

Значения параметров ИНС подсистемы распознавания речи незначительно отличаются от параметров ИНС подсистемы собственно аутентификации диспетчеров.

## V Выводы

1. В статье изложена концепция построения голосовых систем аутентификации диспетчеров. Аутентификация, осуществляемая по непрерывной речи диспетчера, сводится к ее проведению по ключевым речевым фрагментам, выделенным из непрерывной речи диспетчера, что позволяет свести задачу аутентификации по непрерывной речи к задаче аутентификации по отдельным командам.

2. Для осуществления поиска и выделения из непрерывной речи ключевых речевых фрагментов в состав системы введена подсистема распознавания речевых фрагментов, состоящая из модулей параметризации, классификации и принятия решения об отнесении речевого фрагмента к классу «ключевых».

3. Предложен новый подход к построению подсистем распознавания речевых фрагментов и собственно аутентификации диспетчеров, основанный на применении искусственных нейронных сетей, обоснованном выборе их параметров, а также разработанной системе информативных параметров речевого сигнала.

4. Предложены способы повышения быстродействия и достоверности работы систем аутентификации, что позволило обеспечить функционирование разработанной системы в режиме реального времени при высокой степени достоверности (процент правильной аутентификации выше 98%).

5. Разработка представленной в статье системы аутентификации является важным этапом на пути создания комплексной автоматической системы контроля доступа диспетчеров к информационным ресурсам, обеспечивающей проведение аутентификации контролируемых лиц, их идентификацию в случае непрохождения процедуры аутентификации и контроль их психофизиологического (эмоционального) состояния.

6. Применение разработанной системы аутентификации позволяет существенно повысить безопасность на транспорте и в энергетике, резко уменьшить количество аварий и аварийных ситуаций вследствие снижения влияния человеческого фактора.

*Список использованной литературы:* 1. Рамишвили Г. С. Автоматическое опознавание говорящего по голосу. // М.: Радио и связь, 1981. – 224 с. 2. С. Хайкин Нейронные сети. // 2-е изд. Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с. 3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. // М: Мир, 1978. – 848 с. 4. Темников В. А., Шарий Т. В., Темникова Е. Л., Конфорович И. В. Голосовая аутентификация операторов, использующих в процессе работы нормативно установленную фразеологию. // Інформаційна безпека. – 2011. – №1(5). – С.125-130. 5. Bishop C. Pattern Recognition and machine learning (Information Science and Statistics). // Springer-Verlag New York, Inc. Secaucus, NJ, USA, 2006. – 738 p. 6. Маркел Дж., Грей А. Х. Линейное предсказание речи. // Пер. с англ. — Под ред. Ю. Н. Прохорова и В. С. Звездина. — М.: Связь, 1980. – 308 с.

**Борис Уваров, Юрий Зиньковский**

*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"*

УДК 621.3.038

## ТЕПЛОВАЯ НАДЕЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

*Аннотация:* Рассмотрены особенности тепловых процессов в структурных модулях радиоэлектронного аппарата – ячейках и микросборках, элементах их электронной структуры. Проанализированы коэффициенты полезного действия модулей, показатели энергетической эффективности резисторов, конденсаторов, индуктивностей на основе моделей эквивалентных двухполюсников. Предложена математическая модель теплового поля микросборки, получено уравнение для определения температур всех ее элементов. Рассмотрены математические модели расчета параметров надежности элементов электронной структуры и всего радиоаппарата.

*Summary:* Reviewed the features of thermal processes in the structural modules of radio-electronic apparatus - a cell and microassemblies, elements of their electronic structure. Analyzed efficiency factor of modules, energy efficiency indicators of resistors, capacitors, inductances based on models of equivalent two-terminal. Proposed mathematical model thermal field of microassemblies, obtained an analytical equation for determining the temperature of all its elements. The mathematical models of account of parameters of reliability of elements of electronic structure and all radiodevice are considered.

*Ключевые слова:* Электронный аппарат, ячейка, микросборка, модель двухполюсника, тепловая модель, температуры элементов, показатели надежности.

## I Введение

Функционирование радиоэлектронного аппарата (РЭА) – это создание им комплекса связанных физических величин – выходных характеристик, которые могут быть представлены вектором  $Y$  со своими составляющими  $Y_m$ :  $Y = [Y_1, \dots, Y_m, \dots, Y_t]_T$  ( $T$  – оператор транспонирования) [1].

Существенное влияние на функционирование РЭА оказывают внутренние физико-химические процессы, происходящие в нём; их можно представить вектором  $P = [P_1, \dots, P_j, \dots, P_q]_T$ , а сами внутренние процессы разделить на две группы:  $P_1$  – основные,  $P_2$  – производные, являющиеся результатом действия основных.

Процессы  $P_1$  – это усиление, генерация, передача и прием радио- и информационных сигналов; преобразование сигналов: цифро-аналоговое, аналого-цифровое, по частоте, фазе; отвод механической энергии от конструктивных модулей РЭА виброизоляторами; возникновение механических напряжений в элементах конструкции во время деформаций; тепломассоперенос. Общие энергетические затраты на эти процессы во всём РЭА составляют 10 – 25 %.

