

УДК: 681.5.015.63:539.4.019:621.319.4

А.В. ГОРОШКО

Хмельницький національний університет

ДОСВІД ПОСТАНОВКИ І РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ ДОПУСКІВ В КОНСТРУКЦІЇ ДИСКОВИХ КОНДЕНСАТОРІВ

Запропоновано формалізацію і розв'язок задачі параметричного синтезу допусків як оберненої задачі забезпечення працездатності технічних систем. Для цього апроксимовано область працездатності системи полем допусків, що визначається номінальними значеннями первинних параметрів системи і допусків на них. Показано, що задачу обґрунтованого вписування поля допусків у вигляді гіперпаралелепіпеда в область працездатності можна здійснювати за допомогою критерію вартості, замінивши вимогу мінімальної вартості виготовлення рівносильною вимогою максимізації всіх допусків. Розв'язана множинна обернена задача синтезу допусків на фізико-механічних характеристики компаунда, які забезпечують міцність керамічних конденсаторів. Показано, що серед існуючих компаундів відсутній представник зі значеннями характеристик, що задовольняють умовам оберненої задачі, і, отже, поставлена задача не має розв'язку. Розроблено метод неруйнівного контролю, діагностування і прогнозування міцності конденсаторів методом акустичної емісії, що дало змогу продовжити їх експлуатацію, періодично їх діагностуючи.

Ключові слова: допуски, параметричний синтез, дискові конденсатори, працездатність, обернена задача.

A.V. GOROSHKO

Khmelnytsky National University, Ukraine

EXPERIENCE FORMULATING AND SOLVING THE PROBLEM OF PARAMETRIC TOLERANCES SYNTHESIS IN THE DESIGN OF DISK CAPACITORS

Abstract - The paper presents the formalization and solution of the problem of parametric tolerances synthesis as the inverse problem of operability of technical systems. For this area of system health and approximated field tolerances defined nominal values of the primary system parameters and tolerances on them. It is shown that the problem of incorporating sound tolerances as hyper parallelepiped to performance can be performed by using the criterion of value, replacing the requirement of minimum manufacturing cost equivalent to the requirement of maximizing all tolerances. Solved the inverse problem of synthesis of multiple admissions on the physical and mechanical characteristics of the compound, provides strength ceramic capacitors. It was shown that among the existing compounds with no representative values of the characteristics satisfying the conditions of the inverse problem, and therefore, the task set has no solutions. A method for nondestructive testing, diagnosing and predicting the strength of capacitors acoustic emission method, which allowed them to continue operation, diagnosing them periodically.

Keywords: tolerances, parametric synthesis, disk capacitors, operability, inverse problem.

Вступ

Створення будь-якої складної технічної системи починається із задання технічних умов на вихідні параметри, які називають умовами працездатності. Нехай система характеризується вектором вхідних $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ і вектором вихідних $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T$ параметрів, тоді умови працездатності виражаються у вигляді номінальних значень вихідних параметрів $\mathbf{Y}_0 = (Y_{01}, Y_{02}, \dots, Y_{0m})^T$ і допусків на їх значення у вигляді

$$Y_{0i} - \delta_i \leq Y_i \leq Y_{0i} + \delta_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

або лише у вигляді нерівностей типу

$$[y_i] \leq Y_i \leq [Y_i], \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Умови працездатності утворюють область допустимих значень D_y , геометричним відображенням якої у прямокутній декартовій системі координат простору вихідних параметрів \mathbb{R}^m є ортогональний паралелепіпед допусків $D_y = \{y \in \mathbb{R}^m \mid [y_i] \leq Y_i \leq [Y_i], \quad i = 1, 2, \dots, m\}$.

Обмеження на вхідні параметри системи типу $[x_i] \leq x_i \leq [X_i], \quad i = 1, 2, \dots, n$ в прямокутній декартовій системі координат простору вхідних параметрів \mathbb{R}^n утворюють ортогональний паралелепіпед допусків $B_d = \{x \in \mathbb{R}^n \mid [x_i] \leq x_i \leq [X_i], \quad i = 1, 2, \dots, n\}$, який називають бруском допусків [1].

