватности разработанных в работе моделей. Описаны результаты апробации и внедрения работы.

Для проведения испытаний ячеек ЭВА на случайное вибрационное воздействие создана информационно-измерительная система испытаний, основанная на выполнении следующих функций:

1. *Анализ программы испытаний* с целью изучения возможности воспроизведения требуемых условий эксплуатации, результаты которого определяют параметры модели возмущающего вибрационного процесса.

2. *Анализ метрологических характеристик* на основе результатов поверки и аттестации оборудования.

3. *Исследование метрологических характеристик*. Проводятся испытательные мероприятия, направленные на определение амплитудно-частотной характеристики вибростенда и неравномерности распределения амплитуды колебаний в различных точках стола вибратора, калибровка виброизмерительных преобразователей.

4. *Настройка испытательного оборудования*. На данном этапе проводится настройка формирующего оборудования и проверка параметров полученного в результате моделирования вибрационного процесса.

5. *Испытания элементов ЭВА на широкополосное случайное вибрационное воздействие*. Проводятся испытания ЭВА в соответствии с программой.

6. *Анализ результатов испытаний*. На данном этапе проводится формирование отчетов об испытаниях на основе испытательной информации.

Испытания ячеек проводились в двух сериях по три испытания в каждой. В процессе испытаний параметры вибрации исследовались в девяти точках на плате. Адекватность разработанных моделей оценивалась при помощи методики с использованием критерия Фишера. Модели как ячеек с ДГК, так и диссипативного разогрева адекватны с доверительной вероятностью 0,95.

Полученные результаты позволяют повысить надежность ЭВА, работающих в условиях воздействия случайной широкополосной вибрации, за счет снижения амплитуды вибраций ячеек ЭВА.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. На основе анализа существующих методов виброзащиты ячеек ЭВА показана, актуальность разработки новых средств виброзащиты, ми-

нимально влияющих на конструкторско-технологические характеристики электронных устройств.

2. Разработаны математические модели ячейки ЭВА с высокодемпфированным динамическим гасителем колебаний при широкополосном случайном воздействии.

3. Применение созданных в работе алгоритмов и программ оптимизации параметров высокодемпфированных ДГКД ячеек электронно-вычислительной аппаратуры позволило добиться уменьшения дисперсии виброперемещения в 8 – 10 раз.

4. Исследования на основе созданной в работе методики определения зависимости динамических характеристик ВПМ от величины диссипативного нагрева показали, что влияние диссипативного нагрева (+6...+10°C) мало по сравнению с температурным диапазоном эксплуатации ЭВА аэрокосмического комплекса (от -55° до +60°C).

5. Разработана автоматизированная система испытаний ячеек ЭВА на случайное вибрационное воздействие.

6. Основные результаты работы использованы при выполнении НИР Владимирского государственного университета (ВлГУ) по заказу ОАО «Владимирское КБ радиосвязи», а также в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению 551100 «Проектирование и технология ЭС» во Владимирском государственном университете.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Акаемов Д.Г. Математическая модель ячейки с высокодемпфированным гасителем колебаний при случайном вибрационном воздействии // Проектирование и технология электронных средств, 2001, № 3, с. 29 – 33.

2. Акаемов Д.Г. Проектирование ячеек электронно-вычислительной аппаратуры с высокодемпфированным динамическим гасителем колебаний // Проектирование и технология электронных средств, 2002, № 3, с. 5–8.

3. Акаемов Д.Г., Бирюков А.А., Талицкий Е.Н. О возможности применения динамического гасителя колебаний для выбросзащиты РЭС // Проектирование и применение радиотехнических устройств: Науч. тр. – Владимир, 1998, с. 12.

4. Акаемов Д.Г. Исследования динамического гасителя колебаний ячеек электронных средств // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Пятая Международная научно-техническая конференция аспирантов и студентов. Тезисы докладов. В 2-х томах. Том 1. – М.: МЭИ, 1999. – с. 58–59.

5. Акаемов Д.Г. Оценка эффективности уменьшения амплитуды резонансных колебаний ячеек электронных средств высокодемпфированным динамическим гасителем колебаний // XXV Гагаринские чтения. Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции. Москва, 6 – 10 апреля 1999 г. – М.: ЛАТМЭС, 1999. Том 1. – с. 451 – 452.

6. Акаемов Д.Г. Исследование диссипативного разогрева демпфи-

рующих материалов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Шестая Международная научно-техническая конференция аспирантов и студентов. Тезисы докладов. В 3-х томах. Том 1. – М.: МЭИ, 2000. – с. 156-157.

7. Акаемов Д.Г., Талицкий Е.Н., Чупин И.Б. Исследование колебаний ячеек электронных средств при воздействии широкополосной случайной вибрации // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы международной научно-технической конференции. – Владимир: Институт оценки природных ресурсов, 1999. – В 2 частях./ Ч.1. Под ред. А.Г. Самойлова. – с. 168 - 171.

8. Акаемов Д.Г., Талицкий Е.Н. Оптимизация динамического гасителя колебаний ячеек ЭС для защиты от случайных воздействий // Проектирование и эксплуатация электронных средств. Международная научно-методическая конференция. Тезисы докладов. - Казань: КГТУ, 2000, – с. 95–98.

9. Акаемов Д.Г., Долгов Г.Ф., Талицкий Е.Н. Исследование влияния диссипативного разогрева на свойства демпфирующих материалов ЭС // Электроника, информатика и управление. Сборник научных трудов преподавателей, сотрудников и аспирантов. Выпуск 1. Владимир, ВлГУ, 2000, - с. 71-77.

10. Акаемов Д.Г. Исследование диссипативного разогрева в динамическом гасителе колебаний ячеек электронных средств // Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления. V Всероссийская научная конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. - Таганрог, ТРТУ, 2000 г. - с. 223 – 224.

11. Акаемов Д.Г., Тыкоцкий А.Е. Автоматизированная система испытаний ЭВА на широкополосное случайное воздействие // XXVII Гагаринские чтения. Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции. Москва, 6 – 10 апреля 2001 г. – М.: ЛАТМЭС, 2001. Том 6 - с.82.

12. Акаемов Д.Г., Талицкий Е.Н., Тыкоцкий А.Е. Математические основы формирования широкополосной случайной вибрации для испытаний ЭС. // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы международной научно-технической конференции. – Владимир: Институт оценки природных ресурсов, 2001. – В 2 частях./ Ч.1. Под ред. А.Г. Самойлова. – с. 107 – 109.



Из фондов Российской национальной библиотеки

РЛ № 020275 от 13 11 96. Подписано в печать 5 09 2002
Формат 60×80/16 Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93 Уч.-изд. л. 1,35 Тираж 100 экз
Заказ 320-2002

Владимирский государственный университет
Подразделение оперативной полиграфии
Владимирского государственного университета.
Адрес университета и подразделения оперативной полиграфии.
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87

№ 19065

2002-A

19065

Из фондов Российской национальной библиотеки