

# ТЕХНОЛОГИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.396.67.095

А.В. НИКИТЧУК, Б.М. УВАРОВ, *д-р техн. наук*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА И НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА

### Введение

Одной из типовых конструкций радиоэлектронного блока является корпус (субблок) с установленными в нем ячейками – каркасами с печатными платами (ПП), на которых размещаются элементы электронной структуры (ЭЭС).

Тепловые воздействия внешней среды и внутренние тепловыделения в ЭЭС приводят к повышению температур элементов, что, как правило, снижает их надежность. Обычно тепловыделения в ячейках различны и целесообразно размещать их в корпусе блока таким образом, чтобы температуры в них были минимальными, и тогда показатели их надежности, как и всего радиоэлектронного аппарата (РЭА), будут максимальными.

То же и в самих ячейках: рациональное размещение ЭЭС на платах может снизить температуру и повысить надежность как элементов, так и всей ячейки. Топологическая оптимизация температур и надежности в ячейках (изменением размещения ЭЭС на печатной плате) рассмотрена в [1]. Там же приведены полученные аналитически уравнения для расчета температур теплового поля ячейки и ее тепловыделяющих элементов – ЭЭС, описаны разработанные компьютерные программы и результаты имитационного моделирования.

Для оптимизации тепловых режимов и надежности ячеек в блоке необходимо разработать алгоритм и соответствующее ему программное обеспечение, а для автоматизированного расчета показателей надежности следует создать базу данных большинства ЭЭС, применяемых в РЭА и включить ее в программу расчета надежности ячеек.

Этой проблеме и посвящена настоящая статья.

### Расчет усредненных температур ячеек в блоке

Первоначальная оценка оптимальности размещения ячеек в корпусе блока может быть произведена по значению усредненных температур  $T_{срj}$  всех ЭЭС каждой ячейки:

$$T_{срj} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k T_i,$$

где  $T_i$  – температуры ЭЭС,  $k$  – их количество в ячейке.

Температуры  $T_i$  в значительной степени определяются температурой теплоносителя (воздуха) в корпусе и размещением ячеек в корпусе блока. Для большинства типовых конструкций блоков ячейки размещаются вертикально, с минимальными зазорами между ними (последние определяются размерами ЭЭС максимальной высоты), образуя так называемую нагретую зону – это блоки с плотной компоновкой. Тепловой режим в таком блоке формируется тепловыделениями ЭЭС, характером конвекции в зазорах – естественной или принудительной (в последнем случае циркуляция теплоносителя обеспечивается вентилятором).

Для расчета температур стенок корпуса, воздуха в зазорах, среднеповерхностной температуры нагретой зоны могут использоваться существующие компьютерные программные продукты, например входящие в состав комплекса *SolidWorks*, или более компактная программа *BlockTermo2* [2]. Критерии теплоотдачи от соответствующих поверхностей в блоке этой программой рассчитываются на основе критериальных уравнений [3]:

– для естественной конвекции:  $Nu = f_1(Gr \cdot Pr)$ ;

– для принудительной:  $Nu = f_2(Re \cdot Pr)$ ,

где  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$ ,  $Re$  – критерии Нуссельта, Грасгофа, Прандтля, Рейнольдса соответственно;  $f_1$ ,  $f_2$  – соответствующие функциональные зависимости.

Радиационный теплообмен между ячейками и стенками корпуса и между самими ячейками рассчитывается в соответствии с законом Стефана – Больцмана [3].

Обычно в блоках ячейки расположены вертикально для интенсификации конвекционных потоков; кроме того, для двух крайних ячеек, находящихся у боковых стенок корпуса, охлаждение улучшается благодаря радиационному теплоотводу от ЭЭС к более холодной стенке корпуса.

Когда температуры стенок корпуса  $T_k$  и воздуха в корпусе  $T_v$  рассчитаны, можно найти для каждой ячейки ее усредненную температуру  $T_j$ , сформировав систему уравнений, учитывающих конвекционные тепловые потоки от каждой ячейки к воздуху внутри корпуса, радиационные от ячейки к стенкам корпуса, радиационные между самими ячейками.

