

УДК 05.12.04

**В.Н. Осолков**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## **ОБ ОБЩЕСИСТЕМНОЙ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Дана оценка теплового моделирования на этапе проектирования методом итерации. Для аппаратуры функционально-узловой принципа конструирования приемлема поэтапная идеология моделирования тепловых режимов конструкций РЭС, адекватная блочно-иерархическому проектированию и имеющая нисходящее направление, при которой конструктивная система, для которой может быть применен данный способ моделирования, разбивается на следующие изотермические элементы: элементы БНК, систем охлаждения и т.п. на том же структурном уровне (тела оболочки), модули нижележащего уровня (дискретные тела). При этом должны быть известны внешние тепловые воздействия – температуры сред или наружных поверхностей соседних модулей этого и вышележащих уровней, с которыми рассматриваемая конструкция находится в теплообмене, значения которых определены на предыдущих этапах теплового расчета. Недооценка метода итерации на этапе теплового проектирования приводит к необходимости решения этих ошибок на этапе изготовления технологическими методами.

**Ключевые слова:** иерархия РЭС, поэтапное тепловое моделирование, итерация, агрегирование, декомпозиция, оценка точности моделирования.

**V.N. Oskolkov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **ABOUT SYSTEM-WIDE CONCEPTUAL MODEL OF THERMAL DESIGN**

The estimation of thermal modeling at the design stage by iteration. For equipment functional-hub concept design acceptable phased ideology of modeling of thermal modes of constructions RES, adequate block hierarchy design and with the downward direction in which structural system that can be applied this method of modeling is divided into the following isothermal elements: elements of BOC, cooling systems, etc. on the same structural level (body shell), modules underlying level (discrete body). This should be known external heat – temperature environments or external surfaces of adjacent modules of this and the above levels that consider the design is in heat transfer, the value of which is determined on the previous stages of thermal calculation. Underestimation of the method iteration on stage thermal design leads to necessity of the decision of errors at the stage of manufacturing technological methods.

**Keywords:** hierarchy RES, phase thermal modeling, iteration, aggregation, decomposition, assessment of the accuracy of modeling.

Проблема разработки моделей теплового проектирования РЭС началась с первого поколения аппаратуры – электронных ламп. В связи с микроминиатюризацией аппаратуры эта проблема актуальна до сих пор. Ошибки при моделировании теплового режима на этапе проектирования приводят к необходимости исправлять их на этапе изготовления технологическими методами [1].

Ключевой проблемой при разработке подсистемы проектирования «Тепловые режимы» являются выбор, разработка моделей анализа теплообмена в исследуемых конструкциях. Конечная цель теплового моделирования – получение расчетной информации и анализ значений температур отдельных ИЭТ. Только при этом условии можно сделать окончательный вывод о тепловом режиме исследуемой аппаратуры [2].

Разработка тепловых моделей РЭС проводится в соответствии с требованиями решаемой задачи и должна решать следующие основные вопросы: построение геометрической модели, учитывающей компоновку и определяющие размеры объекта; формирование источников и стоков теплоты; описание внутренних тепловых процессов; определение внешней среды и описание теплообмена с ней.

РЭС – сложная система, с множеством внешних и внутренних тепловых моделей, и основная сложность при разработке моделей таких объектов – в трудности учета взаимного влияния большого числа находящихся в тепловом контакте тел с источниками теплоты. Достаточно полное математическое описание температурного поля таких объектов может быть дано в виде системы дифференциальных уравнений теплопроводности для твердых тел и уравнений энергии для потоков теплоносителей с различными граничными условиями [3]. Такая задача неоправданно трудоемка или практически неосуществима даже с применением современных электронно-вычислительных машин. Кроме того, входная информация для расчета тепловых режимов часто весьма неполна, особенно на ранних стадиях проектирования, или задается неточно – имеется разброс параметров, также присутствует часто значительная погрешность определения параметров модели. Можно сказать, что модель не будет более «реалистична», если будет содержать как можно больше переменных, потому что, как правило, число переменных не столь принципиально, как соотношение между ними. Цель состоит в том, чтобы найти компромисс между простотой и точностью – построить простейшую модель, адекватно отражающую процесс теплообмена с приемлемой точностью и полнотой, т.е. включающую ми-

