

Шило Г. М.¹, Сиротюк О. В.², Савелло А. Є.³, Лопатка Ю. А.⁴, Арешкін Є. К.⁵, Гапоненко М. П.⁶

¹Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна, Email: shilo.gn@gmail.com

²Асистент, Запорізький національний технічний університет, Україна

³Начальник сектора, «Хартрон-ЮКОМ», Запоріжжя, Україна

⁴Студентка, Запорізький національний технічний університет, Україна

⁵Студент, Запорізький національний технічний університет, Україна

⁶Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МАСОГАБАРИТНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕРМЕТИЧНИХ БЛОКІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

Досліджено залежність об'єму, маси та масогабариту від кількості плат і відстані між ними у герметичних блоках радіоелектронних апаратів. Показано, що оптимізація несучих конструкцій може зменшити масогабаритні показники у 1,5–3 рази порівняно з одноплатною компоновкою. Аналізується залежність максимальної температури на кожній платі від відстаней між платами. Найгірший тепловий режим спостерігається при відстані між платами 2–5 мм. Моделювання теплових режимів здійснювалось програмними засобами інженерного аналізу.

Ключові слова: герметичні блоки, несучі конструкції, компоновка, масогабаритні і теплові характеристики, програмні засоби, інженерний аналіз, оптимізація.

ВСТУП

Проектування радіоелектронних апаратів відбувається з урахуванням потреб споживачів у розширенні функціональних можливостей пристроїв і зменшенні їх габаритів та маси. Функціональні можливості забезпечуються на етапі схемотехнічного проектування, коли визначається перелік електрорадіоелементів і, відповідно, їх габарити та маса. Однак масогабаритні показники пристроїв можуть значно перевищувати загальний об'єм та масу електрорадіоелементів у зв'язку з необхідністю використання несучих конструкцій для розміщення електрорадіоелементів та функціональних вузлів [1, 2].

Формування масогабаритних показників несучих конструкцій відбувається на етапі компоновки апаратури. На цьому етапі вибираються відстані між електрорадіоелементами, розміри плат та відстані між ними, розміри корпусних елементів та спосіб захисту від зовнішніх впливів. Компоновка проводиться з урахуванням обмежень на максимально допустиму температуру електрорадіоелементів і погіршення теплового режиму при зменшенні габаритів пристроїв [3, 4].

Особливо високі теплові навантаження виникають у герметичних блоках, які часто використовуються у бортовій радіоелектронній апаратурі з жорсткими масогабаритними обмеженнями. Такі блоки часто мають герметичну етажерну конструкцію з високими значеннями коефіцієнта заповнення блока і відсутністю сполучення зовнішнього і внутрішнього теплоносіїв. З точки зору обчислення теплових режимів радіоелектронні пристрої мають надзвичайно складну конструкцію. Внаслідок цього інформація про розподіл температури в блоках радіоелектронних апаратів визначалась тільки в процесі експериментальних досліджень, що призводило до утворен-

ня неоптимальних конструкцій і збільшенні термінів проектування радіоелектронних апаратів.

Можливість вирішення цієї проблеми з'явилась з появою програмних засобів інженерного аналізу [5, 6]. Досвід застосування цих засобів показав, що вони є ефективними для дослідження теплових режимів радіоелектронних апаратів та їх оптимізації [7–10]. Але одночасного дослідження масогабаритних і теплових характеристик радіоелектронних апаратів не проводилось, що ускладнює розробку методик і алгоритмів оптимізації несучих конструкцій.

Метою роботи є дослідження зв'язку масогабаритних показників і теплових режимів герметичних блоків етажерної конструкції. Для вирішення поставленої задачі необхідно:

- розробити спрощену конструкцію і теплову модель герметичного блока етажерної конструкції;
- дослідити масогабаритні показники різних стратегій оптимізації;
- дослідити теплові характеристики герметичних блоків етажерної конструкції.

Результати таких досліджень можуть використовуватися для вибору параметрів несучих конструкцій за оптимальними масогабаритними показниками.

