

СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ И КОМПОНЕНТОВ

Аннотация: Разработаны вибромеханические и тепловые математические модели электронных аппаратов, которые позволяют учитывать свойства и взаимодействие составляющих типовых элементов замены и моделируют виброустойчивость печатных плат и компонентов в условиях технологического процесса их производства.

Ключевые слова: моделирование, внутреннее трение, процесс производства, электронный аппарат, свободные и вынужденные колебания, помехоустойчивость, температурные перегрузки, эффективность управления.

Введение

Исследования, проводимые в отрасли производства электронных аппаратов (ЭА), показали наметившиеся тенденции глобализации взгляда на проблему повышения качества электронных средств, системности в решении проблемы повышения надежности за счет вариации техпроцессов изготовления электронных аппаратов и интеграции производства компьютерной техники по обеспечению связи моделирования с производством. В рассматриваемых системах моделирования электронных аппаратов недостаточное внимание уделяется вопросам анализа надежности электронных аппаратов с учетом влияния системотехнических, компоновочных, конструкторских, тепловых и прочих факторов. В связи с этим, актуальной является проблема развития теории автоматизации техпроцесса производства электронных аппаратов, связанная с наметившимися тенденциями в ее современном видении [1,3]

Основное содержание и результаты работы

Целью работы является разработка метода синтеза электронных аппаратов на основании итерационных алгоритмов, который обеспечивает рациональность вибрационных, механических, компоновочных, тепловых и пр. показателей конструкций в детерминированной постановке задачи и оптимальность проектирования в стохастической постановке задачи, а также позволяет автоматизировать процесс производства электронных аппаратов.

К задачам исследований относятся:

- исследование влияния вибрационных, механических, компоновочных, тепловых факторов на функционирование электрорадиоэлементов (ЭРЭ), печатных плат (ПП), типовых элементов замены (ТЭЗ), блоков электронных аппаратов;

- исследование и создание критерия компоновки электронного аппарата и его составляющих, интегрирующего, анализирующего и оптимизирующего вибрационные, механические, компоновочные и тепловые характеристики электронного аппарата;

- построение математических моделей ЭРЭ, ПП, ТЭЭ и блоков ЭА при различных типах внешних воздействий и их взаимодействия для их анализа и методов оптимизации их синтеза в произвольной постановке при вибрационных, механических, компоновочных и тепловых воздействиях;

- создание итерационных алгоритмов решения задачи синтеза электронного аппарата с оптимальными параметрами в детерминированной и стохастической постановке процесса автоматизации производства электронного аппарата;

- исследование особенностей моделей описания технологических процессов производства электронных аппаратов, которые позволяют осуществить поиск рациональных параметров электронного аппарата за минимальное время, наименьшее количество итераций, с минимальными потерями при производстве;

- проведение экспериментальных исследований для оценки достоверности предлагаемого метода, разработка рекомендаций и предложений по модернизации существующих техпроцессов производства электронных аппаратов.

Для решения первой задачи необходимо математическое описание иерархии электронного аппарата с точки зрения анализа влияния вибрационных [2, 4], механических, компоновочных и тепловых факторов на его функционирование, и программа моделирования [6, 8] и анализа результатов моделирования. Отметим наличие многочисленных вариаций в самой структуре элементов ЭА, так и в их сочетаниях. Особенности конструкций учтены в ДСТУ и ГОСТ.

До настоящего времени для иерархии ЭА не сформулирован общий критерий компоновки элементов, позволяющий учесть механические (вибрационные, ударные, резонансные явления и эффекты, возникающие в ходе эксплуатации аппаратуры) воздействия, анализирующий схемотехнические, структурорские, геометрические, тепловые и др. факторы и позволяющий интеллектуально идентифицировать задачу подстройки под условия эксплуатации ЭА, предвидеть перегрузки и прогнозировать поведение исследуемого объекта во времени. Поэтому разработка и исследование критерия компоновки электронного аппарата является актуальной и одновременно очень сложной задачей.

Для построения математической модели вынужденных колебаний ПП использована теория малых колебаний тонких ортотропных пластин. При построении математической модели учитывается внутреннее трение в ПП по гипотезе Кельвина-Фойхта.