нимальное число переменных, учитывая соображение о том, что степень понимания явления обратно пропорциональна числу переменных, фигурирующих в его описании. Опыт [4–6] показывает эффективность общего подхода к анализу температурных полей сложных объектов, названного методом поэтапного моделирования. Основная идея – построение иерархии моделей, описывающих исследуемую систему на разных уровнях детализации ее характеристик, при этом число переменных в каждой из моделей должно быть невелико. При построении моделей используются такие понятия теории сложных систем, как агрегирование, декомпозиция [7]. Под агрегированием понимается укрупнение исходной полной модели для расчета некоторых усредненных характеристик. Например, полная информация о температурном поле заменяется несколькими характеристиками – среднеповерхностной, среднеобъемной температурой. Агрегирование также может выражаться в уменьшении мерности задачи и т.д. Декомпозиция состоит в расчленении задачи на ряд независимых – выделение элемента или группы элементов из системы для более подробного анализа, при этом должен выполняться постулат совместимости.

Сначала рассматривается РЭС как система в целом, производится агрегирование отдельных ее частей, используя малое различие между ними, и декомпозиция, пренебрегая слабыми связями; при этом определяются усредненные температуры. Далее выделяются узкие места, более детально рассматриваются отдельные части; при этом для задания граничных условий используется информация, полученная на предыдущем этапе, которая агрегируется. Принципы декомпозиции и агрегирования представляют собой принципы организации теплового моделирования РЭС как системы по этапам – горизонтальным иерархическим уровням моделирования, или, в концепции [8–10], стратам. Целесообразно, чтобы уровни моделирования совпадали с иерархическими уровнями конструктивно-функционального структурного деления аппаратуры.

Разбиение такого рода позволяет найти общий подход к поэтапному моделированию сложных иерархических систем. Оно обусловлено потребностями практики теплового проектирования – последовательной выработкой проектных решений по обеспечению температурной надежности для различных модулей РЭС в процессе технического проектирования аппаратуры в целом.

Общее направление расчета и анализа – нисходящее, от аппаратуры, смонтированной на объекте-носителе, до отдельного ИЭТ; только в этом случае можно полностью учесть весь комплекс факторов, влияющих на тепловой режим ИЭТ, начиная от окружающей среды.

Моделирование в принципе может начинаться с любого, не самого высокого иерархического уровня, например, когда анализируется тепловой режим разрабатываемых типовых устройств (блоков, МСБ), предназначенных для эксплуатации в составе различной аппаратуры. Однако в этом случае в ТЗ необходимо представить информацию о внешних тепловых воздействиях, полученную на основе экспертных оценок, предварительно выполненных научно-исследовательских работ.

На каждом уровне (этапе) рассматриваются тепловые взаимодействия между модулями предыдущего уровня иерархии, которые в терминологии теплового моделирования называются источниками теплоты. Модули РЭС здесь имеют некоторые агрегированные, усредненные внутренние теплофизические параметры, усредненное распределение мощностей рассеивания, и рассчитываются для них некоторые усредненные температурные характеристики, а также средние температуры элементов БНК (базовые несущие конструкции), СОТР (системы обеспечения тепловых режимов), воздуха между модулями. На последующем этапе, при более подробном рассмотрении теплового режима отдельного модуля, эта информация используется в качестве входной, определяющей внешние температурные воздействия. Итак, от этапа к этапу подробность рассмотрения возрастает, расчет заканчивается или на этапе, когда определяются температуры корпусов ИЭТ,  $p-n$  переходов и т.п., или на этапе при определении температур элементов и компонентов частного применения, если таковые имеются в составе аппаратуры.

Существуют два общих способа укрупнения тепловых моделей [5]. Первый способ заключается в переходе от объекта – системы тел к квазиоднородному телу с некоторыми эффективными теплофизическими свойствами (модель с распределенными параметрами). Такой подход возможен, когда объект состоит из достаточно большого числа близких в конструктивном отношении элементов (элементарных ячеек), повторяющихся во всех измерениях (например, нагретая зона блока), представляющая собой комплект печатных узлов).

Элементарной ячейкой здесь могут быть модуль РЭС и часть соседнего пространства – элементы БНК, воздушные прослойки. Ячейка имеет усредненные теплофизические параметры, распространяемые на всю систему. Температурное поле в этом случае описывается дифференциальным уравнением теплопроводности, и модель позволяет рассчитать пространственное распределение локально усредненной в пределах элементарной ячейки температуры.

