

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Б. М. Уваров, Ю. Ф. Зиньковский

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”

пр. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: kyivbmu@ukr.net

Рассмотрены вопросы обеспечения высокой надежности электронной аппаратуры. Показатели надежности электронного аппарата являются определяющими, а они, в свою очередь зависят от температур его электрорадиоэлементов. Эти температуры необходимо рассчитывать при проектировании, а по ним – показатели надежности всего аппарата. Таких элементов в современном электронном аппарате может быть несколько тысяч, поэтому определение температур в нем – сложная и громоздкая вычислительная процедура. Приведены математические модели для расчета температур в электронном аппарате и связанных с ними показателей надежности. Определены требования к программным модулям комплексной системы автоматизированного проектирования для расчета температур каждого из элементов электронной структуры, а по ним – показателей надежности всего электронного аппарата.

Ключевые слова: электронная аппаратура, блок, ячейка, микросборка, температура элемента, надежность.

ЗАБЕСПЕЧЕННЯ ВИСОКОЇ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ

Б. М. Уваров, Ю. Ф. Зиньковський

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”

пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: kyivbmu@ukr.net

Розглянуті питання забезпечення високої надійності електронної апаратури. Показники надійності електронного апарату є визначальними, а вони, у свою чергу залежать від температур його електрорадіоелементів. Ці температури необхідно розраховувати при проектуванні, а по них – показники надійності всього апарату. Таких елементів у сучасному електронному апараті може бути декілька тисяч, тому визначення температур у ньому – складна й громіздка обчислювальна процедура. Наведені математичні моделі для розрахунку температур у електронному апараті й пов'язаних з ними показників надійності. Визначені вимоги до програмних модулів комплексної системи автоматизованого проектування для розрахунку температур кожного з елементів електронної структури, а по них – показників надійності всього електронного апарату.

Ключові слова: електронна апаратура, блок, чарунка, мікросбірка, температура елемента, надійність.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современный подход к проектированию и производству высокотехнологичной и наукоёмкой продукции (CALStехнологии – информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий) предполагает уже на этапе проектирования использование методов, обеспечивающих высокие функциональные показатели изделий на этапе эксплуатации.

Для электронной аппаратуры (ЭА) показатели надежности являются основными (иногда и определяющими) функциональными характеристиками, поэтому необходим анализ влияния на них внешних дестабилизирующих факторов – механических, температуры, влажности, ионизирующих излучений.

Статистический анализ показывает, что для устройств ЭА относительное число отказов в процессе эксплуатации, вызванных действием механических и тепловых факторов, достигает 70–85 %.

Наиболее сложно определять тепловые поля и температуры электрорадиоэлементов (ЭРЭ) и функциональных узлов (ФУ) в блоках ЭА с плотной компоновкой, когда во внутреннем объеме такого блока установлены ячейки с минимальными зазорами между ними. Тепловые поля внутри блока и в ячейках определяются не только внешними тепловыми воздействиями, но и внутренними тепловыделениями ФУ и ЭРЭ.

Расчет показателей теплового поля для внутреннего объема блока является сложной проблемой,

поскольку совокупность ячеек представляет собой так называемую нагретую зону, которую в большинстве конструкций можно представить как анизотропное тело с внутренними источниками тепла. Распределение температур в объеме такой анизотропной зоны представляет собой первый этап расчета; второй – это расчет теплового поля ячеек и температур тепловыделяющих элементов (ТВЭ) электронной структуры (ЭРЭ и ФУ) для каждой из ячеек. Если в составе ячейки имеются микросборки (МСБ), может потребоваться расчет температур каждого из ее элементов. Таким образом, для каждого из этапов необходимы объектно-ориентированные методы расчета, которые и рассматриваются в настоящей статье.

Температуры всех ТВЭ, в свою очередь, определяют показатели их надежности – интенсивность отказов, вероятность и время безотказной работы, технический ресурс и т.п.

Цель работы – предложить методы расчета показателей надежности электрорадиоэлементов, микросборки, функциональных узлов как функции температур последних и объединения их в комплексные показатели надежности всего устройства радиоэлектронной аппаратуры.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. *Тепловое поле блока с плотной компоновкой.* Для большинства блоков ЭА отвод теплоты от ячеек нагретой зоны осуществляется конвекцией к тепло-

носителю всередині корпусу (в більшості випадків повітря) і радіації до стінок корпусу (коефіцієнти теплоотдачі α_i , температура теплоносителя $T_{ск}$ в корпусі) визначаються характером конвективного процесу (естественная конвекция или принудительная вентиляция). Параметри α_i і $T_{ск}$, необхідні для розрахунку теплового поля нагрітої зони, можуть бути визначені, виходячи з загальних рівнянь теплового балансу [1].

