

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЛЯ УСТАЛОСТНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

© Авторы, 2011

Е.О. Першин – мл. науч. сотрудник ООО «CALS-технологии», аспирант при ОАО «ЦНИТИ «Техномаш»» (Москва)

E-mail: pershineo@yandex.ru

Д.Б. Соловьев – аспирант, ОАО «РКК «ЭНЕРГИЯ» имени С.П. Королева»

E-mail: solovyov1986@mail.ru

А.С. Шалумов – Генеральный директор ООО «CALS-технологии», д.т.н., профессор,

зав. кафедрой информационных технологий, Владимирский филиал

Российской академии государственной службы при Президенте Российской Федерации

E-mail: ALS140965@mail.ru

Приведена общая методология оценки времени до усталостного разрушения радиоэлементов при механических воздействиях. Представлен метод автоматизации создания конечноэлементных (КЭ) моделей радиоэлементов с произвольными вариантами установки. Рассмотрена автоматизированная подсистема усталостного анализа конструкций печатных узлов при механических воздействиях.

Ключевые слова: печатный узел, выводы радиоэлементов, усталостное разрушение, метод конечных элементов, расчёт на вибрацию.

A general methodology of fatigue life prediction of electronic components under mechanical effects is considered. Automated creation of finite element models of electronic components with arbitrary mounting types on printed circuit boards is described. An automated subsystem of fatigue analysis of printed circuit assemblies under mechanical effects is presented.

Keywords: printed circuit assembly, electronic component leads, fatigue failure, finite element method, vibration analysis.

Актуальность проблемы

Практически все современные автоматизированные технические системы и объекты имеют в своём составе радиоэлектронные средства (РЭС), осуществляющие функции управления, регулирования, координации и связи. При этом круг задач, решаемых с помощью РЭС, с каждым годом расширяется, а их сложность возрастает. Это привело к тому, что оснащённость РЭС таких объектов, как корабли, самолёты, спутники, чрезвычайно возросла, и отказ в работе хотя бы одного из устройств может привести к отказу всего объекта. Поэтому требования к надёжности радиоэлектронных средств постоянно растут.

Надёжность и стабильность работы радиоэлектронных средств значительно ухудшается при механических воздействиях – вибрациях, ударах, линейных перегрузках, акустических шумах [1]. Источниками механических воздействий могут быть различные двигатели, в том числе и реактивные, дорожная тряска, быстро вращающиеся разбалансированные массы, взрывы и многие другие [2]. Сложность задачи защиты электронных средств от механических воздействий обусловлена тем, что, несмотря на непрерывное повышение надёжности элементной базы (резисторов, конденсаторов, микросхем и других радиоэлементов), интенсивность механических воздействий возрастает быстрыми темпами из-за увеличения скоростей подвижных объектов. Нередко отказы РЭС при механических воздействиях связаны с выходом за пределы, установленные нормативно-технической документацией (НТД), механических характеристик конструкций РЭС – ускорений, перемещений, напряжений, что приводит к нарушению прочности и устойчивости работы аппаратуры. Кроме того, к нарушениям прочности РЭС приводит накопление усталостных повреждений в выводах радиоэлементов (РЭ) с последующим их разрушением [3], 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, является важной механической характеристикой. С каждым днем в России разбивается все больше и больше са-

молетов. Как показывает анализ, одной из главных причин является выработка ресурса для старых самолетов, а для новых – механические и тепловые перегрузки аппаратуры, располагаемой на борту. Это происходит потому, что не проводится моделирование РЭС. Проводят, как правило, только испытания, да и то не в процессе проектирования, а уже когда создан опытный образец. При этом при испытаниях никто не контролирует механические ускорения и напряжения на каждом радиоэлементе, а тем более время до усталостного разрушения. Анализ приблизительно 400 отчетов, собранных за 8 лет по результатам механических испытаний приборов и их комплектующих, показали, что усталость является причиной 80 % отказов радиоэлементов [3].