1 КОНСТРУКЦІЯ ГЕРМЕТИЧНОГО БЛОКА

Для визначення узагальнених властивостей процедур компоновки необхідно використовувати спрощені конструкції пристроїв, які містять узагальнені елементи. При аналізі масогабаритних показників спрощена конструкція блока не враховує масу і габарити електрорадіоелементів, з'єднувачів і елементів об'ємного монтажу. Габарити електрорадіоелементів враховуються відповідною

відстанню між друкованими платами. В конструкції також відображено, що усі плати мають однакові розміри. Ці припущення враховуються у спрощеній конструкції герметичного блока етажерної конструкції, показаного на рис. 1, де позначено: 1 – кришка корпусу; 2 – друковані плати; 3 – стояки; 4 – основа корпусу.

Об’єм герметичного блока визначається співвідношенням:

$$V = L_1 L_2 L_3, \tag{1}$$

де L_1 , L_2 і L_3 – ширина, довжина і висота корпусу.

Розміри корпусу обчислюються через параметри елементів конструкцій з допомогою співвідношень:

$$L_1 = l_1 + 2a + 2d_k; \quad L_2 = l_2 + 2b + 2d_k; \\ L_3 = h_0 + nd_{\pi} + (n-1)h_{\pi} + h_k, \tag{2}$$

де l_1 і l_2 – довжина і ширина друкованої плати; a і b – відстань плат від бокових стінок кришки корпусу; d_k – товщина кришки корпусу; n – кількість друкованих плат; h_0 і h_k – відстань плати від основи корпусу та верхньої стінки кришки корпусу; h_{π} – відстань між платами.

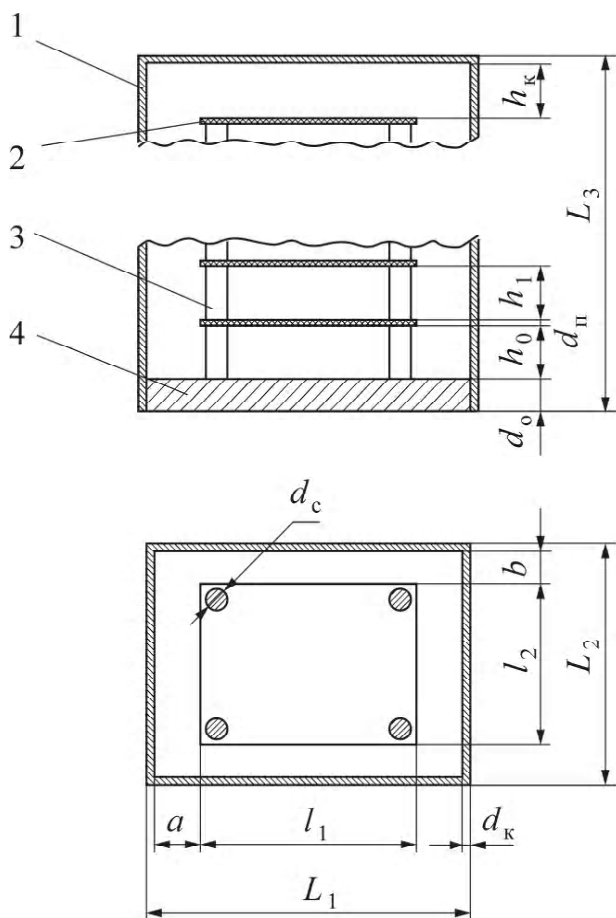


Рис. 1. Спрощена конструкція герметичного блока

Площа поперечного перерізу корпусу досягає мінімального значення при виконанні умов:

$$l_1 = \sqrt{S_{\pi} \frac{a+d_k}{b+d_k}}; \quad l_2 = \sqrt{S_{\pi} \frac{b+d_k}{a+d_k}}, \tag{3}$$

де S_{π} – площа плати.

Площа кожної плати обчислюється з урахуванням монтажної площі усіх електрорадіоелементів, кількості плат, кількості стояків і їх площі поперечного перерізу:

$$S_{\pi} = \frac{S_e}{n} + mS_c, \tag{4}$$

де S_e – загальна монтажна площа, яку електрорадіоелементи займають на усіх платах; m – кількість стояків, на яких закріплюються плати; S_c – площа поперечного перерізу стояка.

При обчисленні маси блока враховувались маса основи і кришки корпусу, маса плат і стояків:

$$m_B = m_o + m_k + m_{\pi} + m_c, \tag{5}$$

де m_B – маса блока; m_o і m_k , m_{π} і m_c – маса основи і кришки корпусу, плат і стояків.

