

0713439-1

На правах рукописи

КУПЕРШМИДТ ПЕТР ВЛАДИМИРОВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-
РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ВИБРАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
УСТРОЙСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.13.05 – Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Казань, 2000

Работа выполнена на кафедре радиуправления Казанского
государственного технического университета им. А.Н.Туполева

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук,
профессор Я.С. Урецкий

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор З. А. Баширов,
кандидат технических наук
И.З. Насыров

Ведущая организация: Казанский научно-
исследовательский институт
авиационных технологий

Защита состоится "13" марта 2000 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета К.063.43.05
при Казанском государственном техническом университете
им. А. Н. Туполева по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан "28" января 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



В. А. Козлов

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000947856

0713439-1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вибрационная надежность является одной из важнейших эксплуатационных характеристик устройств вычислительной техники и систем управления.

Обеспечение вибрационной надежности различных изделий заключается в получении таких динамических свойств их конструкций, при которых вибрация изделий в условиях эксплуатации не превышает допустимых значений. При этом необходимые конструктивные изменения проводят с использованием расчетных и экспериментальных методов.

Расчетные методы основаны на создании математической модели, с помощью которой вычисляют динамические характеристики всей конструкции, а также динамические характеристики конструктивных элементов. Однако исключительная насыщенность и конструктивная сложность радиоэлектронных устройств не позволяют получить качественное описание их динамических свойств, что существенно снижает эффективность применения расчетных методов.

В основе экспериментальных методов лежат вибриспытания, в процессе которых измеряют реакции конструкции на приложенные вибрационные воздействия. Экспериментальные методы позволяют получить оценки динамических свойств различных конструкций, однако эти оценки носят интегральный характер и не дают возможности выработать рекомендации по изменению свойств конструктивных элементов для обеспечения вибрационной надежности изделия.

Наибольшими возможностями обладают экспериментально-расчетные методы, позволяющие по результатам экспериментальных исследований изделий вычислить динамические характеристики конструктивных элементов и установить их взаимосвязь с динамическими свойствами всей конструкции в целом. Однако применение экспериментально-расчетных методов сдерживается недостаточным развитием этих методов и средств для их реализации. Поэтому возникает актуальная задача определения динамических характеристик конструктивных элементов на основе экспериментально-расчетных методов обработки вибрационной надежности устройств вычислительной техники, решению которой и посвящена диссертационная работа.

Цель диссертационной работы заключается в повышении вибрационной надежности вычислительной техники за счет использования экспериментально-расчетных методов определения динамических характеристик конструктивных элементов.

Для достижения этой цели в диссертации решена задача создания совокупности методов и средств для определения динамических характеристик конструктивных элементов на основе экспериментально-расчетных методов обработки вибрационной надежности устройств вычислительной техники.

Частные задачи диссертационной работы заключаются в разработке:

- моделей конструкции, учитывающих динамические характеристики конструктивных элементов;

- экспериментально-расчетных методов определения динамических характеристик конструктивных элементов;
- комплекса технических средств для реализации этих методов;

а также частной задачей является проведение исследований особенностей применения экспериментально-расчетных методов определения динамических характеристик конструктивных элементов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Методы исследований. Основные задачи решены на основе применения: теорий системного анализа, линейных операторов, графов, спектрально-корреляционной теории, а также на основе экспериментальных исследований, выполненных с использованием инструментально-графической системы LabView, программного обеспечения MathCad и разработанного виброизмерительного комплекса.

Научная новизна работы. Научная новизна диссертационной работы заключается следующим.

1. Для описания конструкций при проведении экспериментально-расчетных исследований динамических характеристик конструктивных элементов предложены модели на основе частных и обобщенных функциональных элементов. Показано, что приведенная матрица комплексных передаточных функций частных функциональных элементов, описывающая динамические характеристики конструктивных элементов, является обратной к матрице комплексных передаточных функций обобщенных функциональных элементов, описывающей динамические характеристики всей конструкции.

2. Исследованы возможности экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов при формировании детерминированных тестовых воздействий. Установлена необходимость проведения серии экспериментов, заключающихся в том, что в узлах соединения конструктивных элементов формируют тестовые воздействия, в этих узлах измеряют параметры реакций конструкции, по которым определяют комплексные передаточные функции частных функциональных элементов, полностью описывающие динамические характеристики конструктивных элементов.

3. Проведен анализ возможностей экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов при виброиспытаниях с имитацией условий эксплуатации. Показана целесообразность применения однотоочечного и многотоочечного методов возбуждения спектров случайной вибрации, на основе которых в узлах соединения конструктивных элементов формируют случайные тестовые воздействия, в этих узлах измеряют собственные и взаимные спектральные плотности воздействий и взаимные спектральные плотности реакции и воздействий, по которым определяют комплексные передаточные функции частных функциональных элементов, полностью описывающие динамические характеристики конструктивных элементов.

4. Исследовано влияние дестабилизирующих факторов на качество экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов. Установлено, что общая относительная погрешность определения приведенной матрицы комплексных передаточных функций в ка-

ждой полосе частот определяется дробно-рациональной зависимостью от значений чисел обусловленности этой матрицы и матрицы выходных спектров, относительных погрешностей формирования и измерения матриц спектров входных и выходных сигналов, а также относительного возмущения матрицы комплексных передаточных функций.

