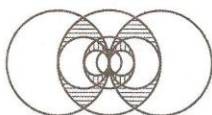


УДК 621.396.6.019.3



Расчет коэффициентов облученности и автоматизация построения тепловых моделей для типовых конструкций радиаторов в подсистеме анализа и обеспечения тепловых характеристик конструкций радиоэлектронных средств АСОНИКА-Т

© Авторы, 2012

С. В. ЧАБРИКОВ – мл. науч. сотрудник, ООО «CALS-технологии»

А. С. ШАЛУМОВ – д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Информационные технологии»,
Владимирский филиал РАНХ и ГС при Президенте РФ,
академик Международной академии информатизации,
лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники
E-mail: ALS140965@mail.ru

Н. А. ШАЛУМОВА – к.т.н., доцент, кафедра «Информационные технологии»,
Владимирский Филиал РАНХ и ГС при Президенте РФ

Рассмотрены возможности подсистемы анализа и обеспечения тепловых характеристик конструкций радиоэлектронных средств АСОНИКА-Т по построению тепловых моделей, в которых присутствует теплообмен излучением. Показаны возможности подсистемы по построению тепловых моделей конструкций радиоэлектронных средств, содержащих радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов. Рассмотрены средства, предлагаемые для включения в функционал Асоника-Т, назначением которых является упрощение расчета коэффициентов облученности, и предлагается новая методика построения тепловых моделей конструкций радиоэлектронных средств, содержащих радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: радиоэлектронное средство, тепловые процессы, радиатор охлаждения полупроводниковых приборов.

In article possibilities of a subsystem of the analysis and maintenance of thermal characteristics of designs of radio-electronic means АSONIKA on construction of thermal models at which there is a heat exchange by radiation are considered. Subsystem possibilities on construction of thermal models of designs of the radio-electronic means containing radiators of cooling of semi-conductor devices are besides considered.

Keywords: radio-electronic, thermal characteristics, radiators of cooling of semi-conductor devices, АSONIKA.

Подсистема анализа обеспечения тепловых характеристик конструкций радиоэлектронных средств (АСОНИКА-Т) предназначена для автоматизации моделирования тепловых процессов типовых и нетиповых конструкций РЭС и позволяет реализовать следующие проектные задачи [1].

Проектные задачи

1. Определение средней температуры блоков, печатных узлов и материалов несущих конструкций, а также воздушных объемов внутри РЭС.
2. Внесение изменений в конструкцию РЭС с целью достижения приемлемых тепловых режимов.
3. Выбор лучшего варианта с точки зрения тепловых режимов работы конструкции из нескольких имеющихся концептуальных вариантов.
4. Обоснование необходимости и оценка эффективности дополнительной защиты РЭС от тепловых воздействий.
5. Создание при необходимости эффективной программы испытаний макетов и опытных образ-

цов РЭС на тепловые воздействия (в задачах выбора наиболее информационных испытательных воздействий, выбора датчиков и точек их установки в наиболее теплонагруженных местах и пр.).

Несмотря на то, что подсистема АСОНИКА-Т обладает достаточным функционалом для решения большого круга проектных задач в области теплового моделирования, научно-технический прогресс влечет за собой необходимость постоянного обновления и расширения возможностей подсистемы.

Цель статьи: описание двух нововведений, расширяющих функционал подсистемы. Одно из них связано с расчетом коэффициента облученности, а второе – с автоматизацией построения тепловых моделей типовых и произвольных конструкций радиаторов охлаждения радиоэлектронных средств.

В существующей подсистеме доступна возможность моделирования теплообмена излучением,

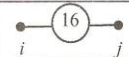
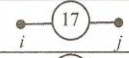

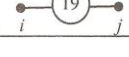
но не был предусмотрен расчет коэффициента облученности, вычисление которого сводится к вычислению сложного интеграла и в повседневной практике инженера, ответственного за проведение теплового расчета, может быть достаточно ресурсоемкой задачей. Существует возможность расчета тепловых характеристик типовых радиаторов, основанного на формулах, полученных при помощи теории подобия. Ограничением данного подхода является наличие большого количества коэффициентов, которые подбираются по экспериментальным данным, т.е. отсутствие универсального закона для теплового расчета радиаторов охлаждения радиоэлектронных средств. Современный рынок наполняется большим количеством радиаторов охлаждения полупроводниковых приборов с самыми разнообразными конструкциями. Старый подход не позволяет перейти к расчету тепловых характеристик радиаторов произвольных конструкций, поскольку каждый новый вид конструкции приводит к необходимости пересмотра всей математической модели.