Доданки у співвідношенні (5) обчислюються з допомогою виразів:

$$m_o = \rho_o (L_1 - 2d_k)(L_2 - 2d_k) \cdot d_o;$$

$$m_k = \rho_k d_k [2(L_1 + L_2 - d_k)L_3 + (L_1 - 2d_k)(L_2 - 2d_k)];$$

$$m_{\pi} = \rho_{\pi} l_1 l_2 d_{\pi}; \quad m_c = \rho_c m [h_0 + (n-1)h_{\pi}] S_c, \tag{6}$$

де ρ_o і ρ_k , ρ_{π} і ρ_c – густина матеріалу основи і кришки корпусу, друкованих плат і стояків; d_o – товщина основи корпусу.

Співвідношення (1), (6) використовуються для обчислення масогабаритних показників герметичних блоків етажерної конструкції.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАСОГАБАРИТНИХ ПОКАЗНИКІВ

Масогабаритні показники блоків радіоелектронних апаратів оцінюються їх об’ємом, масою та масогабаритом – добутком маси і об’єму блока. Останній параметр є аналогом співвідношення ціна/якість, якщо вважати, що маса блока визначає його вартість, а якість пристрою обернена до об’єму блока. Дослідження масогабаритних показників проводилось аналізом масогабаритних характеристик блока, що утворюється як залежність масогабаритних показників від кількості друкованих плат та відстані між ними. У відповідності із масогабаритними показниками утворюються характеристики: габаритна, несуча та масогабаритна.

Габаритні характеристики блока утворювались як сім'я графіків залежності об'єму корпусу (в літрах) від кількості друкованих плат. У зв'язку з великою кількістю параметрів у співвідношеннях (1) та (6), аналіз масогабаритних характеристик проводиться з урахуванням деяких конструктивних обмежень. Обчислення проводиться при товщинах $d_k = d_n = 2$ мм, $d_o = 7$ мм, діаметр стояка мав значення $d_c = 7$ мм, а загальна площа усіх електро радіоелементів – $S_e = 0,04$ мм². Відстань плат від бокових стінок кришки корпусу вибиралась однаковою $a = b = 5$ мм. Однаковими також задавались відстані між платами, а відстані плат від основи та кришки корпусу не змінювались і дорівнювали $h_o = 20$ мм, $h_k = 10$ мм. Обчислені при вказаних конструктивних обмеженнях габаритні характеристики герметичного блока етажерної конструкції показані на рис. 2.

Із рис. 2 видно, що залежність об'єму блока від кількості плат має мінімум при кількості плат $n = 5 - 7$. Порівняно з одноплатними блоками оптимізація кількості плат дозволяє зменшити об'єм блока на 40–60%. Оптимізація можлива при будь-якій відстані між друкованими платами.

Несучі характеристики блока утворювались як сім'я залежностей маси корпусу від кількості друкованих плат. Обчислені з допомогою співвідношення (5) і (6) несучі характеристики герметичного блока надаються на рис. 3. При обчисленнях враховувалось, що стояк, кришка і основа корпусу виготовлялися з алюмінію густиною $\rho = 2700$ кг/м³, а багатоплатні друковані плати мають густиною $\rho = 1800$ кг/м³.

Із рис. 3 видно, що збільшення кількості плат є ефективним заходом зменшення маси блока. Вибором кількості плат маса блока зменшується у 1,5–2,5 рази порівняно з одноплатним корпусом. Така ефективність обумовлена зменшенням площі основи корпусу, яка має значну товщину для забезпечення механічної міцності конструкції і герметизації з'єднувачів. Екстремальні значення на несучих характеристиках спостерігаються при менших значеннях кількості плат порівняно з габаритними характеристиками.

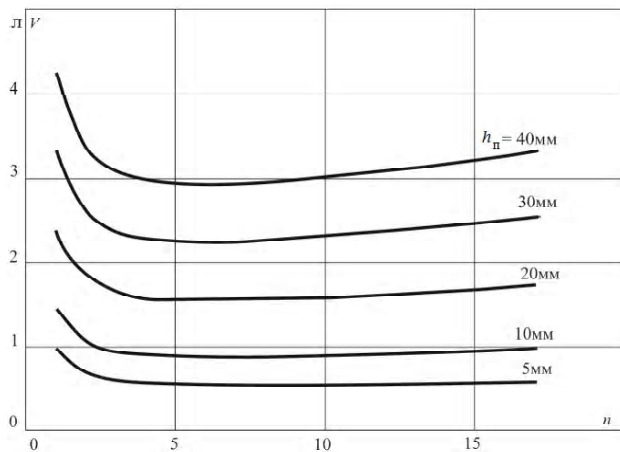


Рис. 2. Габаритні характеристики герметичного блока

Масогабаритні характеристики утворюються як сім'я залежностей масогабариту (добуток маси та об'єму блока) від кількості друкованих плат. Обчислені за допомогою співвідношень (1)–(6) масогабаритні характеристики досліджуваного блока показані на рис. 4.

