

Глава 4

Проблемы математического моделирования при обеспечении высокой надежности и качества бортовой аппаратуры

1.1. Повышение качества автоматизированного проектирования электронных средств на основе комплексирования физической и математических моделей

Одной из важнейших задач обеспечения качества при проектировании электронных средств (ЭС) является задача анализа и обеспечения электрических, тепловых и механических режимов электрорадиоэлементов (ЭРЭ) конструкций ЭС. Традиционно эта задача решалась методом макетирования. Сложность современных устройств, повышение плотности монтажа, снижение массогабаритных показателей зачастую затрудняют макетирование.

Развитие вычислительной техники и появление мощных программных средств моделирования позволяет все шире использовать методы расчета электрических, тепловых и механических режимов на основе математического моделирования. Однако наличие погрешностей моделирования может явиться причиной разработки некачественных ЭС. В первую очередь, снижение качества выражается в повышенных реальных нагрузках ЭРЭ и материалов по сравнению с нагрузками, полученными в результате предварительного моделирования.

Существует три основных вида погрешностей, возникающих при автоматизированном моделировании физических процессов в ЭС.

Первая составляющая выходной погрешности связана с погрешностью вносимой структурой математических моделей. Структура моделей определяется тем, какие приняты допущения в отношении учета или неучета тех или иных местных особенностей протекания физических процессов в ЭС. К примеру, в тепловых моделях могут не учитываться излучающие составляющие между соседними ЭРЭ. Также может не учитываться наличие отверстий в печатных платах под выводами ЭРЭ. Подобные допущения принимаются в том случае, если они не вносят существенных искажений в протекание тепловых процессов. Эти допущения изучены во многих теоретических и экспериментальных исследованиях. Поэтому электрические, механические и тепловые модели на сегодня хорошо отработаны, и с учетом обычно принимаемых допущений они вносят не более 1-2% в общую погрешность результатов моделирования.

Еще меньшую погрешность вносит вычислительный процесс при расчете этих моделей на ЭВМ. Большая размерность представления чисел в современных ЭВМ и специальные алгоритмы отслеживания погрешностей позволяют считать, что вычислительная погрешность в современных САПР мала.

И, наконец, третья составляющая, вносящая существенный вклад в погрешность результатов моделирования физических процессов - неточность входной информации. Прежде всего, отсутствует информация о коэффициентах связи физических процессов между собой. Например, таких параметров, как температурные коэффициенты изменений свойств материалов несущих конструкций (температурный коэффициент модуля упругости, температурный коэффициент механических потерь и др.). С другой стороны в литературе приведены разные значения одних и тех же параметров ЭРЭ, изготовленных разными заводами-изготовителями. К таким параметрам, например, относятся сопротивление эмиттера и базы, емкость коллектора, тепловое сопротивление крепления и внутреннее тепловое сопротивление ЭРЭ.

В настоящее время при проектировании ЭС компьютерное моделирование проводится по номинальным (средним) значениям внутренних параметров моделей ЭРЭ и конструктивных материалов, содержащихся в справочниках, или по параметрам, взятым из

аналогов при отсутствии данных в справочниках. Однако, существующий разброс параметров, зависящий от множества факторов, присущих для каждого производителя ЭРЭ и конструктивных материалов, вносит заметную погрешность при моделировании электрических, тепловых и механических процессов в ЭС. Это приводит к неопределённости в принятии решений по запасам нагрузок, что отрицательно влияет на качество разрабатываемых ЭС.

Поэтому возникает необходимость в снижении погрешности задания исходных данных при моделировании физических процессов, входящих в автоматизированное проектирование ЭС. Это возможно путем проведения идентификации. Если путём идентификации получить действительные значения параметров для конкретных ЭРЭ и материалов, предназначенных для проектируемых ЭС, и при моделировании печатного узла ЭС использовать их вместо номинальных значений, то можно получить значительное снижение погрешностей моделирования. В этом заключается суть предлагаемого метода повышения качества автоматизированного проектирования модулей электронных средств.