Схема тепловых связей между ячейками и стенками корпуса приведена на рис. 1:

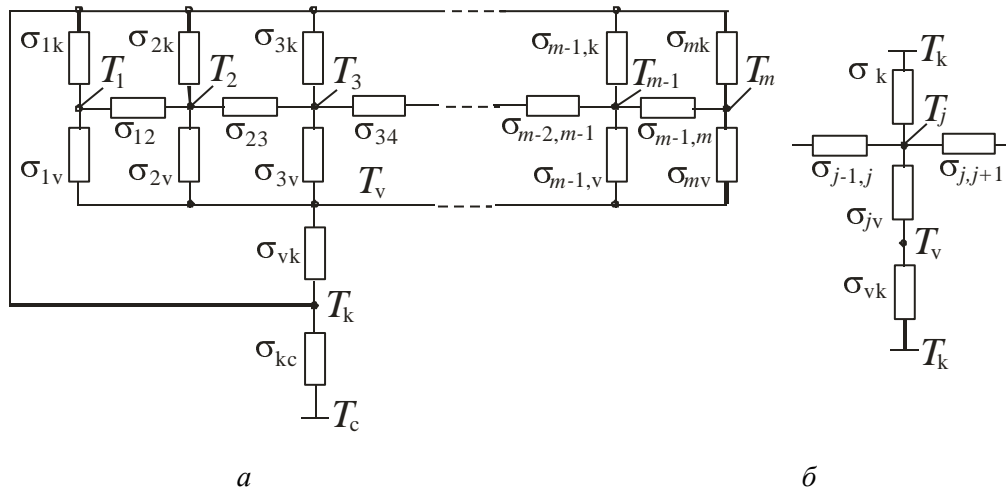


Рис. 1. Тепловые связи в корпусе блока:

*а* – тепловые потоки от ячеек к воздуху и стенкам корпуса;

*б* – тепловые связи отдельной ячейки с другими, воздухом и стенками корпуса

Согласно схеме рис.1, *а* теплота от всех ячеек в конечном счете отводится к стенкам корпуса, а затем отдается в окружающую среду. Для ячейки, которая находится между другими, схема тепловых потоков приведена на рис.1, *б*:  $\sigma_{j-1,j}$ ,  $\sigma_{j,j+1}$  – радиационный теплообмен с соседними ячейками;  $\sigma_{jk}$  – радиационный теплообмен ячейки со стенками корпуса;  $\sigma_{jv}$  – конвективный теплообмен ячейки с внутренним воздухом в корпусе;  $\sigma_{vk}$  – конвективный теплообмен внутреннего воздуха со стенками корпуса. Две крайние ячейки с температурами  $T_1$  и  $T_m$  имеют каждая одну радиационную связь с соседней ячейкой и еще радиационную связь со стенкой корпуса.

Температура стенок корпуса обычно ниже, чем температура любой ячейки, поэтому условия охлаждения двух крайних ячеек лучше, чем условия тех, что находятся между соседними.

Система уравнений математической модели тепловых потоков:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 S_{1k} T_1 - T_v + c_{1k} S_{1kr} T_1^4 - T_k^4 + c_{12} S_{12r} T_1^4 - T_2^4 - Q_1 &= 0; \\ &\dots \\ \alpha_j S_{jk} T_j - T_v + c_{jk} S_{jkr} T_j^4 - T_k^4 + c_{j,j-1} S_{j,j-1r} T_j^4 - T_{j-1}^4 + c_{j,j+1} S_{j,j+1r} T_j^4 - T_{j+1}^4 - Q_j &= 0; \\ &\dots \\ \alpha_m S_{mk} T_m - T_v + c_{mk} S_{mkr} T_m^4 - T_k^4 + c_{m,m-1} S_{m,m-1r} T_m^4 - T_{m-1}^4 - Q_m &= 0; \end{aligned} \right\} (1)$$

Решение этой системы уравнений дает значения усредненных температур  $T_j$  – это тепловой фон ячейки, относительно которого определяются местные перегревы и температуры

$T_i$  каждого из ЭЭС, в соответствии с выделяемой им тепловой энергией, а по ним и показатели надежности.

### Оптимизация показателей надежности ячеек и всего блока

Тепловой режим в блоке, а следовательно, и показатели его надежности можно оптимизировать, рационально располагая ячейки относительно друг друга так, чтобы температуры в них были минимальны.

