

Наличие столь большого количества резонансных частот у ММ и объединительных плат можно объяснить тем, что как ММ так и платы соединяются с приспособлением для испытаний не достаточно жестко, а само приспособление, как было установлено ранее, тоже имеет ряд резонансных частот в диапазоне 0–5000 Гц.

Анализ результатов исследований показывает, что в диапазоне эксплуатационных частот и функциональные платы, и ММ имеют сложные формы колебаний, что говорит о деформациях самих плат, так и установленных на них модулей. Следует также иметь в виду, что испытания микромодулей и функциональных плат проводилось при их закреплении на приспособлении ЩВ 1810-4358 ММ, у которого было обнаружено шесть резонансных частот в диапазоне 0–5000 Гц.

### Литература

1. Нестер Н. А. Применение пьезокристаллов для исследования форм и частот колебаний печатных плат / Н. А. Нестер, В. П. Ройзман, М. И. Хавкин // Теория и практика конструирования и обеспечения надежности и качества РЭА. – Москва, 1978. – С. 100.

2. Нестер Н. А. Пути повышения качества контроля технологического процесса испытаний изделий РЭА / Н. А. Нестер, М. И. Хавкин // Материалы 14 межвуз. науч.-метод. семинара. – Хмельницкий, 1988. – С. 88–89.

## ДОСВІД ПОСТАНОВКИ І РОЗВ'ЯЗКУ ЗВОРОТНИХ ЗАДАЧ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

*Горошко А.В. Хмельницький національний університет  
E-mail: iftomm@ukr.net*

Герметизація елементів радіоелектронної апаратури (РЕА) широко використовується для підвищення надійності їх експлуатації в умовах змін температури, тиску, впливу вологи і т.п. [1, 2]. Зокрема, в авіаційній і ракетній галузі в апаратурі керування використовуються герметизовані микромодулі (ММ).

Під час експлуатації ММ в конструкції керамічний електронний елемент-компунд з'являються небезпечні напруження, причинами яких є різниця коефіцієнтів лінійного температурного розширення (КЛТР), Пуассона та модулів пружності вказаних матеріалів, що приводить до руйнування ММ і, як наслідок, руйнування складних дорогих систем, частиною яких вони є.

З метою усунення таких дефектів необхідно забезпечити в конструкції резистор-компаунд виконання умов міцності у матеріалах резистора і герметика. Для цього потрібно було 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

$$\sigma_{\max i} \leq [\sigma_i], i \in \mathbb{N} \quad (1)$$

для кожної зі складових частин названої конструкції.

В роботі [3] проаналізовано причини руйнування ММ і розроблено математичну модель розрахунку напружень у системі електронний елемент-компаунд. Модель виявилась придатною для розрахунків на міцність деталей системи, але проведений аналіз показав, що розкид значень параметрів моделі, таких як фізико-механічних характеристик компаундів, при виробництві ММ може досягати 300 % і залежить від багатьох факторів, як наприклад, місце виготовлення складових компаунда. Отже, виникла необхідність відшукати точні значення цих характеристик для конкретних партій матеріалу. Крім того, характеристики компаундів в температурному діапазоні  $-60^{\circ}\text{C}$ – $20^{\circ}\text{C}$  взагалі невідомі, хоча вказані ММ експлуатуються за таких температур.

В результаті була поставлена і розв'язана зворотна задача ідентифікації фізико-механічних характеристик полімерного компаунду для їх подальшого використання у математичній моделі, що описує величину контактного тиску системи кераміка-компаунд.

**Розв'язок задачі ідентифікації.** Авторами розроблений розрахунково-експериментальний метод пробних параметрів, який дозволяє одночасно ідентифікувати КЛТР, модуль пружності і коефіцієнт Пуассона компаунда [4].

Ідея методу полягає в тому, що досліджуваний матеріал з'єднують із іншими пробними матеріалами, характеристики яких добре вивчені і відрізняються від відповідних характеристик досліджуваного матеріалу. При цьому форми деталей, що сполучаються, мають бути такими, щоб напружено-деформівний стан у досліджуваних зразках і в реальних конструкціях описувались одними і тими ж рівняннями. Для визначення фізико-механічних характеристик пропонується вважати значення цих параметрів, які ідентифікуються, невідомими у розрахунковій моделі. Значення же тих параметрів пробних конструкцій, які можуть бути виміряні достатньо точно експериментальними способами в реальних умовах функціонування виробів, а також характеристики пробних матеріалів і геометричні розміри конструкцій пропонується підставляти в ту ж модель в якості вхідної інформації. Виготовляючи певну кількість пробних зразків із значеннями фізико-ме-

ханічних характеристик, які задаються таким чином, щоб вимірювальні величини деформації відрізнялись, можна на базі прийнятої розрахункової моделі записати таку кількість лінійно-незалежних рівнянь відносно ідентифікованих параметрів, яка необхідна для їх визначення.

