ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ ТА ТЕХНОЛОГІЯМИ

УДК 621.01:620.179.1

А.В. ГОРОШКО, В.П. РОЙЗМАН
Хмельницький національний університет

СИНТЕЗ ДОПУСКІВ В ЗАДАЧІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕМЕНТІВ ГЕРМЕТИЗОВНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

Показана актуальність проблеми забезпечення міцності герметизованої електронної апаратури на прикладі мікромодулей. Розроблена математична модель взаємодії резистора з компаундом у складі мікромодуля і виявлені первинні фактори, що впливають на величину виникаючих в матеріалах напружень. Розроблений метод пробних параметрів для ідентифікації фізико-механічних характеристик компаунда. Ідентифіковані фізико-механічні характеристики компаунда ЭЗК-25 увійшли в розроблену математичну модель як її уточнені параметри. За допомогою розробленого методу статистичної обробки даних, які не підкоряються унімодальним законам розподілу імовірностей, визначено обґрунтовані значення допустимих напружень в кераміці і компаунді. Розв'язана задача оптимізації допусків на фізико-механічні характеристики матеріалів і геометричні розміри конструкції резистор-компаунд, які гарантують міцність елементів конструкції. Запропоновані конструкторсько-технологічні шляхи забезпечення міцності конструкції резистор-компаунд, впроваджені на ВО «Новатор».

Ключові слова: допуски, мікромодуль, герметизована апаратура, фізико-механічні характеристики, обернена задача, ідентифікація, полі модальний розподіл, синтез

ANDRII VOLODYMYROVYCH GOROSHKO, VILEN PETROVICH ROYZMAN
Khmelnitskiy National University, Ukraine

SYNTHESIS PROBLEM ADMISSION QUALITY PRODUCTION ELEMENTS HERMETYZOVNOYI ELECTRONICS

Abstract - Shown relevance of pressurized ensure the safety of electronic equipment for example micromodules. The mathematical model of interaction with the resistor compound consisting Micromodules and identified the primary factors that influence the value of the materials emerging tensions. The method of test parameters to identify the physical and mechanical characteristics compound. Identifiable physical and mechanical characteristics of the compound ЭЗК-25 entered the developed mathematical model as its specified parameters. With the developed method of statistical data that do not obey the laws of probability distribution unimodal, determined reasonable value of allowable stress in ceramics and compounds. The problem of optimizing the tolerances on physical and mechanical properties of materials and geometric dimensions resistor-compound construction, which guarantee strength structural elements. The proposed design and technological ways of providing structural strength resistor-compound introduced in PA "Innovator".

Key words: tolerance, micromodules, sealed equipment, physical and mechanical characteristics, inverse problems, identification, modal field distribution, synthesis

Вступ

Герметизація елементів радіоелектронної апаратури (РЕА) широко використовується для підвищення надійності їх експлуатації в умовах змін температури, тиску, впливу вологи і т.п. Зокрема, в авіаційній і ракетній галузі в апаратурі керування використовуються герметизовані мікромодулі (ММ). До складу ММ входять металокерамічні резистори, які разом з іншими електрорадіоелементами (ЕРЕ) припаюються до плати. Герметизація виробу досягається поміщенням плати у металічний корпус і заповненням вільного простору у ньому компаундом, що адгезується із ЕРЕ, корпусом і виводами (рис. 1).

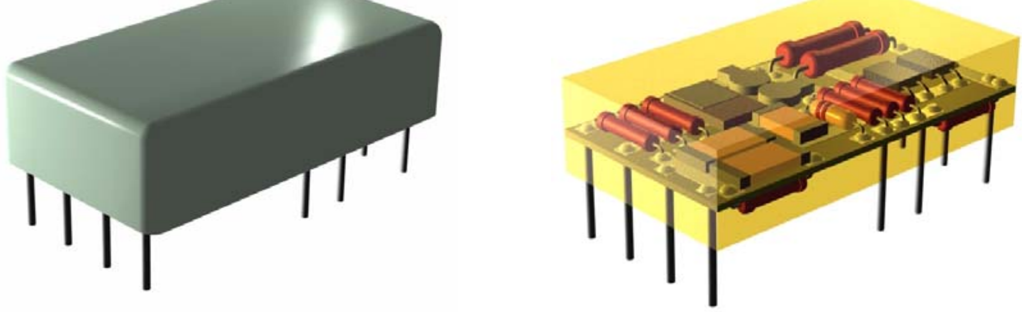

Рис. 1. Зовнішній вигляд і конструкція типового мікромодуля

В практиці випробувань і експлуатації ММ мали місце випадки руйнування кераміки резисторів. Такі дефекти викликали або обрив кола відразу, або так званий «меготливий» дефект, коли краї тріщини розходяться під впливом тих чи інших чинників, а за їх відсутності дотикаються, відновлюючи цілісність кола, і тим самим маскуючи поломку. Тяжкість наслідків дефектів у тому, що неможливо замінити елемент, який вийшов з ладу, і, відповідно, гине весь вузол або прилад, а часто і сам об'єкт, на якому цей прилад

розташований. В зв’язку з цим необхідно було виявити можливі причини виникнення таких дефектів і розробити методи їх усунення.