Экспериментальные исследования РЭС при их проектировании являются трудоемкими и в большинстве случаев не позволяют оценить длительную работоспособность РЭ 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 РЭ в составе печатных узлов (ПУ) и блоков РЭС для анализа усталостной прочности радиоэлементов при механических воздействиях.

Практическое применение аналитических методов для решения задач динамики 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 [4]. В настоящее время существует множество программных реализаций метода конечных элементов. 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 серьезных теоретических знаний и опыта использования данных программ. Кроме того, отсутствие специализированных баз данных по параметрам материалов конструкций РЭС, а также по параметрам радиоэлементов увеличивает время построения и ставит под сомнение адекватность моделей, создаваемых в универсальных программах. Другим существенным недостатком универсальных программ является ограниченность либо полное отсутствие средств проведения усталостного анализа.

Решением задачи моделирования механических процессов в конструкциях РЭС занимались такие специалисты как Маквецов Е.Н. [5–6], Тартаковский А.М. [5, 7], Кофанов Ю.Н. [8, 12–14], Кожевников А.М. [9], Кришук В.Н. [10], Шалумов А.С. [11–14, 16–17], Фадеев О.А. [15–16], Ваченко А.С. [14–15, 17], Способ Д.А. [14, 17–18] и др. Но в данных работах отсутствует методика моделирования механических процессов в конструкциях РЭС на всех иерархических уровнях, включая уровень отдельных РЭ, позволяющая в минимальные сроки и с минимальными затратами проводить расчет на различные механические воздействия и принимать решение об обеспечении стойкости РЭС к механическим воздействиям. Кроме того, отсутствуют методы и алгоритмы расчета времени до усталостного разрушения конструкций радиоэлементов произвольной геометрической конфигурации и варианта установки.

Схема процесса моделирования

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, провести расчет на механи-

ческие воздействия, дать оценку времени до усталостного разрушения и принять решение по повышению надежности проектируемых РЭС. Это прежде всего связано с тем, что в специализированных программах, используемых для анализа механических характеристик конструкций РЭС на уровне блоков, моделирование механических процессов в выводах РЭ не проводится, а в программах, используемых на уровне ПУ и РЭ, предусмотрен только расчет механических напряжений в конструкциях отдельных типовых РЭ, но отсутствует возможность для оценки времени до усталостного разрушения. Отсутствуют расчетные модели РЭ, позволяющие провести оценку времени до усталостного разрушения, которые зависят от варианта установки, 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 особенности геометрии типовых и нетиповых РЭ. Реализация методики предполагает создание пользовательских интерфейсов, автоматизирующих создание геометрических моделей РЭ, разработке специальных алгоритмов, преобразующих геометрические модели в конечноэлементные аналоги, которые позволили бы использовать одну из универсальных САЕ-систем для проведения моделирования. Результаты моделирования содержат собственные формы и частоты ПУ, а также перемещения, напряжения и ускорения в узлах конструкции. На основе этих данных, время до усталостного разрушения может быть рассчитано, используя параметры выносливости материала РЭ.

На основе вышесказанного можно предложить схему моделирования (рис. 1), согласно которой взаимодействие конструктора РЭС с математическим аппаратом САЕ-системы осуществляется 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.