Важно, что путём идентификации можно получать значения тех физических параметров ЭРЭ и материалов, которых нет в справочниках. Справочники, как правило, не ориентированы на математическое моделирование, которое требует большего количества параметров, описывающих электрические, тепловые и механические модели. Это обусловлено тем фактом, что при математическом моделировании на ЭВМ все ЭРЭ заменяются эквивалентными схемами (цепями). При этом количество параметров, входящих в эквивалентные схемы ЭРЭ, гораздо больше, чем количество параметров, указанных в технических условиях, паспортах и справочниках на эти ЭРЭ. Именно эти параметры, необходимые для проведения моделирования ЭС на ЭВМ, часто являются недостоверными и подлежат идентификации.

Например, в модели диода или транзистора часто необходимо идентифицировать сопротивления эмиттера, коллектора и базы, а также емкости эмиттер-база, коллектор-база. Это для простейшей модели Эберса-Молла. В полной модели Эберса-Молла количество идентифицируемых параметров значительно больше. Такова же ситуация и в новых микросхемах большой интеграции. В более простых ЭРЭ: резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности – идентификации часто подлежат паразитные проводимости, емкости, индуктивности и другие параметры.

Идентификация параметров моделей проводится на ранних этапах проектирования, когда нет изготовленных печатных узлов и блоков ЭС, но известны применяемая элементная база и марка материала печатной платы. Так как ЭРЭ располагаются на печатных платах ЭС, то для идентификации должны быть реализованы физические модели в виде фрагментов печатных узлов, в которых на печатных платах должны быть помещены по одному представителю каждого ЭРЭ, для которого требуется получить хотя бы один параметр путем идентификации. При этом эти ЭРЭ должны быть закреплены именно таким образом, как они будут смонтированы в реальных ЭС. Это позволит путем идентификации, задавая на физическую модель (фрагмент печатного узла) тепловое или механическое воздействие, провести идентификацию таких, как правило, информационно недостоверных параметров, как тепловое сопротивление и жесткость крепления, внутренние тепловые сопротивления, коэффициент демпфирования колебаний самой печатной платы, ее модуль упругости и другие параметры.

Возможности изготовления физических моделей в виде небольших макетов способствует существующая унификация конструкций ЭС и существующий на предприятии ограниченный перечень ЭРЭ, разрешенных к применению. Поэтому появляется возможность получить необходимые реальные значения параметров ЭРЭ и материалов для полного моделирования взаимно связанных электрических, тепловых и механических процессов при автоматизированном проектировании всего печатного узла ЭС.

Предлагаемая в работе с целью идентификации параметров ЭРЭ и конструктивных материалов идея комплексирования математических моделей электрических, тепловых и механических процессов с физической моделью изделия позволяет снизить погрешности математического моделирования и повысить достоверность прогнозирования результатов проектирования и изготовления ЭС. Из этого можно сделать вывод, что применение натуральных испытаний физической модели (репрезентативного фрагмента) ЭС для идентификации параметров является одним из рациональных путей повышения эффективности применения математического моделирования при проектировании ЭС.

Под комплексированием моделей будем понимать совместное использование двух типов моделей: физической и математических. Такое комплексирование физической модели фрагмента ЭС с математическими моделями физических процессов, протекающих во фрагменте, показано на рис. 1 (блоки 2 и 3).



Рисунок 1 – Метод повышения качества автоматизированного проектирования ЭС на основе комплексирования моделей

Физическая модель, построенная в виде фрагмента конструкции ЭС (см. блок 1 на рис. 1) позволяет, с одной стороны, измерить определяющие характеристики (токи, электрические напряжения, мощности тепловыделений, температуры элементов, ускорения

вибраций и ударов ЭРЭ), а с другой стороны, провести математическое моделирование протекающих во фрагменте конструкции ЭС физических процессов при различных значениях внутренних параметров.

Математические модели ЭС: электрическая, тепловая и механическая – информационно взаимосвязаны. Поэтому наиболее точные результаты идентификации параметров можно получить при комплексировании физической модели сразу с тремя взаимосвязанными математическими моделями.

Имея результаты физического и математического моделирования, можно провести идентификацию искомых внутренних параметров ЭРЭ и материалов (блок 4 на рис. 1).