Тепловыделения в ячейках в большинстве конструкций неодинаковы, зависят от тепловой мощности установленных в них ЭЭС. На первый взгляд, ячейки с максимальным тепловыделением следует разместить у боковых стенок, температуры которых ниже, чем поверхности ячеек средней зоны, а остальные так, чтобы добиться минимума температур в них. Однако даже при таком расположении ячеек в какой-то из них может оказаться ЭЭС, надежность которого минимальна, и поэтому следует искать другое размещение ячеек, обеспечивающее максимальную надежность всего блока.

Это и приводит к необходимости решения проблемы оптимизации конструкции блока по показателю его надежности.

При большом числе ячеек в корпусе блока рационального их размещения добиться сложно, поскольку это число неповторяющихся вариантов  $P_k$  размещения  $k$  ячеек в блоке равно числу перестановок:  $P_k = k!$ , и даже для небольшого числа ячеек вариантов их размещения достаточно велико (для пяти ячеек  $P_k = 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 = 120$ ).

Поэтому была разработана компьютерная программа *OptimBlock* для размещения ячеек в блоке, обеспечивающая максимальное значение вероятности безотказной работы всего блока.

На рис. 2, а приведено окно ввода данных для блока: необходимо задать размеры корпуса, толщину и критерий теплопроводности материала стенок, температуру окружающей среды.

Затем необходимо последовательно для каждой ячейки ввести ее длину, высоту, толщину (определяется высотой наибольших функциональных узлов, микросборок), суммарную мощность тепловыделений ее ЭЭС, координаты установки ячейки в корпусе блока (рис. 2, б).

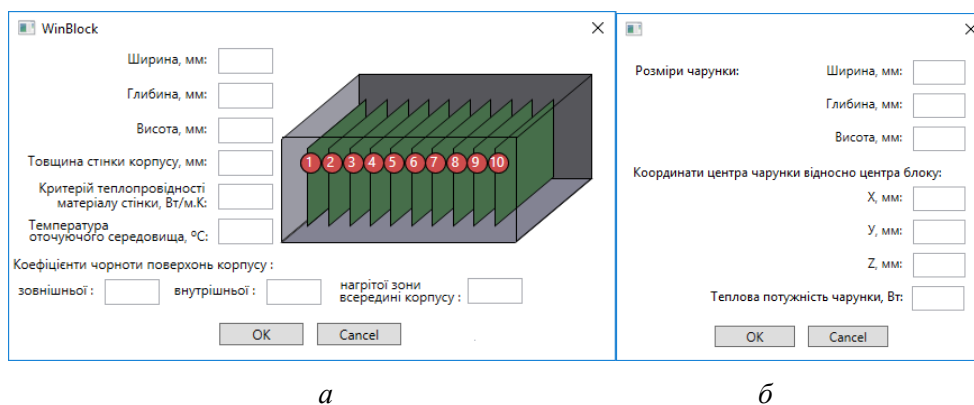


Рис. 2. Ввод параметров: а – блока; б – ячейки

По этим данным программа формирует совокупность ячеек как нагретую зону, рассчитывает температуру стенок корпуса, воздуха в корпусе, критерии теплоотдачи от ЭЭС к воздуху внутри корпуса, от воздуха в корпусе к его стенкам, от стенок к окружающей среде (подобно тому, как это делается программой *BlockTermo 2*).

Основу алгоритма программы составляет программный модуль, генерирующий порядковые номера установки ячеек в блоке. При первоначальном размещении две ячейки с максимальным тепловыделением устанавливаются у боковых стенок блока.

В процессе оптимизации программа обеспечивает такое положение ячеек в блоке, при котором температуры ЭЭС в каждой ячейке минимальны. Целевой функцией оптимизации,

максимальное значение которой программа должна обеспечить, является вероятность  $P(\tau)$  безотказной работы всего блока:

$$P(\tau) = \prod_j^m P_j \quad \tau = \prod_j^m \left[ \prod_i^n P_i \quad \tau \right] \rightarrow \max (2),$$

где  $P_j(\tau)$  – вероятности безотказной работы ячеек,  $P_i(\tau)$  – входящих в ячейку ЭЭС.