Дефектація зруйнованих резисторів і аналіз умов випробувань і експлуатації ММ, при яких відбуваються поломки, дозволили припустити, що причини дефектів є або наслідком існуючої технології складання ММ, або вони закладені в самій конструкції, тобто визначаються невдалим сполученням міцнісних властивостей з’єднувальних елементів, яке проявляється у певних умовах.

В зв’язку з цим в першу чергу було досліджено вплив низки технологічних операцій, таких як формовка, обрізка, лудіння, припайка виводів на зміну міцності елементів [84]. Проведенні експериментальні дослідження і статистична обробка їх результатів дозволили зробити висновок про те, що хоча деякі із операцій і знижують міцність елементів, це зниження, по-перше, з імовірністю 0,99 можна вважати несуттєвим, а по-друге, воно несуттєве у порівнянні з існуючим розкидом міцнісних характеристик резисторів, що постачаються.

Друге припущення полягало в тому, що поломки резисторів виникають від навантажень зі сторони компаунда. В процесі герметизації і випробувань при коливаннях температури відбувається природній стиск або розтяг матеріалів резистора і компаунда. Внаслідок існування сил адгезії на поверхні контакту і різниці у фізико-механічних характеристиках з’єднувальних матеріалів на границі їх розділу виникає контактний тиск, що викликає появу напружень. Встановлено, що перевищення цими напруженнями допустимих для заданих матеріалів значень і приводить до механічних пошкоджень елементів конструкції.

Постановка задачі

З метою усунення таких дефектів необхідно забезпечити в конструкції резистор-компаунд виконання умов міцності у матеріалах резистора і герметика. Для цього потрібно визначити такі первинні фактори, які впливають на величини напружень в матеріалах резистора і герметика, і знайти множину їх значень (допуски), які забезпечують виконання умов міцності

$$\sigma_{\max i} \le \left[\sigma_i\right],\ i \in \mathbb{N} \qquad (1)$$

для кожної зі складових частин названої конструкції.

Результати досліджень

Перш за все необхідно визначити первинні фактори, що суттєво впливають на один із показників якості – міцність, і встановити функціональні залежності між ними і характеристиками міцності – напруженнями в матеріалах сполучених елементів. Розглянемо конструкцію системи ЕРЕ-герметик, представлену на рис. 2 і 3.

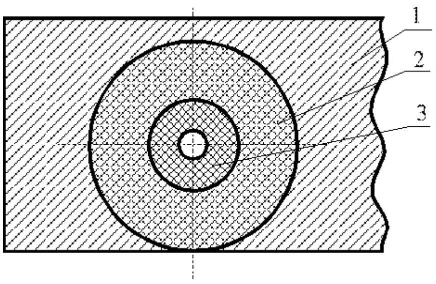

Рис. 2. Поперечний переріз електронного елементу, заполімеризованого компаундом: 1 - компаунд, 2 - виокремлений компаундний циліндр, 3 - електронний елемент.

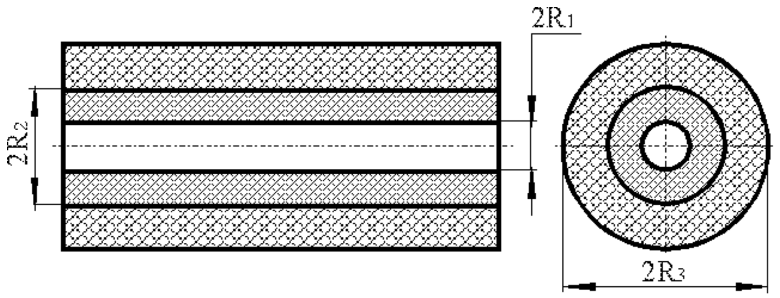

Рис. 3. ЕРЕ, оточений рівномірним шаром компаунду

В роботі [1] встановлено математичну модель взаємодії резистора з компаундом у складі ММ і виявлені первинні фактори, що впливають на величину виникаючих в матеріалах напружень. Математична модель розрахунку напружень зводиться до відомої схеми сполучних циліндрів (задачі Ляме-Гадоліна). Первинними факторами даної моделі поряд із геометричними розмірами системи елемент-компаунд R_1, R_2, R_3 є фізико-механічні характеристики: коефіцієнт лінійного температурного розширення (КЛТР) α_1, α_2, коефіцієнт Пуассона μ_1, μ_2 і модуль пружності E_1, E_2 кераміки і компаунду відповідно. Контактний тиск в елементах конструкцій резистор-компаунд при перепаді температур Δt визначається за формулою

$$P_{1k} = \frac{\left[(1+\mu_1)\alpha_1 - (1+\mu_2)\alpha_2\right]\Delta t}{\dfrac{\left[(1+\mu_1)R_1^2 + (1-\mu_1)R_2^2\right]}{E_1\left(R_2^2 - R_1^2\right)} + \dfrac{\left[(1+\mu_2)R_3^2 + (1-\mu_2)R_2^2\right]}{E_2\left(R_3^2 - R_2^2\right)}}, \qquad (2)$$

