

Анализ конструкций печатных узлов

***А.С. Шалумов, Генеральный директор ООО «НИИ
«АСОНИКА», профессор, доктор технических наук
als@asonika-online.ru***

Д.Н. Травкин, кандидат технических наук

Е.О. Першин, кандидат технических наук

Р.Л. Желтов, кандидат технических наук

И.С. Урюпин, кандидат технических наук

С.В. Чабриков

1. Стойкость конструкций печатных узлов РЭС к тепловым и механическим воздействиям (АСОНИКА-ТМ)

Подсистема АСОНИКА-ТМ позволяет анализировать воздействия на печатные узлы радиоэлектронных средств (РЭС) стационарных и нестационарных тепловых режимов, а также следующих видов механических воздействий:

- гармоническая и случайная вибрации;
- удар;
- линейное ускорение;
- акустический шум.

На рис. 1 показана печатная плата, расположенная в блоке кассетного типа, содержащего девять модулей. Некоторые из них крепятся к металлическому основанию. Проанализируем механические и тепловые воздействия на один из таких модулей, также представляющий собой печатную плату.

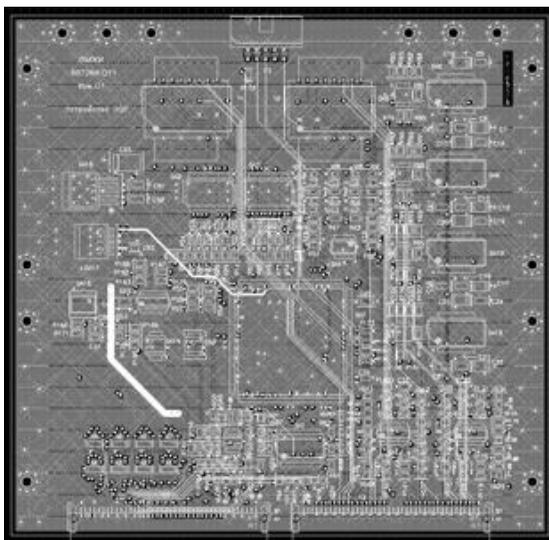


Рис. 1. Печатная плата

Исследуемая печатная плата была смоделирована в программе PCAD2006, в которой файл сохраняется в формате pdf для последующей передачи в подсистему АСО-НИКА-ТМ. Задаются контрольные точки, имитирующие датчики (рис. 2).

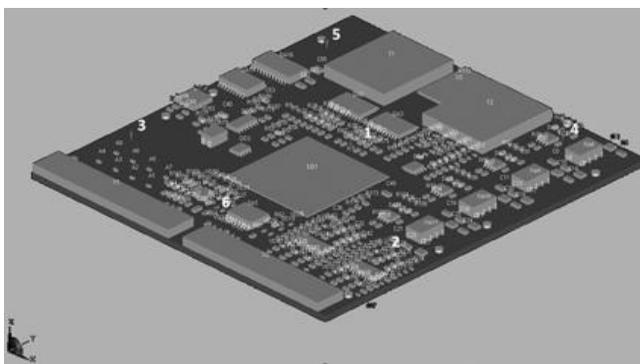


Рис. 2. Печатная плата с контрольными точками

Случайная вибрация. Изделие должно быть работоспособным, сохранять внешний вид и при плавном изменении частоты от 10 до 2000 Гц по каждой из трех осей соответствовать требованиям настоящих ТУ после воздействия широкополосной случайной вибрации (ШСВ), спектральная плотность виброускорения которой показана на рис. 3.

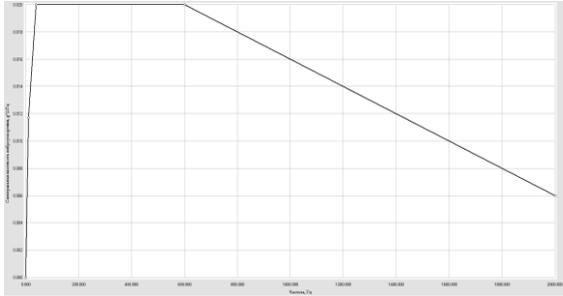


Рис. 3. График воздействия случайной вибрации

Одиночный удар. Изделие должно быть работоспособным, сохранять внешний вид и соответствовать требованиям после испытания на прочность узлов крепления при воздействии механического удара одиночного действия. Осуществляются по три удара в каждом из шести направлений $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$ с пиковым ударным ускорением $12g$ при длительности 15 мс. График воздействия представлен на рис. 4.

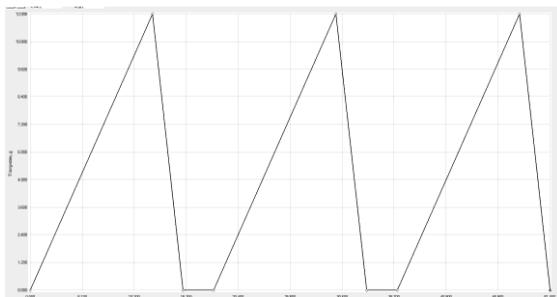


Рис. 4. График воздействия одиночного удара

Многократный удар. Изделие должно быть работоспособным, сохранять внешний вид и соответствовать требованиям ТУ после воздействия механических ударов многократного действия (по 1000 ударов на каждую из трех взаимно перпендикулярных осей) с частотой 60 ударов в минуту, пиковым ударным ускорением $12g$ и длительностью импульса (15 ± 8) мс. График воздействия отдельно взятого импульса представлен на рис. 5.

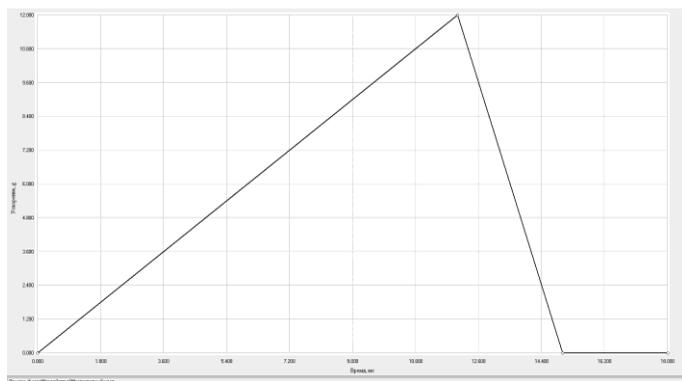


Рис. 5. График воздействия отдельно взятого импульса многократного удара

Воздействие повышенной температуры. Изделие должно соответствовать требованиям ТУ и сохранять внешний вид при воздействии температуры среды $+60^{\circ}\text{C}$ ($+70^{\circ}\text{C}$ кратковременно) и после воздействия предельной температуры $+85^{\circ}\text{C}$ при напряжениях питания: 119 В – сети переменного тока (400 Гц); $+29,4$ В – сети постоянного тока.

Воздействие пониженной температуры. Изделие должно соответствовать требованиям ТУ и сохранять внешний вид при воздействии температуры среды -60°C при напряжениях питания: 109 В – сети переменного тока (400 Гц); 24 В – сети постоянного тока.

С помощью программного обеспечения АСОНИКА-ТМ изделие было рассчитано на указанные виды механических и тепловых воздействий, на основании которых можно сделать следующие выводы:

1. При случайной вибрации спектральная плотность в контрольных точках 1, 2, 3, 4, 6 на частотах 480, 790, 1350, 1430, 1950 Гц многократно превышает значения, заданные в ТУ. В качестве примера на рис. 6 показан график зависимости спектральной плотности от частоты в контрольной точке 1.

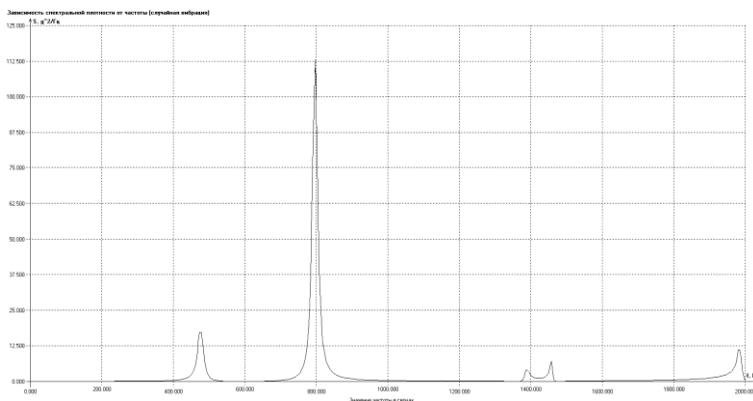


Рис. 6. Зависимость спектральной плотности от частоты в контрольной точке 1

2. При одиночном ударном воздействии значение ускорения в контрольной точке 2 равно 24g, превышая допустимое по ТУ значение 12g. Поля ускорений на печатной плате и зависимость ускорения от времени показаны на рис. 7 и 8 соответственно.

3. При многократном ударном воздействии ускорения в контрольных точках 1, 2, 3, 4, 6 в разных интервалах времени присутствуют резонансные частоты. В качестве примера на рис. 9 и 10 соответственно показаны поля ускорений в

момент времени $t = 12$ мс и зависимость ускорения от времени в контрольной точке 1.