Поскольку, идентификация позволяет получить реальные значения внутренних параметров для конкретных ЭРЭ и материалов, появляется возможность провести математическое моделирование полноразмерных математических моделей электрических, тепловых и механических процессов в проектируемых ЭС (блоки 5, 6 на рис. 1).

Таким образом, закладывается основа для принятия проектных решений (блок 7 на рис. 1), обеспечивающих запасы по электрическим, тепловым и механическим нагрузкам ЭРЭ и материалов несущих конструкций ЭС.

На рис. 2 представлена схема примерной практической реализации предлагаемого метода комплексирования. Специально изготовленный репрезентативный фрагмент печатного узла закрепляется на столе вибростенда. Имеется возможность одновременно измерять напряжения на ЭРЭ, температуры и ускорения вибрации в контрольных точках.

Реально комплексирование физической модели с математическими моделями электрических, тепловых и механических процессов, реализованных на ЭВМ, может происходить поочередно. Имеются три варианта.

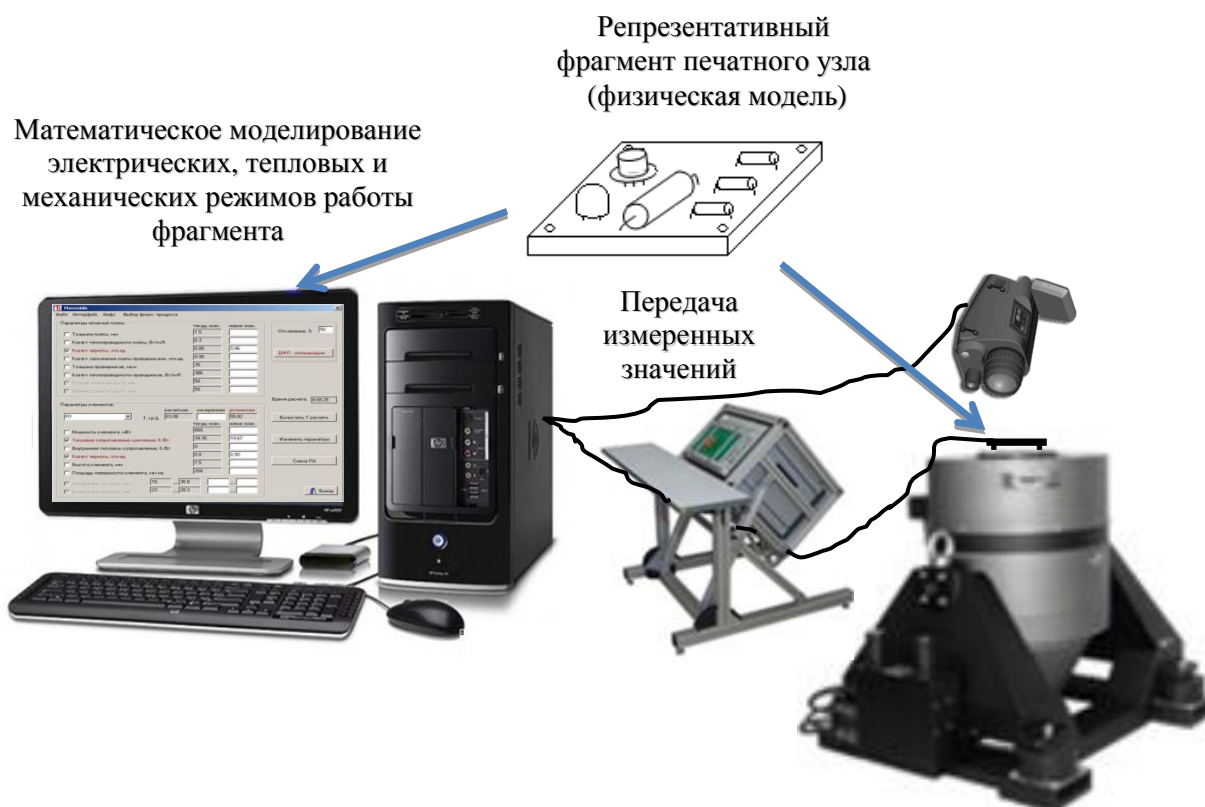


Рисунок 2 – Схема практической реализации метода комплексирования

1. Для идентификации электрических параметров на физическую модель фрагмента конструкции ЭС подаются электрические сигналы (питание и функциональные сигналы) и измеряются напряжения на контрольных элементах. Параллельно воспроизводится на ЭВМ электрический процесс в программе PSpice (или аналогичной программе) и получаются