Проведений авторами аналіз показав, що розкид значень фізико-механічних характеристик компаундів і кераміки при виробництві ММ може досягати 300% і залежить від багатьох факторів, як

наприклад, місце виготовлення складових компаунда. Крім того, характеристики компаундів в температурному діапазоні -60°С…20°С взагалі невідомі, хоча вказані ММ експлуатуються за таких температур.

Зауважимо, що навіть найточніша математична модель може бути скомпрометована, якщо в неї підставляти неточні дані. Отже, в цих умовах було прийнято рішення експериментально уточнити параметри (первинні фактори) моделі. Для їх визначення був розроблений розрахунково-експериментальний метод пробних параметрів, що базується на ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів шляхом вирішення зворотних задач міцності [2]. В методі пробних параметрів відносні деформації в матеріалах виробу, які в задачах традиційно розраховувались, визначаються експериментально і вважаються заданими, а фізико-механічні характеристики, що зазвичай входять у розрахункову модель як задані, вважаються шуканими. З використанням даного методу був розрахований вектор номінальних значень первинних факторів моделі

$$\mathbf{x}_0 = \left\{\alpha_{10}, \alpha_{20}, \mu_{10}, \mu_{20}, E_{10}, E_{20}, R_{10}, R_{20}, R_{30}\right\}. \quad (3)$$

Розраховані значення складових $\mathbf{x}_0$ представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Номінальні значення первинних факторів конструкції резистор-компаунд

КЛТР		Коефіцієнти Пуассона		Модулі пружності		Геометричні розміри конструкції		
$\alpha_{10}\cdot10^{-6}$, град$^{-1}$	$\alpha_{20}\cdot10^{-6}$, град$^{-1}$	μ_{10}	μ_{20}	$E_{10}\cdot10^{5}$, МПа	$E_{20}\cdot10^{5}$, МПа	$R_{10}\cdot10^{-3}$, м	$R_{20}\cdot10^{-3}$, м	$R_{30}\cdot10^{-3}$, м
6	40	0,292	0,330	1,31	0,10	0,20	0,75	1,55

Далі необхідно було визначити обгрунтовані регламентовані значення вихідних характеристик моделі. З цією метою допустимі напруження в досліджуваних матеріалах встановлювали шляхом вимірювання зусиль, що руйнують керамічні основи резисторів і спеціальні зразки, виготовлені з компаунда, при розтягуючих (стискуючих) навантаженнях.

Статистична обробка результатів випробувань здійснювалась згідно розробленого авторами методу обробки даних, що підпорядковуються багатомодальним законам розподілу (методу розщеплення сумішей) [3]. Розглянемо нормалізовану гістограму зусиль, що руйнують кераміку резисторів при розтягу, представлену на рис. 4. Для побудови нормалізованої гістограми, яка є емпіричною густиною розподілу (ГР), були виміряні зусилля руйнування кераміки 50-ти резисторів. По осі абсцис з кроком h=5 Н відкладені значення руйнуючих кераміку зусиль P, H, а по осі ординат – густина відносної частоти n_i/nh, де n_i - кількість значень, що містяться в i-му інтервалі розбиття по осі абсцис, $n = 50$ - обсяг вибірки.