Із рис. 4 видно, що екстремальні значення кількості плат на масогабаритних характеристиках зменшуються і лежать в діапазоні від 3 до 5 друкованих плат. Значення оптимального масогабариту у 2–3 рази менше масогабариту одноплатного корпусу.

Аналогічні габаритні, несучі і масогабаритні характеристики мають герметичні блоки етажерної конструкції із іншими параметрами основи, кришки корпусу, стояка і друкованої плати. Ці характеристики можуть використовуватися при оптимізації компоновки блока для вибору кількості друкованих плат. Вибір відстаней між платами проводиться з урахуванням теплових режимів блоків. Для цього використовуються теплові характеристики радіоелектронних пристроїв.

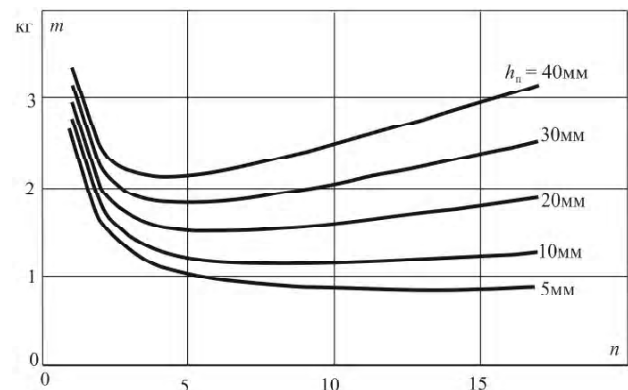


Рис. 3. Несучі характеристики герметичного блока

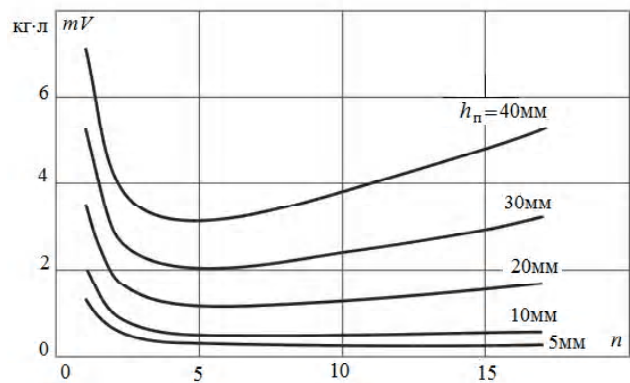


Рис. 4. Масогабаритні характеристики герметичного блока

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ

Дослідження теплових режимів проводилось програмними засобами інженерного аналізу [5]. Для цього утворювались теплові моделі, в яких використовувались припущення:

– відвід тепла від блока у навколишнє середовище відбувається тільки конвекцією та випромінюванням у

повітряному просторі, в середині блока враховується також кондуктивний механізм передачі тепла;

- герметичний блок заповнюється аргоном;
- розподіл густини теплового потоку по поверхні друкованих плат задавався однаковим і рівномірним на усіх платах;
- металізація багат шарових друкованих плат враховувалася анізотропією коефіцієнтів теплопровідності у аксіальному та радіальному напрямках, інші матеріали вважалися однорідними та ізотропними;
- друковані плати, розташовувались у блоці горизонтально, що відповідає найгіршому тепловому режиму.

Дослідження теплового режиму блоків проводилось при кількості плат $n = 3$. В процесі досліджень задавалась температура навколишнього середовища $t_c = 50^\circ\text{C}$ і коефіцієнт чорноти усіх поверхонь $\varepsilon = 0,91$. Коефіцієнт теплопровідності стояків, основи і кришки корпусу дорівнював $\lambda_k = 140\text{Вт/м}\cdot\text{К}$. Багат шарові друковані плати мали коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{п}} = 2(20)\text{Вт/м}\cdot\text{К}$ відповідно у аксіальному та радіальному напрямках. На кожній друкованій платі розсіювалась потужність $P = 2\text{Вт}$. Моделювання розподілу температур в герметичному блоці етажерної конструкції проводилось в середовищі Solid Works за допомогою модуля Flow Simulation. Досліджувався розподіл температур на елементах конструкції блока при зміні відстані між друкованими платами.