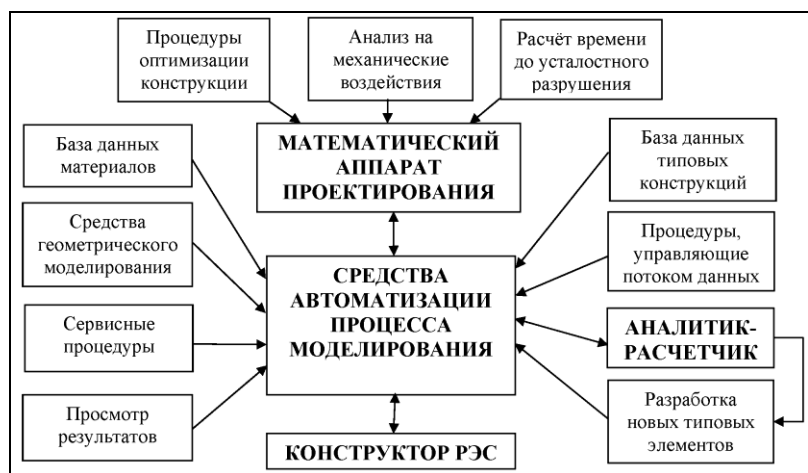


Рис. 1. Предлагаемая схема процесса моделирования конструкций РЭС

Средства автоматизации должны выполнять все типовые действия, характерные для моделирования механических процессов в конструкциях РЭС, снижая тем самым трудоемкость проведения анализа и участие пользователя в работе, легко поддающейся формализации. Участие в анализе расчетчика косвенное и сведено к минимуму. Расчетчик 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 системе в ANSYS, можно существенно автоматизировать процесс построения и конечноэлементного разбиения различных конструкций РЭ. В качестве специализированной программы для создания геометрических моделей печатных узлов выбрана подсистема АСОНИКА-ТМ [13–14, 18]. Подсистема позволяет создавать геометрические модели РЭ с произвольными вариантами установки и располагает широкими средствами геометрической параметризации конструкций.

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

Автоматическая генерация КЭ моделей

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

ANSYS-модель включает в себя две взаимосвязанные модели: твердотельную и конечноэлементную. Причём первая модель используется лишь как вспомогательное средство для генерации второй, так как для проведения анализа нужна лишь конечноэлементная модель.

Одной из основных проблем, возникающих при конечноэлементном разбиении, является обеспечение связности модели. Твердотельная модель состоит из набора геометрических объектов или объёмов различной формы. Если не затратить дополнительных усилий, то эти объёмы будут никак не связаны между собой, сосуществуя в пространстве как совокупность разрозненных объектов. На этапе конечноэлементного разбиения сетка элементов будет отдельно сгенерирована для каждого несвязанного объёма. В результате геометрическое расположение узлов сетки в местах касания объёмов окажется различным для каждого из соприкасающихся объёмов. Такая модель непригодна для анализа, поскольку не обеспечивает передачу нагрузок и деформаций между частями конструкции, моделируемыми разрозненными геометрическими объектами.

Для обеспечения связности на этапе твердотельного моделирования необходимо средствами 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 объёмов. Помимо касания, объекты также могут пересекаться, т.е. занимать общее пространство. В последнем случае нужно приложить дополнительные усилия путём усечения части одного из пересекającychся объёмов перед выполнением связывания.

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

большинство выводов РЭ представляют собой трубную конструкцию круглого или прямоугольного сечения, состоящую из нескольких участков, разделённых 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 всё это во внимание, а также то, что именно выводы являются наиболее уязвимыми частями конструкции РЭ с точки зрения усталостной прочности, необходимо создать оптимизированные алгоритмы КЭ разбиения геометрии выводов стандартной формы;

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

примитивы, из которых состоят модели радиоэлементов и печатной платы, могут иметь са-

1. Формирование твердотельной модели печатного узла без радиоэлементов
<ul style="list-style-type: none"> 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.
2. Формирование твердотельных моделей радиоэлементов, состоящих из отдельных геометрических примитивов
<ul style="list-style-type: none"> Просмотр таблицы геометрических примитивов модели АСОНИКА-ТМ; Каждая строка таблицы преобразуется в набор макрокоманд ANSYS, которые управляют созданием аналогичного геометрического примитива в системе ANSYS; Тонкие элементы конструкции, соответствующие некоторому критерию оптимизации, отбрасываются; ANSYS-модели радиоэлементов, построенные таким способом, будут состоять из набора объёмов (ANSYS Volumes), никак не связанных между собой.
3. Обеспечение связности твердотельной модели
<ul style="list-style-type: none"> Попарная проверка всего набора объёмов на предмет касания/пересечения средствами логических операций ANSYS и выявление типа геометрического контакта; В случае геометрического пересечения (т.е. перекрытия) объёмов – усечение части объёма, имеющего меньший приоритет; 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.
4. Создание конечноэлементной модели
<ul style="list-style-type: none"> 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, используя внутренние команды 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).