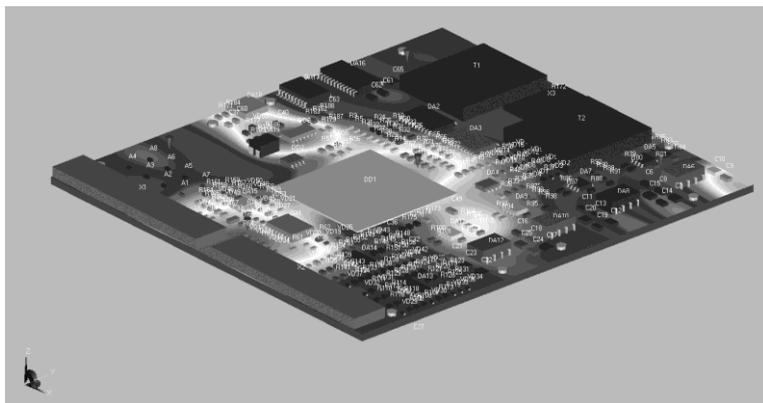


Рис. 7. Поля ускорений на печатной плате при воздействии одиночного удара

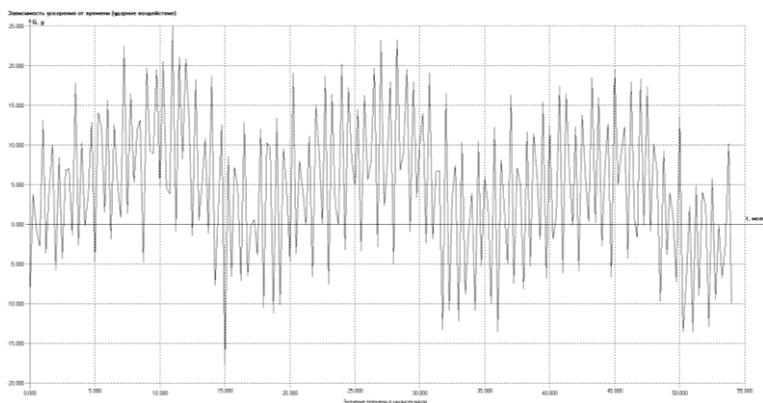


Рис. 8. Зависимость ускорения от времени в контрольной точке 2

4. При воздействии климатических факторов перегревов не обнаружено.

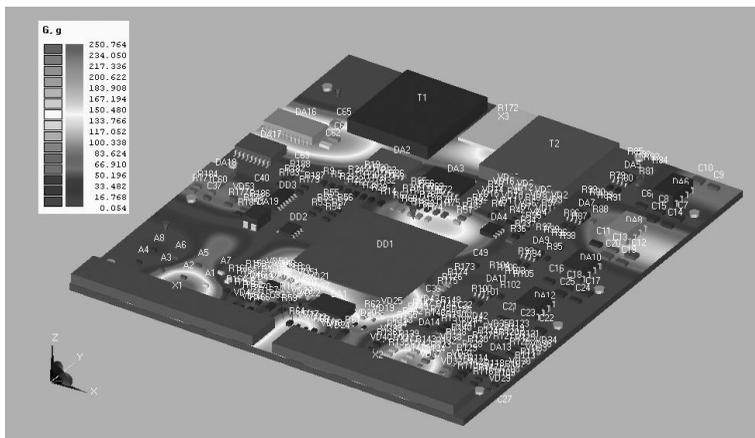


Рис. 9. Поля ускорений на печатной плате
в момент времени $t = 12$ мс

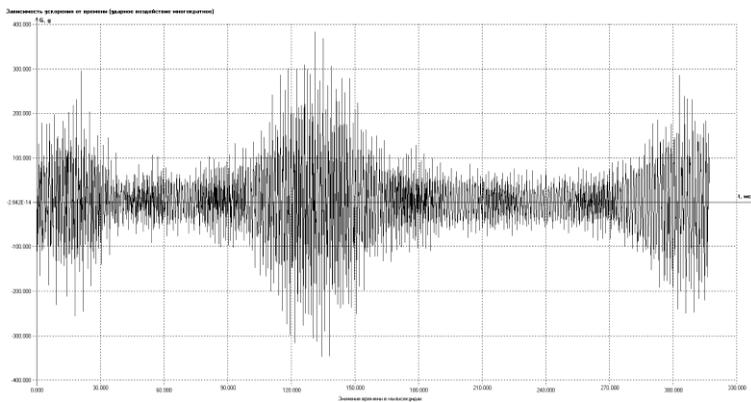


Рис. 10. Зависимость ускорения от времени
в контрольной точке 1

Полученные результаты дают основание считать, что механические воздействия могут привести к разрушению и потере работоспособности изделия.

202	VD11	1	52,952	125,000	0,424	
203	VD22	2	52,951	125,000	0,424	
204	D6	1	52,761	125,000	0,422	
205	VD17	1	52,148	125,000	0,417	
206	D8	1	51,374	125,000	0,411	

2. Моделирование механических процессов в печатных узлах РЭС сложной формы

В основу программного модуля легли алгоритмы, основанные на методе конечных элементов: эффективная сборка глобальных матриц жесткости, решения больших систем алгебраических уравнений методом Холецкого, математические модели типовых элементов конструкций РЭС.

Для исследования измерения механических систем при их динамическом деформировании наиболее удобным оказался вариант метода конечных элементов, при котором принцип возможных перемещений сочетается с принципом Даламбера.

Итоговая система уравнений движения конструкции выглядит следующим образом:

$$[M]\{\ddot{r}\} + [C]\{\dot{r}\} + [K]\{r\} = \{F\}, \quad (1)$$

где $\{r\}$ – вектор узловых перемещений; $[M]$, $[C]$, $[K]$ – матрицы масс, вязкого демпфирования и жесткости соответственно; $\{F\}$ – вектор внешних воздействий.

Проведены исследования свободных колебаний. Свободными, или собственными, колебаниями называется движение при отсутствии внешних сил и сил демпфирования. Система уравнений, которые описывают такое движение, сводится к алгебраической задаче

$$[K]\{r\} - \omega^2[M]\{r\} = 0, \quad (2)$$

которая в линейной алгебре называется обобщенной и нацелена на определение ряда значений ω_i и векторов $\{r_i\}$. Для решения уравнений (1) и (2) необходимо, чтобы число значений ω_i было равно порядку системы уравнений. Последовательность ω_i , расположенных по порядку возрастания, называется спектром собственных значений, а соответствующие им векторы $\{r_i\}$ называются собственными.

Для решения обобщенной задачи в общем случае существует довольно большое число методов. Однако при исследовании свободных колебаний конструкций РЭС их прямое применение не оправдано, поскольку в нашем случае вполне достаточно ограничиться определением лишь части спектра, которая соответствует минимальным значениям ω_i . К решению такой частичной проблемы собственных значений применим модифицированный метод Ланцоша со спектральной трансформацией.

При анализе влияния гармонической вибрации наибольшие амплитуды перемещений возникают на частотах, близких к собственным частотам конструкции. Поэтому при выборе частот, для которых выполняется расчет, наиболее рационально использовать переменный шаг. Плотность посева частот должна быть наибольшей в окрестностях собственных частот конструкции, а также зависеть от заданных параметров демпфирования, так как резонансные пики тем острее, чем меньше демпфирована система.

На рис. 12 представлен пример зависимости амплитуд перемещений от частоты при анализе на гармоническую вибрацию и выбор частот в соответствии с резонансами. Частоты, на которых выполняется расчет, определяются следующим образом:

$$\Omega_{-j}^i = \omega_i / a_{ij}, \quad \Omega_{+j}^i = \omega_i a_{ij},$$

где Ω_{-j}^i – частоты, меньшие собственной частота ω_i ; Ω_{+j}^i – частоты, большие собственной частота ω_i .

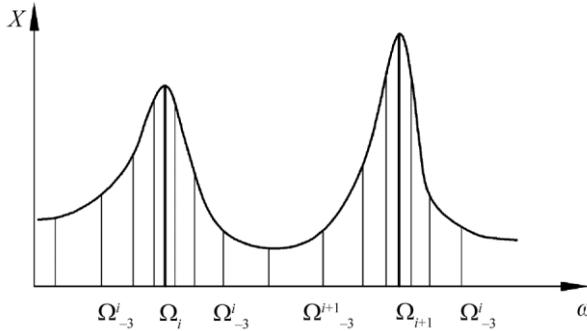


Рис. 12. Переменный шаг частот при гармоническом анализе

Плотность расположения частот Ω характеризует коэффициент

$$a_{ij} = 1 + \xi^b,$$

где $b = \frac{2(N-j)}{N-1}$, ξ – заданный коэффициент демпфирования; N – целочисленная константа, определяющее число частот Ω ; $j = 1, 2, 3, \dots, 2N$.

Описанный подход позволяет уменьшить время расчета при анализе воздействия гармонической вибрации за счет меньшего числа частот, на которых производится расчет, без потери точности.