В процесі досліджень з'ясовано, що при зазначених потужностях перепад температури по поверхні блока не перевищує $0,16^\circ\text{C}$. Основні перепади температури виникали між поверхнею корпусу і навколишнім середовищем (до 14°C), а також по стояку (до 10°C). Максимальне значення температури спостерігалось у центрі середньої друкованої плати і досягало 72°C при відстані між платами $h_{\text{п}} = 5\text{мм}$. Це значення температури може бути критичним для поверхні корпусів деяких електрорадіоелементів.

За результатами досліджень утворювались теплові характеристики герметичного блока, як сім'я залежностей теплового опору плат від відстані між платами:

$$R_{\text{п}i} = \frac{t_{\text{п}i} - t_c}{P_0},$$

де $R_{\text{п}i}$ – тепловий опір між центром i -тої плати і навколишнім середовищем; $t_{\text{п}i}$ – температура в центрі i -тої друкованої плати; P_0 – загальна потужність, що розсіюється усіма платами блока.

Утворені теплові характеристики герметичного блока із зазначеними параметрами елементів конструкції надаються на рис. 5, де графіки 1, 2 і 3 відповідають нижній, середній і верхній платам.

Приведені на рис. 5 теплові характеристики показують, що найбільші теплові опори утворюються при відстані між платами 2–5 мм. Поява цих екстремальних ділянок обумовлена фізичними процесами поблизу поверхні твердого тіла, де утворюється шар нерухомого теплоносія через який тепловий потік в навколишнє середовище передається теплопровідністю. Збільшення

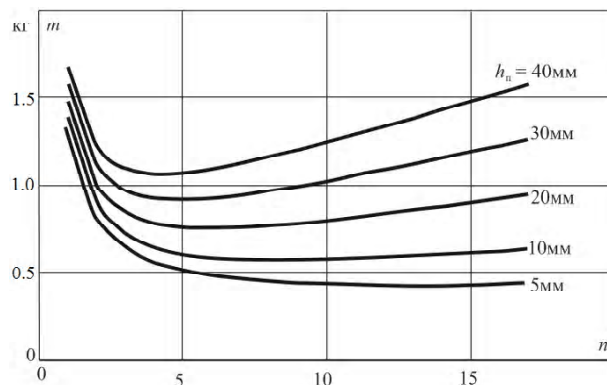


Рис. 5. Теплові характеристики герметичного блока

відстані між платами утворює умови для руху теплоносія, появи конвективного теплопереносу і зменшення теплового опору. Цьому сприяє також збільшення поверхні корпусу.

Дослідження теплового режиму плат показало, що в герметичному корпусі найбільш теплонавантаженою є середня плата із тепловим опором $R_{\text{п}} = 3,66\text{ К/Вт}$ при відстані між платами $h_{\text{п}} = 5\text{мм}$. Максимальне значення теплового опору нижньої плати на 15 % нижче теплового опору середньої плати, збільшення відстані між платами суттєво впливає на їх тепловий опір. При відстані між платами $h_{\text{п}} = 40\text{мм}$ тепловий опір середньої плати зменшується до $R_{\text{п}} = 2,4\text{ К/Вт}$, що відповідає температурі у центрі середньої плати $t_{\text{п}} = 64,4^\circ\text{C}$. Відстаням між платами 2–5 мм відповідає температура 72°C . Зазначені теплові режими задовольняють умовам експлуатації більшості електрорадіоелементів при температурі навколишнього середовища $t_c = 50^\circ\text{C}$. Але збільшення потужності може призвести до перевищення температури корпусів електрорадіоелементів над допустимими.

Теплові характеристики можуть використовуватись при компоновці і оптимізації герметичних блоків етажерної конструкції для визначення відстаней між друкованими платами. Застосовуються ці характеристики після визначення кількості плат з допомогою габаритних, несучих чи масогабаритних характеристик в залежності від стратегії оптимізації: мінімальної маси, мінімального об'єму чи масогабариту.