Практическая ценность работы. Разработанные методы и средства позволяют экспериментально-расчетным путем установить динамические характеристики конструктивных элементов, что дает возможность проводить более детальные исследования динамических свойств конструкций. Информация о динамических характеристиках конструктивных элементов позволяет определить роль различных конструктивных элементов в формировании реакций конструкций на эксплуатационные вибровоздействия и установить «критические» пути распространения колебаний, приводящих к возникновению резонансов. Это создает основу для выработки важных практических рекомендаций по целенаправленному изменению свойств конструктивных элементов при отработке изделий и открывает новые пути для повышения вибрационной надежности устройств вычислительной техники.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы обсуждались на 15-й Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика», Москва, 1999г., научно-технической конференции «AVIA-99», Воронеж, 1999г., 4-й Всероссийской научно-практической конференции «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности», Санкт-Петербург, 1999г., Международной научно-технической конференции «Вибрационные машины и технологии», Курск, 1999г., Международном симпозиуме «Надежность и качество-99», Пенза, 1999г., Международной научно-практической конференции «Технология, инновация, качество», Казань, 1999г., XVI-й военно-технической конференции «Вопросы совершенствования боевого применения и разработок артиллерийского вооружения и военной техники», Казань, 1999г., Всероссийской студенческой научной конференции «V Королёвские чтения», Самара, 1999г., Юбилейной научно-технической конференции «В XXI век – с новыми принципами построения аппаратуры», Н. Новгород, 1999г.

Реализация результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертационной работы были использованы на Казанском вертолетном заводе при отработке вибрационных характеристик элементов конструкции вертолетов, в Федеральном научно-производственном центре по радиоэлектронным системам и информационным технологиям при виброиспытаниях устройств радиоэлектронных систем, а также в Московском научно-производственном объединении «Спектр» при выполнении НИР по определению динамических характеристик конструкций машин и оборудования. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе КГТУ им. А.Н. Туполева.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Она изложена на 120 страницах, содержит 18 рисунков, список использованных источников из 102 наименований.

Научные положения, выносимые на защиту. На основе полученных в диссертационной работе результатов на защиту выносятся следующие научные положения.

1. Приведенная матрица комплексных передаточных функций частных функциональных элементов модели, описывающей динамические характеристики конструктивных элементов, является обратной к матрице комплексных передаточных функций обобщенных функциональных элементов модели, описывающей динамические характеристики всей конструкции, измеренные в узлах соединения конструктивных элементов.

2. Определение динамических характеристик конструктивных элементов достигается проведением серии экспериментов, состоящих в том, что в узлах соединения конструктивных элементов формируют детерминированные тестовые воздействия, в этих узлах измеряют параметры реакций конструкции, по которым определяют комплексные передаточные функции частных функциональных элементов, полностью описывающие динамические характеристики конструктивных элементов.

3. Определение динамических характеристик конструктивных элементов достигается тем, что в узлах соединения конструктивных элементов формируют случайные тестовые воздействия, в этих узлах измеряют собственные и взаимные спектральные плотности воздействий и взаимные спектральные плотности реакций и воздействий, по которым определяют комплексные передаточные функции частных функциональных элементов, полностью описывающие динамические характеристики конструктивных элементов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задачи определения динамических характеристик конструктивных элементов на основе экспериментально-расчетных методов обработки вибрационной надежности устройств вычислительной техники, сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Изложены полученные новые научные результаты и показана практическая значимость работы, приведены сведения об использовании результатов работы, а также о публикациях и апробации, указана структура диссертации.

В первой главе проведен обзор методов обеспечения вибрационной надежности различных изделий, который показал, что наиболее эффективные методы обеспечения вибрационной надежности изделий основаны на разработке конструкций с требуемыми динамическими свойствами, в связи с чем возникает необходимость определения динамических характеристик конструкций с помощью расчетных и экспериментальных методов. В результате сравнительного анализа этих методов применительно к устройствам вычислительной техники показано, что использование расчетных методов затруднено из-за сложности конструкций радиоэлектронных устройств, а экспериментальные методы не достаточно эффективны, так как оценки динамических свойств конструкций, которые они позволяют получить, носят интегральный характер и не

дают важных сведений о динамических свойствах конструктивных элементов. Таким образом, возникает задача определения динамических характеристик

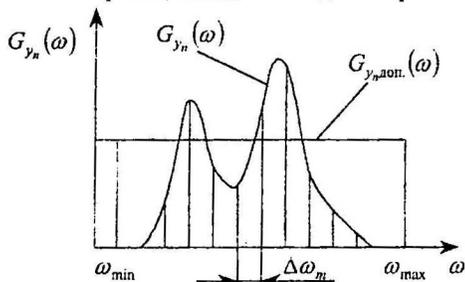


Рис. 1. К вопросу об оценке вибрационной надежности изделия

конструктивных элементов на основе экспериментально-расчетных методов обработки вибрационной надежности устройств вычислительной техники, решаемая в данной диссертационной работе.

Оценка вибрационной надежности базируется на одном из общепринятых подходов, в соответствии с которым считают, что изделие удовлетворяет требованиям по вибрационной надежности, если

при заданных воздействиях реакции конструкции в каждой контрольной точке не превышают допустимых значений в полосах частот рабочего диапазона (рис.1):

$$\max_m \int_{\omega_m - \frac{\Delta\omega_m}{2}}^{\omega_m + \frac{\Delta\omega_m}{2}} (G_{y_n, доп.}(\omega) - G_{y_n}(\omega)) d\omega \leq \varepsilon, \quad (1)$$

где $G_{y_n, доп.}(\omega)$ и $G_{y_n}(\omega)$ – допустимая и измеренная функции спектральной плотности мощности реакций в n -й контрольной точке соответственно, $n = \overline{1, N}$; N – число контрольных точек; $\Delta\omega_m$ – ширина m -й полосы частот рабочего диапазона $\omega_{min} \dots \omega_{max}$; ω_m – центральное значение m -й полосы; $m = \overline{1, M}$, M – число полос; ε – некоторая неотрицательная величина.