Рис. 2. Структура алгоритма генерации конечноэлементных моделей

мые различные варианты геометрического контакта. Наибольшую сложность для обеспечения связности представляют варианты касания по прямой линии и пространственной кривой, а также взаимное пересечение примитивов;

Для генерации конечноэлементных ANSYS-моделей печатных узлов с учётом 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. 2.

Основные модели и теории, применяемые при усталостных расчётах

Усталостное разрушение представляет собой сложный физический процесс, с трудом поддающийся точному описанию на микроскопическом уровне, включающий 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.

Множество теорий, методов и гипотез было предложено, особенно в последнее время, для анализа усталости для различных типов нагружения. Среди них можно выделить:

механизм непрерывного накопления повреждений (Continuum Damage Mechanics), рассматривающий 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.

Однако большинство современных теорий ещё недостаточно проверены временем и опытом и их следует использовать с некоторой осторожностью. В частности, это касается методов анализа для сложного (многоосевого) нагружения.

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

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

Первый подход предполагает наличие достаточно невысоких нагрузок (напряжений) и большого числа циклов. При этом деформации остаются по большей части упругими. Данную модель также называют многоциклового 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 малоциклового усталостью (low-cycle fatigue).

При многоциклового усталости может быть использовано так называемое уравнение Басквина:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_f' (2N_f)^b, \quad (1)$$

где $\frac{\Delta\sigma}{2}$ – 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 является одним из основных уравнений, используемых при многоциклового усталости, хотя на практике чаще используется следующая зависимость:

$$N_f = N_b \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_a} \right)^m, \quad (2)$$

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.

Основным уравнением при малоцикловой усталости служит уравнение Мэнсона-Коффина-Басквина:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c, \quad (3)$$

где $\frac{\Delta \varepsilon}{2}$ – 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 усталостной пластичности (fatigue ductility coefficient), зависящий от материала; c – показатель усталостной пластичности (fatigue ductility exponent), зависящий от материала; E – модуль упругости.

Обе модели разрабатывались при испытании опытных образцов в условиях простого нагружения (циклическое растяжение-сжатие, кручение). В результате получались экспериментальные кривые, характеризующие зависимость циклически изменяющегося параметра (напряжения или полной деформации) от числа циклов до разрушения. При многоцикловой усталости данные кривые 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 применить кривую Веллера (построенную для опытного образца в условиях циклического растяжения-сжатия) для случая многоосевого циклического нагружения 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. Далее приведены наиболее известные критерии в терминах главных напряжений ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$):

1. Критерий максимального главного напряжения

$$\sigma_1 = \sigma_e; \quad (4)$$

2. Критерий максимального касательного напряжения (критерий Треска)

$$\left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right| = \tau_e; \quad (5)$$

3. Критерий Мизеса

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_e. \quad (6)$$

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 в случае, когда история нагружения характеризуется графиком зависимости спектральной плотности нагрузки от частоты. Такие методы иногда называют спектральными. Они позволяют проводить расчёт усталости при вероятностном анализе, таком как анализ на случайную вибрацию.

Усталостный расчёт при вибрационных и ударных воздействиях

Отмечено, что к усталостному разрушению радиоэлектронных средств приводят воздействия, которые могут быть приложены длительное время, а именно вибрации и многократные удары.

Далее рассматриваются особенности расчёта времени до усталостного разрушения при вибрационных и многократных ударных воздействиях, лежащие в основе разработанных алгоритмов, которые были реализованы средствами макропрограммирования ANSYS в рамках постпроцессора.

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.

Задача расчёта времени до усталостного разрушения при гармонической вибрации достаточно тривиальна в связи со следующими обстоятельствами:

амплитуда напряжений в точках конструкции постоянна, следовательно не требуются дополнительные алгоритмы подсчёта 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.