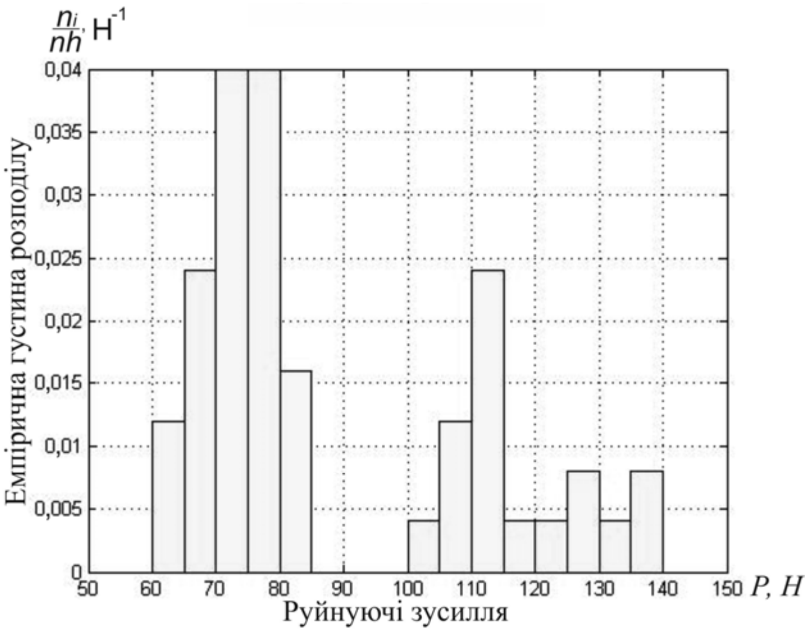

Рис. 4. Розподіл руйнуючих зусиль кераміки резисторів ОМЛТ-0,125

Згідно розробленого методу обробки сумішей розподілу, представлена двомодальна гістограма

апроксимується лінійною комбінацією Гаусових функцій ГР з ваговими коефіцієнтами ρ_i виду

$$f\left(x, M_i, S_i, \rho_i\right) = \sum_{i=1}^{N} \frac{\rho_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(x - M_i\right)^2}{2\sigma_i^2}\right), \; N = 2, \tag{4}$$

де M_i і σ_i - математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення i-ї підвибірки, кожна із яких формується під впливом своїх домінуючих причин, ρ_i - імовірність попадання в i-у підвибірку, $\sum_{i=1}^{N} \rho_i = 1$, $0 \le \rho_i \le 1$, x - випадкова величина, у нашому випадку співпадає із P.

Для подальшої обробки результатів експерименту, перш за все, необхідно визначити невідомі параметри, застосувавши, наприклад, інтерполяцію на деякій точковій множині, згідно з якою невідомі параметри необхідно шукати з умови збігу значень функції (4) у деяких точках (наприклад вершинах і западинах) зі значеннями апроксимуючої функції, графік якої плавною кривою огинає побудовану гістограму. Ясно, що для однозначного визначення $3N$ невідомих параметрів кількість точок в множині повинна бути не менше, ніж $3N-1$ (оскільки коефіцієнти ρ_i завжди пов'язані рівнянням $\sum_{i=1}^{N} \rho_i = 1$). Таким чином, для знаходження невідомих M_i, σ_i и ρ_i необхідно скласти і розв'язати систему рівнянь виду

$$\begin{cases} F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(x, M_i, \sigma_i, \rho_i\right) = \sum_{i=1}^{N} \frac{\rho_i}{S_i \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} \exp\left(-\frac{\left(x_j - M_i\right)^2}{2S_i^2}\right) dx, \\ j = 1, 2, ..., 3N-1, \; \sum_{i=1}^{N} \rho_i = 1. \end{cases}, \tag{5}$$

де M_i, σ_i, ρ_i - постійні, але невідомі параметри розподілу i-ї підвибірки і її ваговий коефіцієнт. Для визначення параметрів шуканого двомодального закону розподілу вибираємо вузли інтерполяції, які разом із значеннями функції в них приведені в таблиці 2. В результаті розв'язку системи (5) при N=2 отримані параметри наступного закону густини розподілу суміші, графіки якого і складових суміші наведені на рис. 5:

$$f(x) = \frac{0,66}{6,6\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(x - 74\right)^2}{2 \cdot 6,6^2}\right) + \frac{0,34}{5,7\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(x - 114\right)^2}{2 \cdot 5,7^2}\right) \tag{6}$$

Таблиця 2

Вузли інтерполяції і значення функції

x_i	66	74	84	114	124
$f(x_i)$	0,018	0,04	0,012	0,024	0,004

Для подальшої обробки розглянемо підвибірку резисторів, руйнуючі зусилля яких підпорядковуються нормальному закону розподілу з параметрами M_1=74Н, S_1=6,6Н, тобто найменш міцних резисторів, тоді можлива помилка для всієї вибірки піде в запас міцності.

Нехай імовірність того, що вказані зусилля лежать на симетричній відносно M_1 ділянці довжиною 2δ дорівнює γ=0,995, тобто $P\left\{\left|P_{руй} - M_1\right| < \delta\right\} = \gamma$. Тоді відношення δ / S_1 є аргументом функції Лапласа, що дорівнює $\gamma/2$ [50]. За таблицею знаходимо $\gamma/2$=2,8, звідки δ=6,6·2,8=18,48 Н. Це означає, що з імовірністю 0,995 за граничне значення руйнуючого навантаження можна прийняти наступне $P_{гр}$=74-18,48=55,52Н.

Аналогічно були отримані значення навантажень, що руйнують кераміку при стискуванні, і відповідні характеристики компаунда, а також обчислені значення граничних напружень в матеріалах (таблиця 3).