Для расчета температур ЭЭС в ячейках, а по ним – и показателей надежности  $P_i(\tau)$  – необходимо уточнить параметры плат ячеек и ввести параметры самих элементов, что иллюстрирует рис. 3:

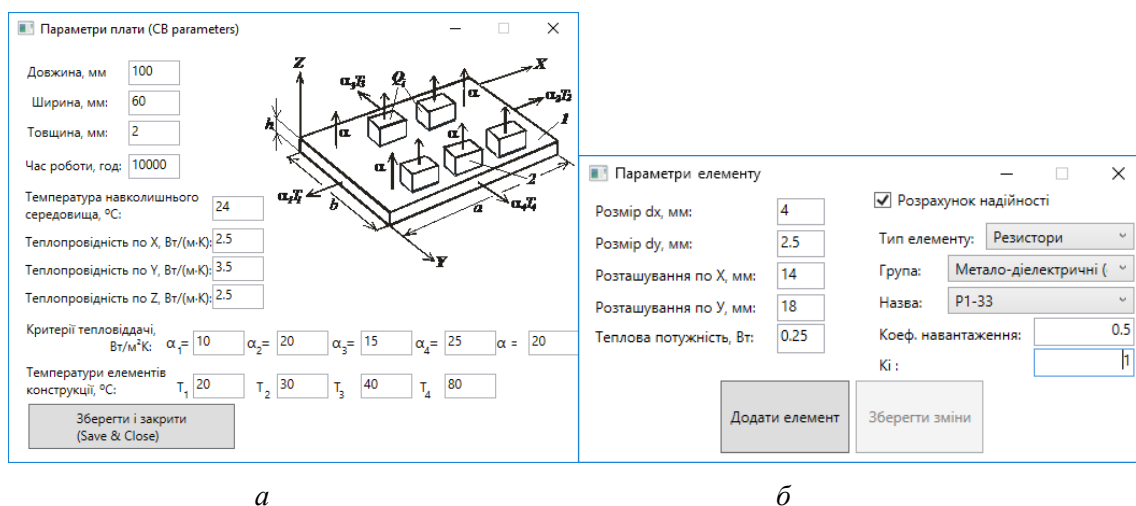


Рис. 3. Ввод параметров платы – а, ЭЭС – б

В первом окне на рис. 3, а вводят: для основания ячейки – прямоугольной платы – размеры  $a \times b \times h$ ; критерии теплопроводности материала платы (они могут быть различными в направлении осей  $X, Y, Z$ ); продолжительность периода работы, для которого должна рассчитываться вероятность  $P(\tau)$ . Значение критерия теплоотдачи  $\alpha_s$  боковых поверхностей платы – рассчитаны на предыдущем этапе и выводятся для уточнения – его можно при необходимости изменить. Необходимо также ввести значения температур  $T_1, T_2, T_3, T_4$  (это могут быть температуры окружающих ячейку элементов конструкции корпуса блока) и критериев теплоотдачи  $\alpha_k$  этим элементам.

Далее необходимо ввести параметры ЭЭС платы: размеры элемента, координаты положения на плате, тепловую мощность (рис. 3, б). В самой программе записана база данных (БД) ЭЭС, которые чаще всего применяют в электрических схемах РЭА:

- резисторов типов Р, С, РП, СП, ПП, КМТ, ММТ, СТ, ТР, 301-319, НР, Б, ПР ;
- конденсаторов типов: К, СГМ, МБГ, ФТ, КТ, Б, КС, КБП;
- трансформаторов типов ТА, ТН, ТО, ТВ, ТП, БТИ, МТИ, ММТИ, ТИ, ТИИ, ТИМ, ТИР, ФИТ, ГХ, ММТС, Т, ТВЛ, ТНЧ, ТОТ, ТУМ, ТФ;
- полупроводниковых приборов типов Д, 2Д, 2Ц, 2В, 2ДС, 2С, 2Т, 1НТ, 2ТС, 2ПС, 2П, 3П, 2У, 2А, 3А;
- интегральных микросхем.

В ячейках «Тип элемента», «Группа», «Название» (рис. 3, б) необходимо выбрать из БД согласно электрической схеме нужный элемент. Значение базовой интенсивности отказов  $\lambda_0$  для выбранного элемента находятся в БД, программа их определяет сама, а коэффициент нагрузки элемента должен быть задан. При необходимости учета дополнительных коэффициентов  $K_i$ , определяющих расчетную надежность элемента (влияние механических нагрузок, влажности, высоты аппарата над уровнем моря) их также необходимо задать.