Алгоритм расчёта времени до усталостного разрушения при случайной вибрации гораздо 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 (распределённых нормально). Это связано с нелинейностью гипотезы Мизеса. Тем более затруднительно для данной гипотезы получить распределение амплитуд или локальных экстремумов эквивалентной величины, необходимых для расчёта 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) может изменяться во времени. Для анализа усталости в условиях такого напряженного состояния обычно используют методы критических плоскостей. Методы критических плоскостей рассматривают накопление усталостных повреждений в отдельных плоскостях, в которых предполагается, что разрушение наступит с наибольшей вероятностью.

Поскольку результатом анализа на случайную вибрацию являются спектральные плотности напряжения в узлах конструкции, для расчёта времени до усталостного разрушения нужно использовать спектральные методы. Для произвольной, в том числе широкополосной, случайной вибрации используются различные гипотезы, позволяющие рассчитать время до разрушения непосредственно из спектральной плотности эквивалентной величины.

Усталостное разрушение при ударном воздействии может наступить за очень короткое время вследствие высоких напряжений и значительных пластических деформаций. Поэтому модель многоциклового усталости здесь неприменима.

Использование модели малоциклового усталости наталкивается на определённые 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 расчёта полных деформаций при ударе с учётом пластичности нужно выполнить в ANSYS нелинейный анализ переходных процессов. Нелинейный анализ сложных конструкций в ANSYS требует больших затрат времени. Во время анализа могут возникнуть проблемы со сходимостью результатов. Это приведёт к необходимости уменьшения шага интегрирования, изменения условий сходимости и т.п. Кроме того, для каждого материала нужно будет задавать кривую зависимости напряжения от деформации по точкам, а также модель упрочнения.

Существуют приближённые методы, позволяющие на основе линейного анализа, результатами которого являются упругие деформации, получить соответствующие значения полных деформаций с учётом пластической составляющей. Наиболее широко применяемый метод – использование правила Нойбера для коррекции пластичности.

Нециклическое нагружение при ударе подразумевает использование алгоритмов подсчёта циклов. Каждый цикл, выделенный из истории нагружения, вносит свой вклад в накопление усталостных повреждений. Для расчёта суммарного повреждения от всех найденных циклов нужно применить одно из правил суммирования усталостных повреждений. При этом правило Пальмгрена – Майнера является наиболее распространённым.

Автоматизированная подсистема усталостного анализа

Согласно предложенной схеме моделирования была разработана автоматизированная подсистема усталостного анализа конструкций печатных узлов при механических воздействиях.

Подсистема даёт возможность пользователю, не имеющему специальных знаний в области механики усталостного разрушения и конечноэлементного моделирования, успешно проводить усталостные расчёты в кратчайшие сроки. Данная подсистема реализована в составе комплексной автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры АСОНИКА [13–14, 16–18], благодаря чему обеспечивается интегрированность процесса анализа усталостной прочности конструкций ПУ в общий процесс автоматизированного проектирования конструкций РЭС.

Структура автоматизированной подсистемы усталостного анализа (рис. 3.) 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 конечноэлементной 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 даёт 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