Теплова модель нагрітої зони в блоці ЕА може бути представлена як паралелепіпед з розмірами $l_x \cdot H \cdot l_y \cdot H \cdot l_z$, з розподіленими внутрішніми джерелами теплоти інтенсивністю $q(x, y, z, \tau)$, бокові поверхні якого знаходяться в конвективному теплообміні з внутрішнім об'ємом корпусу блоку (рис. 1).

В загальному випадку коефіцієнти теплоотдачі α_i для поверхонь зони можуть бути різними, як і коефіцієнти її теплопровідності λ_i вздовж координатних осей n_i . Останнє пояснюється тим, що передача теплоти в площині ячеїки визначається теплопровідністю матеріалів її основи і каркаса (пластмаси або металу), а в напрямленні, нормальному до площини, – прошлойками теплоносителя (повітря) між окремими ячеїками.

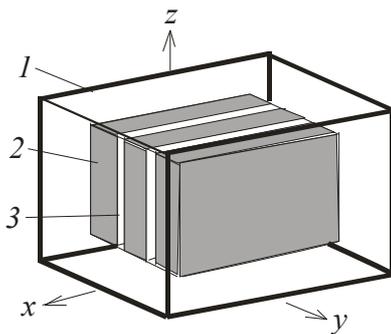


Рисунок 1 – Схема корпусу ЕА і нагрітої зони:
1 – корпус; 2 – ячеїки; 3 – зазори

Диференціальне рівняння нестационарного теплового процесу для такого паралелепіпеда:

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_x \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} + q(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

де $T(x, y, z, \tau)$ – температура в точці зони з координатами x, y, z в момент часу τ ; c – усереднена теплоємність об'єму зони, ρ – її усереднена густина.

Граничні умови на поверхнях нагрітої зони для конвективного теплообміну:

$$\lambda_i \frac{\partial T(l_i)}{\partial n_i} + \alpha_i T(l_i) = 0. \quad (2)$$

Рішення рівняння (1) з граничними умовами (2) можна отримати методом кінцевих інтегральних перетворень, застосувавши ядра [2]:

$$K(\mu_i, v_i) = \sqrt{\frac{2}{l_i}} \cdot \frac{\mu_i \cos\left(\frac{\mu_i}{l_i} v_i\right) + \text{Bi}_i \sin\left(\frac{\mu_i}{l_i} v_i\right)}{\sqrt{(\mu_i^2 + \text{Bi}_i^2) \cdot \left(1 + \text{Bi}_i + \frac{\text{Bi}_i}{\mu_i^2 + \text{Bi}_i^2}\right)}}, \quad (3)$$

де v_i – відповідна координата (x, y або z).

Для випадку з постійною інтенсивністю теплового виділення в об'ємі, коли $q = \text{const}$ рішення рівняння (1) з граничними умовами (2) має вигляд:

$$T(x, y, z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8q}{C_{n,m,k} K_n K_m K_k} \Psi_n \Psi_m \Psi_k \times \varphi_n(x) \varphi_m(y) \varphi_k(z) \Phi(\tau), \quad (4)$$

де $C_{n,m,k} = \lambda_x \frac{\mu_n^2}{l_x^2} + \lambda_y \frac{\mu_m^2}{l_y^2} + \lambda_z \frac{\mu_k^2}{l_z^2}$; μ_i – корні характеристичних рівнянь $\tan(\mu_i) = 2\mu_i \text{Bi}_i / (\mu_i^2 - \text{Bi}_i^2)$; $\text{Bi}_i = \alpha_i l_i / \lambda_i$ – критерії конвективного теплообміну Біо;

$$\Psi_i = \mu_i \sin \mu_i + \text{Bi}_i (1 - \cos \mu_i);$$

$$\varphi_i(v_i) = \cos\left(\mu_i \frac{v_i}{l_i}\right) + \frac{\text{Bi}_i}{\mu_i} \sin\left(\mu_i \frac{v_i}{l_i}\right),$$

$\Phi(\tau) = 1 - \exp[-(C_{n,m,k} a \tau)]$ – функція часу;

a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу пластини;

$$K_i = (\mu_i^2 + \text{Bi}_i^2) \left[1 + \text{Bi}_i + \frac{\text{Bi}_i}{(\mu_i^2 + \text{Bi}_i^2)} \right].$$

Аналогічним чином може бути отримано рішення для довільного розподілу внутрішніх джерел у вигляді функції $q(x, y, z, \tau)$.