Другой способ укрупнения заключается в том, что к исходной математической модели применяются интегральные операции усреднения по некоторым координатам, по площади или по объему. Либо при этом уменьшается размерность задачи, либо задача сводится к расчету среднеповерхностных или среднеобъемных температур отдельных частей системы (модуль РЭС или их групп) – модель с сосредоточенными параметрами. Что касается граничных условий, то возможность замены пространственного распределения тепловых воздействий на границах усреднения обосновывается принципом малых возмущений (местного влияния), согласно которому любое местное возмущение температурного поля является локальным и не распространяется на отдельные участки поля.

Часто используется понятие так называемой «условной среды», общее тепловое воздействие которой эквивалентно тепловому воздействию всех объектов, окружающих рассматриваемый. Следует отметить, что если внешний модуль расположен близко к рассматриваемому (достаточно сильная тепловая связь), но модули имеют металлические кожухи, равномерное распределение мощностей рассеивания, то допущение об усредненных внешних воздействиях должно хорошо работать.

В некоторых случаях целесообразно объединить некоторые этапы моделирования, чтобы избежать погрешностей усреднения на переходах, если, конечно, при этом модель не слишком усложняется. Принцип местного влияния может быть использован также при объединении модулей РЭС (источников теплоты) в группы. Эта ситуация возникает, когда априорно могут быть выделены «узкие места» – модули, тепловой режим которых будет наиболее напряженным из-за больших мощностей рассеивания или худших условий теплообмена. Тогда воздействия удаленных модулей, если не требуется по заданию рассматривать подробнее, могут быть усреднены, объединены.

Метод поэтапного моделирования является приближенным и требует обоснования допущений и анализа погрешностей для каждого рассматриваемого класса объектов. Общие требования к тепловым режимам и математическим моделям РЭС или отдельным их модулям следующие.

Модель должна адекватно отражать процессы теплообмена в объекте, обеспечить многовариантный расчет и анализ тепловых характеристик объекта, позволять оценивать эффективность систем охлаждения в зависимости от внутренних и влияющих факторов – электрических режимов, конструктивно-технологических параметров, а также внешних условий – тепловых воздействий окружающей среды, других аппаратов, модулей.

Все эти влияющие факторы должны найти адекватное отражение в теплофизических параметрах, внешних и внутренних тепловых воздействиях модели. Модель должна быть достаточно проста и вместе с тем должна отображать с необходимой точностью температурные характеристики РЭС; модели должны позволять проводить оценочные и более детальное, более точное моделирование в зависимости от стадии проектирования, этапа расчета.

Высокая точность моделирования при инженерных расчетах, как правило, не требуется по причине неточного знания входной информации. Математическая модель должна быть алгоритмически и программно реализуема на имеющихся технических средствах.

Унификация и стандартизация конструкций, воплощенные в системе БНК, создают предпосылки и требуют разработки унифицированных, универсальных тепловых и математических моделей, позволяющих проводить анализ тепловых режимов однотипных конструкций модулей РЭС.

Это обстоятельство существенно упрощает задачу выбора моделей, что очень важно при автоматизации проектирования. Степень универсальности моделей может быть и более высокая – модель может быть предназначена не только для анализа тепловых режимов однотипных модулей РЭС одного иерархического уровня, но и других уровней, главное, чтобы при этом стремление к обобщению, универсальности не делало модель слишком громоздкой, трудоемкой в математической и программной реализации.

Модели, реализующие поэтапный анализ тепловых режимов комплекса РЭС, должны строиться по иерархическому принципу, должна быть осуществлена их информационная совместимость в части задания внешних граничных условий на каждом последующем этапе моделирования. При этом, если необходимо, организуются соответствующие процедуры.

Модель должна быть экономична при ее программной реализации, что определяется затратами машинного времени и памяти. При выборе и разработке математической модели экономичность можно приближенно оценить количеством арифметических операций, выполняемых при реализации уравнений модели, а также по числу параметров, используемых в ней. Требования простоты (экономичности), точности и универсальности бывают, противоречивы, поэтому необходимо искать компромиссное решение [1].

### **Библиографический список**

1. Шмелев С.С., Осколков В.Н. Опыт обеспечения надежности РЭА на этапе изготовления // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (InnoTech 2013): материалы V Междунар. интернет-конф. молодых ученых, аспирантов и студентов; Пермь, 1 – 30 ноября 2013 г. – Пермь, 2013. – С. 161–166.

