

О МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КОНСТРУКТИВНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ – СИСТЕМЫ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Осколков В.Н.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: tak@pstu.ru

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 ошибок на этапе изготовления технологическими методами.

Ключевые слова: функционально-узловой принцип, тепловое проектирование, метод итерации

MODELING THE THERMAL REGIME STRUCTURALLY-FUNCTIONAL MODULES OF A SYSTEM OF DISCRETE ELEMENTS

Oskolkov V.N.

FGBOU VPO «Perm national research Polytechnic University», Perm, e-mail: tak@pstu.ru

The estimation of thermal modeling at the design stage by the method of iteration. For equipment functionally-hub concept design acceptable phased ideology modeling of thermal regimes constructions RES, adequate block hierarchy design and having a downward direction, in which the structural system that can be applied this way of modeling is divided into the following isothermal elements: elements of the BSC, cooling systems, etc. on the same structural level (body shell), the modules of the underlying level (discrete body). This should be known to the external heat – temperature environments or outer surfaces of adjacent modules and the overlying levels with which the considered design is the heat transfer, the values of which are defined in the previous steps of the thermal calculation. The underestimation of the method of the iteration step thermal design leads to the necessity of decision errors at the stage of manufacturing process methods.

Keywords: functionally-node principle, thermal design, iteration method

Недооценка метода итераций на этапе теплового проектирования для аппаратуры функционально модульного принципа конструирования приводит к проблемам на этапе изготовления. Многие устройства РЭС можно представить как систему дискретных элементов различной формы (тел, оболочек) с источниками теплоты или без них, а также газообразных или жидких теплоносителей (наружных и внутренних сред). При проектировании радиоэлектронных систем управления РЭС, как правило, проводится расчет и анализ нормальных тепловых режимов.

При составлении тепловой модели принимается допущение о том, что в элементах, в которых рассеивается мощность, она равномерно распределена по объему каждого тела, которое называют источником теплоты. Считается, что тела имеют изотермические поверхности, а внутренняя среда – воздух (жидкость) – равномерное распределение температуры по объему. Теплообмен между телами, средами осуществляется конвекцией, излучением, а также кондукцией (теплопроводностью).

В зависимости от формы пространства, взаимного расположения нагретых поверхностей, их температуры естественный теплообмен может протекать в замкнутых объемах (прослойках) – кондуктивно-конвективный теплообмен, от нагретой поверхности в неограниченную среду – конвективный теплообмен, что соответствующим образом классифицировано [1].

Интенсивность естественного конвективного теплообмена существенно повышается в условиях вентиляции, когда в конструкции организованы каналы для прохождения воздуха, имеются вентиляционные отверстия, поддоны и т.п. Передача теплоты за счет теплопроводности происходит в местах контакта тел, через воздушные зазоры, твердые прокладки.

Модели такого типа относятся к моделям с сосредоточенными параметрами или, по терминологии [2], к группе моделей с неупорядоченным расположением тел. Здесь абстрагируются от геометрии – каждое тело имеет два параметра – среднюю поверхностьную температуру t и суммарную мощность тепловыделений

в нем P ; теплообмен между телами, телами и средами характеризуется параметрами связей – тепловыми проводимостями σ .

Схематично такая модель может быть представлена в виде графа, тепловой схемы по правилам электротепловой аналогии [1].

Так как принята поэтапная идеология моделирования тепловых режимов конструкций РЭС, адекватная блочно-иерархическому проектированию и имеющая нисходящее направление, то каждая 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). 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 (уровнях) теплового расчета. Процесс теплообмена таких моделей математически описывается системой алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=2}^N \sigma_{1j} (t_1 - t_j) + \sum_{k=1}^K \sigma_{1ck} (t_1 - t_{ck}) &= P_1, \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} (t_i - t_j) + \sum_{k=1}^K \sigma_{ick} (t_i - t_{ck}) &= P_i, \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{j=1}^{N-1} \sigma_{Nj} (t_N - t_j) + \sum_{k=1}^K \sigma_{Nck} (t_N - t_{ck}) &= P_N, \end{aligned} \right\} (1)$$

где $i = \overline{1, N}$; $j = \overline{1, N}$ – номера тел, оболочек, внутренних сред с неизвестными среднеповерхностными или среднеобъемными температурами; $k = \overline{1, K}$ – номера наружных сред, тел с заданной среднеповерхностной, среднеобъемной температурой t_{ck} ; P_i – мощность рассеивания в i -м теле, Вт; σ_{ij} , σ_{ick} – тепловые проводимости (Вт/К), которые в общем случае могут представлять сумму конвективной, лучистой и кондуктивной составляющих, при отсутствии теплообмена $\sigma = 0$.