Розробник має спроектувати, сконструювати, виготовити і довести об'єкт, який виконує задані функції так, щоб його вихідні параметри відповідали умовам працездатності, чим буде забезпечений необхідний рівень якості. Іншими словами, необхідно знайти область працездатності $D_x = \{x \in \mathbb{R}^n\}$, тобто множину точок простору вхідних параметрів досліджуваної системи \mathbb{R}^n , в яких виконуються умови працездатності.

Задача побудови області працездатності, вибору номінальних значень вхідних параметрів $\mathbf{X}_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})^T$ і допусків на них називається задачею параметричного синтезу [2,3]. В даній роботі пропонується формалізація і розв'язання задачі параметричного синтезу допусків як оберненої задачі забезпечення працездатності технічних систем.

Постановка і розв'язання задачі параметричного синтезу допусків

Нехай в загальному випадку зв'язок між вихідними і вхідними характеристиками технічної системи задається системою функціональних залежностей

$$Y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad Y \in \mathbb{R}^m. \quad (3)$$

Ставиться задача визначення області D_x шляхом розв'язання множинної оберненої задачі, тобто необхідно знайти таку область D_x , для якої виконується $\forall x \in D_x, \mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{X}), \forall Y \in D_y$. Іншими словами, необхідно знайти область $D_x, x \in \mathbb{R}^n$, яка є відображенням області $D_y, y \in \mathbb{R}^m$. Термін «множинна» обернена задача підкреслює, що її розв'язання передбачає визначення множини значень (області) в просторі вхідних параметрів. Цією обставиною вона відрізняється від традиційно розв'язуваних в багатьох галузях техніки точкових обернених задач, в яких за наперед відомим вектором параметрів на виході визначається лише один вектор первинних факторів чи (або) параметрів.

Початковим етапом розв'язання такої оберненої задачі є створення ефективних математичних моделей з уточненими коефіцієнтами, приведеними до конкретної моделі, і подолання труднощів, пов'язаних із некоректністю оберненої задачі, стохастичністю даних, що підставляються у модель та ін. Відмітимо, що обернене відображення точки $y \in \mathbb{R}^m$ в точку $x \in \mathbb{R}^n$ не завжди однозначне: одному і тому ж значенню набору вихідних параметрів можуть відповідати декілька різних векторів вхідних параметрів, тому без застосування спеціальних ефективних методів розв'язання обернених задач неможливо отримати достовірні результати. Шляхи вирішення комплексу перелічених проблем і труднощів виходять за межі цієї статті і описані у інших роботах авторів, наприклад у роботах [4, 5].

Встановлені і уточнені залежності між вихідними і вхідними характеристиками (3) об'єкта дозволяють записати систему нерівностей, розв'язання якої і становить основну мету поставленої задачі. Для цього слід вибрати значення $[y_i]$ і $[Y_i]$, $i = 1, 2, \dots, m$, що регламентують якість роботи об'єкта, або безпосередньо із ТУ, або з міркувань забезпечення тих чи інших властивостей даного об'єкта або його елементів. Крім того, необхідно по можливості із виробничих, фізичних та інших міркувань вказати найширші межі множин можливих значень вхідних параметрів B_d . В результаті система функціональних обмежень буде мати вигляд

$$\begin{cases} [y_i] \leq f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [Y_i], & i = 1, 2, \dots, m, \quad y \in \mathbb{R}^m, \\ [x_j] \leq x_j \leq [X_j], & j = 1, 2, \dots, n, \quad x \in \mathbb{R}^n. \end{cases} \quad (4)$$