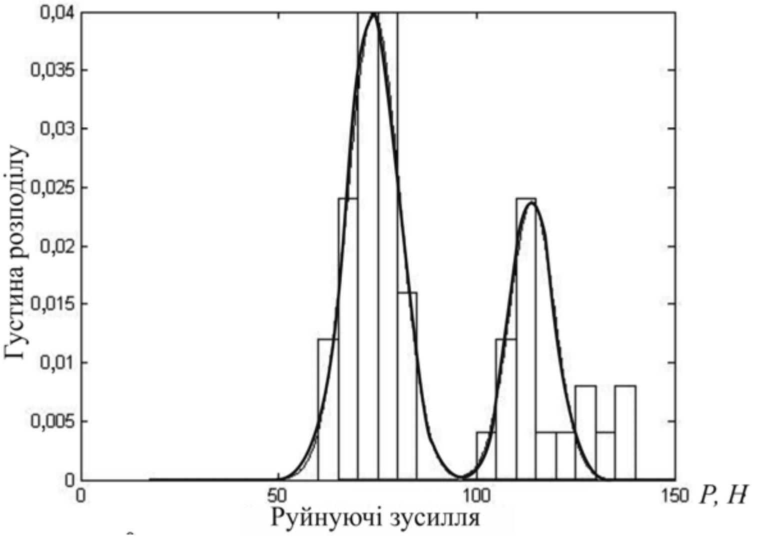

Рис. 5. Графік шуканої суміші густини розподілу

Таблиця 3

Граничні напруження в досліджуваних матеріалах

Тип резистора або компаунда	Граничні напруження	
	На розтяг	На стиск
	Напруження, МПа	Напруження, МПа
Резистор ОМЛТ-0,125	68,72	500
Компаунд ЭЗК-25	108,00	110

Далі розв'язувалась задача оптимізації допусків на значення фізико-механічних характеристик матеріалів і геометричних розмірів конструкції резистор-компаунд.

Як показано в (1), для забезпечення працездатності конструкції резистора, герметизованого компаундом, необхідне виконання умов міцності в матеріалах резистора і компаунда. Враховуючи той факт, що компаунд і кераміка при низьких температурах ведуть себе як крихкі матеріали, за першою теорією міцності для внутрішнього і зовнішнього циліндрів умови міцності запишуться відповідно у вигляді

$$\sigma_{екв1} = \sigma_{\max 1} = \frac{P_{1k}\left(R_1^2 + R_2^2\right)}{R_2^2 - R_1^2} \le \left[\sigma_1\right], \qquad \sigma_{екв2} = \sigma_{\max 2} = \frac{P_{1k}\left(R_2^2 + R_3^2\right)}{R_3^2 - R_2^2} \le \left[\sigma_2\right], \tag{7}$$

де P_{1k} - контактний тиск з (2), $\sigma_{\max 1}, \sigma_{\max 2}$ - максимальні напруження в матеріалах внутрішнього і зовнішнього циліндрів відповідно, $\left[\sigma_1\right]$, $\left[\sigma_2\right]$ - допустимі значення напружень для кераміки і компаунду відповідно.

Допустимі напруження $\left[\sigma_1\right]$, $\left[\sigma_2\right]$ для кераміки і компаунду відповідно знаходяться, виходячи із отриманих експериментально граничних напружень $\sigma_в$ (таблиця 3) з врахуванням коефіцієнта запасу міцності $n = 2$

$$\left[\sigma_1\right] = \sigma_{в1}/n\,, \left[\sigma_2\right] = \sigma_{в2}/n\,. \tag{8}$$

Виходячи із (7) і (8), обмеження на вихідні характеристики конструкції мають вигляд

$$\begin{cases} \sigma_{екв1} \le 34,36, \\ \sigma_{екв2} \le 54. \end{cases} \tag{9},$$

Крім того із ТУ, можна записати обмеження на первинні фактори моделі у вигляді системи нерівностей

$$4 \cdot 10^{-6} \le \alpha_1 \le 8 \cdot 10^{-6},$$
$$35 \cdot 10^{-6} \le \alpha_2 \le 45 \cdot 10^{-6},$$
$$0,25 \le \mu_1 \le 0,35,$$
$$0,31 \le \mu_2 \le 0,35,$$
$$1 \cdot 10^5 \le E_1 \le 1,5 \cdot 10^5, \tag{10}$$
$$0,05 \cdot 10^5 \le E_2 \le 0,15 \cdot 10^5,$$

$$0,19\cdot10^{-3}\le R_1\le0,21\cdot10^{-3},$$
$$0,74\cdot10^{-3}\le R_2\le0,76\cdot10^{-3},$$
$$1,1\cdot10^{-3}\le R_3\le2\cdot10^{-3}.$$

Далі був проведений наступний чисельний експеримент. Шляхом перебору великої кількості (10^5) значень $\alpha_1,\alpha_2,\mu_1,\mu_2,E_1,E_2,R_1,R_2,R_3$ в інтервалах (10), в результаті підстановки (2) у (7) були одержані розрахункові значення максимальних експлуатаційних напружень $\sigma_{екв1}$ для кераміки резисторів. На рис. 6 (а) представлені нормалізовані гістограми розподілу максимальних експлуатаційних напружень і допустимих напружень для кераміки резисторів. Очевидно, що обмеження (10) не гарантують міцність конструкції резистор-компаунд, тобто допуски на первинні параметри, задані у ТУ, не обґрунтовані.