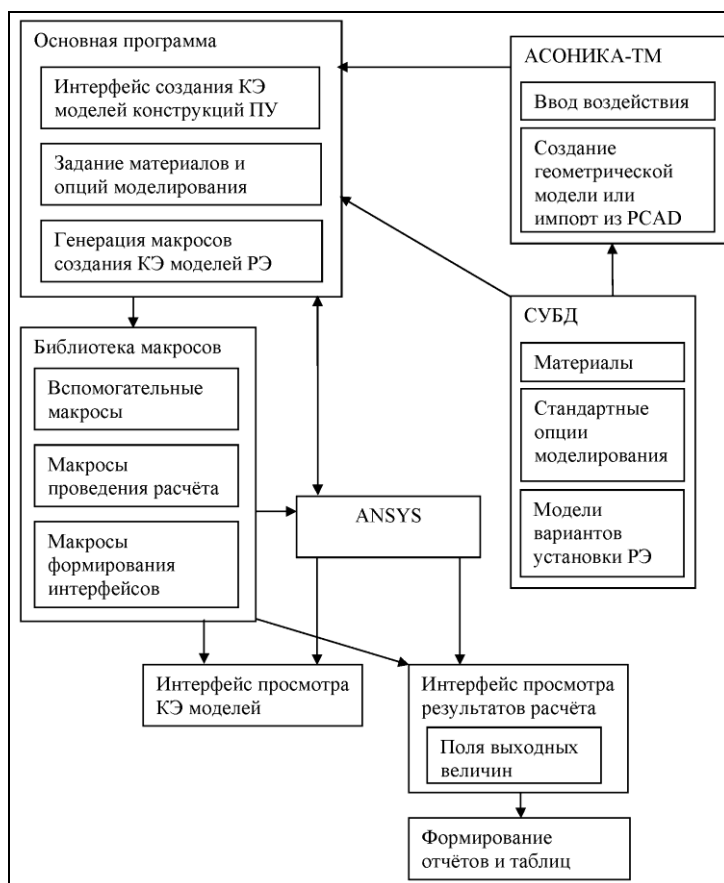


Рис. 3. Структура автоматизированной подсистемы усталостного анализа конструкций печатных узлов

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 подсистему 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 создаётся 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 объёмов, удаление мелких деталей), а также задать особые параметры генерации сетки КЭ.

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

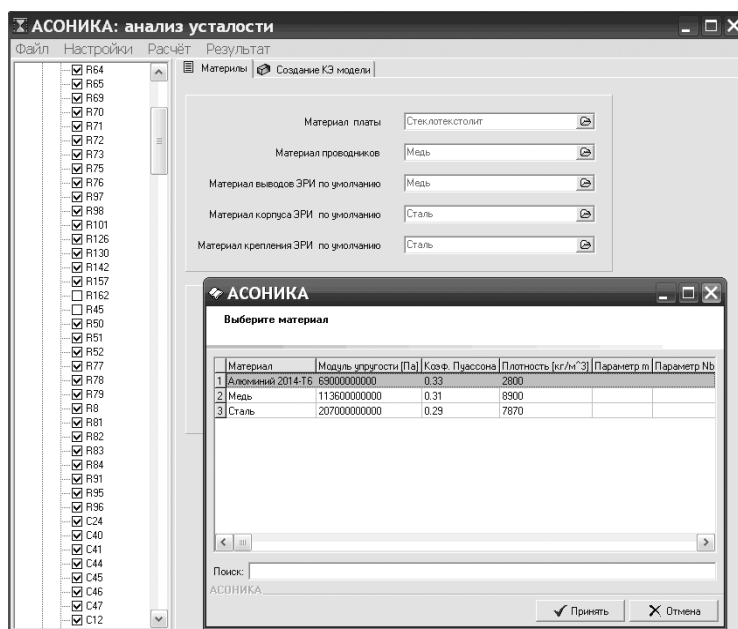
Основу БД составляют модели вариантов установки РЭ, на основе которых, используя минимум параметров (размеры посадочного места и корпуса РЭ, сечения корпуса и выводов, параметры материалов выводов, клея или лака), автоматически рассчитываются остальные параметры (координаты установки выводов, длины участков 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 их изменения вручную. Модели материалов, содержащихся в базе, уже содержат усталостные и механические свойства, и от пользователя требуется указать лишь названия материалов перед проведением расчёта.

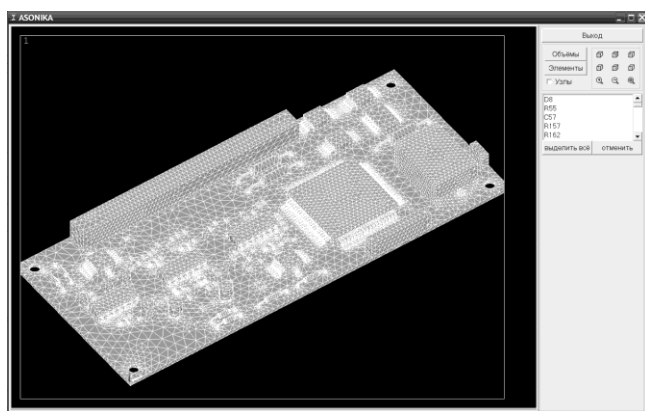
Библиотека макросов, помимо различных вспомогательных макросов и макросов проведения расчёта на механические воздействия, содержит также пользовательские интерфейсы на языке tcl/tk, использующие для отображения результатов все графические возможности ANSYS. Основная программа контролирует данные интерфейсы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