При обеспечении вибрационной надежности изделия проводят конструктивные доработки, позволяющие получить такие динамические характеристики конструкции, при которых реакции конструкции на заданные вибрационные воздействия удовлетворяют требованиям надежной эксплуатации (1).

Для описания динамических характеристик конструкций применяют линейные модели систем вида

$$G_y(j\omega)_{\langle N \rangle} = A(j\omega)_{\{NL\}} G_x(j\omega)_{\langle L \rangle}, \quad (2)$$

где $G_x(j\omega)_{\langle L \rangle}$, $G_y(j\omega)_{\langle N \rangle}$ – векторы комплексных спектров воздействий и реакций соответственно; $G_x(j\omega)_l$ – комплексный спектр воздействия в l -й контрольной точке, $l = \overline{1, L}$; L – число входов системы; $G_y(j\omega)_n$ – комплексный спектр реакции в n -й контрольной точке, $n = \overline{1, N}$; N – число выходов системы; $A(j\omega)_{\{NL\}}$ – матрица комплексных передаточных функций системы; $A(j\omega)_{nl}$ – элемент матрицы $A(j\omega)_{\{NL\}}$; ω – частота.

Для осуществления конструктивных доработок изделия необходимы сведения о динамических характеристиках конструктивных элементах. Однако матрица $A(j\omega)_{[NL]}$ описывает динамические характеристики всей конструкции в целом, в связи с чем информация о динамических характеристиках конструктивных элементах содержится в ней в неявной форме и не доступна, что затрудняет отработку вибрационной надежности изделия. Поэтому возникает задача описания и определения динамических характеристик конструктивных элементов.

Конструкции устройств вычислительной техники представляют собой, как правило, конструкции каркасного типа, в которых конструктивные элементы (стойки, стержни и др.) можно выделить естественным образом. В связи с этим в настоящей работе под конструктивными элементами понимают относительно протяженные части конструкции, динамические характеристики которых описывают парами комплексных передаточных функций $C_{nv}(j\omega)$, $C_m(j\omega)$, образующих матрицу $C_{[NN]}(j\omega)$, где $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, N}$.

С позиций теории линейных преобразований матрица $A(j\omega)_{[ML]}$ является матрицей оператора A , определяющего линейное преобразование комплексного пространства входных спектров G_x в комплексное пространство выходных спектров G_y :

$$G_y = AG_x. \quad (3)$$

Задача исследований заключается в отыскании для данных комплексных пространств G_x и G_y операторов H и C , причем матрицей оператора C является матрица $C_{[NN]}(j\omega)$, при которых линейные преобразования

$$G_y = CHG_x \quad (4)$$

и (3) эквивалентны.

Решение задачи исследований основано на решении частных задач, заключающихся в разработке:

- моделей конструкции, учитывающих динамические характеристики конструктивных элементов;
- экспериментально-расчетных методов определения динамических характеристик конструктивных элементов;
- комплекса технических средств для реализации этих методов;

а также на решении частной задачи, заключающейся в проведении исследований особенностей применения экспериментально-расчетных методов определения динамических характеристик конструктивных элементов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Во второй главе для описания динамических характеристик конструктивных элементов предложены модели на основе частных и обобщенных функциональных элементов, получены соотношения, устанавливающие взаимосвязь между ними.

Сущность модели на основе частных функциональных элементов заключается в том, что распространение сигналов в системе от входов к выходам про-

исходит только по частным функциональным элементам, которые соответствуют элементам конструктивным. Каждый lv -й частный функциональный элемент определяется парой комплексных передаточных функций $C_{nv}(j\omega)$ и $C_{vm}(j\omega)$, описывающих динамические характеристики lv -го конструктивного элемента, расположенного между n -м и v -м узлами соединения конструктивных элементов, при отсутствии колебаний в других узлах.

В модели на основе обобщенных функциональных элементов распространение сигналов в системе от входов к выходам также происходит только по обобщенным функциональным элементам. Каждый lv -й обобщенный функциональный элемент определяется парой комплексных передаточных функций $K_{nv}(j\omega)$ и $K_{vm}(j\omega)$, описывающих динамические характеристики конструкции между n -м и v -м узлами соединения конструктивных элементов при распространении колебаний по всем конструктивным элементам и отсутствии воздействий в других узлах.

Уравнения модели на основе частных функциональных элементов при дискретизации спектров и передаточных функций имеют вид

$$\dot{G}_{y_{mv}} = \dot{C}_{x_{ml}} \dot{G}_{x_{ml}}|_{l=n} + \sum_{\nu=1, \nu \neq n}^N \dot{C}_{m\nu\nu} \dot{G}_{y_{m\nu}}, \quad (5)$$

где $\dot{G}_{x_{ml}}|_{l=n} = G_{x_l}(j\omega_m)|_{l=n}$ и $\dot{G}_{y_{mv}} = G_{y_n}(j\omega_m)$ - значения l -го входного и n -го выходного комплексных спектров в m -м частотном отсчете соответственно, причем входным сигналам соответствуют сигналы, действующие на входах вибровозбудителей; l -му входу и n -му выходу системы соответствует один и тот же узел соединения конструктивных элементов, $\dot{C}_{m\nu\nu} = C_{n\nu}(j\omega_m)$ - значение комплексной передаточной функции lv -го частного функционального элемента в m -м частотном отсчете; $\dot{C}_{x_{ml}}|_{l=n} = C_{x_l}(j\omega_m)|_{l=n}$ - значение в m -м частотном отсчете комплексной передаточной функции, определяющей динамические характеристики вибровозбудителя в узле воздействия; $l = \overline{1, L}$, $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$.