Неидеальность процессов первой группы (общая характеристика их несовершенства – коэффициент полезного действия  $\eta < 1$ ) приводит к появлению процессов группы  $P_2$ . К последним относятся: выделение тепла в резистивных пленках и переходных зонах диодов и транзисторов; обратный ток в них же; внутреннее рассеивание энергии в элементах конструкции; электролитические процессы в конденсаторах.

Энергетические затраты на процессы второй группы составляют 75 – 90 % общих затрат во всём РЭА, и в конечном счете вся эта энергия превращается в тепловую. Особенно существенно выделение теплоты в элементах электронной структуры (ЭЭС), что приводит к их нагреву и может быть причиной появления отказов некоторых из них в процессе эксплуатации: статистика показывает, что доля отказов, вызванных тепловыми факторами, достигает 45 – 50 % общего их числа. Таким образом, показатели надежности всего РЭА в значительной степени определяются температурами ЭЭС.

Настоящая статья посвящена уточнению методов расчета как самих температур, так и связанных с ними показателей надежности РЭА, что особенно важно для аппаратуры защиты информации.

## II Энергетическое совершенство элементов РЭА

Энергетический коэффициент полезного действия (КПД) РЭА – это отношение мощности  $N_F$  (или энергии), необходимой для выполнения его прямого функционального назначения к общей мощности  $N_\Sigma$  (или энергии), необходимой для обеспечения функционирования самого РЭА:

$$\eta = N_F / N_\Sigma. \quad (1)$$

Для РЭА  $N_F$  это мощность, необходимая для создания физических процессов, отображаемых в математической модели устройства векторами  $Y_n$ .

Достаточно точное определение КПД позволило бы обоснованно рассчитывать температуры как всего РЭА, так и его ЭЭС, а, следовательно, и показатели надежности.

КПД бытовых аппаратов на электронных лампах (приемников, усилителей) достаточно низок 2,5 – 6 %; низок КПД у больших электронных комплексов. Так, для радиолокационных станций он не превышает 1,5 – 3 %. Применение полупроводниковых приборов (ПП) дало возможность существенно повысить КПД РЭА: для аналоговых микросхем (МС) их собственный КПД составляет 50 – 65 %. Также возрос и КПД РЭА, основными ЭЭС которых стали ПП. Так, КПД усилителя низкой частоты *Denon PMA-520AE* составляет 38 % (мощность его потребления от источника питания равна 185 Вт).

Определение КПД по формуле (1) для ЭЭС нулевого функционального уровня (основных и наиболее распространенных) – резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности – можно провести с помощью схем эквивалентных двухполюсников для этих ЭЭС, если каждый из них представить как соединение идеальных резистора  $R$ , конденсатора  $C$ , индуктивности  $L$  с так называемыми ”паразитными“ их параметрами  $R_n$ ,  $C_n$ ,  $L_n$ .

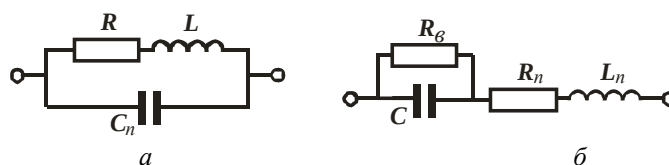


Рисунок 1 – Эквивалентные двухполюсники:  
 а – для резистора и индуктивности; б – для ёмкости

Для резистора и индуктивности в соответствии с эквивалентной схемой на рис. 1, а полный импеданс  $Z_{\Sigma}$  двухполюсника получим в виде:

$$Z_{\Sigma} = \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega C(R + j\omega L)}, \quad (2)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление резистора,  $C$  и  $L$  – паразитные ёмкость и индуктивность,  $\omega$  – частота гармонического сигнала на входе двухполюсника,  $j$  – мнимая единица.

Для резистора КПД как отношение “полезного” импеданса  $Z_R$  к полному  $Z_{\Sigma}$ :

$$\eta_R = \frac{Z_R}{Z_{\Sigma}} = \frac{R[1 + j\omega C(R + j\omega L)]}{R + j\omega L}.$$

Для относительно низкой частоты ( $\omega \ll 1$ )  $\eta_R \approx 1$ .

Для резистора целесообразно рассмотреть показатель энергетического совершенства – возможность полностью использовать его нагрузочную способность  $Q_P$ , то есть такую, которая должна определяться допустимой температурой  $T_k$  корпуса резистора, точнее – материала его резистивного слоя, и тем самым показателя надежности. Эту температуру ориентировочно можно определить из уравнения теплового баланса для резистора, если рассмотреть процесс естественного воздушного охлаждения (наиболее частый случай):

$$Q_P = k \cdot S(T_k - T_c),$$

где  $k$  – критерий теплоотдачи от поверхности резистора к окружающей среде;  $S$  – площадь поверхности резистора, от которой отводится теплота;  $T_c$  – температура окружающей среды.

Для резистора основное функциональное назначение – создание падения напряжения на нём  $U = I \cdot R$  (где  $I$  – ток через резистор,  $R$  – сопротивление резистора). Вследствие прохождения тока через резистивный слой в корпусе резистора выделяется теплота  $Q = I^2 R$ , которая должна быть отведена к окружающей среде.