Одним із методів призначення допусків може бути перебір достатньо великої кількості значень $\alpha_1,\alpha_2,\mu_1,\mu_2,E_1,E_2,R_1,R_2,R_3$ в інтервалах (10) і відбір лише такої множини їх значень, яка б гарантувала, що криві розподілу максимальних експлуатаційних і допустимих напружень не перетнуться. На рис. 6 (б) представлений розподіл експлуатаційних напружень, що не перевищують допустимі. Аналогічно можна побудувати гістограми розподілу напружень і для компаунда.

Такий спосіб оптимізації допусків був реалізований за допомогою системи комп'ютерної математики MATLAB. Програма перебирає з певним кроком значення кожного із первинних параметрів, взяті із (10), за формулами (2) і (7) розраховуються максимальні експлуатаційні напруження, і якщо вони не перевищують допустимі (9), формується масив даних векторів цих вхідних параметрів.

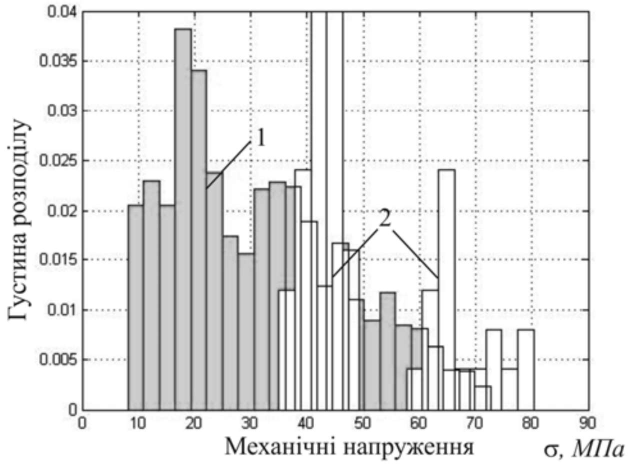

Рис. 6. Розподіл максимальних експлуатаційних (1) і допустимих (2) напружень для кераміки резисторів, що гарантує виконання (3.17)

Більш загально задача призначення обґрунтованих допусків на фізико-механічні характеристики матеріалів резистора і компаунда і геометричні розміри досліджуваної конструкції може бути сформульована наступним чином. При заданих номінальних значеннях первинних факторів (3) визначити такі їх допустимі відхилення δ_i, $i=1,2,\ldots,9$ від номінальних значень, щоб у отриманому паралелепіпеді

$$x_{i0}-\delta_i/2\le x_{i0}\le x_{i0}+\delta_i/2,\ i=1,2,\ldots,9 \qquad (11)$$

було забезпечено виконання умов (7).

Розв'язок задачі у наведеній постановці означає вписування в криволінійну область, заданунерівностями (7), паралелепіпеду. Але таких паралелепіпедів може бути вписано нескінченно багато. Для вибору конкретного паралелепіпеду необхідно накласти додаткову умову, для чого пропонується ввести критерій оптимальності або економічного, або виробничого, або будь-якого іншого змісту. Призначення критерію оптимальності дозволяє звести задачу визначення допусків до задачі оптимізації вибраної цільової функції при обмеженнях (7).

Оскільки виходячи з міркувань економії допуски на всі параметри бажано максимально розширити, то розглянута оптимізаційна задача є багатокритеріальною (векторною), а множина оптимальних значень допусків може бути знайдена мінімізацією цільових функції типу

$$\min\left(-\delta_i\right),\ i=\overline{1,9}. \qquad (12)$$

Добитись одночасної максимізації всіх допусків таким чином, щоб виконувались умови (7), в принципі неможливо. Одним із шляхів розв'язку є зведення даної багатокритеріальної задачі до однокритеріальної (скаляризація), для чого були використані лінійна згортка критеріїв виду $F_i=\max\limits_{\{c_i\}_{i=1}^{9}}\left(\sum\limits_{i=1}^{9}c_i\delta_i\right)$ і згортка Гермейєра [4] $\tilde{F}_2=\min\limits_i(c_i\delta_i)$, де $c_i\ge0,\ \sum\limits_{i=1}^{9}c_i=1$ - нормовані додатні числа, що визначаються із виробничих або економічних міркувань. Отже, задача зводиться до визначення таких значень δ_i, $i=\overline{1,9}$, за яких досягається максимум однієї із цільових функцій $\tilde{F}_1$, $\tilde{F}_2$ за умови виконання обмежень (7) при перепаді температури від +70°С до -60°С.