В соответствии с определением обобщенного функционального элемента

$$\dot{K}_{m\nu\nu} = K_{n\nu}(j\omega_m) = \frac{\dot{G}_{y_{mn}}}{\dot{G}_{x_{ml}}} \Big|_{\dot{G}_{x_{ml}} = 0, \lambda \neq l = \nu}, \quad (6)$$

где $\lambda = \overline{1, L}$.

Выражения (5) и (6) свидетельствуют о сложном характере зависимости

$$\dot{K}_{m\nu\nu} = f(\dot{C}_{x_{m1}}, \dots, \dot{C}_{x_{ml}}, \dots, \dot{C}_{x_{mL}}, \dot{C}_{m12}, \dots, \dot{C}_{m\nu\nu}, \dots, \dot{C}_{mN, N-1}). \quad (7)$$

В результате анализа моделей на основе частных и обобщенных функциональных элементов показано, что

$$\dot{K} = \dot{C}'^{-1}, \quad (8)$$

где $\dot{K} = (\dot{K}_{\langle M \rangle})_{\langle ML \rangle}$ - матрица комплексных передаточных функций обобщенных функциональных элементов; $L = N$; $\dot{C}' = (\dot{C}'_{\langle M \rangle})_{\langle LN \rangle}$ - приведенная матрица

комплексных передаточных функций частных функциональных элементов; \dot{C}'^{-1} - матрица, обратная к матрице \dot{C}' .

Элементы матрицы \dot{C} комплексных передаточных функций частных функциональных элементов равны

$$\dot{C}_{mnv} = \begin{cases} 1, & n = v, \\ -\frac{\dot{C}'_{mln}}{\dot{C}'_{mml}} & n \neq v, v = l; \end{cases} \text{ причём } \dot{C}_{x_{ml}} = \frac{1}{\dot{C}'_{mml}}, l = n. \quad (9)$$

По определению обобщенных функциональных элементов матрица $(\dot{K}_{<M>})_{\{NL\}}$ описывает динамические характеристики всей конструкции, поэтому если в выражении (2) входам и выходам системы с одинаковыми номерами соответствуют одни и те же узлы соединения конструктивных элементов, то

$$(\dot{K}_{<M>})_{\{NL\}} = (\dot{A}_{<M>})_{\{NL\}} \quad (10)$$

и

$$\dot{A} = \dot{C}'^{-1}, \quad (11)$$

где $\dot{A} = (\dot{A}_{<M>})_{\{NL\}}$.

Таким образом, найден оператор \mathbf{H} , элементы матрицы которого равны

$$\dot{H}_{mvl} = \begin{cases} \frac{1}{\dot{A}_{mvv}^{-1}} \sum_{l=1}^L \sum_{\lambda=1}^L \dot{A}_{mvl} \dot{A}_{m\lambda l}, & v = l; \\ -\frac{1}{\dot{A}_{mvv}^{-1}} \sum_{l=1}^L \sum_{\lambda=1}^L \dot{A}_{mvl} \dot{A}_{m\lambda l}, & v \neq l, \end{cases} \quad (12)$$

где \dot{A}_{mvv}^{-1} - элемент матрицы \dot{A}^{-1} , обратной к матрице \dot{A} .

При этом преобразование (4) имеет вид

$$\dot{G}_{y_{mi}} = \sum_{v=1}^N \sum_{l=1}^L \dot{C}_{mvv} \dot{H}_{mvl} \dot{G}_{x_{ml}}, \quad (13)$$

Выражения (8) - (11) устанавливают взаимосвязь между динамическими характеристиками всей конструкции и динамическими характеристиками конструктивных элементов, что доказывает первое научное положение, выносимое на защиту.

На основе полученных результатов проведен анализ возможностей экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов. Анализ показывает, что выражение (11), как правило, не позволяет вычислить динамические характеристики конструктивных элементов, так как при проведении исследований; основанных на традиционных экспериментальных методах, определяют лишь динамические характеристики конструкции при распространении колебаний в направлении от точек крепления к точкам контроля, в связи с чем определение всех элементов матрицы \mathbf{A} невозможно. Поэтому возникает задача определения динамических характеристик конструктивных элементов непосредственно по результатам измерений параметров реакций конструкции на приложенные тестовые воздействия.

Эта задача требует определения N^2 неизвестных комплексных передаточных функций частных функциональных элементов. Однако N узлов соединения конструктивных элементов позволяют в результате одного эксперимента получить лишь N различных уравнений (5). В связи с этим установлена необходимость проведения N экспериментов, при которых в узлах соединения конструктивных элементов формируют тестовые воздействия, измеряют параметры реакций, по измеренным параметрам получают систему N^2 линейно независимых уравнений (5) и решают ее относительно комплексных передаточных функций частных функциональных элементов, полностью описывающих динамические характеристики конструктивных элементов.