Для анализа конструкций РЭС при воздействии случайной вибрации используется следующее соотношение между выходной спектральной плотностью и спектральной плотностью воздействия:

$$S_d = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \varphi_j \varphi_k \left[\sum_{l=1}^q \sum_{m=1}^q \frac{\varphi_{lj} \varphi_{mk}}{M_j M_k} \times H_j^*(\omega) H_k(\omega) S_{P_l P_m}(\omega) + \right. \\ \left. + \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r \Gamma_{lj} \Gamma_{mk} \times H_j^*(\omega) H_k(\omega) S_{i_l i_m}(\omega) \right],$$

где S_d – динамическая компонента выходной спектральной плотности ускорений; n – число используемых собственных частот конструкции; q – число степеней свободы, соответствующих незакрепленным узлам, где приложено воздействие; r – число степеней свободы, соответствующих закрепленным узлам, где приложено воздействие в виде ускорения; φ_j – форма колебаний конструкции на j -й собственной частоте; φ_{lj} – lj -й элемент матрицы форм колебаний конструкции на собственных частотах; $S_{P_l P_m}$ и $S_{i_l i_m}$ – спектральная плотность воздействия, приложенного к свободным узлам конструкции, и спектральная плотность ускорений, приложенная к закрепленным узлам; ω – круговая частота воздействия; $H_j(\omega) = \frac{1}{\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\omega_j \xi_j \omega}$ – ком-

плексная модальная передаточная функция на j -й собственной частоте, связывающая входное воздействие в форме ускорений и реакцию системы в форме перемещений.

Среднеквадратическое ускорение незакрепленных узлов элементов конструкции определяется следующим выражением:

$$\sigma_{f_i}^2 = \int_0^{\infty} S_{d_i}(\omega) d\omega.$$

При анализе воздействия случайной вибрации на конструкцию обычно задается спектральная плотность ускорений, которая является линейной (логарифмической) функцией скорости. В этом случае подынтегральное выражение

$S(\omega)$ можно представить в виде рациональной дроби $p(\omega)/q(\omega)$, где $p(\omega)$ – полином с действительными членами, а $q(\omega)$ – с комплексными. Полином $q(\omega)$, имеющий N комплексных корней Ω_R , можно разложить на сумму простых дробей:

$$\frac{1}{q(\omega)} = \sum_{R=1}^N \frac{a_R}{(\omega - \Omega_R)}, \quad \text{где } a_R = \frac{1}{\prod_{J=1, J \neq R}^N (\Omega_R - \Omega_J)}.$$

Демпфирующие свойства материала при динамическом нагружении учитываются в формуле Е.С. Сорокина, описывающей эллиптическую петлю гистерезиса (рис. 13):

$$\sigma = E(\varepsilon \pm \delta(\varepsilon_0)\pi^{-1}\varepsilon_0\sqrt{1 - \varepsilon^2/\varepsilon_0^2}),$$

где σ – нормальное напряжение; ε – относительная деформация; ε_0 – амплитудное значение относительной деформации ε ; E – модуль упругости материала; δ – логарифмический декремент затухания колебаний.

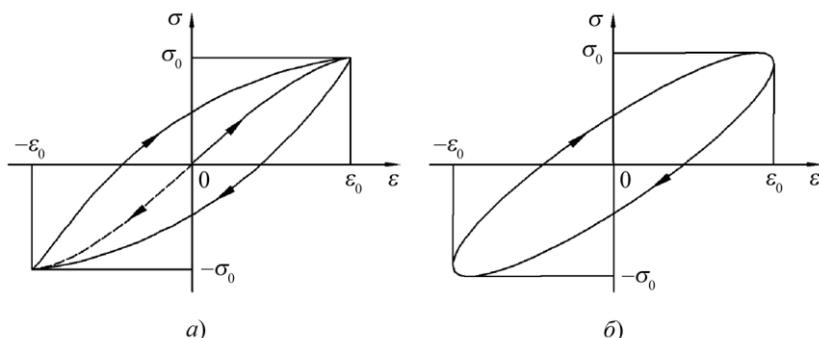


Рис. 13. Вид петли гистерезиса, получаемой экспериментально (а) и в соответствии с теорией Сорокина (б)

Эта формула справедлива лишь для установившихся (стационарных) колебаний. При исследовании знакопере-

менных переходных процессов ее можно рассматривать как приближенную, заменяя в ней амплитуду деформации ε_0 значением $|\varepsilon_m|$ относительной деформации в точках реверса кривых деформирования материала на каждом полупериоде колебаний.

Реакция конечно-элементной модели конструкции с учетом амплитудно-зависимого рассеяния энергии в материале определяется дифференциальным уравнением движения

$$[M]\{\ddot{x}\} + [\bar{K}(t)]\{x\} = \{F(t)\},$$

где $[M]$ – матрица масс; $[\bar{K}(t)]$ – нелинейная матрица жесткости; $\{x\}$ – вектор перемещений; $\{F(t)\}$ – вектор внешних сил.

Для формирования нелинейной матрицы жесткости конструкции достаточно объединить нелинейные матрицы жесткости всех конечных элементов, каждая из которых в общем случае определяется следующим образом:

$$[\bar{K}]_e = \int_V [B]^T [\bar{D}] [B] dV,$$

где $[B]$ – матрица, связывающая внутри элемента перемещения и деформации; $[\bar{D}]$ – нелинейная матрица упругости элемента, связывающая напряжения и деформации.

Уравнение движения конструкции, записанное в этой форме, решается одним из шаговых методов численного интегрирования и может использоваться без каких-либо ограничений для исследования всевозможных динамических процессов.

При циклическом деформировании материала более выгодно применять частную формулировку, основанную на гипотезе Сорокина о комплексном внутреннем трении:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} + i[K_g]\{x\} = e^{i\omega t}\{F_0\},$$

где $[K]$ – матрица жесткости конструкции; $[K_g] = [\bar{K}] - [K]$ – матрица гистерезисного демпфирования; ω – частота внешнего гармонического воздействия; $\{F_0\}$ – вектор, содержащий амплитуду внешнего воздействия.

Следует отметить, что элементы матрицы $[K_g]$ в уравнении содержат логарифмический декремент материала δ , зависящий от соответствующих амплитуд деформаций конечных элементов, а последние при формировании уравнения неизвестны. Поэтому для решения данного уравнения необходимо использовать итерационные методы.

Таким образом, в уравнениях динамического поведения конструкции, соответствующих гипотезе внутреннего трения, т.е. амплитудной зависимости демпфирования, учтена несовершенная упругость материала.

Разработанный программный модуль является частью проблемно-ориентированной подсистемы АСОНИКА-ТМ и также может быть интегрирован с подсистемой АСОНИКА-М.

Программный модуль для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС методом конечных элементов разработан в интегрированной среде разработчика Microsoft Visual Studio 2008 на языке С#. Для его нормального функционирования необходима IBM-совместимая ПЭВМ минимальной конфигурации: CPU 1 ГГц, 128 Mb RAM, 1Gb HDD, SVGA 32 Mb, CD-R 20x, Keyboard, Mouse, 15" Monitor.

С помощью подсистемы АСОНИКА-ТМ, дополненной программным модулем моделирования механических процессов методом конечных элементов (рис. 14), можно моделировать печатные узлы РЭС сложной формы при воздействиях в виде гармонической и случайной вибрации; удара

одиночного и многократного действия; линейного ускорения. Подсистема позволяет оценивать в узлах конструкции печатного узла, контрольных точках и на отдельных ЭРИ значения абсолютных и относительных ускорений, прогибов и перемещений, а также механических напряжений.

Результаты моделирования могут быть представлены в следующем виде:

- АЧХ или АВХ в зависимости от типа воздействия на контрольные точки и узлы конструкции, а также на отдельные ЭРИ;

- полей механических характеристик при заданном значении времени или частоты;

- деформации конструкции печатного узла;

- таблицы максимальных и допустимых напряжений в элементах конструкции, на основе которых разработчиком может быть принято проектное решение;

- карт механических режимов работы с указанием коэффициентов нагрузки и перегрузок, если таковые имеются, на основе которых разработчиком может быть принято проектное решение.

Основу подсистемы составляют следующие модули: управляющая программа (1), интерфейс с САД системами (2), препроцессор (3), подсистема моделирования механических процессов (4) и постпроцессор (5).

Управляющая программа осуществляет автоматизированную передачу данных между препроцессором, подсистемой моделирования механических процессов и постпроцессором подсистемы. Для взаимодействия с PDM-системой хранения и управления данными о РЭС используется интерфейс связи с различными САД системами и системами топологического проектирования печатных плат PCAD, MENTOR GRAPHICS, в которых могут содержаться перечень ЭРИ, координаты размещения

ЭРИ на плате, а также геометрия самой платы, что значительно сокращает время на ввод модели печатного узла.