Прогиб ПП удовлетворяет уравнению:

$$\varpi(\xi, \eta) = a^2 \tag{1}$$

где $\nabla_1^4 = \bar{D}_1 \frac{\partial^4}{\partial \xi^4} + 2\bar{D}_3 \frac{\partial^4}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + \bar{D}_2 \frac{\partial^4}{\partial \eta^4}$;

$\xi = x/a$; $\eta = y/b$ – безразмерные координаты;

$$\bar{D}_1 = \frac{\bar{E}_1 h^3}{12(1 - \mu_1 \mu_2)}; \bar{D}_2 = \frac{\bar{E}_2 h^3}{12(1 - \mu_1 \mu_2)}; \bar{D}_3 = \frac{\bar{E}_1 \mu_2 + 2\bar{G}(1 - \mu_1 \mu_2)}{12(1 - \mu_1 \mu_2)};$$

$\bar{Q}(\xi, \eta, t)$ – интенсивность внешней нагрузки;

\bar{E}_1, \bar{E}_2 – комплексные модули упругости по главным направлениям x и y , соответственно;

\bar{G} – комплексный модуль сдвига;

μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона;

ρ, h, ψ – плотность, толщина и коэффициент механических потерь ПП.

Функции прогиба и интенсивность внешней нагрузки представим в комплексной форме:

$$W(\xi, \eta, t) = \varpi(\xi, \eta)e^{i\omega t}; \quad Q(\xi, \eta, t) = \bar{q}(\xi, \eta)e^{i\omega t} \tag{2}$$

При подстановке (2) в (1), получаем:

$$\nabla^4 \varpi - \bar{k}^2 \omega^2 \varpi = \frac{a^4}{D} \bar{q} \tag{3}$$

Решение уравнения (3) ищем с помощью функций влияния

$\bar{G}(\xi, \eta, \hat{\xi}, \hat{\eta})$:

$$\bar{w}(\xi, \eta) = a^2 \int_0^1 \int_0^\gamma \bar{q}(\hat{\xi}, \hat{\eta}) \bar{G}(\xi, \eta, \hat{\xi}, \hat{\eta}) d\hat{\xi} d\hat{\eta}, \tag{4}$$

где $\gamma = b/a$.

Функция влияния должна удовлетворять граничным условиям, описывающим способы закрепления ПП и дифференциальному уравнению:

$$\nabla_1^4 \bar{G} - \rho h a^4 \omega^2 \bar{G} = a^2 \delta(\xi - \hat{\xi}) \cdot \delta(\eta - \hat{\eta}), \tag{5}$$

где $\delta(\xi - \hat{\xi}), \delta(\eta - \hat{\eta})$ – дельта-функции Дирака.

Решение (5) ищем в виде:

$$\bar{G}(\xi, \eta, \hat{\xi}, \hat{\eta}) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{Y}_n(\eta, \hat{\xi}, \hat{\eta}) \cdot \sin n\pi\xi. \tag{6}$$

Подставив (6) в (5), получаем:

$$\bar{Y}_n^{(IV)} - 2\pi^2 n^2 \bar{k}_{32} \bar{Y}_n^{(II)} + (\pi^4 n^4 \bar{k}_{12} - \bar{k}^2 \omega^2) \bar{Y}_n = 2 \frac{a^2}{D_2} \cdot \sin n\pi \hat{\xi} \cdot \delta(\eta - \hat{\eta}) \tag{7}$$

где $\bar{k}_{32} = \bar{D}_3/\bar{D}_2$; $\bar{k}_{12} = \bar{D}_1/\bar{D}_2$; $\bar{k}^2 = a^4 \rho h / \bar{D}_2$.

Общее решение уравнения (7) ищем в виде:

$$\bar{Y}_n(\eta, \hat{\xi}, \hat{\eta}) = \sum_{j=0}^3 \overline{C_{jn} Y_{jn}}(\eta) + \bar{\Phi}_n(\eta, \hat{\xi}, \hat{\eta}), \quad (8)$$

где \bar{C}_{jn} – произвольные постоянные, определяемые из граничных условий по η ; $\bar{\Phi}_n(\eta, \hat{\xi}, \hat{\eta})$ – частное решение уравнения (7).

С помощью операционного исчисления получаем:

$$\bar{\Phi}_n(\eta, \hat{\xi}, \hat{\eta}) = \frac{2a^2}{D_2} \sin \pi n \hat{\xi} \cdot \bar{Y}_{3n}(\eta - \hat{\eta}) \cdot \sigma(\eta - \hat{\eta}) \quad (9)$$

где $\sigma(\eta - \hat{\eta})$ - единичная функция.