Перевірка виконання цих обмежень на кожному кроці оптимізаційного процесу відбувалась у вершинах побудованих паралелепіпедів, оскільки частинні похідні еквівалентних напружень по кожному із первинних факторів зберігають знаки.

Для конструкції резистора типу ОМЛТ-0,125, герметизованого компаундом ЭЗК-25, було проведено визначення допусків на фізико-механічні характеристики матеріалів резистора і компаунда, а також геометричні розміри конструкції, номінальні значення яких наведені в таблиці 1. Причому обмеження на

первинні фактори і вихідні характеристики конструкції задавались системою нерівностей (10).

Отримані в результаті максимізації цільових функцій $\tilde{F}_1$ і $\tilde{F}_2$ значення допусків дозволили визначити такі значення фізико-механічних характеристик матеріалів компаунда і резистора, а також геометричних розмірів конструкції, при яких виконуються умови міцності резистора і компаунда. Ці значення первинних факторів, отримані при різних наборах значень коефіцієнтів c_i, наведені в таблиці 4. Причому, в одному випадку значення c_i були встановлені експертним шляхом, а в іншому – всі c_i приймались рівними $1/9$ для дослідження того випадку, коли всі частинні критерії рівнозначні. Оскільки в обох методах оптимізації отримані близькі результати, можна зробити висновок про правомірність застосування скаляризації для розв'язку задачі векторної оптимізації (12).

Таким чином були визначені допуски на фізико-механічні характеристики матеріалів і геометричні розміри вісесиметричної конструкції резистор-компаунд, які гарантують міцність елементів конструкції.

Таблиця 4

Первинні фактори	Критерій оптимальності $\max\limits_{\{c_i\}_{i=1}^{9}}\left(\sum\limits_{i=1}^{9} c_i\delta_i\right)$				Критерій оптимальності $\tilde{F}_2 = \min\limits_i (c_i\delta_i) \to \max$			
	$c_i = 1/9$ $i = 1,2,...,9$		$c_1 = c_2 = 0,17$; $c_3 = c_4 = 0,04$; $c_5 = c_6 = 0,08$; $c_7 = c_8 = c_9 = 0,14$		$c_i = 1/9$ $i = 1,2,...,9$		$c_1 = c_2 = 0,17$; $c_3 = c_4 = 0,04$; $c_5 = c_6 = 0,08$; $c_7 = c_8 = c_9 = 0,14$	
	Границя множини значень				Границя множини значень			
	Нижня	Верхня	Нижня	Верхня	Нижня	Верхня	Нижня	Верхня
$\alpha_{10} \cdot 10^{-6}$, град$^{-1}$	5,5	6,5	5,5	6,5	5,5	6,5	5,5	6,5
$\alpha_{20} \cdot 10^{-6}$, град$^{-1}$	38	42	38	42	38,7	41,3	38,3	41,7
μ_{10}	0,290	0,294	0,290	0,294	0,290	0,294	0,290	0,294
μ_{20}	0,315	0,345	0,315	0,345	0,322	0,338	0,321	0,339
$E_{10} \cdot 10^{5}$, МПа	1,22	1,40	1,22	1,40	1,22	1,40	1,22	1,40
$E_{20} \cdot 10^{5}$, МПа	0,090	0,110	0,098	0,102	0,095	0,105	0,096	0,104
$R_{10} \cdot 10^{-3}$, м	0,190	0,210	0,190	0,210	0,191	0,209	1,191	0,209
$R_{20} \cdot 10^{-3}$, м	0,740	0,760	0,740	0,760	0,743	0,757	0,742	0,758
$R_{30} \cdot 10^{-3}$, м	1,380	1,720	1,100	2,000	1,115	1,985	1,115	1,985

Розроблені методи оптимізації допусків дозволяють вказати обґрунтовані допуски на первинні параметри моделі. На практиці це означає, що ідентифікувавши фізико-механічні характеристики партій резисторів і компаундів, необхідно відібрати такі з них, фізико-механічні характеристики яких знаходяться у паралелепіпеді (11). Таким чином можна гарантовано забезпечити міцність конструкції герметизований елемент-компаунд.

Для оптимізації допусків на первинні фактори моделі перспективним також видається застосування інтервальних глобальних методів оптимізації.

Але постає питання, що робити з рештою партій, фізико-механічні характеристики яких знаходяться поза паралелепіпедом (11), тобто не увійшли у встановлені допуски ? З метою підвищення економічної ефективності можна рекомендувати селективне складання вузлів, суть якого у наступному. Для зменшення витрат рекомендується вибирати партії матеріалів так, щоб гістограми розподілу максимальних експлуатаційних напружень і допустимих напружень не перетинались, але були як найближче одна до одної. Оскільки кожна конкретна модель дає власні розрахункові експлуатаційні напруження, то за ними можна підібрати відповідну до моделі партію матеріалів.