Температури стаціонарного режиму $T(x, y, z)$ можуть бути розраховані за рівнянням (4), якщо покласти $\Phi(\tau) = 1$.

Для розрахунку температур за рівнянням (4) необхідний об'єктно-орієнтований програмний комплекс.

Теплове поле ячеїки і мікросборки. Ячеїка блоку зазвичай представляє собою прямокутну пластину з діелектрика або металу, на якій закріплені МСБ, МС, ФУ або ЕРЭ. Відведення теплоти від ТВЭ здійснюється конвекцією до теплоносителя всередині блоку, радіацією до стінок блоку або оточуючим елементам, кондукцією до основи ячеїки.

Тепловою моделлю для ячеїки може бути двохмерна пластина з розмірами $l_x H_y H_d$, з дискретними джерелами теплоти Q_i з центрами в координатах x_i, y_i , основи яких мають розміри $\Delta x_i H \Delta y_i$. Для пластин з металу або кераміки з хорошою теплопровідністю цілком природно враховувати тепловідвід через торці пластини з коефіцієнтами теплоотдачі α_x, α_y .

Розрахункове рівняння для температур ТВЭ ячеїки, отримане в [1] також методом кінцевих інтегральних перетворень з ядрами (3) має вигляд:

$$T(x, y, z, \tau) = \sum_{i=1}^k 16 \frac{\text{Bi}_x l_x l_y}{\alpha d^2} \frac{Q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} K_n^2 K_m^2 \times \\ \times \frac{I_n(x_i) I_m(y_i)}{C_{n,m}} \varphi(\mu_n, x) \varphi(\mu_m, y) \Phi(\tau), \quad (5)$$

$$I_n(x_i) = \left[\mu_n \cos\left(\mu_n \frac{x_i}{l_x}\right) + \text{Bi}_x \sin\left(\mu_n \frac{x_i}{l_x}\right) \right] \sin\left(\frac{\mu_n x_i}{2 l_x}\right);$$

$$I_m(y_i) = \left[\mu_m \cos\left(\mu_m \frac{y_i}{l_y}\right) + \text{Bi}_y \sin\left(\mu_m \frac{y_i}{l_y}\right) \right] \sin\left(\frac{\mu_m y_i}{2 l_y}\right);$$

$$C_{n,m} = \mu_n^2 \frac{l_y}{l_x} + \mu_m^2 \frac{l_x}{l_y} + \text{Bi} \frac{l_x l_y}{d^2};$$

$$\Phi(\tau) = 1 - \exp[-(C_{n,m} a \tau)],$$

где a – коэффициент температуропроводности материала пластины.

По уравнению (5) можно также рассчитать тепловое поле и температуры элементов МСб. Для расчета температур ячеек и МСб необходим объектно-ориентированный программный комплекс.

Показатели надежности как функции температур ЭРЭ и ФУ. Отказы технических устройств являются сложными физическими явлениями и их можно классифицировать по таким признакам:

- по степени влияния на работоспособность устройства: полные, частичные;
- по физическому процессу проявления: катастрофические, параметрические;
- по характеру процесса проявления: внезапные, постепенные;
- по характеру связи с другими отказами: независимые, зависимые;
- по длительности существования: стойкие, временные, перемежающиеся;
- по причине возникновения: конструкторские, производственно – технологические, эксплуатационные.

Эти признаки характеризуют отказ как комплексное явление, требующее анализа именно как комплекса показателей надежности. Такая постановка проблемы правомочна также и потому, что каждый отказ характеризуется сразу всеми шестью признаками, приведенными выше.

Отказ технического устройства априори является вероятностным явлением и поэтому нахождение комплексных показателей надежности – задача высшей сложности в связи с необходимостью учета тотального влияния всего множества внешних факторов на каждый из элементов конструкции.