2. Ширяев Ю.Н., Киселев В.В., Осколков В.Н. Математическое моделирование тепловых режимов конструкций радиоэлектронных средств как сложных систем. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 105 с.

3. Шелест В.И. Оптимальное проектирование радиоэлектронных систем с волоконно-оптическим электромонтажем: монография. – СПб.: Лениздат, 1995. – С. 232.

4. Автоматизация теплового проектирования микросистемных устройств средствами САПР / В.А. Коваль [и др.]. – Львов: Высшая школа, 1988. – С. 256.

5. Энкарначчо Ж., Шлехтендаль Э. Автоматизированное проектирование. Основные понятия и архитектура систем: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 288.

6. Автоматизация проектирования и производства микросборок и электронных модулей / Н.П. Меткин [и др.]. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 280.

7. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах: монография. – Л.: Энергия, 1968. – С. 360.

8. Самарский А.А. Теория разностных схем: монография. – М.: Наука, 1977. – С. 654.

9. Шерин К.Ю. Синтез типоразмерных рядов базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств автоматизированных систем управления: монография. – СПб.: Политехника, 2000. – С. 116.

10. Буров И.В. Формализация синтеза конструкций РЭС производственных нестандартных АСУ: монография. – СПб.: Политехника, 2000. – С. 138.

### References

1. Shmelev S.S., Oskolkov V.N. Opyt obespecheniia nadezhnosti REA na etape izgotovleniia [The experience of reliability of radioelectronic equipment on the stage of manufacture]. *Innovatsionnye tekhnologii: teoriia, instrumenty, praktika (InnoTech 2013): materialy V Mezhdunarodnoi internet-konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov.Perm, 1 –30 November 2013*. Perm, 2013, pp. 161-166.

2. Shiriaev Iu.N, Kiselev V.V., Oskolkov V.N. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh rezhimov konstruksii radioelektronnykh sredstv kak slozhnykh system [Mathematical modeling of thermal structure of radio-electronic means as complex systems]. *Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet*, 2011. 105 p.

3. Shelest V.I. Optimal'noe proektirovanie radioelektronnykh sistem s volokonno-opticheskim elektromontazhem [Optimal design of radio-electronic systems with fiber-optic electromontage] Saint Petersburg: Lenizdat, 1995. 232 p.

4. Koval' V.A. Avtomatizatsiia teploвого proektirovaniia mikroelektronnykh ustroystv sredstvami SAPR [Automation of thermal design of microelectronic devices by CAD]. L'vov: Vysshaya shkola, 1988. 256 p.

5. Enkarnachcho Zh., Shlekhtendal' E. Avtomatizirovannoe proektirovanie. Osnovnye poniatii i arkhitektura system [Computer-aided design. Basic concepts and architecture of systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1986. 288 p.

6. Metkin N.P. Avtomatizatsiya proektirovaniya i proizvodstva mikrosborok i elektronnykh modulei [Automation of design and production of microcircuits and electronic modules]. Moscow: Radio i svyaz', 1986. 280 p.

7. Dul'nev G.N., Semyashkin E.M. Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh [Heat transfer in electronic devices]. Leningrad: Energiya, 1968. 360 p.

8. Samarskiy A.A. Teoriya raznostnykh skhem [The theory of difference schemes]. Moscow: Nauka, 1977. 654 p.

9. Sherin K.Yu. Sintez tiporazmernykh ryadov bazovykh nesushchikh konstruktsiy radioelektronnykh sredstv avtomatizirovannykh sistem upravleniya [Synthesis of complete units of the basic bearing structures of radio-electronic means of automated control systems]. Saint Petersburg: Politekhnik, 2000. 116 p.

10. Burov I.V. Formalizatsiya sinteza konstruktsiy RES proizvodstvennykh nestandartnykh ASU [Formalization of synthesis of structures RES production of non-standard ACS]. Saint Petersburg: Politekhnik, 2000. 138 p.

### **Сведения об авторах**

**Осколков Владимир Николаевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: voskolkov@mail.ru).

### **About the authors**

**Oskolkov Vladimir Nikolaevich** (Perm, Russian Federation) is Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Technology in Electrical Engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: voskolkov@mail.ru).

Получено 10.06.2014