ВИСНОВКИ

Дослідження стратегій компоновки герметичних блоків етажерної конструкції показало, що зміна кількості друкованих плат дозволяє значно покращити масогабаритні показники блоків. Збільшення кількості плат може зменшити ці показники у 1,5–3 рази в залежності від стратегії компоновки. Для вибору кількості плат використовуються габаритні, несучі і масогабаритні характеристики. В першому випадку відбувається оптимізація об'єму блока. У другому і третьому випадках оптимізується маса блока та його масогабарит – добуток маси на об'єм блока. Можна вважати, що масогабарит характеризує співвідношення ціна/якість апаратури.

Дослідження теплових характеристик герметичних блоків показало, що найбільш теплонавантаженими є електрорадіоелементи розташовані на середніх платах герметичного блока. Теплові характеристики блоків мають екстремальні ділянки при відстанях між платами 2–5 мм, що обумовлено фізичними процесами поблизу поверхні твердого тіла, де утворюється шар нерухомого теплоносія, через який передається тепловий потік в навколишнє середовище. Подальше збільшення цих відстаней утворює зони рухомого теплоносія, збільшує поверхню корпусу і зменшує перегрів плат.

При щільній упаковці плат у блоці температури корпусів елементів можуть перевищувати гранично допустимі значення. Збільшення теплових потоків можливо при збільшенні відстані між платами, погіршенні масогабаритних показників блоків або використанні додаткових тепловідводів.

Утворені теплові характеристики можуть використовуватись при компоновці герметичних блоків етажерної конструкції для визначення відстаней між друкованими платами. Застосовуються ці характеристики після визначення кількості плат з допомогою габаритних, несучих чи масогабаритних характеристик в залежності від стратегії оптимізації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Лутченков, Л. С.* Автоматизированное проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств. – М. : Радио и связь, 1991. – 204 с.
2. *Овсищев, П. И.* Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры / П. И. Овсищев, Ю. В. Голованов. – М. : Радио и связь, 1988. – 232 с.
3. *Дульнев, Г. Н.* Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М. : Высш. шк., 1984. – 247 с.
4. *Цветков, Ф. Ф.* Тепломассообмен : учебное пособие для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – М. : Издательство МЭИ, 2005. – 550 с.
5. *Алямовский, А. А.* Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
6. *Данилов, Ю.* Практическое использование NX / Ю. Данилов, И. Артамонов. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 332 с.
7. *Верлань, А. Ф.* Компьютерное моделирование процессов передачи тепла в перспективных базовых несущих конструкциях стоечного типа с тепловыми трубами / А. Ф. Верлань, И. О. Горошко, Ю. Е. Николаенко // Математические машины и системы. – 2008. – № 2. – С. 90–99.
8. *Шило, Г. Н.* Проектирование радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами / Г. Н. Шило, Е. В. Огренич, Н. П. Гапоненко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2011. – № 1–2. – С. 30–33.
9. Оптимизация объема герметичных блоков радиоэлектронной аппаратуры / Н. П. Гапоненко, О. В. Сиротюк, Е. В. Огренич [та ін.] // Прикладная радиоэлектроника. – 2012. – № 3. – С. 455–458.
10. Thermal modeling and analysis of a power device heat sinks / [Farcas C., Ciocan I., Petreus D., Palaghita N.] // IEEE 18th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME) 25–28 Oct. 2012. – 2012. – С. 217–222.

Стаття надійшла до редакції 15.04.2013.
Після доробки 14.10.2013.

Шило Г. Н.¹, Сиротюк О. В.², Савелло А. Е.³, Лопатка Ю. А.⁴, Арешкин Е. К.⁵, Гапоненко Н. П.⁶

¹Канд. техн. наук, доцент, Запорозький національний технічний університет, Україна

²Асистент, Запорозький національний технічний університет, Україна

³Начальник сектора, «Хартрон-ЮКОМ», Запорозьке, Україна

⁴Студентка, Запорозький національний технічний університет, Україна

⁵Студент, Запорозький національний технічний університет, Україна

⁶Канд. техн. наук, доцент, Запорозький національний технічний університет, Україна

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕРМЕТИЧНЫХ БЛОКОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Исследована зависимость объема, массы и масогабарита от количества плат и расстояния между ними в герметичных блоках радиоэлектронных аппаратов. Показано, что оптимизация несущих конструкций может уменьшить массогабаритные показатели в 1,5–3 раза по сравнению с одноплатной компоновкой. Анализируется зависимость максимальной температуры на каждой плате от расстояний между платами. Худший тепловой режим наблюдается при расстоянии между платами 2–5 мм. Моделирование тепловых режимов осуществлялось программными средствами инженерного анализа.