Для вентилируемой аппаратуры при установлении связи между температурой потока воздуха внутри оболочек t_b и снаружи $t_{b,вх}$, $t_{b,вых}$ используется соотношение:

$$t_b = (t_{b,вх} + t_{b,вых}) / 2. \quad (2)$$

$$\exists \forall i \in [1, \dots, N]; j \in [1, \dots, N], k \in [1, \dots, K];$$

Тогда мощность этого стока теплоты, т.е. мощность, которую выносит воздух из аппаратуры, определяется следующим образом:

$$G_V \rho c_p (t_{b,вых} - t_{b,вх}) = 2G_V \rho c_p (t_b - t_{b,вх}), \quad (3)$$

где G_V – объемный расход теплоносителя; ρ , c_p – плотность теплоносителя и его теплоемкость при постоянном давлении.

Система уравнений (1) – нелинейная, т.к. коэффициенты – тепловые проводимости зависят от искомых температур. При решении уравнений можно использовать стандартные методы решения систем линейных алгебраических уравнений и метод итераций. Начальные приближения температур задаются на основе оценочных расчетов тепловых режимов, данных предыдущего этапа моделирования. Для определения тепловых проводимостей можно воспользоваться моделями, методиками, приведенными в [1, 2, 3] и другой литературе по теплопередаче в РЭС.

Приведенный способ моделирования достаточно универсален, позволяет описывать тепловой режим разнообразных РЭС, отдельных ее модулей, проводить декомпозицию с различной степенью детализации. Для проведения оценочных расчетов используется менее детальное разбиение, часто элементы объединяются в «нагретую зону» [2], например, для блока кассетной конструкции – это совокупность печатных узлов, для секции – совокупность блоков и т.д.

Результат математического моделирования – температуры элементов системы t_i – можно представить в виде сумм составляющих, каждая из которых обусловлена воздействием одного элемента – источника теплоты мощностью $F_j(\vartheta_{ji})$ или среды с заданной температурой $t_{ck}(\vartheta_{cki})$:

$$\exists \forall i \in [1, \dots, N] \quad t_i = \sum_{j=1}^N \vartheta_{ji} + \sum_{k=1}^K \vartheta_{cki}.$$

Такой анализ результата позволит учесть по отдельности влияние каждого источника мощности или температуры и тем самым при необходимости, определить возможные направления обеспечения нормального теплового режима. Составляющие ϑ_{ji} и ϑ_{cki} рассчитываются после определения температур элементов t_i и тепловых проводимостей σ с учетом их температурной зависимости (после решения системы (1) – обычно не более трех-четырёх итераций). Перегревы ϑ_{ji} и ϑ_{cki} определяются в результате многократного (максимум – $N + K$ раз) решения системы уравнений (1).

$$\begin{aligned} \vartheta_{ji} &= t_i \text{ при } P_j \neq 0, P_l = 0, t_{ck} = 0, \forall k \in [1, \dots, K]; \\ \vartheta_{cki} &= t_i \text{ при } t_{ck} \neq 0, t_{cm} = 0, \forall m \in [1, \dots, K], m \neq k; \\ P_j &= 0, \quad \forall j \in [1, \dots, N]. \end{aligned}$$

ϑ_{ji} и ϑ_{cki} можно представить в следующем виде:

$$\vartheta_{ji} = F_{ji} P_j, \quad \vartheta_{cki} = \varphi_{ki} t_{ck}$$

где $F_{ji} = \vartheta_{jk} / P_j$ – тепловой коэффициент, характеризующий влияние j -го источника; $\varphi_{ki} = \vartheta_{cki} / t_{ck}$ – коэффициент влияния k -й среды на температуру i -го элемента.

Если принять допущение о линейной зависимости температуры элементов t_i от тепловых воздействий P_j и t_{ck} , то выражение

$$t_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} P_j + \sum_{k=1}^K \varphi_{ki} t_{ck}, \quad \forall i \in [1, \dots, N]$$

можно использовать при разработке оценочной методики для анализа теплового состояния конструкции при возможном изменении P_j , t_{ck} и при постоянных F и φ , то есть при условии, что конструктивные параметры, условия теплообмена не изменяются. При

$$t_{yci} = \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N \sigma_{ij} t_j + \sum_{k=1}^K \sigma_{ick} t_{ck} \right) / \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N \sigma_{ij} + \sum_{k=1}^K \sigma_{ick} \right), \quad (4)$$

где σ , t_j – проводимости и температуры, определённые из (1).