Взамен предлагается использовать новую методику построения тепловых моделей радиаторов, основанную на разбиении радиатора на элементарные изотермические объемы и построении автомата, который на основе определенного набора входных данных генерировал бы требуемую модель радиатора, используя при этом стандартные или достаточно хорошо изученные средства построения тепловых моделей.

Возможности подсистемы АСОНИКА-Т для моделирования теплообмена излучением

Подсистема АСОНИКА-Т позволяет моделировать теплопередачу излучением, что особо важно в случаях теплообмена в вакууме, т.е. при отсутствии каких-либо видов конвекции, когда основной вклад в теплообмен вносит кондукция и (или) излучение. Доступные в АСОНИКА-Т ветви для моделирования теплопередачи излучением представлены в табл. 1.

Таблица 1. Типы ветвей, используемых в подсистеме АСОНИКА-Т для моделирования теплообмена излучением

Номер ветви	Графическое изображение	Характеристика вида или разновидности ветви
<i>Излучение</i>		
16		Теплообмен излучением с плоской неразвитой поверхностью.
17		Теплообмен излучением с развитой поверхности с пластинчатым оребрением.
18		Теплообмен излучением с развитой поверхности с игольчато-штыревым оребрением.
19		Теплообмен излучением с цилиндрической неразвитой поверхностью.

Излучаемое число тепла зависит (без учета начальных условий, т.е. мощности, температуры и теплоемкости, так как они моделируются отдельными узлами) от геометрических размеров излучающего тела, его материала, а также от конфигурации всей системы. Влияние конфигурации системы, т.е. взаимное расположение ее частей, учитывается в коэффициенте облученности. У этого коэффициента много названий. В литературе можно встретить следующие: угловой коэффициент излучения, геометрический коэффициент, коэффициент формы. Любое название отражает тот факт, что этот коэффициент целиком зависит от геометрического расположения взаимодействующих поверхностей. Коэффициент облученности представляет собой безразмерную величину, характеризующую долю лучистой энергии, которая

покидает излучающую поверхность и достигает поглощающую поверхность.

Вычисление коэффициента облученности сводится к вычислению интеграла следующего вида:

$$\phi_{dF_1-F_2} = \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi r^2} dF_2$$

– угловой коэффициент излучения от элементарной площадки dF_1 , падающего на ограниченную поверхность F_2 ;

$$\phi_{F_1-F_2} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2$$

– угловой коэффициент для излучения от ограниченной поверхности F_1 падающей на ограниченную поверхность F_2 , где F_1, F_2 – площадь излу-

чающей и поглощающей поверхностей, m^2 ; β_1, β_2 – угол между направлением излучения и нормалью к поверхности 1 и поверхности 2; r – расстояние между двумя поверхностями, м.

Вычисление указанных выше интегралов представляет собой весьма сложную задачу, поэтому в справочной литературе [2, 3] приводятся уже вычисленные интегралы для наиболее распространенных конфигураций поверхностей. Для облегчения работы с подсистемой АСОНИКА-Т предлагается дополнить ее справочником, который должен предоставлять возможность выбора необходимой конфигурации поверхностей, позволить задать входные данные и возвращать значение вычисленного коэффициента облученности. Общий вид предлагаемого решения представлен на рис. 1. Результатом будет значение коэффициента облученности (рис. 2).

Автоматизация моделирования тепловых процессов в конструкциях РЭС с охлаждающими радиаторами с помощью подсистемы АСОНИКА-Т

Подсистема АСОНИКА-Т позволяет моделировать тепловые процессы в конструкциях РЭС с охлаждающими радиаторами. Для этого в ней предусмотрены следующие ветви (табл. 2).

Для примера, предположим, что требуется рассчитать температуры узлов системы, состоящей из транзистора и охлаждающего его радиатора. Схематическое изображение системы приведено на рис. 3. Особенности построения данной системы подробно описаны в [4].

Для упрощения процесса моделирования будем рассматривать следующие узлы: 1 – транзистор; 2 – окружающая среда; 3 – радиатор.