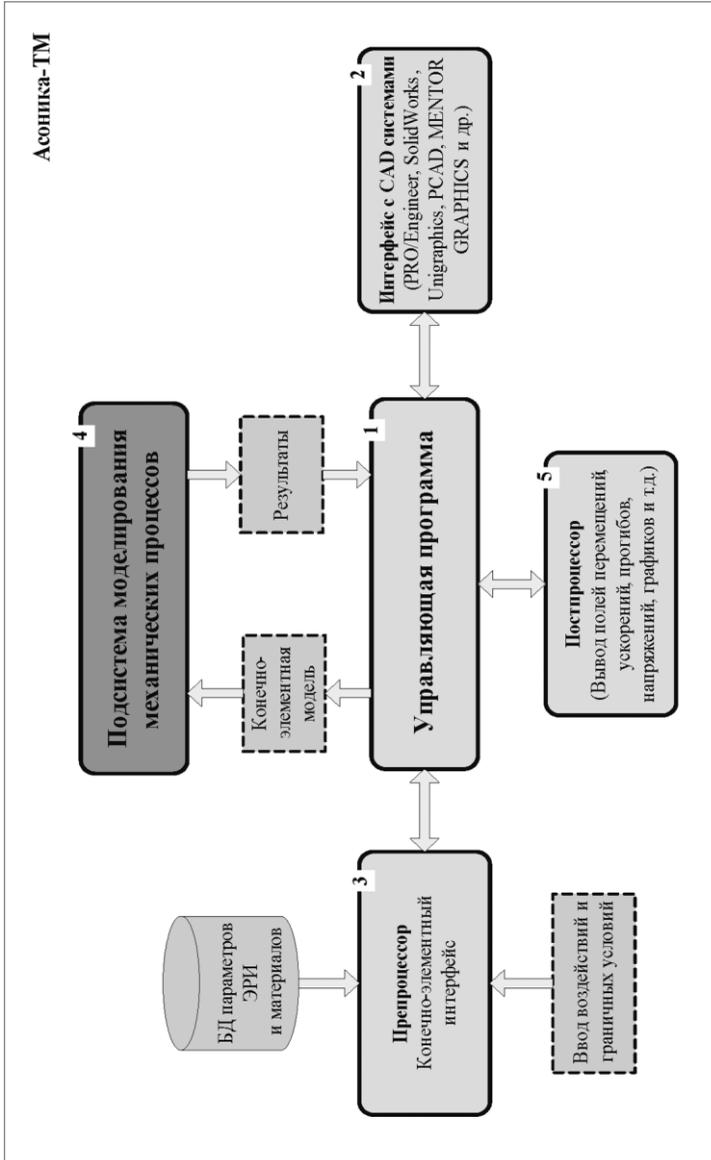


Рис. 14. Структура автоматизированной подсистемы АСОНИКА-ТМ с программным модулем моделирования механических процессов методом конечных элементов

В препроцессоре с помощью графических интерфейсов автоматизированного синтеза макромоделли печатного узла, графического интерфейса ввода механических воздействий и базы данных параметров ЭРИ и материалов формируется информационная модель печатного узла с точки зрения визуализации исходных данных.

В подсистеме АСОНИКА-ТМ рассмотренный программный модуль моделирования механических процессов выполняет роль механического процессора.

В постпроцессоре результаты моделирования отображаются в доступном пользователю виде. На основе полученных результатов разработчиком может быть принято проектное решение об обеспечении стойкости несущих конструкций РЭС к механическим воздействиям.

В случае превышения расчетных напряжений элементов конструкции или расчетных ускорений на ЭРИ над допустимыми возможна корректировка конструкции.

Структура программного модуля моделирования механических процессов в конструкциях РЭС методом конечных элементов показана рис. 15.

Взаимодействие программного модуля моделирования механических процессов в конструкциях РЭС методом конечных элементов и подсистемы АСОНИКА-ТМ организовано формированием файла макрокоманд, который обрабатывается внутренним интерпретатором. По полученным входным данным для каждого элемента сначала вычисляются локальные матрицы жесткости, масс и демпфирования, которые затем собираются в глобальные матрицы. В зависимости от типа заданного механического воздействия проводится анализ либо произвольного динамического воздействия, либо случайной вибрации.

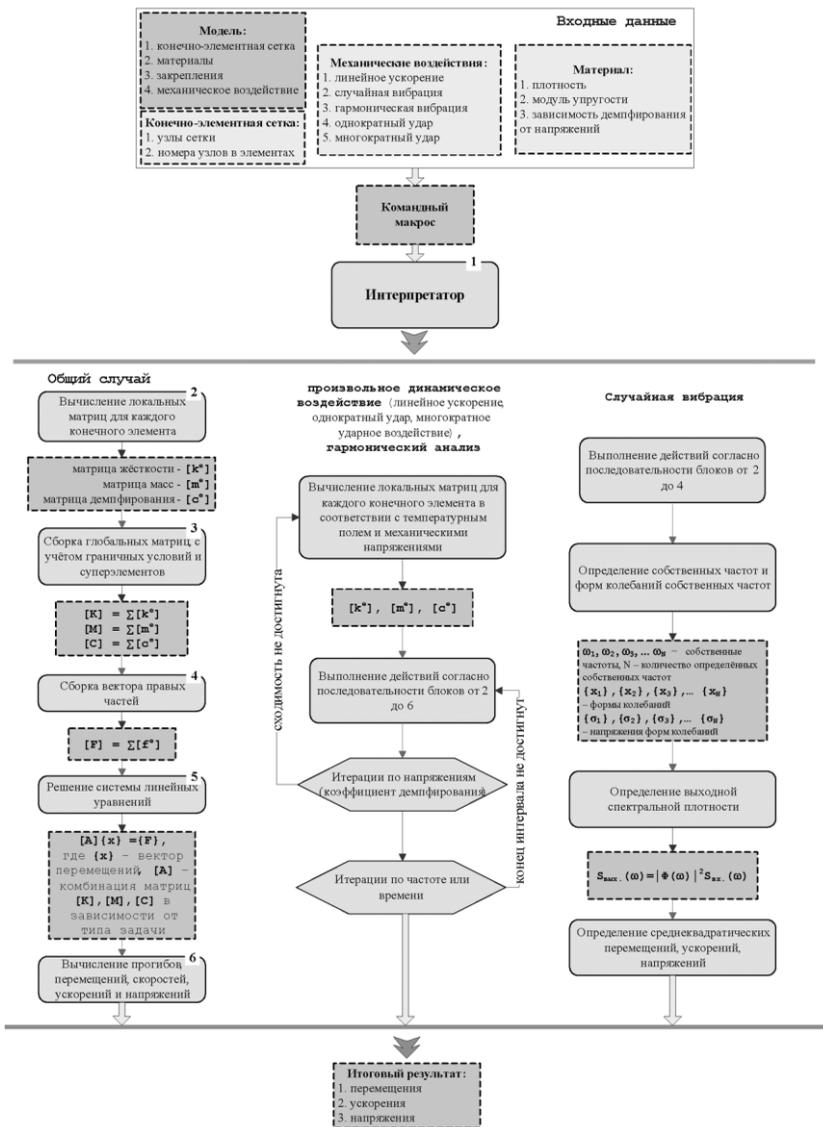


Рис. 15. Структура программного модуля моделирования механических процессов в конструкциях РЭС методом конечных элементов

В первом случае учитывается заданная зависимость демпфирующих свойств материала от механических напряжений, поэтому данный вид анализа выполняется итерационно.

Входные данные для программного модуля моделирования механических процессов в конструкциях РЭС методом конечных элементов подготавливаются на основе следующей информации:

- техническое задание на разработку изделия;
- эскизы или сборочные чертежи конструкции;
- спецификация;
- перечень элементов;
- параметры.

Структура входных данных для моделирования печатных узлов РЭС на механические воздействия формируется на основе следующих данных:

- геометрия печатного узла;
- описание слоев материала печатного узла в виде следующих параметров: D_z – толщина слоя; ρ – плотность материала слоя; E_1, E_2, E_3 – модули упругости по осям x, y и под углом 45° соответственно; μ_1, μ_2, μ_3 – коэффициенты Пуассона по осям x, y и под углом 45° соответственно; γ_0 – коэффициент механических потерь; k_σ – коэффициент зависимости демпфирования от напряжения;
- описание ЭРИ, т.е. обозначение, номер поверхности установки, координаты установки, масса $M_{\text{ЭРИ}}$;
- описание условий закрепления, т.е. координаты, жесткость опоры;
- описание ребер жесткости, т.е. координаты и поверхность установки, толщина и параметры материала (аналогично слоям).

Уровни входных механических воздействий задаются в частотном или временном диапазоне:

- для гармонической вибрации в виде зависимости амплитуды виброускорения от частоты;
- для случайной вибрации в виде зависимости спектральной плотности ускорения от частоты;
- для удара в виде зависимости ударного ускорения от времени (для многократного удара дополнительно задаются число ударных импульсов и период следования импульсов);
- для линейного ускорения в виде зависимости ускорения от времени;
- для акустического шума в виде зависимости среднеквадратического значения акустического давления от частоты.

По описанным входным данным подсистема АСОНИКА-ТМ формирует файл с макрокомандами, по которым данные передаются в программный модуль анализа на механические воздействия.

По результатам расчета конструкций РЭС в рамках программного модуля анализа на механические воздействия выходная информация передается в подсистему АСОНИКА-ТМ и представляется в следующем виде:

- поля амплитуд ускорений, прогибов и напряжений (для несущих конструкций по осям) для каждого рассчитанного значения частоты или времени в зависимости от типа механического воздействия;
- поля среднеквадратических значений виброускорений элементов конструкции РЭС при воздействии случайной вибрации;
- зависимости спектральной плотности виброускорения от частоты случайной вибрации.

На основе параметров механических воздействий и выходной информации постпроцессоры подсистемы

АСОНИКА-ТМ автоматически рассчитывают остальные механические характеристики, необходимые для принятия проектного решения об обеспечении стойкости РЭС к механическим воздействиям и о повышении показателей надежности разрабатываемой аппаратуры (рис. 16).

Проектное решение принимается на основе сравнения расчетных характеристик с допустимыми по ТУ:

- максимальные допустимые напряжения на изгиб материалов конструкции;

- максимальные допустимые ускорения гармонической вибрации, одиночного и многократного ударов, линейного ускорения.