Проведені дослідження міцнісних властивостей конструкції резистор-компаунд у складі ММ дозволили запропонувати підприємству-виготовлювачу наступні конструкторсько-технологічні шляхи забезпечення працездатності.

Організація вхідного контролю з метою підбору із працездатних пар, що є у наявності, на основі отриманих у таблиці 4 умов. При цьому контроль відповідних характеристик проводиться за їх імовірнісними вибірковими оцінками, отриманими при обробці методом статистичної обробки багатомодальних законів розподілу [3].

У випадку неможливості або недоцільності введення вхідного контролю або відсутності працездатних пар був запропонований конструктивний захист резисторів від дії компаунда за допомогою термоусадкових трубок (ДМГТ.975.016.ТУ). Ефективність застосування вказаних трубок, які одягаються на резистори, пояснюється наступними обставинами. По-перше, наявність вільного простору між резистором і трубкою, допускає більш вільну деформацію резистора, чим обумовлюється зниження величин напружень в кераміці. По-друге, використання трубки приводить до усунення адгезій них зв’язків між резистором і компаундом, що викликає зменшення напружень в конструкції, що розглядається.

Для перевірки об’єктивності захисту резисторів термоусадочними трубками був проведений наступний експеримент. Резистори типу ОМЛТ-0,125, що були взяті з однієї партії після підготовки їх до монтажу, препарувались тензодатчиками типу МПБ-1. На частину таких резисторів до їх монтажу на плати одягались термоусадочні трубки. Далі мікромодулі зі всіма препарованими резисторами, частина з яких була захищена вказаним чином, герметизувались компаундом ЭЗК-25. Під час полімеризації компаунда і при проведенні термоударів проводилась реєстрація показів тензорезисторів.

Після статистичної обробки результатів дослідження було встановлено, що амплітудні значення деформацій резисторів, захищених трубками, майже вдвічі менше, ніж в серійних, що свідчить про ефективність запропонованих заходів.

Наведені вище конструкторсько-технологічні заходи були впроваджені на ВО «Новатор».

Висновки

Розроблена математична модель взаємодії резистора з компаундом у складі ММ і виявлені первинні фактори, що впливають на величину виникаючих в матеріалах напружень.

Розроблений метод пробних параметрів для ідентифікації фізико-механічних характеристик компаунда. Ідентифіковані фізико-механічні характеристики компаунда ЭЗК-25 увійшли в розроблену математичну модель як її уточнені параметри.

За допомогою розробленого методу статистичної обробки даних, які не підкоряються унімодальним законам розподілу ймовірностей, визначено обґрунтовані значення допустимих напружень в кераміці і компаунді.

Розв’язана задача оптимізації допусків на фізико-механічні характеристики матеріалів і геометричні розміри конструкції резистор-компаунд, які гарантують міцність елементів конструкції.

Запропоновані конструкторсько-технологічні шляхи забезпечення міцності конструкції резистор-компаунд, впроваджені на ВО «Новатор».

Література

1. Ройзман В. П., Ковтун І.І., Петращук С.А. Розрахунок напружень в системі компаунд - електронний елемент при термоударах // Вісник Технологічного університету Поділля. Хмельницкий. -2002. -№1. - С. 189 - 195.
2. Ройзман В. П., Ковтун І.І., Петращук С.А. Ідентифікація фізіко-механічних характеристик полімерних матеріалів //Вісник Технологічного університету Поділля. Хмельницкий. - 2002. – №.4 - Ч.1. - С.18-25.
3. Горошко А.В. Методи обробки емпіричних даних, що підпорядковуються багатомодальним законам розподілу / А.В. Горошко, В.П. Ройзман // Вісник Хмельницького національного університету. - 2013. №4. -С. 195-201.

References

1. Royzman V. P., Kovtun I.I., Petrashchuk S.A. Rozrakhunok napruzhen' v systemi kompaund -elektronnyy element pry termoudarakh // Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillya. Khmel'nytskyy. -2002. -№1. - S. 189 - 195.
2. Royzman V. P., Kovtun I.I., Petrashchuk S.A. Identyfikatsiya fiziko-mekhanichnykh kharakterystyk polimernykh materialiv //Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillya. Khmel'nytskyy. - 2002. – №.4 - Ch.1. - S.18-25.
3. Goroshko A.V. Metody obrobky empirychnykh danykh, shcho pidporyadkovuyut'sya bahatomodal'nym zakonam rozpodilu / A.V. Goroshko, V.P. Royzman // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. -2013. №4. -S. 195-201.

Рецензія/Peer review : 19.11.2015 р.　　　Надрукована/Printed :13.12.2015 р.