Например, для широко распространенных резисторов МЛТ в технических условиях указано, что максимальная температура окружающей среды, при которой резисторы могут эксплуатироваться при полной электрической нагрузке, составляет  $T_c = +75$  °С.

Для резистора МЛТ-2 (то есть с номинальной тепловой мощностью 2 Вт) это дает возможность рассчитать максимальную допустимую температуру  $(T_k)_P \approx 200$  °С. Но если  $T_c$  меньше, электрическую нагрузку можно увеличить: например, при  $T_c = +20$  °С она может быть  $Q_P = 2,9$  Вт. Технические условия для  $T_c = +125$  °С требуют уменьшения  $Q_P$  до 0,6 Вт, но расчет показывает, что при  $(T_k)_P \approx 200$  °С для резисторов МЛТ-2  $Q_P = 1,4$  Вт.

Показатель энергетического совершенства  $\eta_{эс}$  для резисторов – это отношение мощности реальной электрической нагрузки  $Q = I^2 R$  к значению  $Q_P$ , отвечающему температуре эксплуатации  $T_c$ :  $\eta_{эс} = Q/Q_P$ ; значение этого показателя зависит от  $T_c$ .

Для ЭЭС с индуктивностью  $L$  полный импеданс определяется формулой (2), а энергетический КПД в форме (1):

$$\eta_L = \frac{Z_L}{Z_{\Sigma}} = \frac{j\omega L[1 + j\omega C(R + j\omega L)]}{R + j\omega L},$$

где  $R$  – активное сопротивление,  $C_n$  – паразитная ёмкость элемента с индуктивностью  $L$ .

Для конденсатора ёмкостью  $C$  эквивалентная схема приведена на рис. 1, б, где резистор  $R_{ут}$  символизирует канал тока утечки (существенный для электролитических конденсаторов и конденсаторов с плохой изоляцией),  $R$  – сопротивление потерь,  $L_n$  – паразитная индуктивность конденсатора.

Полный импеданс конденсатора:

$$Z_C = j\omega L + R + \frac{R_{ут} \left( \frac{1}{j\omega C} \right)}{R_{ут} + \frac{1}{j\omega C}}.$$

Если током утечки можно пренебречь (приняв  $R_{ут} \approx \infty$ ), то КПД конденсатора:

$$\eta_C = \frac{Z_C}{Z_{\Sigma}} = \frac{1}{1 + j\omega C(R + j\omega L)}.$$

Показатель энергетического совершенства конденсатора, характеризующий его нагрузочную способность  $Q_P$ , можно определить подобно тому, как это сделано для аналогичного показателя резистора, используя значение допустимой температуры  $T_k$  корпуса конденсатора. В технических условиях на конденсаторы

приводятся два показателя, определяющие условия нормальной его эксплуатации: допустимое напряжение  $U_p$  и температура внешней среды  $T_c$ . Для поликарбонатных конденсаторов  $T_c$  находится в пределах  $(-55...+125)$  °С, полиимидные и фторопластовые могут эксплуатироваться при температуре до  $+250$  °С.

В рабочем режиме в корпусе конденсатора ёмкостью  $C$  выделяется теплота  $Q_a$  (активная мощность), которая должна быть отведена в окружающее пространство с температурой  $T_c$ ; температура корпуса  $T_k$  может быть найдена из уравнения теплового баланса:

$$Q_a = U_p^2 \omega C \tan(\delta) = kS(T_k - T_c),$$

где  $\tan(\delta)$  – тангенс угла потерь;  $k$  – критерий теплоотдачи от поверхности конденсатора к окружающей среде;  $S$  – площадь поверхности конденсатора, отводящая теплоту.

Показателем энергетического совершенства для конденсаторов и их надежности может быть отношение температуры его корпуса  $T_k$  в рабочем режиме к максимально допустимой температуре корпуса  $T_{kp}$ :  $\eta_{эс} = T_k/T_{kp}$ ; значение этого показателя зависит от  $T_c$ , так же как и для резисторов.

### III Тепловые процессы в РЭА

Функционирование РЭА и его надежность существенно зависят как от внутренних тепловых процессов, так и от внешних тепловых воздействий. Среди первых значительную роль играет выделение теплоты в ЭЭС, а среди вторых – температура окружающей среды. Совокупность этих двух факторов определяет температуры ЭЭС, а они напрямую связаны с надежностью последних, то есть и с надежностью всего РЭА. КПД РЭА могут быть достаточно малыми (иногда меньшими 1 %), поэтому тотальное явление перегрева РЭА за счет своего несовершенства и является причиной большинства её отказов.

Определение температур ЭЭС – сложная проблема, во-первых, потому что методы расчета параметров теплового поля в структурно-конструктивных модулях (СКМ) РЭА сами по себе достаточно сложны, а во-вторых – потому, что таких элементов в современном РЭА могут быть тысячи.

В связи с этим расчеты температур ЭЭС целесообразно проводить с помощью объектно-ориентированных программ систем автоматизированного проектирования (САПР), а для них рационально использовать аналитические зависимости, полученные как решения систем дифференциальных уравнений, описывающих тепловые процессы в СКМ.