Подставляя (9) в (6), будем иметь:

$$\bar{G}(\xi, \eta, \hat{\xi}, \hat{\eta}) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{j=0}^3 \bar{C}_{jn} \bar{Y}_{jn}(\eta) + \bar{\Phi}_n(\eta, \hat{\xi}, \hat{\eta}) \right] \sin \pi n \xi \quad (10)$$

В работах [5, 7] дано объяснение и математическое описание эффекта резонансного взаимодействия ЭРЭ с ПП, возникающего в процессе функционирования ЭА. Для объяснения эффекта умножения частоты разработана механическая модель ЭРЭ, учитывающая нелинейность упругой связи ЭРЭ с печатной платой. Эта модель описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + f(x) = u_0 \omega^2 \sin \omega t, \quad (11)$$

где x – координата вертикальных колебаний ЭРЭ, $f(x)$ – нелинейная упругая характеристика выводов ЭРЭ, отнесенная к массе m ; $\omega = 2\pi\nu$ – угловая частота вынуждающего воздействия (рад/с); u_0 – амплитуда колебаний планшайбы вибростенда.

Для описания колебаний конструкции ЭА (объекта виброзащиты), установленного на основание посредством системы виброизоляции, воспользуемся выражением для кинетической энергии твердого тела, которая в общем случае определяется соотношением:

$$W_k = \frac{1}{2} m (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2) + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} J_X \omega_X^2 + J_Y \omega_Y^2 + J_Z \omega_Z^2 \\ -2J_{XY} \omega_X \omega_Y - \\ -2J_{YZ} \omega_Y \omega_Z - 2J_{XZ} \omega_X \omega_Z \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где m – масса тела; J_X, J_Y, J_Z – моменты инерции тела относительно осей X_1, Y_1, Z_1 соответственно; J_{XY}, J_{YZ}, J_{XZ} – центробежные моменты инерции тела относительно системы координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$; – проекции вектора угловой скорости тела на оси X_1, Y_1, Z_1 , соответственно.

Связь между проекциями вектора угловой скорости, обобщенными координатами и обобщенными скоростями \dot{q}_j определяется кинематическими уравнениями Эйлера:

$$\begin{aligned} \omega_X &= \dot{\varphi} + \dot{\psi} \sin \theta; \\ \omega_Y &= \dot{\psi} \cos \theta \cdot \cos \varphi + \dot{\theta} \sin \varphi; \\ \omega_Z &= \dot{\theta} \cos \varphi - \dot{\varphi} \cos \theta \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \quad (13)$$

Подставим (13) в (12) и представим кинетическую энергию в виде квадратичной формы

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 \sum_{l=1}^6 A_{lk} (q_1, q_2, \dots, q_6) \cdot \dot{q}_l \dot{q}_k. \quad (14)$$

Ограничиваясь рассмотрением малых колебаний объекта виброзащиты. Раскладывая коэффициенты инерции A_{lk} в ряд Маклорена по степеням обобщенных координат и сохраняя в этом разложении только члены $a_{lk} = A_{lk}(0, 0, \dots, 0)$, получим выражение

$$w_k = \frac{1}{2} \left(a_{11} \dot{X}^2 + a_{22} \dot{Y}^2 + a_{33} \dot{Z}^2 + a_{44} \dot{\varphi}^2 + a_{55} \dot{\psi}^2 + a_{66} \dot{\theta}^2 + 2a_{45} \dot{\varphi} \dot{\psi} + 2a_{56} \dot{\psi} \dot{\theta} + 2a_{46} \dot{\varphi} \dot{\theta} \right), \quad (15)$$

где обобщенные коэффициенты инерции: $a_{11} = a_{22} = a_{33} = m$; $a_{44} = J_X$; $a_{55} = J_Y$; $a_{66} = J_Z$; $a_{45} = -J_{XY}$; $a_{56} = -J_{YZ}$; $a_{46} = -J_{XZ}$.

Расчет физических характеристик конструктивно-технологических, электрических и магнитных эффектов (частичных емкостей системы проводников, индуктивностей, коэффициентов взаимоиנדукции и активных сопротивлений) производим методами теории электромагнитного поля для физической модели, адекватной реальной конструкции ПП. Такой моделью является слоистая среда с плоскопараллельными границами раздела слоев. Для расчета паразитных емкостей функция Грина находится как решение уравнения Лапласа для потенциала электрического поля в слоистой среде и имеет вид:

$$G = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{\chi=0}^k B_{\chi} (\eta^2 + \tau_{\chi}^2)^{-0.5}, \quad (16)$$

где $\eta = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$; x_0, y_0 — координаты источника электрического поля; x, y — координаты точек пространства, где вычисляется потенциал поля; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; τ_{χ} — константы, зависящие от индекса суммирования χ , коэффициенты B_{χ} рассчитываются через функцию F , определяемую при решении уравнения Лапласа из граничных условий для каждой конкретной конструкции ПП, и несущую информацию о размерах и электрофизических свойствах слоев физической модели.