напряжения на тех же контрольных элементах. Измеренные и рассчитанные напряжения подаются на программу оптимизации. Ее цель - путем изменения идентифицируемых геометрических и физических параметров (ГФП) в математической модели на ЭВМ добиться минимума отклонения рассчитанных значений напряжений на элементах от измеренных значений. На диапазон изменения идентифицируемых параметров в программе оптимизации могут быть наложены ограничения, определенные физическим смыслом задачи.

Критерий оптимизации имеет вид квадрата разности между измеренным и расчетным значениями определяющих характеристик (в выше рассмотренной задаче идентификации это напряжения на контрольных элементах):

$$\min_{\mathbf{q}^P} H = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i^P - y_i^M}{y_i^M} \right)^2, \quad (1)$$

где \mathbf{y}^M – вектор измеренных определяющих характеристик; $\mathbf{y}^P = f(\mathbf{q}^P)$ – вектор определяющих характеристик, полученных в результате моделирования; N – число определяющих характеристик; \mathbf{q}^P – вектор идентифицируемых ГФП модели фрагмента конструкции.

В конце процесса оптимизации, когда критерий H становится меньше наперед заданной малой величины ε , полученное значение параметров \mathbf{q}^P , принимается в качестве окончательных значений идентифицируемых параметров.

2. В случае идентификации тепловых параметров после включения электрической схемы, реализованной в физической модели, измеряются значения температур в контрольных точках. Их расположение определяется удобством крепления датчиков температуры.

С помощью программы моделирования тепловых процессов, например АСОНИКА-Т, АСОНИКА-ТМ, ANSYS и др., рассчитываются температуры в тех же контрольных точках. Далее на основе того же критерия (1) проводится оптимизация той же программой, которая применяется и для идентификации электрических параметров. В данном случае в критерии (1) под векторами \mathbf{y}^M и \mathbf{y}^P понимаются последовательности измеренных и рассчитанных температур в контрольных точках.

3. В случае идентификации механических параметров физическая модель (макет) устанавливается на вибростенде (при этом электрическая схема не включается). Также выделяются контрольные точки, в которых устанавливаются датчики ускорений и с помощью интерфейса связи и управляющей программы измеренные значения передаются в программу оптимизации. С помощью программ АСОНИКА-М и АСОНИКА-ТМ рассчитываются ускорения в тех же контрольных точках. В критерии (1) под векторами \mathbf{y}^M и \mathbf{y}^P понимаются измеренные и рассчитанные ускорения вибрации.

Возможен четвертый вариант, когда физическая модель используется с интегрированной математической моделью, которая представляет собой объединение трёх математических моделей. Тогда эксперимент с физической моделью проводится на вибростенде с включенной электрической схемой. Включение электрической схемы возбуждает как электрический процесс в ней, так и тепловой процесс от рассеиваемых тепловыделений ЭРЭ. Для учета естественной интеграции между взаимовлияющими электрическими, тепловыми и механическими процессами в физической модели необходимо использовать моделирование одновременно тремя программами электрического, теплового и механического моделирования, связанными между собой интерфейсными программами-конвертерами. Они обеспечивают передачу мощностей тепловыделений из электрической модели в тепловую модель, а температур ЭРЭ и различных участков платы в электрическую и механическую модели.

Такое комплексирование физической модели с взаимосвязанными электрической, тепловой и механическими математическими моделями позволяет идентифицировать

коэффициенты влияния температуры на электрические параметры ЭРИ и на механические параметры материала платы.

Отметим, что при моделировании ЭС математические модели печатных узлов имеют большую размерность, поэтому проектировщик с целью сокращения размерности задачи может сократить число идентифицируемых параметров, оставив лишь наиболее значимые. Тогда в процессе идентификации будут определяться действительные значения только этих параметров, а значения оставшихся внутренних параметров печатного узла будут приниматься равными номинальным.