### IV Микросборка как структурный элемент РЭА

Основными структурно-конструктивными модулями первого уровня (СКМ1) любого РЭА являются ячейки и микросборки (МСб) – функционально законченные модули, ЭЭС и функциональные узлы (ФУ) которых размещены на полимерной, металлической или керамической печатной плате (ПП). У некоторых РЭА в СКМ1 сосредоточены электромагнитные процессы, определяющие функциональное назначение устройства; на долю остальных элементов конструкции, принимающих участие в поддержании упомянутых процессов, остается только обеспечение электрических связей между модулями; СКМ1 может иметь специальный каркас, системы теплоотвода и экранирования.

В конструктивной иерархии РЭА СКМ1 входят в состав конструкций второго уровня – блочных каркасов (СКМ2), а последние – в состав конструкций наивысшего, третьего уровня (СКМ3): шкафа, стойки, контейнера, пульта. Обычно защиту от внешних механических и климатических дестабилизирующих влияний осуществляют конструкции второго и третьего уровня, оборудованные системами вибро- удароизоляции и поддержания необходимого температурного режима.

В общем объеме всей разнообразной РЭА СКМ1 составляют не менее 70–85% структурных элементов, поэтому можно считать, что именно они и должны рассматриваться как основные объекты, для которых в первую очередь и необходимо определять их функциональные характеристики.

### V Математическая модель теплового поля микросборки

Тепловую модель СКМ1 в большинстве случаев можно представить в виде теплопроводной пластины с размерами  $a \times b \times h$ , на которой размещены тепловыделяющие элементы (ТВЭ) (рис. 2).

От каждого из ТВЭ 2 тепловой поток  $Q_i$  передаётся через площадку основы кондукцией к плате 1 СКМ1, а от последней – конвекцией и радиацией к окружающей среде и элементам конструкции (критерии теплоотдачи  $\alpha$ ).

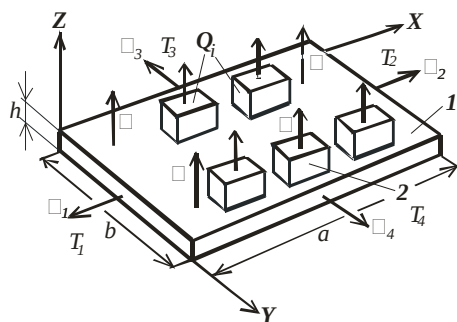


Рисунок 2 – Схема тепловых потоков для СКМ1

От боковой поверхности каждого ТВЭ часть теплоты отводится конвекцией и радиацией (критерии теплоотдачи  $\alpha$ ) к окружающей среде с температурой  $T_c$ . Дополнительно в модели необходимо учесть теплоотдачу от торцовых поверхностей платы (критерии теплоотдачи  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ) – это может быть существенным для МСБ; у МСБ достаточно часто эти торцовые поверхности имеют прямой тепловой контакт с её корпусом или с другими элементами конструкции СКМ1, а значения  $\alpha_i$  могут находиться в широком диапазоне. Температуры элементов конструкции, к которым теплота отводится с торцов пластины, обозначены как  $T_1, T_2, T_3, T_4$ .

Если толщина пластины  $h$  значительно меньше её длины  $a$  или ширины  $b$  (для большинства плат ячеек или пластин МСБ), можно рассматривать двухмерную задачу, а перепад температур по толщине пластины можно не учитывать; если же толщина пластины-основы относительно велика, необходимо анализировать трехмерную модель. Кроме того, у МСБ критерии теплопроводности материала основы в разных направлениях могут быть различными (для анизотропного материала):  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda$  – соответственно направлениям координатных осей  $X, Y, Z$ .

Микросборки в СКМ часто работают в нестационарных режимах (чаще для микроэлектронной аппаратуры), поэтому целесообразно рассмотреть модель нестационарного теплового процесса; температуры стационарного процесса могут быть получены по расчетным формулам нестационарного как частный случай, когда значение времени  $\tau = \infty$ .

Начальное распределение температур в пластине для нестационарного режима должно быть задано в виде функции  $\varphi(x, y)$ ; в некоторых случаях эти температуры могут быть одинаковыми по всей пластине:  $T(x, y) = T_0$ .

Если принять температуру окружающей среды  $T_c$  за условный 0, дифференциальное уравнение нестационарного процесса для температурного поля пластины можно записать в виде:

$$c\rho \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} - \frac{\alpha}{h} T(x, y, \tau) + \sum_{i=1}^n \frac{q_i(x, y)}{h}, \quad (3)$$