Автоматизированная подсистема позволяет проводить анализ усталостной прочности конструкций ПУ при следующих механических воздействиях:

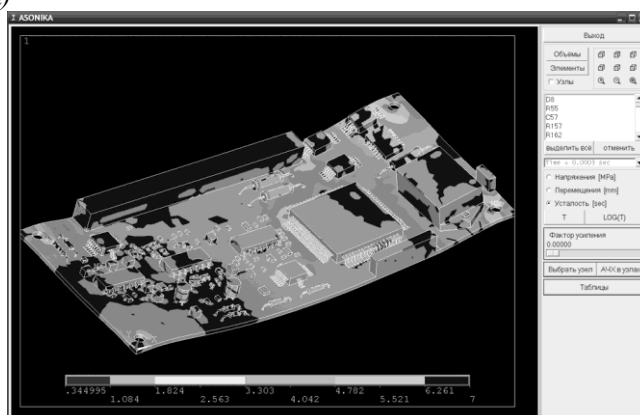
- 1) гармонической вибрации;
- 2) случайной вибрации;
- 3) многократном ударном воздействии.



а)



б)



в)

Рис. 4. Экранные формы автоматизированной подсистемы: а – задание исходных данных; б – просмотр результатов конечно-элементного разбиения; в – просмотр результатов расчёта (поле логарифма времени до усталостного разрушения)

Результатом расчёта являются поля следующих величин:

- 1) перемещений;
- 2) напряжений;
- 3) времени до усталостного разрушения.

Экранные формы автоматизированной подсистемы по заданию исходных данных и выводу результатов представлены на рис. 4.

Рассмотрим методику обеспечения защиты конструкций ПУ от усталостного разрушения с применением разработанной автоматизированной подсистемы. Данная методика может рассматриваться как часть более общей методики обеспечения надёжности конструкций РЭС при механических воздействиях с применением системы АСОНИКА.

Методика включает следующие этапы:

1. После создания модели ПУ в подсистеме АСОНИКА-ТМ осуществляется экспорт полученной модели в систему конечноэлементного 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. Визуализация и анализ результатов. Пользователь просматривает поля и графики выходных механических характеристик (напряжений, перемещений, времени до усталостного разрушения).

4. В случае превышения расчетными величинами допустимых значений редактирование конструкции и проведение повторного расчёта 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 рёбер жесткости в конструкцию ПУ;
 - изменение материалов платы и отдельных РЭ.
5. Сохранение результатов в табличной или графической форме.

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

📖 Литература

1. Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов / под ред. В.А.Фролова. М.: Радио и связь. 1984. 224 с.
2. Вибрации в технике: Справ.: В 6 т. / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение. 1978 – 1981.
3. Дзержинский С.М., Рыжанков В.И. Модель форсирования испытаний РЭА на воздействие широкополосной случайной вибрации // Междувед. темат. науч. сб.: Механика радиоэлектронных и вычислительных устройств / Таганрог. радиотехн. ин-т. Таганрог: изд. ТРТИ. 1982. Вып. 2. С. 61–66.