Тепловая модель двухслойной структуры содержит N тепловых источников, расположенных на поверхности подложки с размерами L_x, L_y . Каждый слой: имеет определенную толщину h_n и h_{n+1} и характеризуется коэффициентами теплопроводности k_n и k_{n+1} . Распределение теплового поля в пределах анализируемой структуры математически описываем следующим выражением:

$$\nabla^2 T(x, y, z, t) - \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial t} T(x, y, z, t) = 0, \quad (17)$$

где $T(x, y, z, t)$ — значение температуры в зависимости от координат и времени; D — термическая диффузия.

Поскольку рассматриваем стационарное тепловое поле, т. е. установившийся тепловой режим, то (17) примет вид

$$\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} = 0. \quad (18)$$

Вторая задача предполагает анализ каждого из факторов и возможностей их вариаций. Вибрационные воздействия связаны с механическими, в частности виброустойчивость является механической характеристикой, ударное воздействие рассматриваем как частный случай вибрационного воздействия, массогабаритные показатели ЭРЭ на ПП приводят к конфликту в расположении двух крупногабаритных ЭРЭ в непосредственной близости к центру ПП, что при вибрационных воздействиях вызывает резонансные явления, сопровождающиеся нарушением целостности ЭРЭ, топологии ПП и растрескиваниями ПП, а неравномерность заполнения монтажного пространства ПП ЭРЭ приводит к перегруженности активного сечения ПП и в местах максимальной плотности совместного прохождения проводников возможны электромагнитные наводки и тепловые перегрузки и, как следствие, нарушение топологии ПП и ее работоспособности. Вибрационные воздействия на блок ЭА приводит к вибрационным воздействиям на ТЭЭ, потом на ПП, а затем на ЭРЭ, что сопровождается резонансными явлениями, вызывающими также нарушения контактов, целостности ЭРЭ, выходу из строя соединений между ТЭЭ и блоком ЭА и т.п. температурные перегрузки вызывают изменения физических и химических свойств в первую очередь электрических контактов, затем механических креплений и электрических и герметических изоляций.

На данном этапе выполнения работы в детерминированной постановке решение задачи синтеза электронного аппарата с оптимальными вибро-тепло-механическими параметрами предполагается путем применения итерационных алгоритмов, поочередно обрабатывающих вначале иерархию составляющих ЭА, потом соответствующей главной группы факторов, соответствующих приоритету, отражающему условия эксплуатации, а затем непосред-

ственно каждого из факторов. Стохастическая постановка решения задачи синтеза электронного аппарата с оптимальными параметрами в плоскости техпроцесса его производства предполагает решение задачи оптимального управления в рамках адаптивной системы по критерию компоновки, связывающему параметры ЭА и его составляющих с параметрами техпроцесса его производства.

Проведя исследование особенностей моделей описания технологического процесса производства электронных аппаратов, следует отметить, что в детерминированной постановке необходимо отыскать оптимальные параметры электронного аппарата, а в стохастической постановке имеем стохастический характер внешних воздействий на электронный аппарат, который в случае с атомной электростанцией или боевой ракетой может привести к плачевным последствиям. Эти последствия устраняем путем изменения параметров и (или) структуры системы так, чтобы приблизить математическое описание претерпевшей изменения системы к ее исходной модели настолько, чтобы сохранить работоспособность первоначально принятого принципа обратной связи [2, 6]. В качестве “ядра” предлагаемой системы выбираем схему, реализующую принцип обратной связи, а на контур адаптации возлагаем функции коррекции параметров и (или) структуры в зависимости от условий эксплуатации, предварительной компоновки ЭА и пр. факторов, и в соответствии с предлагаемым функционалом качества.

На рис. 1 представлена в общем, виде структурная схема предлагаемой адаптивной САУ. Адаптивно управляющее устройство позволяет осуществить поиск рациональных параметров электронного аппарата за минимальное время, наименьшее количество итераций, с минимальными потерями при производстве, что и составляет критерий управления, в качестве основного управляющего устройства выступает замкнутая система анализа характеристик ЭА и его составляющих, объектом управления является техпроцесс производства электронных аппаратов.

В рассматриваемом техпроцессе изготовления ЭА система адаптации будет работать однократно и в режиме оптимизации качества управления.