Ключевые слова: герметичные блоки, несущие конструкции, компоновка, массогабаритные и тепловые характеристики, программные средства, инженерный анализ, оптимизация.

Shilo G. M.¹, Sirotyuk O. V.², Savello A. E.³, Lopatka J. A.⁴, Areshkin E. K.⁵, Gaponenko M. P.⁶

¹Philosophy Doctor, associate professor, Zaporizhian National Technical University, Ukraine

²Assistant of professor, Zaporizhian National Technical University, Ukraine

³Head of Department of Research and Production Enterprise Smc «Hartron-Ucom Ltd», Ukraine

⁴Student, Zaporizhian National Technical University, Ukraine

⁵Student, Zaporizhian National Technical University, Ukraine

⁶Doctor, associate professor, Zaporizhian National Technical University, Ukraine

RESEARCHING THE MASS, SIZE AND THERMAL CHARACTERISTICS OF ELECTRONIC DEVICE SEALED UNIT

The dependence of volume, mass and size on the number of boards and the distance between them in sealed unit of electronic devices is researched. Mass and size characteristics are calculated excluding the mass of electronic components, wiring harness and connectors. During packaging the total mounting of electronic components does not change. Dimensions of each board are included the rock areas and guard bend at the board boundaries. The square boards are used to reduce the volume.

Overall dimensions of the unit are given as the family of block volume dependencies on the number of boards if range of board-distances is equal from 5 to 40 mm. The minimum volume of the unit is provided from 5–7 boards. Then the volume is reduced by 1,5–2 times in comparison with one-board units. The mass of the block is reduced 1,5–3 times under the same conditions.

The dependence of maximal temperature on each board from distance between the boards is analyzed. The temperature mode is the worst if distances between the boards are from 2 to 5 mm.

The research of the mass, size and thermal characteristics has allowed to reduce design errors and to improve the quality of the electronic device design simultaneously.

Keywords: sealed units, supporting structures, layout, thermal characteristics, software, engineering analysis, optimization.

REFERENCES

1. Lutchenkov L. S. Avtomatizirovannoe proektirovanie nesushhix konstrukcij radioelektronny'x sredstv. Moscow, Radio i svyaz', 1991. – 204 s.
2. Ovsishher P. I., Golovanov Yu. V. Nesushhie konstrukcii radioelektronnoj apparatury'. Moscow, Radio i svyaz', 1988, 232 p.
3. Dul'nev G. N. Teplo- i massoobmen v radioelektronnoj apparature. Moscow, Vy'ssh. shk., 1984, 247 p.
4. Czvetkov F. F., Grigor'ev B. A. Teplomassoobmen: Uchebnoe posobie dlya vuzov. Moscow, Izdatel'stvo ME'I, 2005, 550 p.
5. Alyamovskij A. A. Inzhenerny'e raschety' v SolidWorks Simulation. Moscow, DMK Press, 2010, 464 p.
6. Danilov Yu., Artamonov I. Prakticheskoe ispol'zovanie NX. Moscow, DMK Press, 2011, 332 p.
7. Verlan' A. F., Goroshko I. O., Nikolaenko Yu. E. Komp'yuternoe modelirovanie proccessov peredachi tepla v perspektivny'x bazovy'x nesushhix konstrukciyax stoechnogo tipa s teplovy'mi trubami, *Matematicheskie mashiny' i sistemy'*, 2008, No. 2, pp. 90–99.
8. Shilo G. M., Ogrenich E. V., Gaponenko M. P. Proektirovanie radiatorov s optimal'ny'mi massogabaritny'mi parametrami, *Texnologiya i konstruirovanie v elektronnoj apparature*, 2011, No. 1–2. pp 30–33.
9. Gaponenko M. P., Sirotyuk O. V., Ogrenich E. V., Lopatka J. A., Areshkin E. K. Optimizaciya ob'yoma germetichny'x blokov radioelektronnoj apparatury', *Prikladnaya radioelektronika (Applied Radio Electronics)*, 2012. No. 3. pp. 455–458.
10. Farcas C., Ciocan I., Petreus D., Palaghita N. Thermal modeling and analysis of a power device heat sinks, *IEEE 18th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME) 25–28 Oct. 2012, 2012*, pp. 217–222.