Отбор значимых параметров предлагается проводить по значениям относительных функций параметрической чувствительности выходных характеристик y_j ЭС, включаемых в критерий оптимизации, к изменению каждого внутреннего параметра печатного узла:

$$S_{q_k}^{y_j} = A_{q_k}^{y_j} \times \frac{q_k^{\text{НОМ}}}{y_j^{\text{НОМ}}} = \frac{\partial y_j}{\partial q_k} \frac{q_k^{\text{НОМ}}}{y_j^{\text{НОМ}}}, \quad (2)$$

где $A_{q_k}^{y_j}$ – абсолютная функция параметрической чувствительности j -й выходной характеристики к изменению k -го параметра; $q_k^{\text{НОМ}}$ – номинальное значение k -го параметра; $y_j^{\text{НОМ}}$ – номинальное значение j -й выходной характеристики; ∂y_j – очень малое приращение значения j -й выходной характеристики; ∂q_k – очень малое приращение значения k -го параметра.

Структура метода комплексирования показана на рис. 3.

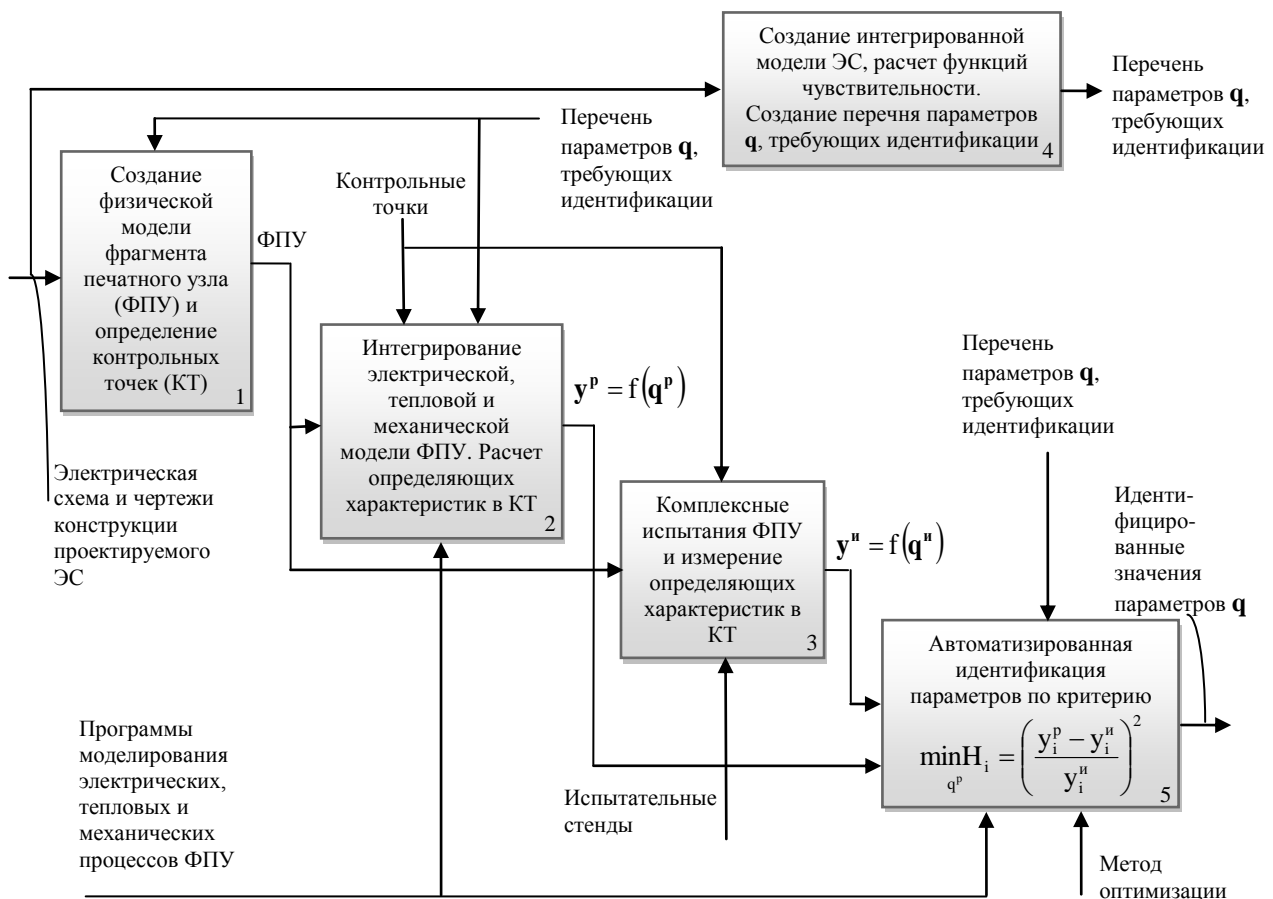


Рисунок 3 – Структура метода комплексирования

Из рис. 3 видно, что исходная информация для комплексирования включает в себя: электрическую схему и чертежи конструкции проектируемого ЭС, а также программы моделирования электрических, тепловых и механических процессов. Для конкретного проектируемого ЭС вначале создается перечень параметров q ЭРИ и материалов, которые требуют идентификации. Определению подлежит также метод оптимизации, который зависит от свойств программ моделирования электрических, тепловых и механических процессов, поскольку эти программы в процессе оптимизации применяются несколько раз и не должны затягивать во времени процесс оптимизации.

Под ФПУ понимается фрагмент печатной платы, который изготавливается из того же материала, что и плата проектируемого печатного узла. Элементы для размещения берутся по одному каждого типа, для которых нужно идентифицировать параметры. Из них составляется простейшая функциональная схема. На физическую модель фрагмента конструкции ЭС подаются электрические сигналы (питание и функциональные сигналы). Она может быть также закреплена на вибростенде, в случае идентификации механических параметров. Измеряются определяющие (выходные) характеристики в заранее выбранных контрольных точках.

Параллельно проводится моделирование на ЭВМ определяющих характеристик интегрированной математической модели (электрических, тепловых и механических процессов).