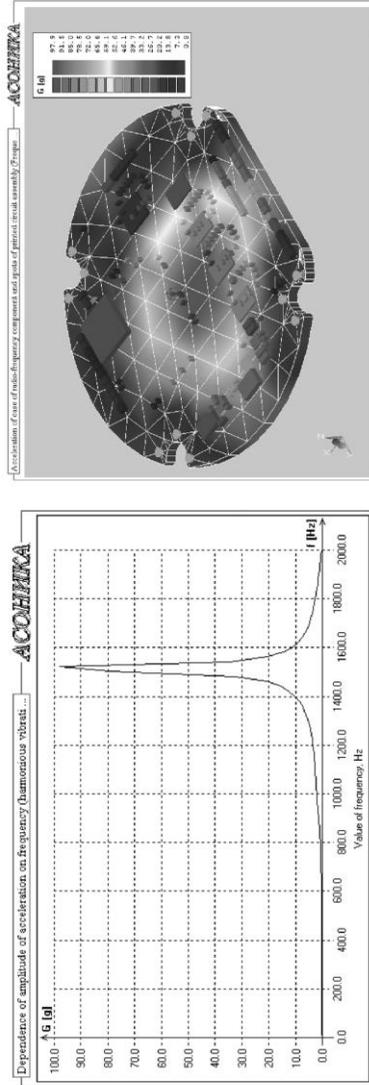
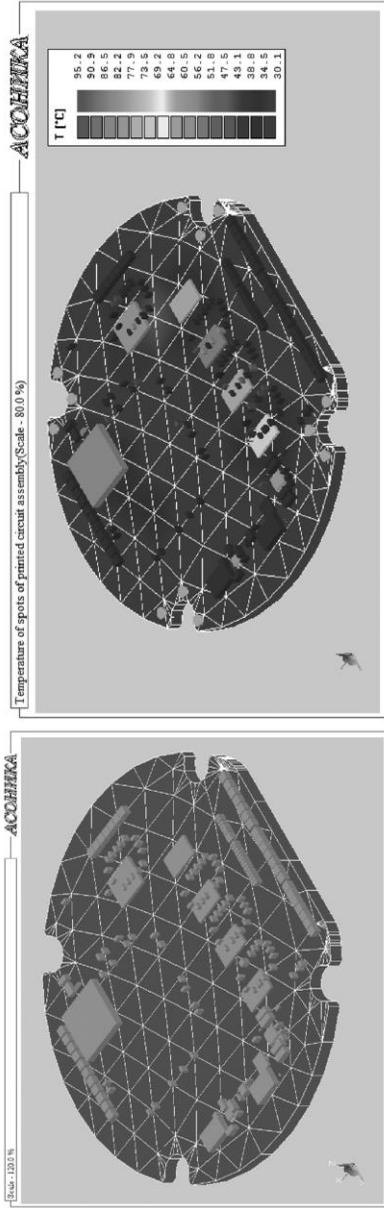


Рис. 16. Результаты моделирования тепловых и механических процессов в печатных узлах сложной формы

3. Усталостная прочность конструкций печатных узлов РЭС при механических воздействиях (АСОНИКА-УСТ)

К нарушениям прочности РЭС приводит накопление усталостных повреждений в выводах радиоэлементов (РЭ) с последующим их разрушением, и именно усталость является основным источником отказов в работе РЭС при механических воздействиях.

В связи с этим время до усталостного разрушения выводов РЭ, которое не должно быть меньше суммарной длительности механических воздействий на аппаратуру в условиях эксплуатации, – важная механическая характеристика. С каждым днем в России разбивается все больше и больше самолетов. Как показывает анализ, для старых самолетов одной из главных причин является выработка ресурса, а для современных – механические и тепловые перегрузки аппаратуры, располагаемой на борту. Новые РЭС, как правило, только испытывают, да и то не в процессе проектирования, а после создания опытного образца. При этом никто не контролирует механические ускорения и напряжения на каждом радиоэлементе, а тем более время до усталостного разрушения. Анализ приблизительно 400 отчетов о результатах механических испытаний приборов и их комплектующих, собранных за восемь лет, показали, что усталость является причиной 80% отказов радиоэлементов.

Экспериментальные исследования РЭС при их проектировании трудоемки и в большинстве случаев не позволяют оценить длительную работоспособность радиоэлементов при механических воздействиях, так как время испытаний аппаратуры при номинальных нагрузках достигает десятков тысяч часов, что практически не реализуемо. Таким образом, в настоящее время весьма актуальна задача компьютерного моделирования радиоэлементов в составе печатных

узлов (ПУ) и блоков РЭС для анализа усталостной прочности радиоэлементов при механических воздействиях.

Практическое применение аналитических методов для выявления динамики изменений конструкций РЭС сопряжено с рядом трудностей. Конструкции современных РЭС представляют собой сложные механические системы с множеством упругих и жестких связей, с неклассическими для строительной механики способами крепления отдельных конструктивных элементов. Кроме того, радиоэлементы представляют собой механические конструкции, в которых могут возникать резонансные колебания, усиливающие механические нагрузки в десятки раз. Для такой механической системы сложно построить расчетную модель, достаточно простую и в то же время хорошо отражающую физические и динамические свойства. При составлении и решении уравнений движения конструкции возникает ряд математических трудностей.

Эти причины обуславливают необходимость применения численных методов для расчета динамических параметров конструкций РЭС. Метод конечных элементов является одним из наиболее эффективных численных методов решения математических задач, описывающих состояние физических систем сложной структуры. В последние десятилетия он занял ведущее положение и получил широкое применение. В настоящее время существует множество его программных реализаций. Это, прежде всего, так называемые «тяжелые» САЕ-системы, причем практика показывает, что большинство промышленных предприятий отдает предпочтение крупным универсальным САЕ-системам типа NASTRAN, COSMOS-M, MARC, ANSYS.

Однако применение универсальных систем требует теоретических знаний и опыта использования данных программ. Кроме того, отсутствие специализированных баз

данных о параметрах материалов конструкций РЭС, а также о параметрах радиоэлементов увеличивает время моделирования и ставит под сомнение адекватность моделей, создаваемых с помощью универсальных программ. Другим существенным недостатком универсальных программ является ограниченность либо полное отсутствие средств проведения усталостного анализа.

Исследования процесса проектирования РЭС с применением компьютерного моделирования механических процессов и существующих специализированных программ моделирования показывают отсутствие на сегодняшний день необходимого программного и методического обеспечения, позволяющего разработчику РЭС в заданные сроки построить адекватную модель конструкции, рассчитать механические воздействия, оценить время до усталостного разрушения и принять решение о повышении надежности проектируемых РЭС. Это прежде всего связано с тем, что в специализированных программах, используемых для анализа механических характеристик конструкций РЭС на уровне блоков, не заложено моделирование механических процессов в выводах РЭ, а в программах, используемых на уровне ПУ и РЭ, предусмотрен только расчет механических напряжений в конструкциях отдельных типовых РЭ, но отсутствует возможность определения зависимости времени до усталостного разрушения от варианта установки, крепежного материала, геометрических размеров и формовки выводов.

Выход из сложившейся ситуации лежит в разработке методики, позволяющей с минимальными усилиями синтезировать математические модели радиоэлементов, входящих в состав ПУ (или блоков РЭС). Данные модели должны отображать геометрические особенности типовых и нетиповых РЭ. При реализации методики предполагается, что поль-

зовательские интерфейсы будут автоматизировать формирование геометрических моделей РЭ с помощью специальных алгоритмов, преобразующих геометрические модели в конечно-элементные аналоги, которые позволили бы использовать для моделирования одну из универсальных САЕ-систем. Результаты моделирования содержат собственные формы и частоты ПУ, а также перемещения, напряжения и ускорения в узлах конструкции. На основе этих данных, используя параметры выносливости материала РЭ, можно рассчитать время до усталостного разрушения.

На основе сказанного можно предложить схему моделирования (рис. 17), согласно которой конструктор РЭС взаимодействует с математическим аппаратом САЕ-системы через набор специализированных интерфейсов на языке, доступном для разработчика аппаратуры. В данной схеме отсутствует посредничество аналитика-расчетчика между конструктором и системой анализа, что увеличивает эффективность моделирования.

Средства автоматизации должны выполнять все типовые операции, характерные для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС, снижая тем самым трудоемкость анализа и работы пользователя, поддающейся формализации. Участие в анализе расчетчика косвенное и сведено к минимуму: он только исследует, создает и внедряет новые модели типовых элементов конструкций РЭС.

В качестве математического аппарата моделирования рассматривается математическое ядро универсальной САЕ-системы ANSYS. Благодаря средствам макропрограммирования, встроенным в систему ANSYS, можно автоматизировать процесс построения и конечно-элементного разбиения различных конструкций РЭ. В качестве специализированной программы для создания геометрических моделей печатных узлов выбрана подсистема АСОНИКА-ТМ, позво-



Рис. 17. Предлагаемая схема процесса моделирования конструкций РЭС

ляющая создавать геометрические модели РЭ с произвольными вариантами установки и располагающая большими средствами геометрической параметризации конструкций.

Для обеспечения взаимодействия подсистем АСОНИКА-ТМ, САЕ-системы ANSYS, интерфейсов ввода свойств конструкций РЭС, средств проведения усталостного расчета и интерфейсов вывода результатов моделирования необходимо разработать соответствующее программное обеспечение.