где  $T(x, y, \tau)$  – температура точки пластины с координатами  $x, y$  для момента времени  $\tau$ ;  $c$  – удельная теплоёмкость материала,  $\rho$  – его плотность;  $q_i(x, y)$  – поверхностная плотность теплового потока от локальных ТВЭ, координаты центров основ которых  $x_i, y_i$ , размеры основ каждого из них  $\Delta x_i \times \Delta y_i$ :

$$q_i(x_i, y_i) = q_i u(x_i) u(y_i);$$

$$u(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{для } (x_i - 0,5\Delta x_i) \geq x_i \leq (x_i + 0,5\Delta x_i); \\ 0 & \text{для } x_i \leq (x_i - 0,5\Delta x_i), \quad x_i \geq (x_i + 0,5\Delta x_i); \end{cases}$$

$$u(y_i) = \begin{cases} 1 & \text{для } (y_i - 0,5\Delta y_i) \geq y_i \leq (y_i + 0,5\Delta y_i); \\ 0 & \text{для } y_i \leq (y_i - 0,5\Delta y_i), \quad y_i \geq (y_i + 0,5\Delta y_i). \end{cases}$$

Отвод теплоты от торцов пластины может осуществляться различными способами: в случае конвективного теплоотвода необходимо задавать значения критериев конвективного теплообмена  $\alpha_i$ , при кондуктивном – определить интенсивность тепловых потоков  $q_i$  с каждого торца.

Граничные условия на торцах пластины при конвективном теплообмене:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_1 T = \alpha_1 T_1 \quad \text{при } x = 0; \quad \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_2 T = \alpha_2 T_2 \quad \text{при } x = a;$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha_3 T = \alpha_3 T_3 \quad \text{при } y = 0; \quad \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha_4 T = \alpha_4 T_4 \quad \text{при } y = b;$$

Начальные условия – это распределение температуры по поверхности пластины в момент времени  $\tau = 0$ :  $T(x, y, 0) = \varphi(x, y)$ ; в простейшем случае  $\varphi(x, y) = 0$  – это состояние элементов МСб после длительного нерабочего периода.

Аналитическое решение уравнения (3) получено методом конечных интегральных преобразований.

Ядра интегральных преобразований для двухмерной пластины с размерами  $a \times b \times h$ , теплота от которой отводится также и от её торцов, в соответствии с [2], имеют форму:

$$\left. \begin{aligned} K(\mu_n, x) &= \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \frac{\mu_n \cos\left(\frac{\mu_n}{a} x\right) + \text{Bi}_1 \sin\left(\frac{\mu_n}{a} x\right)}{\sqrt{(\mu_n^2 + \text{Bi}_1^2) \cdot \left(1 + \text{Bi}_1 + \frac{\text{Bi}_2}{\mu_n^2 + \text{Bi}_2^2}\right)}}; \\ K(\nu_m, y) &= \sqrt{\frac{2}{b}} \cdot \frac{\nu_m \cos\left(\frac{\nu_m}{b} y\right) + \text{Bi}_3 \sin\left(\frac{\nu_m}{b} y\right)}{\sqrt{(\nu_m^2 + \text{Bi}_3^2) \cdot \left(1 + \text{Bi}_3 + \frac{\text{Bi}_4}{\nu_m^2 + \text{Bi}_4^2}\right)}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\mu_n, \nu_m$  – корни характеристических уравнений:

$$\tan \mu_n = \frac{\mu_n (\text{Bi}_1 + \text{Bi}_2)}{\mu_n^2 - \text{Bi}_1 \text{Bi}_2}; \quad \tan \nu_m = \frac{\nu_m (\text{Bi}_3 + \text{Bi}_4)}{\nu_m^2 - \text{Bi}_3 \text{Bi}_4}. \quad (5)$$

В этих уравнениях критерии Био:

$$\text{Bi}_1 = \frac{\alpha_1 a}{\lambda_1}; \quad \text{Bi}_2 = \frac{\alpha_2 a}{\lambda_1}; \quad \text{Bi}_3 = \frac{\alpha_3 b}{\lambda_2}; \quad \text{Bi}_4 = \frac{\alpha_4 b}{\lambda_2}.$$

Теплоотдача в поперечном (нормальном к поверхности пластины) направлении характеризуется соответствующим критерием Био:  $\text{Bi} = \frac{\alpha h}{\lambda}$ .

После применения прямого и обратного преобразований с ядрами (4) к уравнению (3), получено выражение для температурного поля пластины в виде следующей суммы (при условии  $\varphi(x, y) = 0$ ):

$$T(x, y, \tau) = T_Q(x, y, \tau) + T_x(x, y, \tau) + T_y(x, y, \tau) + T_c. \quad (6)$$

где отдельные составляющие:

$$T_Q(x, y, \tau) = \sum_{i=1}^k 16 \frac{\text{Bi}_i}{\alpha h^2} \frac{Q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\varphi_1(\mu_n, x) \varphi_2(\nu_m, y)}{K_n K_m} \frac{I_n(x_i) I_m(y_i)}{C_{n,m}} \Phi_{n,m}(\tau); \quad (7)$$

$$T_x(x, y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{K_n K_m} \frac{\theta_{1(n,m)}}{C_{n,m}} \varphi_1(\mu_n, x) \varphi_2(\nu_m, y) \Phi_{n,m}(\tau); \quad (8)$$

$$T_y(x, y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{K_n K_m} \frac{\theta_{2(n,m)}}{C_{n,m}} \varphi_1(\mu_n, x) \varphi_2(\nu_m, y) \Phi_{n,m}(\tau). \quad (9)$$

В уравнениях (6) – (9):