Область працездатності D_x , $D_x \subseteq B_d$ є відображенням у просторі вхідних параметрів \mathbb{R}^n гіперпаралелепіеда D_y , утвореного умовами працездатності (2), причому, D_x має довільну невідому конфігурацію і орієнтацію. Безпосередній пошук всіх точок області D_x викликає неабиякі труднощі. Одним із способів наближеного визначення області D_x є її апроксимація полем допусків K_x , який являє собою гіперпаралелепіед допусків, тобто пропонується розв'язок задачі шукати у вигляді області K_x , утвореної нерівностями типу

$$x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

Геометрично це означає вписування в криволінійну область n -вимірного простору вхідних параметрів \mathbb{R}^n , що визначається системою нерівностей (3), n -вимірного паралелепіеда K_x , утвореного (5). Така задача, має неєдиний розв'язок, оскільки таких паралелепіедів у вказану область може бути вписано незліченна безліч. На жаль, на сьогоднішній день відсутні методи розв'язання задач оптимізації допусків, а окремі спроби створення таких методів носять частковий характер і не можуть бути використані при проектуванні широкого кола складних об'єктів [6].

Оскільки не кожен розв'язок сформульованої задачі може бути практично реалізований, різноманітні конструктивні, технологічні або економічні міркування щодо цього можуть бути аналітично сформульовані у вигляді деяких цільових функцій економічного, виробничого або іншого змісту. Обрані цільові функції мають містити в якості аргументів відхилення первинних факторів від їх номінальних значень

$$F_i = F_i(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{2i}), \quad i = 1, 2, \dots, q, \quad F \in \mathbb{R}^q, \quad \delta \in \mathbb{R}^{2n}.$$

Очевидно, що зі всіх паралелепіпедів найбільш прийнятними для практичної реалізації в реальному об'єкті є ті, на які такі критерії можуть бути оптимізовані. Одним із критеріїв оптимізації допусків є мінімізована функція вартості. Обмеженість у застосуванні критерію вартості при розв'язанні більшості практичних задач пояснюється тим, що для його запису необхідно попередньо встановлювати залежність вартості формування кожного з первинних факторів від можливих текучих значень допусків. З цієї причини пропонується змінити вимогу мінімальної вартості виготовлення виробу в певному сенсі рівносильною вимогою максимізації всіх допусків. В цьому випадку в якості часткових критеріїв оптимальності будемо розглядати допуски на значення первинних факторів, взяті зі знаком мінус

$$F_i = -\delta_i \rightarrow \min, \quad i = 1, 2, \dots, 2n, \tag{6}$$

для того, щоб досягти одноманітності при постановці задачі.

Отже, ми звели поставлену задачу параметричного синтезу допусків на вхідні параметри системи до задачі багатокритеріальної оптимізації, в якій вимагається визначити такі максимальні відхилення вхідних параметрів від заданих номінальних значень, при яких в області (5) виконується система обмежень (4).

Сформулювавши техніко-економічні міркування у вигляді критеріїв оптимальності, в загальному випадку виду (6), приходимо до необхідності розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації за наявності обмежень (4). Конкретний метод оптимізації вибирається стосовно розв'язуваної задачі із числа невідомих і достатньо детально розроблених алгоритмів. Ці питання не входять в область дослідження даної роботи. Автором при розв'язанні практичних задач було використано введення одного узагальнюючого критерію оптимальності, що отримується шляхом згортки часткових критеріїв (скаляризації), а задача умовної оптимізації зводилась до задачі безумовної оптимізації методу штрафних функцій. В якості методу однокритеріальної безумовної оптимізації був використаний адаптований алгоритм прямого пошуку [6].

При цьому вагові коефіцієнти c_i згортки типу $F = -\sum_{i=1}^{2n} c_i \delta_i \rightarrow \min$, що визначаються, наприклад, за методом Сааті [7], мають чіткий зрозумілий зміст.