Модели радиоэлементов в АСОНИКА-ТМ состоят из набора геометрических примитивов различной формы. Для генерации конечно-элементных ANSYS-моделей радиоэлементов, в первую очередь, необходимо преобразовать геометрические примитивы, составляющие модель АСОНИКА-ТМ, в аналогичные геометрические объекты системы ANSYS.

ANSYS-модель включает в себя две взаимосвязанные модели: твердотельную и конечно-элементную, причем первая модель используется лишь как вспомогательное средство для генерации второй, поскольку для анализа нужна лишь вторая.

Одна из основных проблем, возникающих при конечно-элементном разбиении, связана с обеспечением связности модели. Твердотельная модель состоит из набора геометрических объектов или объемов различной формы. Без дополнительных усилий эти объемы останутся не связанными между собой, сосуществуя в пространстве как совокупность разрозненных объектов. На этапе конечно-элементного разбиения будет сформирована своя сетка элементов. В результате геометрическое расположение узлов сетки в местах касания объемов окажется различным для каждого из соприкасающихся объемов. Такая модель не гарантирует передачи нагрузок и деформаций между частями конструкции, моделируемыми разрозненными геометрическими объектами, и не пригодна для анализа.

Для обеспечения связности на этапе твердотельного моделирования необходимо с помощью логических операций состыковать разрозненные объекты в единую твердотельную модель, что автоматически обеспечит совпадение узлов сетки в местах касания. Использование логических операций зависит от варианта касания объемов. Кроме касания, объекты также могут пересекаться, т.е. занимать общее пространство. В последнем случае перед выполнением связывания приходится отсекал часть одного из пересекающихся объемов.

Другие сложности, возникающие при создании конечно-элементных моделей, зависят от особенностей объектов моделирования. Анализ моделей радиоэлементов позволяет сделать несколько заключений:

– большинство выводов РЭ представляют собой трубу круглого или прямоугольного сечения, состоящую из нескольких участков, разделенных местами перегиба. Вывод может касаться или пересекаться с корпусом или элементами крепления. Размеры корпуса, как правило, значительно превышают размеры выводов. При этом отдельные модели РЭ могут содержать не один десяток выводов. Принимая все это во внимание, а также то, что именно выводы – наиболее уязвимые части конструкции РЭ с точки зрения усталостной прочности, необходимо создать оптимизированные алгоритмы КЭ разбиения геометрии выводов стандартной формы;

– при создании твердотельной модели тонкие элементы конструкции (например, клеевое соединение, а также различные прокладки) могут быть отброшены без потери жесткости;

– примитивы, из которых состоят модели радиоэлементов и печатной платы, могут иметь самые различные варианты геометрического контакта. Наибольшую сложность для обеспечения связности представляют варианты касания по прямой линии и пространственной кривой, а также взаимное пересечение примитивов.

Для формирования (генерации) конечно-элементных ANSYS-моделей печатных узлов с учетом геометрии радиоэлементов был разработан алгоритм, реализация которого позволяет осуществлять автоматический перенос геометрических моделей из АСОНИКА-ТМ в ANSYS. Структура алгоритма генерации с указанием основных этапов и действий, выполняемых на каждом этапе представлена на рис. 18.

Усталостное разрушение представляет собой сложный, с трудом поддающийся точному описанию на микроскопическом уровне, физический процесс, в который включаются

стадии зарождения микротрещин и их последующего развития.

Несмотря на всю сложность данного явления, оценка степени усталостного повреждения в элементах конструкций и компонентов является в настоящее время неотъемлемой составляющей процесса проектирования.

Для анализа усталости при различных типах нагрузки было предложено множество теорий, методов и гипотез, особенно в последнее время. Среди них можно выделить:

- механизм непрерывного накопления повреждений (Continuum Damage Mechanics), позволяющий рассматривать процесс накопления повреждений как непрерывный интегральный процесс, вследствие чего отпадает необходимость введения понятия «цикл нагружения»;

- методы критических плоскостей (Critical Plane Approaches), постулирующие, что усталостное разрушение наступает преимущественно в отдельных плоскостях, называемых критическими, и поэтому рассматривающие накопление повреждений в пределах упомянутых плоскостей.

Долгие годы экспериментальных исследований привели к двум основным подходам (или моделям) для оценки времени до усталостного разрушения:

1. Формирование твердотельной модели печатного узла без радиоэлементов:
<p>получение геометрических характеристик ПУ; получение информации о слоях ПУ, в том числе ортотропных свойств материала ПУ; получение геометрических характеристик креплений; преобразование данных в макрокоманды, которые передаются препроцессору ANSYS для построения твердотельной модели ПУ.</p>
2. Формирование твердотельных моделей радиоэлементов, состоящих из отдельных геометрических примитивов.
<p>просмотр таблицы геометрических примитивов модели АСОНИКА-ТМ; преобразование каждой строки таблицы в набор макрокоманд ANSYS, которые управляют созданием аналогичного геометрического примитива в системе ANSYS; отбрасывание тонких элементов конструкции соответствующих некоторому критерию оптимизации; построение ANSYS-моделей радиоэлементов так, чтобы составляющие их наборы объёмов (ANSYS Volumes) не были связаны между собой.</p>
3. Обеспечение связности твердотельной модели.
<p>попарная проверка всего набора объёмов на предмет касания/пересечения средствами логических операций ANSYS и выявление типа геометрического контакта; усечение части объёма, имеющего меньший приоритет в случае геометрического пересечения (т.е. перекрытия) объёмов; поиск вырожденных поверхностей в местах контакта объёмов и корректировка модели; связывание объёмов средствами логических операций, выбор которых зависит от выявленного варианта геометрического контакта; связывание моделей радиоэлементов с моделью ПУ.</p>
4. Создание конечно-элементной модели
<p>задание свойств материалов для ПУ и РЭ, включая элементы РЭ (выводы, корпуса); применение для отдельных частей твердотельной модели (например, для выводов стандартной формы) оптимизированных методов КЭ разбиения; КЭ разбиение остальных частей модели; проверка формы полученных конечных элементов по внутренним командам проверки ANSYS; при обнаружении элементов «слабой формы» – повторное разбиение объёмов с изменением опций команды разбиения (до тех пор, пока число элементов «слабой формы» не станет равным нулю либо не достигнет некоторого минимума).</p>

Рис. 18. Алгоритм генерации конечно-элементных моделей

- основанный на напряжениях (stress-life approach S-N);
- основанный на деформациях (strain-life approach e-N).

Первый подход предполагает наличие достаточно высоких нагрузок (напряжений) и большого числа циклов.

При этом деформации остаются по большей части упругими. Данную модель также называют многоцикловою усталостью (high-cycle fatigue). Второй подход предполагает наличие довольно высоких нагрузок (напряжений и деформаций) и сравнительно небольшого числа циклов. При этом нельзя игнорировать пластическую составляющую полной деформации. Данную модель также называют малоцикловою усталостью (low-cycle fatigue).

При многоцикловою усталости может быть использовано так называемое уравнение Басквина: $0,5\Delta\sigma = \sigma_f' (2N_f)^b$, где $0,5\Delta\sigma$ – амплитуда напряжения в цикле; N_f – число циклов до разрушения; σ_f' – коэффициент усталостной прочности, зависящий от материала; b – показатель усталостной прочности (показатель Басквина), зависящий от материала.

Уравнение Басквина – одно из основных, используемых при многоцикловою усталости, хотя на практике чаще используется следующая зависимость: $N_f = N_b (\sigma_0 / \sigma_a)^m$, где N_f – число циклов до разрушения; N_b – базовое число циклов (обычно принимается $N_b = 10^7$); σ_0 – предел выносливости (или предел усталости) для материала; σ_a – амплитуда напряжения в цикле; m – параметр, зависящий от материала.

При малоцикловою усталости основным считается уравнение Мэнсона–Коффина–Басквина:

$0,5\Delta\varepsilon = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c$, где $0,5\Delta\varepsilon$ – амплитуда полной деформации в цикле; N_f – число циклов до разрушения; σ_f' – коэффициент усталостной прочности (fatigue strength coefficient), зависящий от материала; b – показатель усталостной прочности или показатель Басквина (fatigue strength exponent), зависящий от материала; ε_f' – коэффициент уста-

лостной пластичности (fatigue ductility coefficient), зависящий от материала; c – показатель усталостной пластичности (fatigue ductility exponent), зависящий от материала; E – модуль упругости.

Обе модели разрабатывали при испытании опытных образцов в условиях простого нагружения (циклическое растяжение–сжатие, кручение). В результате получали экспериментальные кривые, характеризующие зависимость циклически изменяющегося параметра (напряжения или полной деформации) от числа циклов до разрушения. При многоциклового усталости такие зависимости называют кривыми усталости, или кривыми Веллера (Wöhler curves).

Для их применения в условиях сложного (многоосевого) нагружения применяются так называемые эквивалентные величины (эквивалентные напряжения или эквивалентные деформации). Например, чтобы использовать кривую Веллера (построенную для опытного образца в условиях циклического растяжения–сжатия) при многоосевом циклическом нагружении в опасной точке конструкции, необходимо вычислить амплитуду эквивалентного напряжения по одному из известных критериев. Число циклов до разрушения при данной амплитуде эквивалентного напряжения будет равно числу циклов до разрушения при циклическом растяжении–сжатии с той же амплитудой напряжения.