Для ідентифікації вказаних фізико-механічних характеристик компаунда, що герметизує і оточує резистор, було виготовлено двохшарові циліндричні конструкції “пробний матеріал–компаунд”, вибираючи в якості пробного матеріалу, характеристики якого добре вивчені і відмінні від аналогічних характеристик компаунда. В цих конструкціях на границі розділу матеріалів при перепаді температури виникає контактний тиск. Параметрами, які входять у вибрану математичну модель і можуть бути точно виміряні експериментальними методами, є виникаючі під дією контактного тиску деформації на зовнішній поверхні пробного циліндра, значення яких пов’язані із значеннями напружень законом Гука. Співвідношення закону Гука, а також встановлені авторами співвідношення для розробленої моделі дозволяють для відомих радіальних розмірів конструкцій за визначеними експериментально значеннями деформацій знайти величину контактного тиску.

Цінність запропонованого методу ідентифікації полягає в тому, що він дає можливість досить точно визначити фізико-механічні характеристики для конкретної партії матеріалу, температури і, особливо, розрахункової схеми, яка описує напружено-деформований стан системи електронний елемент – компаунд. Це пояснюється тим, що будь-яка математична модель реального виробу містить різного роду допущення і при підстановці в неї неточних коефіцієнтів можна скомпрометувати навіть найточнішу розрахункову схему. А із застосуванням методу ідентифікації, розроблена нами математична модель стає дієвою, оскільки в неї будуть підставлені ідентифіковані характеристики, отримані з цієї ж математичної моделі.

Ідентифіковані фізико-механічні характеристики компаунда ЭЗК-25 увійшли в розроблену математичну модель як її уточнені параметри.

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

Зважаючи на те, що закон розподілу експериментально отриманих значень руйнуючих зусиль керамічних резисторів виявився полімодальним, була поставлена і розв’язана друга зворотна задача – декомпозиція, тобто розщеплення суміші законів розподілу, оскільки

структура отриманих даних невідома. Це задача визначення кількості, долі і параметрів кожної з підвбірок в загальній вибірці.

**Розв'язок задачі декомпозиції суміші законів розподілу.** За розробленим методом обробки даних, що підпорядковуються полімодальним законам розподілу [5], одержана двомодальна гістограма розподілу руйнуючих зусиль керамічних резисторів була апроксимована лінійною комбінацією гауссіан з ваговими коефіцієнтами  $\rho_i$  виду:

$$f(x, \mu_i, \sigma_i, \rho_i) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^N \rho_i \sigma_i^{-1} \exp\left[-(x - \mu_i)^2 (2\sigma_i^2)^{-1}\right], N = 2, \quad (2)$$

де  $\mu_i$  та  $\sigma_i$  – математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення  $i$ -ї підвбірки, кожна із яких формується під впливом своїх домінуючих причин;  $\rho_i$  – імовірність попадання в  $i$ -ту підвбірку,  $\sum_{i=1}^N \rho_i = 1$ ,  $0 \leq \rho_i \leq 1$ ,  $x$  – випадкова величина, у нашому випадку результат вимірювання руйнуючого зусилля керамічних резистора.

Для подальшої обробки одержаних статистичних даних розглядалась підвбірка найменш міцних резисторів, тоді можлива помилка піде в запас міцності всієї вибірки. За одержаними даними було визначено обґрунтовані значення допустимих напружень в кераміці і компаунді. Далі необхідно було дати відповідь на питання: в яких межах мають знаходитись фізико-механічні характеристики і геометричні розміри параметрів моделі для того, щоб забезпечити гарантовану міцність конструкції резистор-компаунд? Отже, була поставлена і розв'язана третя зворотна задача – задача оптимізації допусків на значення фізико-механічних характеристик матеріалів і геометричних розмірів конструкції резистор-компаунд.