Застосування розробленого методу синтезу допусків для забезпечення міцності дискових конденсаторів

Дискові конденсатори, наприклад типу К15-5 (закордонний аналог СТ81) представляють собою керамічні диски з металізованими торцями, до яких припаяні виводи. При герметизації цих конденсаторів епоксидними компаундами і наступному процесі термоциклювання часто відбувалось руйнування кераміки конденсаторів (рис. 1). Причинами цього дефекту найчастіше є невдалі сполучення властивостей з'єднувальних матеріалів. Оскільки процеси герметизації і термоциклювання супроводжуються появою напружень в контактуючих матеріалах, у випадку, коли величини цих напружень в кераміці перевищують допустиме для даного матеріалу значення, може відбуватись руйнування конденсаторів.



Рис. 1. Дисковий конденсатор і руйнування його кераміки

З метою пошуку причин появи дефектів і розробки заходів щодо їх усунення були поставлена задача моделювання конструкції конденсатора і визначення тих первинних факторів, від яких залежить величина напружень в конструкції конденсатор-компаунд і задача синтезу допусків, тобто множинна обернена задача пошуку такої множини їх значень, які забезпечували б виконання умов міцності для керамічних конденсаторів.

В роботі [8] було розроблено математичну модель конструкції конденсатор-компаунд і одержані залежності тисків і напружень в елементах конструкції від геометричних розмірів деталей і фізико-механічних характеристик матеріалів конструкції. Умова міцності конструкції може бути сформульована як

$$\sigma_{екв} \leq [\sigma], \tag{7}$$

де $\sigma_{екв}$ – еквівалентні напруження у матеріалі конденсатора, $[\sigma]$ – допустимі напруження у матеріалі. Оскільки кераміка – крихкий матеріал, то застосувавши другу теорію міцності, запишемо

$$\sigma_{екв1} = \sigma_{11} - \mu(\sigma_{12} + \sigma_{13}) \leq [\sigma_1], \tag{8}$$

де $\sigma_{11} \geq \sigma_{12} \geq \sigma_{13}$ – головні напруження в кераміці. В силу принципу суперпозиції, головні напруження є алгебраїчними сумами однойменних напружень, що виникають при адгезії кераміки і компаунда тільки по торцях, з однієї сторони, і лише по циліндричній поверхні – з іншої.

Далі розв'язувалась множинна обернена задача синтезу допусків на фізико-механічні характеристики компаунду. Для забезпечення міцності кераміки конденсаторів, виходячи із висловлених гіпотез руйнування, необхідно було знайти компаунд з такими фізико-механічними характеристиками, близькими до відповідних характеристик кераміки, щоб виконувались умови (8) і

$$|q| \leq [\sigma_1]. \quad (9)$$

Близькість характеристик означає, що номінальні значення первинних факторів, які визначають властивості компаунду α_2, E_2, μ_2 доцільно вибирати такими, що співпадають зі значеннями α_1, E_1, μ_1 , обчисленими за встановленими залежностями (таблиця 2). Тоді в номінальній точці гарантовано виконання умов (8) і (9).

Таблиця 2

Значення первинних факторів конструкції конденсатор-компаунд				
Кераміка				
$\alpha_1 \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	$E_1 \cdot 10^5$, МПа	μ_1	$H \cdot 10^{-2}$, м	$R_1 \cdot 10^{-2}$, м
11	1,13	0,31	0,52	1,575
Компаунд ЭК-242				
$\alpha_2 \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	$E_2 \cdot 10^5$, МПа	μ_2	$h \cdot 10^{-2}$, м	$R_1 \cdot 10^{-2}$, м
35	0,092	0,34	0,1	1,575

Використовуючи розроблений метод синтезу допусків і зводячи задачу багатокритеріальної оптимізації до однокритеріальної за допомогою лінійної згортки критеріїв, маємо задачу у вигляді

$$\tilde{F} = -\sum_{i=1}^n c_i \delta_i \rightarrow \min. \text{ Виходячи з апіорної оцінки ступеня впливу вказаних первинних факторів на}$$