Существует множество критериев определения эквивалентных величин. Они основаны на применении статических критериев текучести для анализа усталости при сложном нагружении. Наиболее известны критерии в терминах главных напряжений:

– критерий максимального главного напряжения $\sigma_1 = \sigma_e$;

– критерий максимального касательного напряжения (критерий Треска) $|\left(\sigma_1 - \sigma_3\right) / 2| = \tau_e$;

– критерий

Мизеса

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_e.$$

Если история нагружения представляет собой случайный процесс (т.е. не является циклической), то для применения моделей усталости существуют специальные методы и алгоритмы в зависимости от способа задания истории нагружения. Так называемые «дождевые» алгоритмы подсчета циклов позволяют учесть эффект от последовательности приложения циклов с различной амплитудой. Существуют также методы, позволяющие рассчитывать время до усталостного разрушения тогда, когда история нагружения характеризуется графиком зависимости спектральной плотности нагрузки от частоты. Такие методы, иногда называемые спектральными, позволяют проводить расчет усталости при вероятностном анализе, например при анализе случайной вибрации.

Обычно к усталостному разрушению радиоэлектронных средств приводят длительные воздействия, т.е. вибрации и многократные удары. Время до усталостного разрушения в произвольной точке конструкции при гармонической вибрации определяется простым делением числа циклов до разрушения на значение частоты. Число циклов до разрушения рассчитывается согласно одному из уравнений многоциклового усталости. Таким образом, при гармонической вибрации задача расчета этого времени достаточно тривиальна, поскольку

– амплитуда напряжений в точках конструкции постоянна, следовательно не требуются дополнительные алгоритмы подсчета циклов с различной амплитудой, а также исключается использование гипотез суммирования усталостных повреждений;

– нет необходимости в дополнительной корректировке среднего значения напряжения в цикле, так как оно равно нулю.

При случайной вибрации алгоритм расчета времени до усталостного разрушения более сложен. Одной из основных проблем является выбор эквивалентной величины. Рассчитываемые системой ANSYS эквивалентные напряжения затруднительно применять для анализа времени до усталостного разрушения, поскольку распределение эквивалентной величины по гипотезе Мизеса отличается от распределения компонент тензора напряжений (распределенных нормально). Это связано с нелинейностью гипотезы Мизеса. Тем более трудно оценить для данной гипотезы распределение амплитуд или локальных экстремумов эквивалентной величины, необходимых для расчета усталости.

При случайной вибрации воздействия в местах креплений – случайные величины, имеющие одинаковые статистические параметры, однако в каждый момент времени их мгновенные значения могут различаться. Это вызовет в произвольной точке конструкции сложное многоосевое, в общем случае непропорциональное нагружение. Другими словами, направление и пропорциональное соотношение главных напряжений (или деформаций) могут изменяться во времени. Для анализа усталости в условиях такого напряженного состояния обычно используют методы критических плоскостей, т.е. накопление усталостных повреждений в отдельных плоскостях, для которых предполагается, что разрушение наступит с наибольшей вероятностью.

Поскольку результатом анализа случайной вибрации являются спектральные плотности напряжения в узлах конструкции, то для расчета времени до усталостного разрушения нужно использовать спектральные методы. Для произвольной, в том числе широкополосной, случайной вибрации

задействуют различные гипотезы, позволяющие рассчитать время до разрушения непосредственно из спектральной плотности эквивалентной величины.

При ударном воздействии усталостное разрушение может наступить за очень короткое время из-за больших механических напряжений и значительных пластических деформаций. Поэтому модель многоциклового усталости здесь неприменима.

Использование модели малоциклового усталости наталкивается на определенные затруднения. Это связано, во-первых, с нециклическим характером нагрузки в узлах КЭ модели конструкции, так как форма ударного импульса может быть произвольной; а во-вторых – со сложностью моделирования пластического деформирования в системе ANSYS.

Для расчета полных деформаций при ударе с учетом пластичности нужно выполнить в ANSYS нелинейный анализ переходных процессов, который для сложных конструкций в ANSYS требует больших затрат времени. Во время анализа могут возникнуть проблемы со сходимостью результатов. Это приведет к необходимости уменьшать шаг интегрирования, изменять условия сходимости и т.п. Кроме того, для каждого материала потребуется задавать зависимость напряжения от деформации по точкам, а также модель упрочнения.

Существуют приближенные методы, позволяющие на основе линейного анализа, результатами которого являются упругие деформации, получить соответствующие значения полных деформаций с учетом пластической составляющей. Наиболее широко применяемый метод – коррекция пластичности с помощью правила Нойбера.

Оценка нециклического нагружения при ударе подразумевает использование алгоритмов подсчета циклов. Каж-

дый цикл, выделенный из истории нагружения, вносит свой вклад в накопление усталостных повреждений. Для расчета суммарного повреждения от всех выделенных циклов нужно применить одно из правил суммирования усталостных повреждений. В такой ситуации наиболее распространено правило Пальмгрена–Майнера.

Учитывая сказанное, была разработана автоматизированная подсистема усталостного анализа конструкций печатных узлов при механических воздействиях. Подсистема дает возможность пользователю, не имеющему специальных знаний в области механики усталостного разрушения и конечно-элементного моделирования, успешно проводить усталостные расчеты в кратчайшие сроки. Данная подсистема реализована в составе комплексной автоматизированной системы обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА, благодаря чему обеспечивается интегрированность процесса анализа усталостной прочности конструкций ПУ в общий процесс автоматизированного проектирования конструкций РЭС.

Структура автоматизированной подсистемы усталостного анализа (рис. 19) продиктована уровнем пользователя, ограниченными знаниями разработчика РЭС и необходимостью взаимодействия данной подсистемы со смежными программами.

Процесс взаимодействия пользователя с автоматизированной подсистемой следует рассматривать как совокупность этапов преобразования исходной информации о моделируемом объекте. При этом участие разработчика РЭС сводится к минимуму как при обращении к конечно-элементной САЕ-системе, так и при чтении и формировании входных и выходных данных для обращения к специализированным программам, участвующим в процессе работы подсистемы.

Автоматизированная подсистема имеет в своем составе основную программу, которая обеспечивает связь между сервисной оболочкой подсистемы и программными модулями, входящими в систему. Основная программа дает возможность пользователю осуществить выбор задач, обеспечить программу входной информацией, организовать процесс управления программным обеспечением подсистемы. Интерфейс создания КЭ модели, входящий в основную программу, автоматизирует процесс построения и разбиения на конечные элементы конструкций ПУ любой сложности и опционально позволяет активировать автоматический режим, в котором КЭ модель формируется без участия пользователя. Обычно пользователя интересует время до усталостного разрушения отдельных РЭ, наиболее уязвимых к усталостному разрушению. Поэтому в подсистеме реализована возможность выбора радиоэлементов, геометрия которых будет включена в результирующую КЭ модель ПУ. Генератор макросов создания КЭ моделей РЭ анализирует модель печатного узла, созданную в АСОНИКА-ТМ. На основе анализа создается набор управляющих макросов, которые передаются системе ANSYS в командном режиме. Эти макросы управляют созданием твердотельных ANSYS-моделей РЭ и их разбиением на конечные элементы. Настройки программы позволяют для сложных моделей РЭ применить средства оптимизации конструкции (например: упрощение сложных объемов, удаление мелких деталей), а также задать особые параметры генерации сетки КЭ.

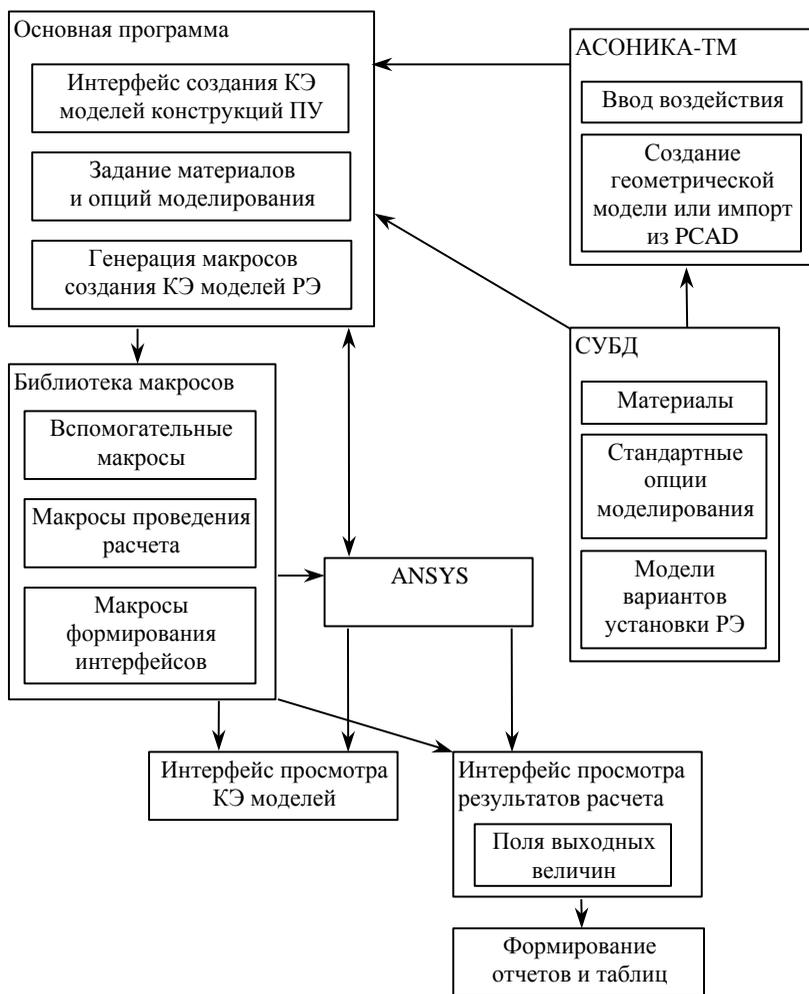


Рис. 19. Структура автоматизированной подсистемы усталостного анализа конструкций печатных узлов

Структура автоматизированной подсистемы включает в себя, помимо основной программы, следующие блоки: библиотеку макросов, систему управления базами данных (СУБД) и интерфейсы отображения результатов.