4. *Зенкевич О.С.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир. 1975.
5. *Маквецов Е.Н., Тартаковский А.М.* Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. М.: Радио и связь. 1993. 200 с.
6. *Маквецов Е.Н.* Цифровое моделирование вибраций в радиоконструкциях. М.: Сов. радио. 1976. 123 с.
7. *Тартаковский А.М.* Краевые задачи в конструировании радиоэлектронной аппаратуры. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та. 1984. 136 с.
8. *Кофанов Ю.Н. и др.* Информационная технология моделирования механических процессов в конструкциях радиоэлектронных средств. М.: Радио и связь. 2000. 160 с.
9. *Кожевников А.М.* Исследование и разработка машинных методов расчета конструкций печатных узлов РЭА при внешних механических воздействиях / Дис. канд. техн. наук. М. 1976. 186 с.
10. *Кришук В.Н.* Исследование и разработка машинных методов расчета конструкций бортовой РЭС этажерочного типа на вибрационные и ударные воздействия / Дис. канд. техн. наук. М.: МИЭМ. 1977. 213 с.
11. *Шалумов А.С.* Моделирование механических процессов в конструкциях РЭС на основе МКР и аналитических методов: Учебное пособие. Ковров: Ковровская государственная технологическая академия. 2001. 296 с.
12. *Кофанов Ю.Н., Шалумов А.С., Журавский В.Г., Гольдин В.В.* Математическое моделирование радиоэлектронных средств при механических воздействиях. М.: Радио и связь. 2000. 226 с.
13. *Кофанов Ю.Н., Шалумов А.С., Варицев К.Б. и др.* Подсистема анализа и обеспечения стойкости конструкций радиоэлектронной аппаратуры к тепловым, механическим и комплексным воздействиям АСОНИКА-ТМ / Учеб. пособие. М.: МГИЭМ. 2000. 61 с.
14. *Шалумов А.С., Кофанов Ю.Н., Малютин Н.В., Способ Д.А., Жаднов В.В., Носков В.Н., Ваченко А.С.* Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий: Том 1 / под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат. 2007. 538 с.
15. *Фадеев О.А., Ваченко А.С.* Автоматизация прочностного анализа сложных конструкций радиоэлектронных средств // Техника машиностроения. 2002. № 3. С. 22–30.
16. *Фадеев О.А., Орлов А.В., Шалумов А.С.* Методика моделирования механических и тепловых процессов в элементах конструкций на основе систем ANSYS и АСОНИКА // «Управление в технических системах – XXI век»: Сб. науч. трудов III Международной научно-технической конференции. Ковров. 2000. С. 155–157.
17. *Журавский В.Г., Гольдин В.В., Шалумов А.С., Ваченко А.С., Способ Д.А.* Совместное применение автоматизированных систем ANSYS и АСОНИКА для моделирования и обеспечения механической стойкости сложных конструкций радиоэлектронных средств // Радиопромышленность. 2003. № 3. С. 41–69.
18. *Способ Д.А., Васильчиков С.А., Игнатьев А.А.* Автоматизированная подсистема моделирования тепловых и механических процессов в печатных узлах АСОНИКА-ТМ // Техника-машиностроения. 2002. Вып. 3. С. 36–40.

Поступила 31 августа 2011 г.

AUTOMATION FACILITIES DEVELOPMENT FOR FATIGUE ANALYSIS OF RADIOELECTRONIC MEANS UNDER MECHANICAL EFFECTS

© Authors, 2011

E.O. Pershin, D.B. Solovyov, A.S. Shalumov

This article presents a general methodology of fatigue life prediction of these electronic components within printed circuit assemblies (PCA) under mechanical effects.

An automated subsystem of fatigue analysis of printed circuit assemblies under mechanical effects was developed. Mechanical characteristics of electronic components are determined using finite element modeling approach. The subsystem permits automatic transformation of АSONИКА-ТМ parametrical models into ANSYS solid model, and automatic finite element mesh generation. Dynamic analysis is performed within ANSYS environment. The vibration analysis provides system characteristics such as modal shapes and, and dynamic responses including displacements, accelerations, and stresses. Using the results of analysis, fatigue life is predicted based material durability information. The automated subsystem controls the analysis procedure and visualizes the modeling results. Using PCA models constructed in АSONИКА-ТМ, geometrical and material properties of electronic components are transferred to ANSYS preprocessor. The database of АSONИКА-ТМ contains a large number of parametrical models of electronic components with arbitrary mounting types. The program analyzes model's information and generates a set of ANSYS macro commands which create the finite element model.