**Оптимізація допустимих значень параметрів моделі.** Узагальнено задача призначення обґрунтованих допусків на фізико-механічні характеристики матеріалів резистора і компаунда і геометричні розміри досліджуваної конструкції може бути сформульована наступним чином [6]. При заданих номінальних значеннях дев'яти первинних факторів  $x_i$  визначити такі їх допустимі відхилення  $\delta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 9$  від номінальних значень  $x_{i0}$ , щоб у отриманому паралелепіпеді:

$$x_{i0} - \delta_i/2 \leq x_i \leq x_{i0} + \delta_i/2, \quad i = 1, 2, \dots, 9. \quad (3)$$

було забезпечено виконання умов міцності.

Для вибору конкретного паралелепіпеду необхідно накласти додаткову умову, для чого пропонується ввести критерій оптималь-

ності 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. 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 функцій типу:

$$F_i = -\delta_i \rightarrow \min, i = 1, 2, \dots, 9. \quad (4)$$

Досягти одночасної максимізації всіх допусків при обмеженнях в принципі неможливо [7], тому ця багатокритеріальна задача була зведена до однокритеріальної за допомогою скаляризації.

Таким чином 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, які гарантують міцність елементів конструкції. При розв'язуванні наведених зворотних задач були застосовані розроблені у [8] статистичні методи і алгоритми забезпечення стійкості і підвищення точності розв'язків зворотних задач.

**Висновки.** Досвід постановки і розв'язку зворотних задач параметричної ідентифікації, декомпозиції суміші імовірнісних розподілів експериментально отриманих значень, оптимізації допустимих значень параметрів математичних моделей показав свою ефективність і високу точність при вирішенні проблем забезпечення міцності компаундованих елементів РЕА. Між тим постає питання – а що робити з керамічними резисторами, фізико-механічні характеристики яких не увійшли у встановлені допуски? Перспективними видаються два напрями подальших досліджень:

– розробка розрахункових методів для здійснення селективного складання ММ, при якому для партій компаунду із значеннями фізико-механічних характеристик, які виходять поза встановлені межі (3), були б підібрані резистори з такими характеристиками кераміки, які б забезпечували міцність конструкції;

– за умов неможливості виконання (1), пропонується складання ММ з різними допустимими напруженнями для їх подальшого використання у конструкціях із меншими (більшими) за вказані у ТУ механічними навантаженнями.

Ці дослідження виходять за рамки цієї статті і будуть опубліковані у подальших роботах.

### Література

1. Морозов Д. И. Защита радиоэлектронных средств от влияния климатических факторов / Д. И. Морозов, П. Г. Андреев, И. Ю. Наумова. – 2011. – С. 255.
2. Masuko, Shingo. “Method of packaging electronic parts” U.S. Patent No. 7,200,924. 10 Apr. 2007.
3. Локощенко А. М. Оценка и обеспечение прочности системы “электронный элемент – компаунд” / А. М. Локощенко, С. А. Петрашук, В. П. Ройзман // Вісн. Хмельниц. нац. університету. – 2012. – № 5. – С. 193–197.
4. Goroshko A. V. Identification of physical and mechanical properties of compound by solving inverse problems / A. V. Goroshko, V. P. Royzman, A. Bubulis // Vibroengineering Procedia of International Conference “VIBROENGINEERING – 2013”, 17–19 September 2013, Druskininkai, Lithuania. – P. 81–86.
5. Горошко А. В. Представление и обработка статистических данных, не подчиняющихся унимодальным законам распределения / А. В. Горошко, В. П. Ройзман // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. – № 3. – С. 56–77.
6. Royzman V. Multiple inverse problem / V. Royzman, A. Goroshko // Journal of Vibroengineering. – September 2012. – Vol. 14. – С 1417–1424.
7. Zitzler E. Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications / E. Zitzler. – Ithaca : Shaker, 1999. – P. 63.
8. Горошко А. В. Шляхи підвищення точності розв’язків зворотних задач / А. В. Горошко, В. П. Ройзман // Вісн. Хмельниц. нац. університету. – 2013. – № 6. – С. 60–69.

### **ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Крыжний А. В., Опенько П.В. Национальный университет обороны Украины  
им. Ивана Черняховского, 03049, г. Киев, пр-т Воздухофлотский, 28  
Тел. 0672339908, e-mail: pavel.openko@mail.ru*

Опыт локальных войн и вооруженных конфликтов современности показывает, что основным отличием их от всех предыдущих, в первую очередь, есть значительное возрастание роли информационных технологий в достижении цели конфликтов. Безусловно, принятие на вооружение новых образцов имеет значительное влияние на формы и способы ведения боевых действий и достижения целей, но, вместе с