Согласно этим данным, а также соответствующим математическим моделям [4], программа рассчитывает коэффициент режима  $K_p$  для каждого элемента.

Полученные температуры используются в программе для расчета вероятности безотказной работы  $P_i(\tau)$  каждого ЭЭС согласно модели  $DN$ -распределения (диффузионного немоного) [5].

“Флажок” возле надписи “Расчет надежности” ставится в случае, если необходимо рассчитать и температуры, и показатели надежности; если его не ставить, будут рассчитаны только температуры.

В процессе оптимизации координаты расположения ячеек в корпусе определяются с помощью генератора псевдослучайных чисел; число вариантов расположения должно быть таким, чтобы оно находилось в пределах  $P_k$  (обычно не менее  $P_r = 64$ ).

Для каждого варианта размещения рассчитываются температуры ЭЭС и показатели надежности каждой ячейки. Из полученного массива  $[P(\tau)]_k$  выбирается вариант, для которого ЦФ (2) максимальна, и это значение ЦФ фиксируется.

Процедура генерации вариантов, расчета температур и показателей надежности повторяется до тех пор, пока не будет найден вариант с максимальным значением ЦФ.

Пример работы модуля генерации вариантов размещения десяти ячеек в корпусе блока показан на рис. 4:  $a$  – первоначальное размещение ячеек,  $b$  – полученное в результате работы программы и обеспечивающее максимальное значение  $P(\tau)$ :

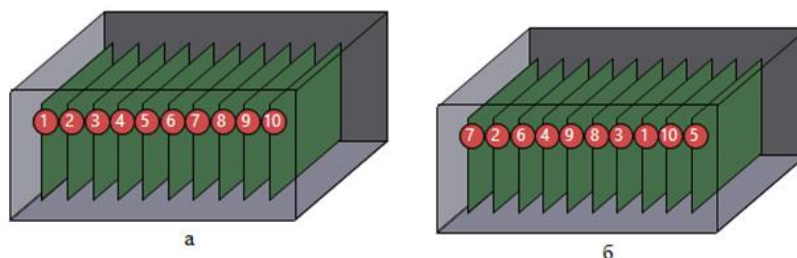


Рис. 4. Компоновка ячеек в блоке:  $a$  – исходная;  $b$  – после оптимизации

Таким образом, обеспечивается минимум температур ЭЭС в ячейках и максимальная надежность всего радиоаппарата.

### Оптимизация температур и надежности ЭЭС ячеек изменением топологии

После оптимального размещения ячеек в блоке имеются дополнительные возможности снижения температур ЭЭС и повышения их надежности с помощью оптимизации топологии ячеек – оптимального (с точки зрения надежности) выбора координат расположения ЭЭС на ПП ячейки – это обеспечивается программой *OptPlat2015* [2].

Исходные данные для программы – типы ЭЭС, их размеры, тепловыделения каждого элемента. Координаты установки ЭЭС могут задаваться в соответствии с электрической схемой (обычно группируются элементы, принадлежащие одной функциональной группе ячейки) или произвольно.

В процессе поиска оптимальной топологии, эти координаты программой будут изменяться до тех пор, пока не будут получены максимальные показатели надежности. Практика эксплуатации программы *OptPlat2015* показала, что определенная по функциональному назначению группировка ЭЭС в известной мере соблюдается даже и при оптимальной (по надежности) топологии.

Температуры ЭЭС и их надежность зависят от координат их положения на ПП ячейки  $x_i, y_i$ , которые формируются с помощью генератора псевдослучайных чисел. Значение ЦФ вычисляется на каждом шаге оптимизации, если изменяются координаты центров ЭЭС  $x_i, y_i$ , пока не будет найден вариант, при котором достигнут максимум  $[P(\tau)]_k$ .

Моделирование процесса оптимизации проведено на нескольких вариантах ПП ячеек и при различном расположении ФУ и ТВЭ.

Нижче приведені результати оптимізації топології плати з розмірами  $120 \times 100 \times 1.5$  мм (із кераміки  $\kappa = 15$  Вт/м·К), на якій встановлені ЕЭС загальною потужністю  $P_{\Sigma} = 9,5$  Вт. Критерії теплоотдачі з поверхностей плати і ЕЭС ( $\alpha = 15$  Вт/м<sup>2</sup>·К) відповідають процесу примусової конвекції. Інтервал часу, для якого визначалась ймовірність безотказної роботи, прийнятий рівним  $10^5$  ч. На зображеннях елементів програма вказує їх температури (в °С).