В БД собраны модели вариантов установки РЭ, на основе которых, используя минимум параметров (размеры места установки и корпуса РЭ, сечения корпуса и выводов, параметры материалов выводов, клея или лака), автоматически рассчитываются остальные параметры (координаты установки выводов, длины участков выводов, площадь поверхности, тепловое сопротивление крепления, теплоемкость элемента и т.д.).

В базе данных содержатся стандартные опции генерации КЭ моделей для всех вариантов установки РЭ, что в большинстве случаев избавляет пользователя от необходимости изменять их вручную. Модели материалов, хранящиеся в базе, уже содержат усталостные и механические свойства, и от пользователя требуется указать лишь названия материалов перед проведением расчета.

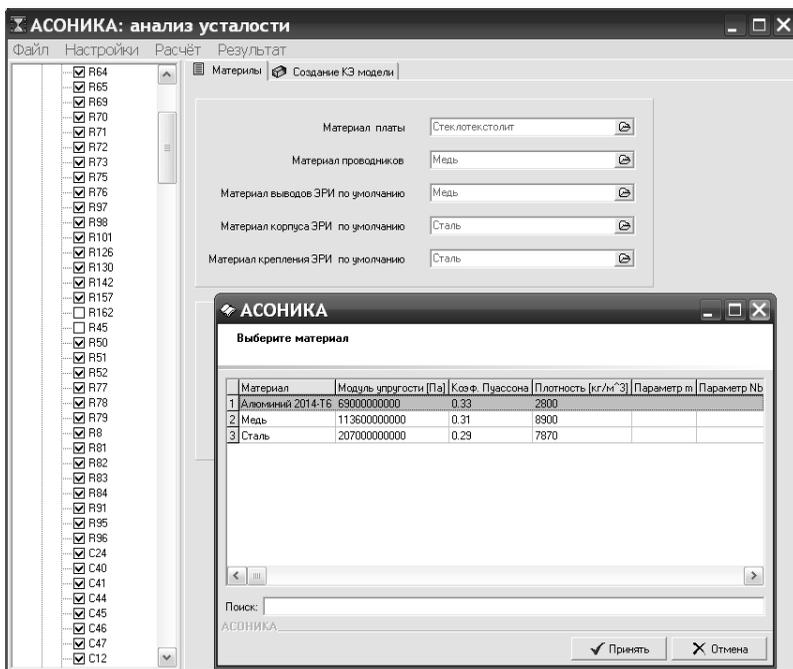
Библиотека макросов, помимо различных вспомогательных макросов и макросов проведения расчета на механические воздействия, содержит также пользовательские интерфейсы на языке tcl/tk, использующие для отображения результатов все графические возможности ANSYS. Основная программа контролирует данные интерфейсы лишь косвенно, через посредство библиотеки макросов.

Автоматизированная подсистема позволяет проводить анализ усталостной прочности конструкций ПУ при обычных механических воздействиях типа гармонической и случайной вибраций, а также при многократном ударном воздействии. Результатом расчета являются поля перемещений и напряжений, а также время до усталостного разрушения.

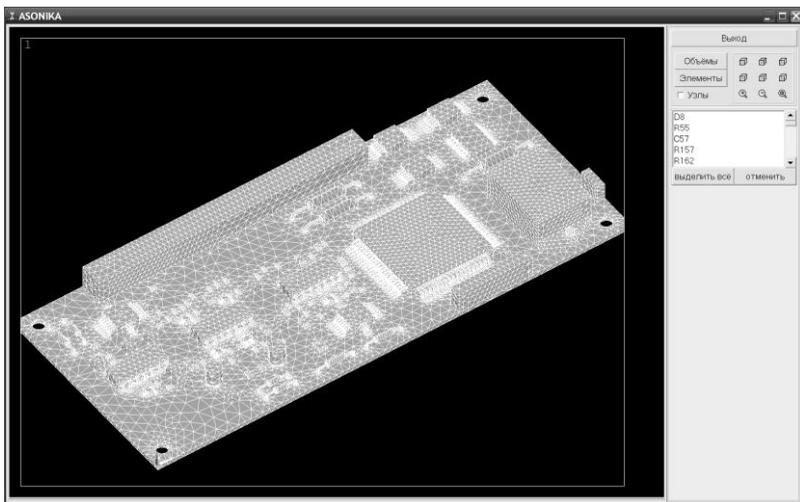
Экранные формы автоматизированной подсистемы по заданию исходных данных и выводу результатов представлены на рис. 20.

Рассмотрим методику обеспечения защиты конструкций ПУ от усталостного разрушения с помощью рассмотренной автоматизированной подсистемы. Такую методику можно полагать частью более общей методики обеспечения надежности конструкций РЭС при механических воздействиях с применением системы АСОНИКА.

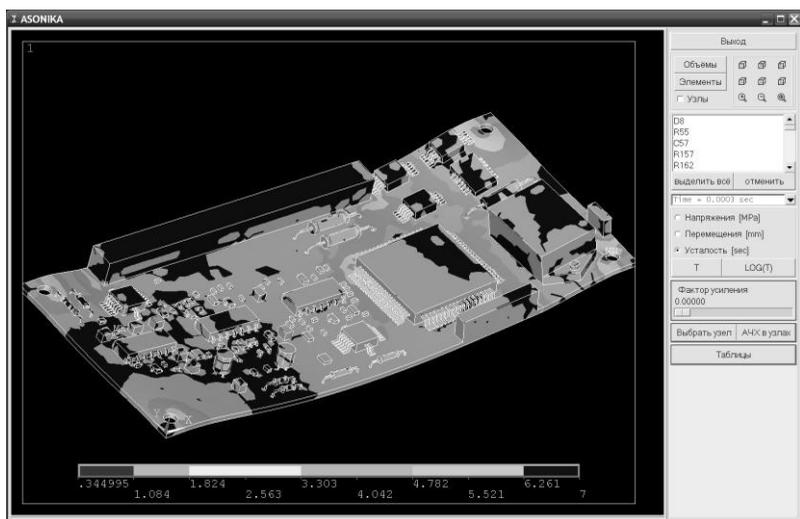
Методика включает следующие этапы:



a)



б)



в)

Рис. 20. Экранные формы автоматизированной подсистемы:
a – задание исходных данных; *б* – просмотр результатов
конечноэлементного разбиения; *в* – просмотр результатов расчета
(поле логарифма времени до усталостного разрушения)

1. После создания модели ПУ в подсистеме АСОНИКА-ТМ осуществляется экспорт полученной модели в систему конечно-элементного моделирования ANSYS с помощью специального графического интерфейса пользователя.

1.1. Производится ввод механических и усталостных свойств материалов и опций моделирования. Ввод материалов и опций моделирования автоматизирован с помощью соответствующих баз данных.

1.2. Для экспорта в систему ANSYS выбираются РЭ в составе ПУ, представляющие наибольший интерес с точки зрения времени до усталостного разрушения.

1.3а. Пошагово в автоматизированном режиме осуществляется экспорт печатной платы и выбранных РЭ в систему ANSYS и их разбиение на конечные элементы. На каждом шаге (т.е. после экспорта отдельного РЭ) возможен просмотр результата экспорта с помощью специального интерфейса просмотра ANSYS-моделей, а также изменение опций и материалов для отдельных РЭ.

1.3б. Вместо пошагового режима экспорта модели в ANSYS может быть использован автоматический режим. В данном случае просмотр доступен только после полного построения КЭ модели ANSYS.

2. Созданная КЭ модель рассчитывается на нужный вид механического воздействия. Воздействия автоматически импортируются из подсистемы АСОНИКА-ТМ, поэтому для их задания не требуется специальных действий пользователя.

3. Пользователь просматривает поля и графики выходных механических характеристик (напряжений, перемещений, времени до усталостного разрушения) на предмет визуализации и анализа результатов.

4. В случае превышения расчетными величинами допустимых значений выполняется редактирование конструкции и проводится повторный расчет до тех пор, пока не будут обеспечены требования к выходным параметрам (например, пока время до усталостного разрушения не станет больше допустимого значения). Можно выделить следующие варианты изменения конструкции: изменение толщины печатной платы; изменение вариантов установки отдельных РЭ; перерасположение отдельных РЭ в пределах печатной платы; добавление ребер жесткости в конструкцию ПУ; изменение материалов платы и отдельных РЭ.

5. Результаты сохраняются в табличной или графической форме.

Использование автоматизированной подсистемы и данной методики уменьшает влияние человеческого фактора на адекватность результатов моделирования, что приводит к увеличению надежности разрабатываемой аппаратуры. Другими достоинствами разработанной автоматизированной подсистемы являются малые временные затраты и относительная легкость процесса моделирования.