$Q_i$  – тепловые мощности отдельных ТВЭ;

$\varphi_1(\mu_n, x) = \mu_n \cos\left(\frac{\mu_n}{a} x\right) + \text{Bi}_1 \sin\left(\frac{\mu_n}{a} x\right)$ ;  $\varphi_2(\nu_m, y) = \nu_m \cos\left(\frac{\nu_m}{b} y\right) + \text{Bi}_3 \sin\left(\frac{\nu_m}{b} y\right)$  – функции распределения температур вдоль осей  $X$  и  $Y$  соответственно;

$$\left. \begin{aligned} I_n(x_i) &= \left[ \cos\left(\frac{\mu_n}{a} x_i\right) + \frac{\text{Bi}_1}{\mu_n} \sin\left(\frac{\mu_n}{a} x_i\right) \right] \sin\left(\frac{\mu_n}{a} \frac{\Delta x_i}{2}\right); \\ I_m(y_i) &= \left[ \cos\left(\frac{\nu_m}{b} y_i\right) + \frac{\text{Bi}_3}{\nu_m} \sin\left(\frac{\nu_m}{b} y_i\right) \right] \sin\left(\frac{\nu_m}{b} \frac{\Delta y_i}{2}\right); \end{aligned} \right\}$$

– функции, учитывающие влияние источников теплоты  $Q_i$  на распределение температур;

$$\left. \begin{aligned} \theta_{1,n,m} &= \left[ T_1 \mu_n \text{Bi}_1 + T_2 (\mu_n \cos \mu_n + \text{Bi}_1 \sin \mu_n) \text{Bi}_2 \right] \cdot \left[ \sin v_m + \frac{\text{Bi}_3}{v_m} (1 - \cos v_m) \right]; \\ \theta_{2,n,m} &= \left[ T_3 v_m \text{Bi}_3 + T_4 (v_m \cos v_m + \text{Bi}_3 \sin v_m) \text{Bi}_4 \right] \cdot \left[ \sin \mu_n + \frac{\text{Bi}_1}{\mu_n} (1 - \cos \mu_n) \right]; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

– функции, учитывающие теплоотдачу от торцов на температурное поле пластины;

$$\Phi_{n,m}(\tau) = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{c\rho} \left[ \lambda_1 \left( \frac{\mu_n}{a} \right)^2 + \lambda_2 \left( \frac{v_m}{b} \right)^2 + \lambda \frac{\text{Bi}}{h^2} \right] \tau \right\} \text{ – функция влияния времени } \tau \text{ на температурное поле}$$

пластины;

$$K_n = (\mu_n^2 + \text{Bi}_1^2) \left( 1 + \text{Bi}_1 + \frac{\text{Bi}_2}{\mu_n^2 + \text{Bi}_2^2} \right); K_m = (v_m^2 + \text{Bi}_3^2) \left( 1 + \text{Bi}_3 + \frac{\text{Bi}_4}{v_m^2 + \text{Bi}_4^2} \right); C_{n,m} = \frac{\lambda_1}{\lambda} \left( \frac{\mu_n}{a} \right)^2 + \frac{\lambda_2}{\lambda} \left( \frac{v_m}{b} \right)^2 + \frac{\text{Bi}}{h^2}.$$

Составляющие температуры  $T(x, y, \tau)$ , рассчитываемые по уравнениям (8) – (10), определены при условии, что значение температуры окружающей среды принято  $T_c = 0$ . Реальные температуры ТВЭ необходимо рассчитывать по уравнению (6) при реальном значении  $T_c \neq 0$ , а температуры  $T_1, T_2, T_3, T_4$ , входящие в функции (10), определять как относительные, то есть по отношению к температуре  $T_c$ .

Если отвод теплоты с торцовых поверхностей незначителен, можно принять:

$$T(x, y, \tau) \approx T_Q(x, y, \tau) + T_c.$$

Параметры теплового поля пластины в стационарном режиме получим из уравнения (6), приняв  $\tau = \infty$ , что соответствует значению  $\Phi_{n,m}(\tau) = 1$ .

## VI Определение показателей надежности как функций температур ЭЭС

В процессе проектирования показатели надежности (вероятность безотказной работы, технический ресурс и др.) устройств РЭА и их электрорадиоэлементы (ЭРЭ) следует определять в соответствии со стандартами [3,4] по модели  $DN$ -распределения (диффузионного немонотонного):

$$P(x) = \Phi \left( \frac{1-x}{v\sqrt{x}} \right) + e^{v^2} \Phi \left( -\frac{1+x}{v\sqrt{x}} \right), \quad (11)$$

где  $\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp \left( -\frac{u^2}{2} \right) du$  – функция нормального распределения,  $u$  – параметр интегрирования.

Отрезок времени, полностью соответствующий функциональной пригодности объекта, принимают в качестве базового и обозначают  $\mu$ ; если реальное время  $\tau$  работы технического объекта отличается от  $\mu$ , вводят относительное время работы  $x = \tau/\mu$ ;  $v$  – коэффициент вариации распределения отказов.