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

$$P(x) = \Phi\left(\frac{1-x}{v\sqrt{x}}\right) + e^{\frac{2}{v^2}} \Phi\left(-\frac{1+x}{v\sqrt{x}}\right), \quad (6)$$

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 μ ; если реальное время τ работы технического объекта отличается от μ , 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, 8]:

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p \times \prod_{i=1}^n K_i, \quad (7)$$

где λ_p – рабочая (эксплуатационная) интенсивность отказов элемента, λ_0 – исходная (базовая) интенсивность отказов при номинальной электрической нагрузке и нормальной температуре окружающей среды $t_{oc} = 25$ °C; K_p – коэффициент режима, являющийся функцией температуры T и коэффициента нагрузки β : $K_p = f(T, \beta)$; K_i – коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов как функций различных факторов.

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

Математические модели показателей надежности ЭА.

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

$$K_p = A \exp B(T + 273), \quad (8)$$

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

Другие особенности конкретных ИМС (напряжение питания, тип корпуса, степень жесткости условий эксплуатации и т.п.) учитываются в модели (8) коэффициентами K_i .

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

Для кремниевых ППП:

$$K_p = A \exp \left[\frac{N_T}{\Phi} + \left(\frac{\Phi}{T_m} \right)^L \right]; \\ \Phi = 273 + T + (175 - T_{nm}) + \\ + \Delta T \cdot K_{эл} \left(\frac{T_{nm} - T_{зн}}{150} \right), \quad (9)$$

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:

$$K_p = A \cdot \exp B \left(\frac{T + 273}{N_t} \right)^G \times \exp \left[\frac{\beta}{N_s} \cdot \left(\frac{T + 273}{273} \right)^J \right]^H, \quad (10)$$

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

Для конденсаторов:

$$K_p = A \cdot \left[\left(\frac{\beta}{N_s} \right)^H + 1 \right] \cdot \exp \left[B \left(\frac{T + 273}{N_t} \right)^G \right], \quad (11)$$

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

Для трансформаторов:

$$K_p = A \cdot \exp \left(\frac{T_M + 273}{B_M} \right)^G, \quad (12)$$

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

В научной литературе для определения K_p приводят также соответствующие таблицы или графики, охватывающие необходимый диапазон рабочих температур T_p и значений коэффициентов нагрузки β . Но для программных модулей САПР использование таблиц требует больших массивов памяти, а также разработки интерполяционных подпрограмм (чаще всего – сплайновых); графики для определения K_p в САПР вообще непригодны.

Поэтому в САПР наиболее рационально использовать аналитические модели (8)–(12).

Определение вероятности безотказной работы ЭА.

Целью расчетов надежности любого объекта обычно является определение вероятности безотказной работы $P(\tau)$ на протяжении отрезка времени $0 < \tau < \theta$, где символом θ 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 ППП, ИМС, конденсаторов, других изделий электронной техники – находятся в диапазоне $v = 0,70 \dots 1,5$. Такие же значения принимают

для расчетов показателей надежности указанных элементов ЭА.

Вероятность безотказной работы $P(x)$ рассчитывают по уравнению (7).

В соответствии со стандартом [4], среднюю наработку ЭРЭ до отказа θ_0 необходимо находить из трансцендентного уравнения:

$$\sqrt{\frac{\theta_0}{2\pi \tau_b^3}} \exp \left[-\frac{(\tau_b - \theta_0)^2}{2\tau_b \theta_0} \right] = \lambda_p, \quad (13)$$

где τ_b – продолжительность испытаний (в часах), при которой была получена λ_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 λ_0 , в соответствии с (8)–(12) можно рассчитать λ_p для конкретного ЭРЭ, а из уравнения (13) найти значение θ_0 ; базовое значение времени $\mu = \theta_0$. Затем следует задать необходимое время работы τ и рассчитать вероятность $P(\tau)$ безотказной работы ЭРЭ в зависимости от безразмерного времени $x = \tau/\mu$, коэффициента v по уравнению (6).

В программах САПР для решения уравнений, подобных (13), обычно используют итерационные процедуры, но это требует дополнительных затрат времени на вычисления; этого можно избежать, используя аппроксимационные выражения для прямого вычисления необходимых параметров без итерационных процедур.

Для определения θ_0 как функции параметров λ_p и τ_b по уравнению (13) в САПР необходима специальная подпрограмма, но θ_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:

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

где $u_1 = \frac{1-x}{v\sqrt{x}}$; $u_2 = -\frac{1+x}{v\sqrt{x}}$, 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 и ФУ.