При формировании тестовых воздействий источники вибровозбуждения оказывают влияние на динамические свойства конструкций. В связи с этим разработаны экспериментально-расчетные методы определения динамических конструктивных элементов при формировании тестовых воздействий с помощью различных источников вибровозбуждения.

Формирование тестовых воздействий с помощью источников силового вибровозбуждения. Решение получаемой по результатам измерений системы уравнений имеет вид

$$(\dot{C}'_{\langle M \rangle})_{\{LN\}} = (\dot{G}'_{x\langle M \rangle})_{\{LP\}} (\dot{G}'_{y\langle M \rangle})_{\{NP\}}^{-1}, \quad (14)$$

где $(\dot{G}'_{x\langle M \rangle})_{\{LP\}}$ и $(\dot{G}'_{y\langle M \rangle})_{\{NP\}}$ - матрицы входных и выходных спектров соответственно, столбцы которых $(\dot{G}'_{x\langle M \rangle})_{\langle L \rangle, p}$ и $(\dot{G}'_{y\langle M \rangle})_{\langle N \rangle, p}$ соответствуют результатам p -го эксперимента, $p = \overline{1, P}$, $L = N = P$.

Формирование тестовых воздействий при поочередном подключении источников кинематического вибровозбуждения к каждому узлу соединения конструктивных элементов. Матрица \dot{C}' , представленная в виде вектора

$$(\dot{C}'_{\langle N \rangle})_{\langle Q \rangle} = [\dot{C}'_{11}, \dot{C}'_{12}, \dots, \dot{C}'_{1N}, \dot{C}'_{21}, \dot{C}'_{22}, \dots, \dot{C}'_{2N}, \dots, \dot{C}'_{Q1}, \dot{C}'_{Q2}, \dots, \dot{C}'_{QN}]^T, \quad (15)$$

равна

$$((\dot{C}'_{\langle M \rangle})_{\langle N \rangle})_{\langle Q \rangle} = ((\dot{G}'_{y\langle M \rangle})_{\{LN\}})_{\{PQ\}}^{-1} ((\dot{G}'_{x\langle M \rangle})_{\langle L \rangle})_{\langle P \rangle}, \quad (16)$$

где $q = \overline{1, Q}$, $L = N = P = Q$.

$$\dot{G}'_{x_{mlp}} = \begin{cases} 0, & l \neq p; \\ \dot{G}'_{x_{ml}}, & l = p; \end{cases} \quad (17)$$

$$\dot{G}'_{y_{mnpq}} = \begin{cases} 0, & p \neq q; \\ 0, & p = q, n \neq q; \\ \dot{G}'_{y_{mnp}}, & p = q, n = q. \end{cases} \quad (18)$$

$$\dot{C}'_{mnv} = \begin{cases} 1, & n = v, \\ -\frac{\dot{C}'_{mnq}}{\dot{C}'_{mnn}}, & n \neq v, q = v; \end{cases} \quad \dot{C}'_{x_{ml}} = \frac{1}{\dot{C}'_{mnn}}, l = n. \quad (19)$$

Разработанные методы основаны на формировании тестовых воздействий во всех узлах соединения конструктивных элементов. Однако при исследовании динамических характеристик широкого класса изделий это условие невыполнимо по конструктивным соображениям. Поэтому проведен анализ возможностей экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов в тех случаях, когда не все узлы их соединения доступны для формирования в них тестовых воздействий. Установлено, что если каждый из узлов воздействия связан конструктивным элементом лишь с одним из недоступных узлов соединения конструктивных элементов, то динамические характеристики конструктивных элементов определяют с помощью формулы (14), причем в качестве элементов матрицы входных спектров $(G_{x<M>})_{[LP]}$ принимают соответствующие значения комплексных спектров реакций, измеренных в узлах воздействий.

В третьей главе рассмотрены особенности экспериментально-расчетных методов определения динамических характеристик конструктивных элементов с позиций их практической реализации. Анализ показывает, что основные особенности этих методов связаны с тем, что формирование тестовых воздействий необходимо осуществлять в нескольких точках конструкции, а измерение сигналов – с учетом фазовых соотношений.

Для реализации этих методов предложены варианты структурно-функциональных схем аппаратно-программных виброизмерительных комплексов для определения динамических характеристик конструктивных элементов при моно- и полигармонических тестовых воздействиях, а также при воздействиях ударом. Однако эти технические решения не позволяют их использовать при виброиспытаниях изделий с имитацией условий эксплуатации, в связи с чем проведены исследования возможностей экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов при случайных тестовых воздействиях.

При описании случайных тестовых воздействий с помощью спектрально-корреляционной теории сигналов система уравнений линейной модели имеет вид

$$(C'_{<M>})_{[LN]}(G_{y<M>})_{[NL]} = (G_{x<M>})_{[LL]}, \quad (20)$$

где $(G_{x<M>})_{[LL]}$ – матрица собственных и взаимных спектральных плотностей входных сигналов; $(G_{y<M>})_{[NL]}$ – матрица взаимных спектральных плотностей входных и выходных сигналов в m -й полосе частот; $m = \overline{1, M}$, $\lambda = \overline{1, L}$, $l = \overline{1, L}$, $n = \overline{1, N}$.

$$G_{m\lambda, x_l} = \frac{1}{\Delta\omega_m} \int_{\omega_m - \frac{\Delta\omega_m}{2}}^{\omega_m + \frac{\Delta\omega_m}{2}} G_{x_l, x_l}(j\omega) d\omega; \quad G_{m\lambda, y_n} = \frac{1}{\Delta\omega_m} \int_{\omega_m - \frac{\Delta\omega_m}{2}}^{\omega_m + \frac{\Delta\omega_m}{2}} G_{x_l, y_n}(j\omega) d\omega, \quad (21)$$

где $G_{m_l x_l}$ и $G_{m_l y_n}$ – элементы матриц $(G_{x \times M})_{[LL]}$ и $(G_{y \times M})_{[NL]}$ соответственно; $G_{x_l x_l}(j\omega)$ – функция собственной (при $l = \lambda$) или взаимной (при $l \neq \lambda$) спектральной плотности l -го и λ -го входных сигналов; $G_{x_l y_n}(j\omega)$ – функция взаимной спектральной плотности l -го входного и n -го выходного сигналов.