Как показали исследования,  $DN$ -распределение существенно точнее отображает типовые процессы постепенных отказов ЭРЭ, а экспоненциальный – внезапных [5,6]. Причем для интегральных микросхем (ИС) средняя наработка на отказ, рассчитанная по экспоненциальному распределению, может отличаться от точного значения (быть большей), рассчитанного по  $DN$ -распределению, в сотни раз [6].

Расчет параметров надежности отдельных ЭРЭ проводят в соответствии с математическими моделями [7]:

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p \times \prod_{i=1}^n K_i, \quad (12)$$

где  $\lambda_p$  – рабочая (эксплуатационная) интенсивность отказов элемента,  $\lambda_0$  – исходная (базовая) интенсивность отказов при номинальной электрической нагрузке и нормальной температуре окружающей среды  $t_{oc} = 25$  °С;  $K_p$  – коэффициент режима, являющийся функцией температуры  $T$  и коэффициента нагрузки  $\beta$ :  $K_p = f(T, \beta)$ ;  $K_i$  – коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов как функций различных факторов.

Количество отдельных ЭРЭ и функциональных узлов (ФУ) в устройстве РЭА может достигать сотен, а для сложных РЭА даже тысяч, поэтому для расчетов показателей надежности устройств РЭА необходимо создавать программные модули объектно-ориентированных систем автоматизированного проектирования (САПР).

Выражения коэффициентов режима  $K_p$  в математических моделях для интегральных микросхем (ИМС) имеют такой вид:

$$K_p = A \exp[B(T + 273)], \quad (13)$$

где  $A$  и  $B$  – константы, определенные для соответствующих групп ИС;  $T$ , °С – температура ИС.

Другие особенности конкретных ИМС (напряжение питания, тип корпуса, степень жесткости условий эксплуатации и т. п.) учитываются в модели (12) коэффициентами  $K_i$ .

Более сложны и детализированы выражения  $K_p$  в моделях для дискретных полупроводниковых приборов (ПП) – транзисторов, диодов.

Для кремниевых ПП:

$$K_p = A \exp \left[ \frac{N_T}{\varphi} + \left( \frac{\varphi}{T_M} \right)^L \right]; \quad \varphi = 273 + T + (175 - T_{пм}) + \Delta t \cdot K_{эл} \left( \frac{T_{пм} - T_{зн}}{150} \right), \quad (14)$$

где  $A$ ,  $N_T$ ,  $T_M$ ,  $L$ ,  $\Delta t$  – постоянные модели;  $K_{эл}$  – отношение рабочей электрической нагрузки к максимально допустимой;  $T_{зн}$  – максимальная температура, для которой температура перехода не превышает максимальной  $T_{пм}$ .

Для резисторов:

$$K_p = A \cdot \exp \left[ B \left( \frac{T + 273}{N_t} \right)^G \right] \exp \left[ \frac{\beta}{N_s} \cdot \left( \frac{T + 273}{273} \right)^J \right]^H, \quad (15)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $N_t$ ,  $G$ ,  $N_s$ ,  $J$ ,  $H$  – постоянные модели;  $\beta$  – отношение рабочей мощности рассеивания резистора к его номинальной.

Для конденсаторов:

$$K_p = A \cdot \left[ \left( \frac{\beta}{N_s} \right)^H + 1 \right] \cdot \exp \left[ B \left( \frac{T + 273}{N_t} \right)^G \right], \quad (16)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $N_t$ ,  $G$ ,  $N_s$ ,  $H$  – постоянные модели;  $\beta$  – отношение рабочего напряжения на конденсаторе к номинальному.

Для трансформаторов:

$$K_p = A \cdot \exp \left( \frac{T_M + 273}{B_M} \right)^G, \quad (17)$$

где  $A$ ,  $G$ ,  $B_M$  – постоянные модели;  $T_M$  – температура наиболее нагретой точки трансформатора:  $T_M = T_p + T_n$ ;  $T_n$  – температура перегрева:  $T_n = 0,5 T_{ты} (\beta^2 + 1)$ ,  $T_{ты}$  – максимально допустимая по техническим условиям температура.

Целью расчетов надежности любого объекта обычно является определение вероятности безотказной работы  $P(\tau)$  на протяжении отрезка времени  $0 < \tau < \theta$ , где символом  $\theta$  обозначается ресурс, или средний срок службы, или наработку на отказ.

Реальные процессы характеризуют также коэффициентами вариации  $v$  параметров – отношением среднеквадратического отклонения  $s$  параметра к его среднему значению  $\bar{z}$ :  $v = s/\bar{z}$ . Рекомендованные стандартом [4] значения коэффициентов вариации факторов – электрических процессов (электролиза, миграции зарядов, электродиффузии), приводящих к разрушению ПП, ИМС, конденсаторов, других изделий электронной техники – находятся в диапазоне  $v = 0,70 \dots 1,5$ .

Вероятность безотказной работы  $P(x)$  рассчитывают по уравнению (11).

В соответствии со стандартом [4], среднюю наработку ЭРЭ до отказа  $\theta_0$  необходимо находить из трансцендентного уравнения:

$$\sqrt{\frac{\theta_0}{2\pi \tau_b^3}} \exp \left[ -\frac{(\tau_b - \theta_0)^2}{2\tau_b \theta_0} \right] = \lambda_p, \quad (18)$$

где  $\tau_b$  – продолжительность испытаний (в часах), при которой была получена  $\lambda_0$ .