На рис. 5 показані положення і температури ЕЭС – до і після оптимізації:

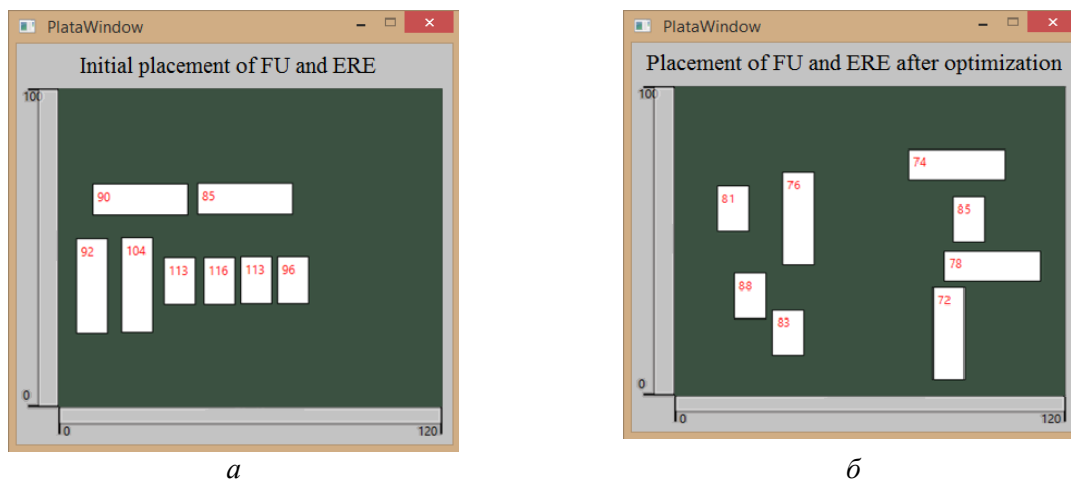


Рис. 5. Топологія плати: а – до оптимізації; б – після

Продовжителіть самого ітераційного процесу залежить від потужності персонального комп'ютера (ПК) і числа ЕЭС на платі; для 8 ЕЭС ПК з тактовою частотою 3,3 ГГц провів оптимізацію за 6 ітерацій і 493 вичислення ЦФ, і на це витрачено 85 с. Вероятність безотказної роботи ячейки збільшилась на 25,3 %.

Програма *OptPlat2015* може використовуватись для розрахунку показателів надійності і пошуку більш «виносливих» елементів – для збільшення ймовірності безотказної роботи.

Топологічна оптимізація температур і надійності ЕЭС в ячейках може застосовуватись в конструкціях РЭА, де розташування ЕЭС може варіюватись в відомих межах без зміни функціональних характеристик ячейки (електромагнітної сумісності). Це більшість конструкцій ячеек РЭА; виключення складають «лінійки» свержвысокочастотних усилителів і генераторів, оптикоелектронна апаратура.

## Выводы

1. Предложено методы оптимізації розташування ячеек в корпусе радиоэлектронного аппарата, позволяющие обеспечить минимальные температуры электронных компонентов ячеек, следовательно – и их максимальную надежность.

2. Рассмотрен метод топологической оптимізації ячейки – изменения координат электронных компонентов, позволяющий получить максимальные показатели надежности их и всей ячейки.

3. Описаны разработанные программные продукты (программы систем автоматизированного проектирования), в которых реализованы указанные методы.

**Список литературы:** 1. Уваров, Б.М., Зінковський, Ю.Ф. Оптимізація теплових режимів та надійності конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками. – Київ : Корнійчук, 2011. – 201 с. 2. Уваров, Б.М. Автоматизація визначення показників механічної витривалості, теплових режимів та надійності радіоелектронних апаратів : електрон. навч. посіб. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 128 с. 3. Исаченко, В.П., Осипова, В.А., Сукомел А.С. Теплопередача : учебник для вузов ; изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1975. – 488 с. 4. С.Ф., Горбачева, В.М., Мартынова, М.Н., Петров, Г.А. Надежность электрорадиоизделий : справочник. – МО РФ и НИИ «Электронстандарт», 2004. – 620 с. 5. ДСТУ 2862-94. Методи розрахунку показників надійності.