Таблица 2. Типы ветвей, используемых в подсистеме АСОНИКА-Т для моделирования теплообмена в конструкциях РЭС с охлаждающими радиаторами

Номер ветви	Графическое изображение	Характеристика вида или разновидности ветви	
<i>Естественная конвекция (ЕК)</i>			
36		Конвективно-кондуктивно-лучистая теплопередача (ККЛТ) с развитой (оребреной) поверхностью	Пластинчатое
37			Игольчато-штыревое
<i>Вынужденная конвекция (ВК)</i>			
52		Обдув развитой (оребреной) поверхности	Пластинчатое
53			Игольчато-штыревое

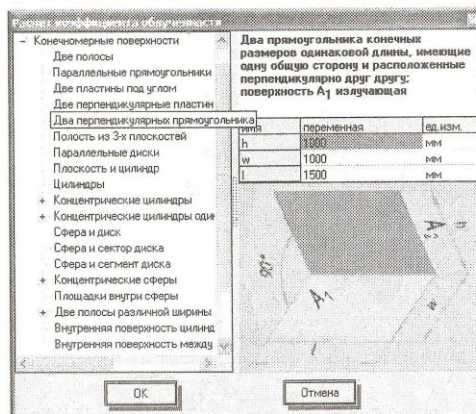


Рис. 1. Диалоговое окно для выбора и задания параметров одной из типовых конфигураций взаимодействующих излучением поверхностей

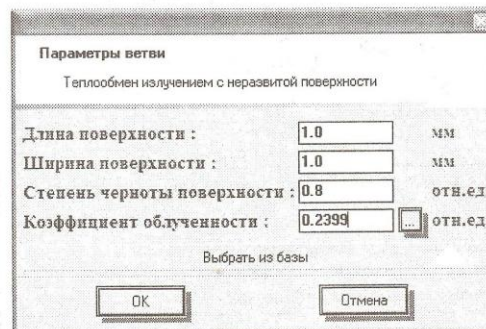


Рис. 2. Результат расчета коэффициента облученности

Построенная модель показана на рис. 4, а результаты приведены в табл. 3.

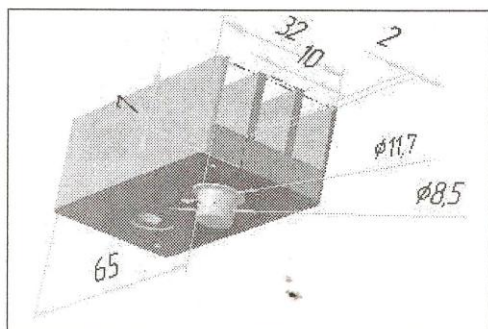


Рис. 3. Система транзистор – ребристый радиатор

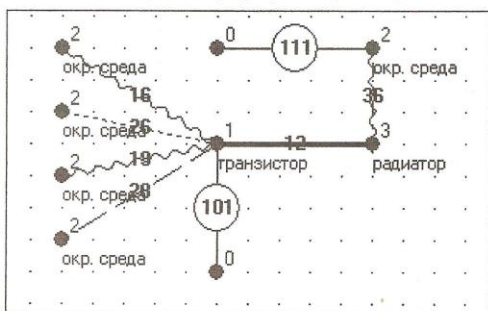


Рис. 4. Тепловая модель системы транзистор – ребристый радиатор

Таблица 3. Результаты расчета теплового режима транзистора, установленного на радиаторе

№ узла	Имя узла	Температура, °C
1	Транзистор	27,6
2	Окружающая среда	25
3	Радиатор	26,8

Фактически при расчете используется следующая математическая модель теплообмена:

$$X_{ij} = (\alpha_n + \alpha_k) \cdot (S_n + \eta_p \cdot S_p),$$

где $\alpha_n = \varepsilon \cdot \xi \cdot f(T)$ – лучистый теплообмен; ε – приведенный коэффициент черноты поверхностей тел; $\xi = D_n / (2H_p + D_n)$ – приведенный коэффициент облученности ребреной поверхности; D_n – расстояние между ребрами; H_p – высота ребер (штырей); $f(T) = 0,567 \cdot 10^{-7} \cdot [(T_i^2 + T_j^2) \cdot (T_i + T_j)]$; T_i и T_j – температура тел, участвующих в теплообмене по шкале Кельвина; $\alpha_k = (\lambda_g \cdot Nu / L_0) \times$