величини напружень і контактного навантаження, коефіцієнти при допусках в згортці (ранги), обчислені за методом парних порівнянь Т. Сааті, становлять: при допуску на $\alpha_2 \Rightarrow c_1=0,6$, на $E_2 \Rightarrow c_2=0,25$, на $\mu_2 \Rightarrow c_3=0,15$. Для первинних факторів і параметрів моделі були прийняті наступні обмеження

$$11 \cdot 10^{-6} \leq \alpha_2 \leq 1 \cdot 10^{-4}, \quad 4,5 \cdot 10^3 \leq E_2 \leq 1,13 \cdot 10^5, \quad 0,31 \leq \mu_2 \leq 0,4, \quad 10^{-3} \leq h \leq 1,1 \cdot 10^{-3},$$

причому останнє обмеження взято з ТУ на конструкцію герметизованого конденсатора. В якості $[\sigma_1]$ взято значення 17 МПа. Перевірка виконання обмежень (8) і (9) на кожному кроці оптимізаційного процесу проводилась у вершинах отриманих паралелепіпедів.

Розв'язок задачі оптимізації, показав, що отримана область значень фізико-механічних характеристик настільки мала, що в ній не міститься жодної точки, що відповідає компаундам, які на сьогодні застосовуються. Тому було прийнято рішення розглянути більш міцну кераміку з $[\sigma_1]=30$ МПа, а номінальне значення модуля пружності компаунда вибрати таким, що дорівнює значенню для компаунда ЭК-242. Тоді обмеження на значення цього первинного фактора мають вигляд $0,08 \cdot 10^5 \leq E \leq 0,092 \cdot 10^5$, МПа. При цьому розширення області від номінальної точки передбачалось лише в сторону зменшення модуля пружності, оскільки при цьому зменшуються значення напружень в кераміці. Отже, був запропонований пошук більш еластичних компаундів.

В результаті отримано наступний розв'язок задачі оптимізації

$$11 \cdot 10^{-6} \leq \alpha_2 \leq 11 \cdot 10^{-6}, \quad 0,091 \cdot 10^5 \leq E_2 \leq 0,092 \cdot 10^5, \quad 0,31 \leq \mu_2 \leq 0,4. \quad (10)$$

Аналіз результатів розв'язку показав, що серед компаундів, які до тепер використовувались, відсутній представник з фізико-механічними характеристиками, що задовольняють (10). Тому підприємству-виготовлювачу було рекомендовано відмовитись від модифікацій відомих типів компаундів і зайнятись розробкою компаундів з принципово новими властивостями.

Через те, що на сьогодні велика кількість конденсаторів типу К15-5 експлуатуються у різноманітних дороговартісних відповідальних за безпеку системах літаків, відмова конденсаторів через розгерметизацію їх конструкції може привести до відмови цілого вузла і, як наслідок, загибелі літака. В цій ситуації було важливо, не відмовляючись від використання цих конденсаторів, не допустити їх руйнування в процесі експлуатації, тому була поставлена задача створення методу завчасного попередження про можливість їх руйнування. Тому був запропонований і реалізований метод і засіб неруйнівного контролю, діагностування і прогнозування міцності конденсаторів методом акустичної емісії (АЕ), який попереджає про можливість розгерметизації конденсаторів [9].

Висновки

Запропоновано формалізацію і розв'язок задачі параметричного синтезу допусків як оберненої задачі забезпечення працездатності технічних систем. Для побудови області працездатності складної

технічної системи запропоновано розв'язувати задачу обґрунтованого вписування поля допусків у вигляді гіперпаралелепіеда в область працездатності за допомогою критерію вартості.

Розв'язана множинна обернена задача синтезу допусків на фізико-механічні характеристики компаунда, які забезпечують міцність керамічних конденсаторів. Показано, що серед існуючих компаундів відсутній представник зі значеннями характеристик, що задовольняють умовам оберненої задачі, і, отже, поставлена задача не має розв'язку. Розроблено метод неруйнівного контролю, діагностування і прогнозування міцності конденсаторів методом акустичної емісії, що дало змогу продовжити їх експлуатацію, періодично їх діагностуючи.