Решение системы (20) имеет вид

$$(C'_{<M>})_{[LN]} = (G_{x \times M})_{[LL]} (G_{y \times M})_{[NL]}^{-1} \quad (22)$$

Значения комплексных передаточных функций частных функциональных элементов в m -й полосе частот определяют по формуле (9), причем

$$C_{mnv} = \frac{1}{\Delta\omega_m} \int_{\omega_m - \frac{\Delta\omega_m}{2}}^{\omega_m + \frac{\Delta\omega_m}{2}} C_{nv}(j\omega) d\omega \quad (23)$$

На основе полученных результатов разработан экспериментально-расчетный метод, заключающийся в том, что в узлах соединения конструктивных элементов формируют случайные тестовые воздействия, в этих узлах измеряют собственные и взаимные спектральные плотности воздействий и взаимные спектральные плотности реакций и воздействий, по которым получают матрицы $(G_{x \times M})_{[LL]}$ и $(G_{y \times M})_{[NL]}$ и определяют с помощью формул (22) и (9) комплексные передаточные функции частных функциональных элементов, полностью описывающие динамические характеристики конструктивных элементов.

Для реализации этого метода разработан аппаратно-программный виброизмерительный комплекс на основе нескольких вибровозбудителей, пример использования которого при определении динамических характеристик

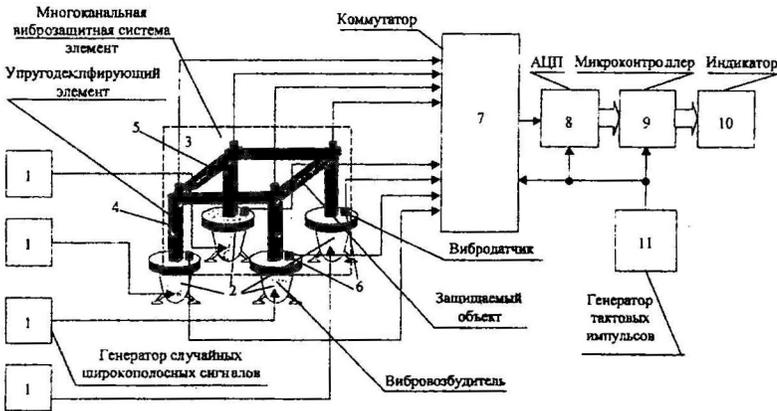


Рис. 2. Виброизмерительный комплекс для определения динамических характеристик элементов конструкции многоканальной виброзащитной системы

конструктивных элементов многоканальной виброзащитной системы, состоящей из защищаемого объекта и присоединенных к нему упругодемпфирующих элементов, показан на рис. 2.

Для обеспечения вибрационной надежности малогабаритных изделий разработан экспериментально-расчетный метод определения динамических характеристик конструктивных элементов с помощью одного вибровозбудителя, в основе которого лежит одноточечный метод формирования многоточечной скалярной вибрации, предложенный Я.С. Урецким.

Таким образом, разработаны методы экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов на основе применения детерминированных и случайных тестовых воздействий, а также комплекс аппаратно-программных технических средств для их реализации, что доказывает второе и третье научные положения, выносимые на защиту.

В четвертой главе проведен анализ влияния дестабилизирующих факторов на качество определения динамических характеристик конструктивных элементов, в результате которого получена оценка общей относительной погрешности определения приведенной матрицы комплексных передаточных функций в каждой полосе частот:

$$\delta_{\Sigma C'} \leq \frac{N_{G_y} \left(\delta_{mG_x} + \frac{N_C}{1 - N_C \delta_{eC}} (\delta_{eC} + \delta_{eG_x}) + \delta_{mG_x} \right)}{1 - N_{G_y} \left(\frac{N_C}{1 - N_C \delta_{eC}} (\delta_{eC} + \delta_{eG_x}) + \delta_{mG_y} \right)}, \quad (24)$$

где δ_{mG_x} , δ_{mG_y} – относительные погрешности измерения матриц \dot{G}_x и \dot{G}_y , обусловленные шумами аппаратуры, $\delta_{eC'}$ – относительное возмущение матрицы \dot{C}' , обусловленное нежесткой заделкой изделия; δ_{eG_x} – относительная погрешность формирования матрицы \dot{G}_x ; $N_{G_y} = \|\dot{G}_y\| \|\dot{G}_y^{-1}\|$ и $N_C = \|\dot{C}'\| \|\dot{C}'^{-1}\|$ – числа обусловленности матриц \dot{G}_y и \dot{C}' соответственно.

На основе методов имитационного моделирования проведены исследования особенностей применения экспериментально-расчетных методов определения динамических характеристик конструктивных элементов при воздействии дестабилизирующих факторов.