$\times (P_{oc} / 760)^{0,5} \cdot K_{op}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи; λ_g – коэффициент теплопроводности холодоносителя; $Nu = 1,4 \cdot \sqrt{1 + 0,113 \cdot Gr \cdot \frac{D_p}{2L_p}}$ (при $Gr \cdot \frac{D_n}{2L_p} < 7$ – число Нуссельта); $Nu = 0,5 \cdot Gr \cdot \frac{D_n}{2L_p}$ (при $7 \leq Gr \cdot \frac{D_n}{2L_p} \leq 20$); $Nu = 0,5 \times Gr \cdot \frac{D_n}{2L_p}$ (при $Gr \cdot \frac{D_n}{2L_p} \geq 20$); L_0 – определяющий размер; P_{oc} – давление окружающей среды (Вт); $Gr = g\beta(T_i - T_j)L_0^3 / \nu^2$ – число Грасгофа; β – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения холодоносителя; ν – коэффициент кинематической вязкости холодоносителя (воздуха); S_n – площадь пазов; S_p – площадь ребер; $\eta_p = th(m \cdot H_p) / (m \cdot H_p)$ – эффективность ребра; $m = \sqrt{((\alpha_n + \alpha_k) \cdot P_p) / (\lambda_p \cdot F_p)}$; P_p – периметр сечения ребра; F_p – площадь сечения ребра; λ_p – коэффициент теплопроводности материала ребра.

Математическая модель, приведенная выше, получена на основе анализа размерностей (с помощью теории подобия). Известно, что с увеличением ребер (штырьков) погрешность результата становится недопустимо большой.

Современная вычислительная техника позволяет строить тепловые модели достаточно больших размеров, что позволяет рассмотреть новый подход к моделированию радиаторов с помощью автомата, который должен строить модель с использованием хорошо известных видов теплообмена, т.е. кондукция, конвекция и излучение, или другие хорошо изученные виды теплообмена.

Для увеличения точности расчета предлагается разбиение радиатора на элементарные изотермические объемы и вычисление температур с использованием стандартных видов теплообмена (т.е. конвекция, излучение и теплопроводность между элементарными изотермическими объемами).

На рис. 3 системе из радиатора и установленного на нем транзистора можно выделить следующие узлы (условно изотермические объемы, полученные мысленным рассечением радиатора плоскостями проходящим через крайние поверхности ребер):

- 1) транзистор;
- 2) окр. среда (окружающая среда);
- 3) ребро 1 (крайнее левое на рис. 3);
- 4) основание 12;
- 5) воздух 12 (воздух между крайним левым ребром и соседним ребром);
- 6) ребро 2;
- 7) основание 23;
- 8) воздух 23;
- 9) ребро 3;
- 10) основание 34;
- 11) воздух 34;
- 12) ребро 4.

Очевидно, что модель получается более громоздкой, но создание программного автомата, генерирующего модель радиатора, аналогичного автомату, описанному в [5], упростит построение модели, а в дальнейшем сделает возможным построение тепловой модели на основании 3-мерной модели произвольной конструкции радиатора, созданной либо средствами программного комплекса АСОНИКА, либо экспортированной из других систем 3-мерного твердотельного моделирования.

Для упрощения построения модели будем считать, что на основании радиатора может быть установлен один транзистор (источник мощности). Кроме того, он установлен в центре основания радиатора (на неоребренной стороне). Условные основания радиатора взаимодействуют со смежными ребрами кондукцией в декартовой системе координат (тип ветви 2). Длины путей тепловых потоков считаются от центра масс ребер до центра масс основания. Взаимодействие транзистора с окружающей средой моделируется аналогично предыдущему расчету. Поверхности радиатора, смежные с окружающей средой (ребро 1 – левая сторона, нижний, верхний, передний и задний торцы; основание – 12, 23 и 34 – нижняя сторона, передний и задний торцы, ребро 4 – правая сторона, нижний, верхний, передний и задний торцы), взаимодействуют с ней за счет конвекции (с учетом ориентации радиатора в пространстве) и излучения (вся излучаемая перечисленными поверхностями энергия поглощается окружающей средой). Внутренние поверхности радиатора взаимодействуют с условно выделенным воздухом между ребрами за счет конвекции и излучения. Воздух между ребрами не остается на месте. Нагретый воздух перемещается в окружающую среду, замещаясь воздухом окружающей среды (диффузионный теплообмен). Данная ситуация подобна теплообмену в перфорированном блоке.

Вынос тепловой энергии моделируется направлением из воздуха между ребрами в окружающую среду ветви типа 72. Моделирование теплообмена в перфорированном блоке подробно описано в [4]. Объем воздуха между ребрами делится на предыдущий объем (окружающая среда) и нагреваемый ребрами и основанием воздухом в соотношении 1:1. Данное соотношение зависит от величины температурного напора между ребрами, основанием радиатора и воздухом между ребрами, а также от геометрических параметров.

Полученная модель показана на рис. 5.

В данном случае в модель можно было не включать теплообмен излучением внутренних поверхностей ребер, так как их вклад в общую картину меньше 1%. Но при применении другого материала радиатора, или изменении давления окружающей среды (т.е. уменьшении вклада естественной конвекции) суммарный вклад теплообмена излучением может увеличиться.