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 ЭА 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.

ВЫВОДЫ. 1. Определены требования к программным модулям комплексной САПР для расчетов тепловых режимов и показателей надежности структурно-конструктивных модулей электронной аппаратуры – блоков, ячеек, микросборок.

2. Показано, что среднеинтегральные температуры ячеек в блоках ЭА можно рассчитать аналитически, представив совокупность внутренних конструктивных составляющих РЭА как нагретую зону.

3. Для расчетов температур отдельных ЭРЭ и ФУ в ячейках предложены математические модели в виде систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы теплообмена. Предложены аналитические решения таких систем в виде уравнений, расчет по которым требует разработки объектно-ориентированных программ САПР.

ASSURANCE OF HIGH RELIABILITY OF ELECTRONIC EQUIPMENT AT THE DESIGN STAGE

B. Uvarov, Yu. Zinkovsky

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute "
prosp. Victory 37, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: kyivbmu@ukr.net

The problems of electronic equipment high reliability ensuring are considered. Reliability of electronic apparatus is a crucial factor, which, in its turn, depends on temperature of its electroradioelements. These temperatures should be calculated while designing, and they are the indicators of reliability of the whole apparatus. Such elements in modern electronic device can be numbered in several thousands, so to determine the temperature in it is a complicated and cumbersome calculation procedure. The mathematical models for calculation of the temperature in electronic devices and its associated indicators of reliability are presented. It is defined the requirements for the software modules of the integrated automated design system for calculating the temperature of each of the elements of the electronic structure, and then, using these results, calculating the reliability indices of the whole electronic device.

Key words: electronics, unit, unit cell, microassembly, element temperature, reliability.

REFERENCES

1. Uvarov, B.M., Zinkovsky, Yu.F. (2011), *Optimizatsiya teplovykh rezhymiv ta nadiinosti konstruktivnykh radioelektronnykh zasobiv z imovirnosnyimi kharakterystykamy* [Optimization of thermal modes and reliability of designs of radio electronic means with the probabilistic characteristics], Korneichuk, Kyiv, Ukraine.

2. Lykov, A.V. (1978), *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer], Reference book. 2nd ed., revised and supplemented, Energiya, Moscow, Russia.

3. DSTU 2860–94. Dependability of Technics. Terms and definitions.

4. DSTU 2992–96. Electronics products. Methods of calculation of reliability.

5. Strelnikov, V.P., Fedukhin, A.V. (2002), *Otsenka i prognozirovanie nadezhnosti elektronnykh elementov i*

4. Для расчетов температур в микросборках предложены аналитические решения, учитывающие отвод теплоты от всех поверхностей пластины основы к окружающему ее объему.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Уваров Б.М., Зінковський Ю.Ф. Оптимізація теплових режимів та надійності конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками – К.: "Корнійчук", 2011. – 248 с.

2. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

3. ДСТУ 2860–94. Надійність техніки. Терміни та визначення.

4. ДСТУ 2992–96. Вироби електронної техніки. Методи розрахунку надійності.

5. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

6. Стрельников В.П. Оценка ресурса изделий электронной техники // Математичні машини та системи. – 2004. – № 2. – С. 186–195.

7. Прытков С.Ф., Горбачева В.М., Мартынова М.Н., Петров Г.А. Надежность электрорадиоизделий: Справочник. – М.: МО РФ и НИИ "Электрон-стандарт", 2004. – 620 с.

8. Military HandBook. Reliability prediction of electronic equipment. – Mil-Hdbk-217F, 1991.

sistem [Estimation and forecasting of reliability of electronic components and systems], Logos, Kyiv, Ukraine.

6. Strelnikov, V.P. (2004), "Assessment of resource of electronic technics products", *Mathematical machines the systems*, no. 2, pp. 186–195.

7. Prytkov, S.F., Gorbacheva, V.M., Martynova, M.N., Petrov, G.A. (2004), *Nadezhnost elektroradioizdelii* [Reliability of radio electronic products/Directory], reference book, The Ministry of Defense of the Russian Federation and The Research Institute 'Electron-standard', Moscow, Russia.

8. (1991), *Military HandBook. Reliability prediction of electronic equipment*, Mil-Hdbk-217F.

Стаття надійшла 10.03.2014.