Література

1. Назаров Д.А. Алгоритм построения области работоспособности с детализированным квантованием области поиска / Д.А. Назаров // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2009. – Т. 2. – С. 18–22.
2. Абрамов О.В. Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности / О.В. Абрамов. – М. : Наука, 1992. – 176 с.
3. Антушев Г.С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем / Г.С. Антушев. – М. : Наука, 1989. – 89 с.
4. Royzman V. Multiple inverse problem / V. Royzman, A. Goroshko // Journal of Vibroengineering. September 2012. Volume 14, Issue 3. – P. 1417–1424.
5. Goroshko A. V. Methods for testing and optimizing composite ceramics-compound joints by solving inverse problems of mechanics / A.V. Goroshko, V.P. Royzman, A. Bubulis, K. Juzėnas // Journal of Vibroengineering. Vol. 16, Issue 5, 2014. – P. 217–2187.
6. Иншаков А.Н. Допусковый анализ при проектировании сложных технических систем [Электронный ресурс] / А.Н. Иншаков, С.А. Иншаков // Наука в образовании : электронное научное издание № ФС 77 - 48211. Государственная регистрация № 0421200025. – ISSN 1994-0408. – Режим доступа : <http://www.technomag.edu.ru/doc/45563.html>
7. Создание программы оптимизации для решения задач нелинейного математического программирования : отчет по хоз. Теме № 615 / ГГУ. Рук И.Н. Калинин. – Горький, 1980. – 100 с.
8. Saaty T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures / T.L. Saaty // Journal of mathematical psychology. – 1977. – Т. 15. – №. 3. – P. 234–281.
9. Горошко А. В. Синтез допусків як множинна обернена задача міцності дискових конденсаторів / А. В. Горошко, В. П. Ройzman // Современные достижения в науке и образовании : сб. тр. IX междунар. науч. конф. 22-29 сент.2014 г., г. Нетания (Израиль). – Хмельницкий : ХНУ, 2014. – 154 с. – ISBN 978-966-330-209-6.

References

1. Nazarov, D.A. (2009). An algorithm for constructing the field performance with detailed quantization search area. *Proceedings of the International Symposium "The reliability and quality"*, T. 2, 18-22. (in Russian)
2. Abramov, O.V. (1992). Parametric synthesis of stochastic systems with regard to the requirements of reliability. *Moscow, Nauka*, 176p. (in Russian)
3. Antushev, G.S. (1989). Methods of parametric synthesis of complex technical systems. *Moscow, Nauka*, 89p. (in Russian)
4. Royzman, V., Goroshko, A. (2012). Multiple inverse problem. *Journal of Vibroengineering*. Volume 14, Issue 3. ISSN 1392-8716. 1417-1424
5. Goroshko, A.V., Royzman V.P., Bubulis A., Juzėnas K. (2014). Methods for testing and optimizing composite ceramics-compound joints by solving inverse problems of mechanics. *Journal of Vibroengineering*. Vol. 16, Issue 5, 2014, 2178-2187
6. Inshakov, A.N., Inshakov, S.A. Tolerable analysis in the design of complex technical systems. *Science in Education: Electronic scientific editions. E number of PS 77 - 48211. The state registration №0421200025. ISSN 1994-0408. Mode of access to the journal: <http://www.technomag.edu.ru/doc/45563.html>*
7. Establishment of the optimization program for solving nonlinear mathematical programming: Report on the host. Related №615. *GSU. I.N. Kalinin. Gorky*, 1980. -100 p. (in Russian)
8. Saaty, T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, V. 15, №. 3. 234-281.
9. Goroshko, A.V., Royzman, V.P. (2014). Synthesis tolerances as multiple inverse problem of durability disk capacitors. "Modern achievements in science and education". *Proceeding of IX International scientific conference. September 22-29, 2014, Netanya (Israel)*. - Khmelnytsky: KNU. 28-34.

Рецензія/Peer review : 1.11.2014 р.

Надрукована/Printed :29.11.2014 р.

Стаття рецензована редакційною колегією