С помощью инструментально-графической системы LabView и программного обеспечения MathCad разработана модель конструкции, в качестве которой использована линейная система, образованная соединением нескольких пассивных четырехполюсников. В процессе экспериментальных исследований комплексные передаточные функции этих четырехполюсников вычислялись при моделировании входных и выходных сигналов, случайных широкополосных помех, имитирующих шумы аппаратуры, а также при моделировании возмущений матрицы комплексных передаточных функций, имитирующих нежесткую заделку изделия.

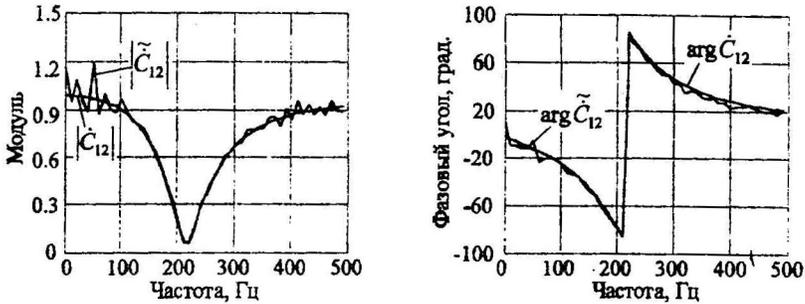


Рис. 3. Амплитудные и фазовые передаточные функции одного из четырехполосников модели

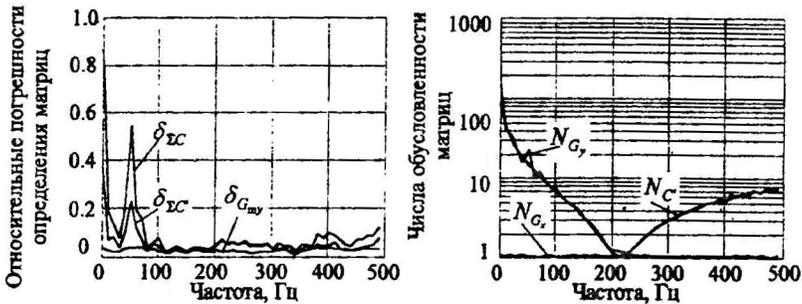


Рис. 4. Частотные характеристики чисел обусловленности и относительных погрешностей определения матриц \tilde{C} , \tilde{C}' , \tilde{G}_r , \tilde{G}_y

Как показывает анализ результатов этих исследований, они хорошо согласуются с полученными в диссертационной работе соотношениями, что является дополнительным подтверждением достоверности последних. Некоторые из результатов численных экспериментов представлены на графиках (рис. 3, 4).

Рассмотрены примеры использования разработанного виброизмерительного комплекса для определения динамических характеристик конструктивных элементов различных устройств вычислительной техники.

В Заключение приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе, показывающие, что в диссертационной работе решены задачи, заключающиеся в разработке моделей, учитывающих динамические свойства конструктивных элементов, экспериментально-расчетных методов определения динамических характеристик конструктивных элементов и технических средств для их реализации, а также решена задача, заключающаяся в проведении исследований особенностей применения разработанных методов при воздействии дестабилизирующих факторов.

Приложения содержат листинги программ для имитационного моделирования, а также акты об использовании результатов диссертационной работы, подтверждающие их практическую значимость.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для описания конструкций при экспериментально-расчетных исследованиях динамических характеристик конструктивных элементов предложены модели на основе частных и обобщенных функциональных элементов. Показано, что приведенная матрица комплексных передаточных функций частных функциональных элементов, описывающая динамические характеристики конструктивных элементов, является обратной к матрице комплексных передаточных функций обобщенных функциональных элементов, описывающей динамические характеристики всей конструкции. Это позволяет по известным динамическим характеристикам конструкции вычислить динамические характеристики конструктивных элементов, что значительно расширяет возможности анализа динамических свойств изделий.

2. Исследованы возможности экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов при формировании детерминированных тестовых воздействий. Установлена необходимость проведения серии экспериментов, сущность которых состоит в том, что в узлах соединения конструктивных элементов формируют тестовые воздействия, в этих узлах измеряют параметры реакций конструкции, по которым определяют комплексные передаточные функции частных функциональных элементов, описывающие динамические характеристики конструктивных элементов. На основе полученных результатов разработаны экспериментально-расчетные методы определения динамических характеристик конструктивных элементов при различных тестовых воздействиях и виброизмерительный комплекс для их реализации. Это позволяет при обработке вибрационной надежности устройств вычислительной техники выработать важные рекомендации по целенаправленному изменению свойств их конструкции.

3. Проведен анализ возможностей экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов при виброиспытаниях с имитацией условий эксплуатации. Показана целесообразность применения одноточечного и многоточечного методов возбуждения спектров случайной вибрации, на основе которых в узлах соединения конструктивных элементов формируют случайные тестовые воздействия, в этих узлах измеряют собственные и взаимные спектральные плотности воздействий и взаимные спектральные плотности реакций и воздействий, по которым определяют комплексные передаточные функции частных функциональных элементов, описывающие динамические характеристики конструктивных элементов. На базе этих методов разработан виброизмерительный комплекс для экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов с помощью одного или нескольких вибровозбудителей. Это позволяет при виброиспытаниях изделий с имитацией условий эксплуатации проводить исследования их динамических характеристик, что открывает новые пути для повышения вибрационной надежности устройств вычислительной техники.