Результат расчета показан в табл. 4.

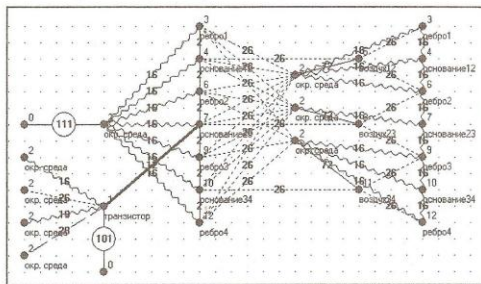


Рис. 5. Модель тепловых процессов в системе радиатор транзистор

Таблица 4. Результаты расчета теплового режима транзистора, установленного на радиаторе

№ узла	Имя узла	Температура, °С
1	Транзистор	32,1
2	Окр. среда	25
3	Ребро 1	30,4
4	Основание 12	30,4
5	Воздух 12	25
6	Ребро 2	30,4
7	Основание 23	30,4
8	Воздух 23	25
9	Ребро 3	30,4
10	Основание 34	30,4
11	Воздух 34	25
12	Ребро 4	30,4

Отличие результатов моделирования связано с тем, что в вычислениях с помощью конвективно-кондуктивно-лучистой теплопередачи с развитой (оребренной) не учитывается нагрев воздуха между ребрами и вынос его в связи с разностью концентраций холодного и теплого (горячего воздуха). Вопрос о соотношении объемов нагретого (между ребрами) и холодного воздуха (окружающей среды) требует дополнительных исследований.

Шаг 1. Автоматизация процесса построения модели радиатора состоит в создании дополнительного диалогового окна АСОНИКА-Т, на котором нужно выбрать тип радиатора – ребристый или игольчато-штыревой (в соответствии с [4]); окружающую среду – вакуум или воздух; геометрические размеры радиатора, а также параметры обдува – скорость воздуха и пр., если радиатор охлаждается

вентилятором или кулером. На основании введенных данных должна строиться математическая модель радиатора и ее отображение в редакторе моделей (визуализированная тепловая модель), аналогично модели, показанной на рис. 5 без трансляции.

Шаг 2. Интеграция АСОНИКА-Т с модулем ввода 3-мерных конструкций АСОНИКА-ТМ с целью использования ее функционала для ввода произвольных конструкций радиаторов.

В настоящее время на рынке программных продуктов доступно множество систем 3-мерного твердотельного моделирования, предназначенных для проектирования и разработки конструктивной документации. Для легкости интеграции с ними (в перспективе) должен использоваться унифицированный формат обмена данными. Одним из них является STEP, описанный в [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалумов А.С., Малютин Н.В., Кофанов Ю.Н., Способ Д.А., Жаднов В.В., Носков В.Н., Ваченко А.С. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. Т. 1 / под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат. 2007.
2. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: пер. с англ. / Справочник. М.: Атомиздат. 1979.
3. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением: пер. с англ. / Под ред. Б.А. Хрусталева. М.: Мир. 1975.
4. Шалумов А.С., Манохин А.И., Шалумова Н.А. Моделирование тепловых процессов в технических объектах с помощью автоматизированной подсистемы АСОНИКА-Т: Учеб. пособие. Ковров: КГТА. 2002.
5. Шалумов А.С., Орлов А.В. Математические модели и методы анализа тепловых процессов: Учеб. пособие. Ковров: Ковровская государственная технологическая академия, 2003.
6. ГОСТ Р ИСО 10303-203-2003 Системы автоматизированного производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Ч. 203. Прикладной протокол. Проекты с управляемой конфигурацией.
7. Шалумов А.С., Кофанов Ю.Н., Куликов О.В., Трояков Д.Н., Соловьев Д.Б., Першин О.Е. Динамическое моделирование сложных радиоэлектронных систем // Динамика сложных систем. 2011. № 3. С. 51–59.
8. Шалумова Н.А., Чабриков С.В., Манохин А.И., Багоева Т.А. Чинь Куок Тан Подсистема анализа и обеспечения тепловых характеристик конструкций радиоэлектронных средств АСОНИКА-Т // Научные технологии. 2011. № 11. С. 44–53.
9. Шалумова Н.А., Шалумов А.С., Мартынов О.Ю., Багоева Т.А. Анализ и обеспечение тепловых характеристик конструкций радиоэлектронных средств с помощью подсистемы АСОНИКА-Т // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 1. С. 42–49.

Поступила 28 февраля 2012 г.