Этот приближенный прием (1)–(4) дает общий подход к усреднению внешних температурных воздействий. Он может быть использован для отдельных оценочных расчетов модулей при поэтапном моделировании РЭС как с использованием моделей данного типа, так и других моделей.

Недооценка метода итерации при тепловом моделировании на этапе проектирования, т.е. выполнения не в полном объеме, не всех этапов после окончательного определения конструктива, приводит к проблемам обеспечения надежности на этапе изготовления, локальным перегревам, когда трудно уже что-то исправить конструктивно [4]. Приходится вводить селекцию по тепловому параметру для дискретных элементов, то есть решения проблем технологическими методами, например применением метода групповой селекции [5].

Список литературы

1. Голубев А.В. Параметрический синтез многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств специального назначения: монография. – СПб.: Политехника, 1998. – С. 118.
2. Шелест В.И. Оптимальное проектирование радиоэлектронных систем с волоконно-оптическим электропитанием: монография. – М.: Радио и связь, 1997. – С. 186.
3. Лутченков Л.С., Лайне В.А. Тепловые режимы аппаратуры многоканальной связи, монография. – СПб.: Лениздат, 1995. – С. 186.
4. Осолков В.Н., Шмелев С.С. Опыт обеспечения надежности РЭА на этапе изготовления // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. (InnoTech 2013):

поэтапном моделировании РЭС среднеповерхностные температуры модулей, среднеобъемные температуры воздуха, полученные на предыдущем этапе, используются в качестве входной информации на последующем, когда более детально рассматривается каждый отдельный модуль. Иногда требуется внешние температурные воздействия на модуль РЭС усреднить, например на этапе анализа теплового режима комплектов стоек в помещении, отсеке, усреднить воздействие окружающей среды (воздуха), соседнего оборудования; при анализе теплового режима отдельного узла – усреднить температурные воздействия соседних узлов, элементов БНК, среды. В этих целях используется понятие «условной среды» модуля РЭС [2], под которой понимается совокупность поверхностей окружающих модулей, элементов БНК, воздуха, находящихся в теплообмене с данным модулем:

материалы V-й Международной интернет конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 1–30 ноября 2013 г. – Пермь, 2013. – С. 161–166.

5. Киселев В.В., Осолков В.Н., Ширяев Ю.Н. Технология радиоэлектронных средств – 2-е изд., стереотип. – Пермь: Изд-во Перм. гос.техн.ун-та, 2010. – 87 с. Регистрационный номер рецензии 762 от 17.03.2010 МГУП.

References

1. Golubev A.V. Parametricheskij sintez mnogourovnevnykh konstrukcij radioelektronnykh sredstv special'nogo naznacheniya: monografiya. SPb.: Politehnika, 1998. pp. 118.
2. Shelest V.I. Optimal'noe proektirovanie radioelektronnykh sistem s volokonno-opticheskim jelektromontazhem: monografiya. M.: Radio i svjaz', 1997. pp. 186.
3. Lutchenkov L.S., Lajne V.A. Teplovye rezhimy apparatury mnogokanal'noj svjazi, monografiya. SPb.: Lenizdat, 1995. pp. 186.
4. Osolkov V.N., Shmelev S.S. Opyt obespechenija nadezhnosti RJeA na jetape izgotovlenija // Innovacionnye tehnologii: teorija, instrumenty, praktika. (InnoTech 2013): materialy V-j Mezhdunarodnoj internet konferencii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, Perm', 1noja. 30.noja. 2013 g. Perm', 2013. pp. 161–166.
5. Kiselev V.V., Osolkov V.N., Shirjaev Ju.N. Tehnologija radioelektronnykh sredstv 2-e izd., stereotip. Perm': Izd-vo Perm. gos. tehn. un-ta, 2010. 87 p. Registracionnyj nomer recenzii 762 ot 17.03.2010 MGUP.

Рецензенты:

Хижняков Ю.Н., д.т.н., профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;
Труфанова Н.М., д.т.н., профессор, зав кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 15.09.2014.