Измеренные и рассчитанные определяющие характеристики подаются на программу оптимизации, цель которой, путем автоматизированного изменения идентифицируемых ГФП в математической модели на ЭВМ добиться минимума отклонения их рассчитанных значений от измеренных.

Критерием сравнения расчетного и измеренного значений определяющих характеристик является квадратичный критерий оптимизации (1). Наличие четной степени дает положительное значение критерию N независимо от того, какое - положительное или отрицательное значение приобретает разность расчетного и измеренного значения параметра на текущий момент оптимизации. Критерий N , будучи всегда положительным, в конце минимизации должен принять значение меньше наперед заданной малой величины ε .

Данный метод проверен при проведении автоматизированного проектирования бортовых источников вторичного электропитания (ИВЭП). При этом повышение качества проектирования выразилось в уменьшении погрешности моделирования электрических, тепловых и механических процессов в среднем на 22 %. Это позволило обнаружить возможность нагрева некоторых ЭРЭ выше предельно допустимых значений, что могло привести к их отказу в процессе эксплуатации. Поэтому при автоматизированном проектировании были внесены дополнительные шины теплоотвода, что позволило повысить надежность ИВЭП до требуемого уровня.

Заключение. Рассматриваемый подход к повышению качества автоматизированного проектирования модулей ЭС в отличие от существующих реализован с использованием комплексированной модели, представляющей собой синтез физической и математических моделей фрагмента конструкции ЭС. При этом путём использования процедуры идентификации уточняются геометрические и физические параметры радиоэлементов и материалов конструкции, необходимые для проведения моделирования электрического, теплового и механического процессов, протекающих в электронном модуле. В качестве показателя качества автоматизированного проектирования взята погрешность определения электрических, тепловых и механических нагрузок радиоэлементов и конструкционных материалов проектируемого электронного модуля. Метод позволяет на этапе расчетов более точно определить режимные нагрузки ЭРЭ и материалов и, соответственно, более точно рассчитать впоследствии необходимые показатели надежности и качества при компьютерном моделировании проектируемых ЭС.