Для большинства ЭРЭ рекомендован диапазон  $10^4 < \tau_b < 5 \cdot 10^4$ ; для практических расчетов можно принять  $\tau_b \approx 3 \cdot 10^4$  ч.

Если определена  $\lambda_0$ , в соответствии с (8) – (12) можно рассчитать  $\lambda_p$  для конкретного ЭРЭ, а из уравнения (17) найти значение  $\theta_0$ ; базовое значение времени  $\mu = \theta_0$ . Затем следует задать необходимое время работы  $\tau$  и рассчитать вероятность  $P(\tau)$  безотказной работы ЭРЭ в зависимости от безразмерного времени  $x = \tau/\mu$ , коэффициента  $v$  по уравнению (6).



Для определения  $\theta_0$  как функции параметров  $\lambda_p$  и  $\tau_b$  по уравнению (18) в САПР необходима специальная подпрограмма, но  $\theta_0$  можно рассчитать по аппроксимационной формуле (для  $\tau_b \approx 3 \cdot 10^4$  ч с погрешностью менее 1%):

$$\theta_0(\lambda_p) = a \lg \lambda_p + b; \quad a = -1,574; \quad b = 2,697.$$

Для создания программных модулей САПР чаще всего используется интегрированная среда **C++Builder**, но в ее математической библиотеке нет “встроенной” функции нормального распределения  $\Phi(u)$ , поэтому необходимо создавать специальную подпрограмму для вычисления этой функции. Упростить такую математическую операцию можно с помощью аппроксимационного выражения:

$$P(x) = 0,5 \left[ (1 + \tanh(ku_1)) + e^{\frac{2}{v^2}} (1 + \tanh(ku_2)) \right];$$

$$\text{где } u_1 = \frac{1-x}{v\sqrt{x}}; \quad u_2 = -\frac{1+x}{v\sqrt{x}}, \quad \text{в свою очередь: } k = 0,31v^2 - 0,915v + 1,554;$$

для конкретных значений  $v$ :  $k = 1,065$  для  $v = 0,7$  (это значение наиболее реально для ЭРЭ);  $k = 0,952$  для  $v = 1$ ;  $k = 0,9$  для  $v = 1,2$ ;  $k = 0,88$  для  $v = 1,5$ .

Погрешность аппроксимации в диапазоне  $0 < x < 4$  для  $P(x)$  не превышает 2%.

Показатели надежности РЭА могут быть рассчитаны по рассмотренным выше математическим моделям, но исходными данными для этих расчетов должны быть значения температур ЭРЭ.

Таким образом, основой комплексной САПР, определяющей показатели надежности любого электронного аппарата, должны быть программные модули определения температур каждого из элементов электронной структуры.

Когда температуры всех электронных составляющих аппарата определены, можно рассчитать показатели надежности каждого из них, а потом и для всего объекта в соответствии со структурной схемой надежности в виде соединения отдельных структурных составляющих [3].

Рассмотренные методы определяют структуру программных модулей комплексной САПР для расчетов тепловых режимов и показателей надежности структурно-конструктивных модулей электронного аппарата.

Последние создаются на базе современных интегрированных сред типа **C++Builder**, для них лучше всего подходят аналитические решения, рассмотренные выше.

Значения температур, найденные из уравнений (7) – (10), дают возможность рассчитать показатели надежности каждого из ЭЭС, отдельной МСб, всего РЭА по известным нормативным документам [3, 4].

## VII Выводы

1. Тепловые процессы в структурно-конструктивных модулях – ячейках, микросборках – в значительной степени определяют их функциональные характеристики и надежность всего радиоэлектронного аппарата.

2. Предложены математические модели для определения параметров теплового поля в микросборках.

3. Получены аналитические решения для расчетов температур в микросборках, учитывающие отвод теплоты со всех поверхностей пластины-основы к окружающему её объёму.

4. Методы определения тепловых режимов микросборок являются основой для аналитического расчета показателей надежности РЭА, связанных с температурами отдельных элементов электронной структуры.

5. Определены математические модели для аналитического расчета показателей надежности составляющих электронной структуры и всего устройства РЭА.

*Список использованной литературы:* 1. Уваров Б. М., Зиньковский Ю. Ф. Оптимізація теплових режимів та надійності конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками: – Київ, “Корнійчук”, 2011.–248 с. 2. Лыков А. В. Теплообмен(Справочник). 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1978. — 480 с. 3. ДСТУ2860-94.Надійність техніки.Терміни та визначення. 4. ДСТУ 2862-94. Методи розрахунку показників надійності. 5. Прытков С. Ф., Горбачева В. М., Мартынова М. Н., Петров Г. А. Надежность электрорадиоизделий/Справочник. — МО РФ и НИИ “Электронстандарт”, 2004. — 620 с. 6. Стрельников В. П., Федухин А. В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. 7. Стрельников В. П. Оценка ресурса изделий электронной техники // Математичні машини та системи, 2004, № 2.