Проведение экспериментальных исследований по оценке достоверности предлагаемого метода предполагает исследование техпроцессов производства электронных аппаратов конкретных предприятий отрасли с выполнением их сравнительного анализа, внедрению полученных результатов и разработки рекомендаций и предложений по модернизации существующих техпроцессов.

Сформулирована цель работы, заключающаяся в создании метода синтеза ЭА с оптимальными вибро-тепло-механическими параметрами в детерминированной постановке и обеспечивающего оптимальность процесса проектирования в стохастической поста-

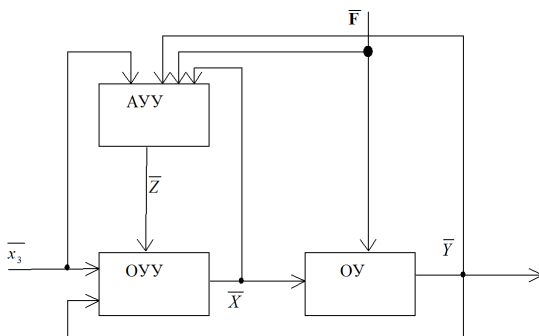


Рис. 1 – Структурная схема адаптивной САУ АУУ - адаптивно управляющее устройство, ОУУ – основное управляющее устройство, ОУ – объект управления.

новке. Поставлены задачи исследований. Приведено математическое описание конструктивных элементов ЭА и процессов происходящих с ними в процессе эксплуатации. Для предлагаемого математического аппарата необходимо разработать “переход” к критерию компоновки ЭА и их составляющих, который впоследствии бы “перерос” в критерий качества предлагаемой адаптивной САУ и способствовал ее внедрению в техпроцесс производства ЭА предприятий отрасли.

Функциональная зависимость (1) не ориентирована на свойства, параметры и компоновку производимого объекта, но ориентирована на сложный, многостадийный и итерационный процесс управления производством электронного аппарата. Для процесса производства электронного аппарата было определено предельное значение эффективности управления производством электронных аппаратов и получены механизмы подстройки качества изделий, компоновки их элементов и виброустойчивости и надежности под назначение объекта производства и предъявляемые требования [3–8].

Выводы

ППП представлена в виде вибромеханической модели, учитывающей внутреннее трение в материале платы, ортотропность механических свойств и зависимость вибромеханических свойств ППП от ее размеров.

Для решения задачи о вынужденных колебаниях ППП предложены фундаментальные функции, учитывающие внутреннее трение в материале платы.

Математически доказана возможность разделения задач: описания свойств и способов закрепления ППП в ТЭЗ, описания свойств

ЭРЭ и описания вынуждающих воздействий, чем обеспечивается модульно-иерархическое моделирование ТЭЗ на базе его составляющих.

Введено в рассмотрение динамическое и кинематическое возбуждение колебаний. Математические модели вынуждающих воздействий дают возможность оценить влияние условий эксплуатации на ТЭЗ.

Список литературы

1. Смолий В.Н. Показатели эффективности управления процесса производства электронных аппаратов// Адаптивні системи автоматичного управління. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.:НТУУ “КПІ”, 2012.- № 20(40).-С. 70 - 77.
2. Смолий В.Н. Нейросетевая технология обучения системы поддержки принятия решений для электронных аппаратов // Българско списание за инженерно проектиране, брой 23, юли 2014г. – С.125 – 135.
3. В.Н. Смолий, А.В. Карпенко Концепция автоматизированной системы обучения для высшего учебного заведения// Проблеми інформаційних технологій. – Херсон.: ХНТУ., 2014. – № 15. - С.70-76.
4. Смолий В.Н. Управление производством сложноорганизованных технологических объектов//Вісник СХУ ім.В.Далія.– 2009. - № 2 (132). Ч.2. – С. 46 - 55.
5. Смолий В.Н. Исследование эффективности управления процесса производства электронных аппаратов // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2010.- Вип. 39. – С. 174 - 178.
6. Смолий В.Н. Особенности концепции управления производством электронных аппаратов// Вісник СХУ ім.В.Далія. – 2010. - № 2 (144). - С. 128 - 133.
7. Vitaly Ulshin, Victoria Smoliy. Automated management by designer preparation of production of electronic vehicles/ ТЕКА Ком. Mot. I Energ. Roln. – OL PAN, 2011, 11A, P276 – 281.
8. Ульшин В.А., Смолий В.Н. Функции лица, принимающего решение, при управлении производством электронных аппаратов// Вісник СХУ ім.В.Далія. – 2011. - № 3 (157) - с. 214 - 220.

Отримано 13.04.2015 р.