4. Исследовано влияние дестабилизирующих факторов на качество экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструк-

тивных элементов. Установлено, что общая относительная погрешность определения приведенной матрицы комплексных передаточных функций в каждой полосе частот определяется дробно-рациональной зависимостью от значений чисел обусловленности этой матрицы и матрицы выходных спектров, относительных погрешностей формирования и измерения матриц спектров входных и выходных сигналов, а также относительного возмущения матрицы комплексных передаточных функций. Это позволяет прогнозировать качество определения динамических характеристик конструктивных элементов и выработать рекомендации для его повышения.

Таким образом, из изложенного следует, что цель диссертационной работы, заключающаяся в повышении вибрационной надежности устройств вычислительной техники за счет применения экспериментально-расчетных методов определения динамических характеристик конструктивных элементов, достигнута.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях.

1. *Урецкий Я.С., Купершмидт П.В., Овчинников А.Л.* Определение динамических характеристик элементов конструкции в задачах проектирования и диагностики машин и оборудования. /Тезисы докладов 15-й Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика», Москва, 1999, т. 1, с. 220.

2. *Урецкий Я.С., Купершмидт П.В.* Снижение интенсивности вибрации машин и оборудования на основе экспериментально-расчетного определения динамических характеристик элементов их конструкции. / Труды 4-й Всероссийской научно-практической конференции «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности», Санкт-Петербург, 1999, 317-318.

3. *Урецкий Я.С., Купершмидт П.В., Саид А. Али.* Определение динамических характеристик элементов конструкции машин и оборудования на основе экспериментально-расчетного метода. / Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции «Вибрации в технике», Курск, 1999, с. 54-56.

4. *Урецкий Я.С., Купершмидт П.В.* Обеспечение качества РЭА на основе применения экспериментально-расчетного метода определения динамических характеристик конструктивных элементов. / Сборник трудов «Технология, инновация, качество», Казань, КНИАТ, 1999.

5. *Урецкий Я.С., Купершмидт П.В., Саид А. Али.* Особенности определения динамических характеристик элементов конструкций при отработке вибрационной надежности устройств аэрокосмической техники. /Труды Международного симпозиума «Надежность и качество-99», Пенза, 1999, с. 365-366.

6. *Урецкий Я. С., Купершмидт П. В.* Особенности разработки программно-аппаратного комплекса для исследования динамических свойств конструкций узлов летательных аппаратов в задачах обеспечения их вибрационной надежности. / Сборник трудов научно-технической конференции «AVIA-99», Воронеж, 1999, с. 125-132.

7. *Урецкий Я.С., Купершмидт П.В.* Новый метод обработки виброустойчивости РЭА на основе экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов. / Тезисы докладов Юбилейной научно-технической конференции «В ХХI век с новыми принципами построения аппаратуры», «Кварц», Н. Новгород, 1999, с. 102-104.

8. *Купершмидт П.В.* Экспериментально-расчетный метод определения динамических характеристик конструктивных элементов приборов и устройств аэрокосмической техники. / Материалы докладов Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Приборостроение в аэрокосмической технике», Арзамас, 1999, с. 210-212.

9. *Замирович В.В., Купершмидт П.В., Урецкий Я.С.* Экспериментально-расчетный метод определения динамических характеристик конструктивных элементов узлов транспортных средств и вибродиагностический комплекс для его реализации. / Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы транспорта», Ульяновск, 1999, с. 145.

10. *Купершмидт П.В., Саид А. Али, Урецкий Я.С.* Особенности экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов узлов транспортных средств с учетом влияния оснастки для их крепления на вибростенде. / Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы транспорта», Ульяновск, 1999, с. 150.

11. *Урецкий Я.С., Купершмидт П.В.* Конструирование виброшумоустойчивых узлов автомобилей на основе экспериментально-расчетного определения динамических характеристик конструктивных элементов. / Труды I Международной научно-практической конференции «Автомобиль и техносфера», Казань, 1999, с. 69-74.

12. *Купершмидт П.В., Шарипов Р.Р.* Особенности определения динамических характеристик элементов конструкции устройств РЭА экспериментально-расчетным методом. / Тезисы докладов Всероссийской студенческой научной конференции «Королевские чтения», Самара, 1999, с. 127.

13. *Купершмидт П. В., Мязунин П.А., Савченко Е.Н., Хайруллин Л.В., Шуянов Ал.А., Шуянов Ан.А.* Программно-аппаратный виброиспытательный комплекс в задачах обеспечения вибрационной надежности устройств РЭА. / Тезисы докладов Всероссийской студенческой научной конференции «Королевские чтения», Самара, 1999, с. 125-126.

14. *Власова Е. В., Купершмидт П.В.* Оценка качества определения динамических характеристик элементов конструкции устройств РЭА экспериментально-расчетным методом. / Тезисы докладов Всероссийской студенческой научной конференции «Королевские чтения», Самара, 1999, с.126-127.

15. *Урецкий Я.С., Купершмидт П.В., Шарипов Р.Р.* Определение динамических характеристик элементов конструкции в задачах повышения надежности узлов и агрегатов комплексов РАВ. / Труды XVI-й военно-технической конференции «Вопросы совершенствования боевого применения и разработок артиллерийского вооружения и военной техники». Казань, КВАКИУ, 1999, с. 86-87.

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Бумага газетная. Печать офсетная.
Печ. л. 1,0. Усл. печ. л. 0,93 Усл. кр.-отт. 0,98 Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 100. Заказ А11.

Типография Издательства
Казанского государственного технического университета
420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

200