

УДК 621.3.049.76

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-08

Денисюк В. Ю.

Луцький національний технічний університет

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ І ПРОЄКТУВАННЯ АКТЮАТОРІВ ДИСКРЕТНОЇ ДІЇ

В статті описано застосування термобіметалевих актюаторів дискретної дії в конструкціях сучасних електротехнічних пристроїв. Встановлено, що термобіметалеві актюатори дискретної дії є відповідальними елементами цих пристроїв, так як від їх роботи залежить функціонування всієї системи. Термобіметалеві елементи деформуються нелінійно, прокладаючи при досягненні критичної температури. При аналізі актюаторів визначається їхня робоча характеристика, тобто залежність між величиною, що характеризує зміну геометричної форми і температурою навколишнього середовища. Завдання аналізу біметалевого актюатора дискретного дії полягає у визначенні його пружної характеристики, тобто залежності між переміщенням характерної точки і зміною температури, при відомих конструктивних параметрах. Особливістю даної характеристики є стрибкоподібна зміна форми елемента при досягненні критичної температури. При цьому нова робоча точка потрапляє на верхню стабільну частину характеристики і при охолодженні до критичної температури реалізується зворотний перескок. Запропоновано методика чисельного аналізу і синтезу термобіметалевих актюаторів дискретної дії, що дозволяє удосконалювати існуючі і створювати нові конструкції актюаторів з заданими параметрами.

Ключові слова: актюатор дискретної дії, біметалевий актюатор, переміщення, аналіз, сигнал, керування, методика, розрахунок.

Постановка проблеми. В даний час мікроелектромеханічні системи (МЕМС) набули широкого поширення в техніці. Вони використовуються в автомобілебудуванні, авіакосмічній промисловості, енергетиці, хімії, фармакології, медицині. Для інноваційно-технологічного розвитку України роботи в області МЕМС є дуже значущими.

Будь-яка керуюча система здійснює контроль над об'єктом за допомогою керуючих сигналів, відповідна взаємодія здійснюється за допомогою сигналів зворотного зв'язку. МЕМС мають аналогічну структуру: сенсорна підсистема, актюаторна підсистема і підсистема аналізу інформації та прийняття рішень. Сенсорна підсистема служить для вимірювання стану контрольованого об'єкта. Це здійснюється за допомогою передачі електричного сигналу у відповідь на зміну будь-якої величини в системі. Актюаторна підсистема, навпаки, здійснює вплив на об'єкт управління: при підведенні до системи енергії реалізує керований рух [1].

Проблема дослідження. Залежно від виду перетворюваної енергії вибирають різні типи актюаторів: п'єзоелектричні, електромагнітні, електростатичні, біметалеві, термо-пневматичні, з ефектом пам'яті форми. Деформація біметалевих актюаторів обумовлена біметалевим ефектом. Їх область застосування різноманітна і включає в себе: термомеханічні перемикачі, реле, запобіжники, мікродзеркала, мікрозахвати, мікроперемикачі і маніпулятори тощо [1, 2].

До багатьох чутливих елементів сучасних технічних виробів пред'являються вимоги дискретного спрацьовування при монотонно змінному зовнішньому впливі. Добре відомі біметалеві актюатори куполоподібної форми, які змінюють напрямок кривизни на зворотний, прокладаючи при досягненні критичної температури. Незважаючи на простоту виготовлення, такі актюатори мають і ряд недоліків: нестабільна температура спрацьовування, обмежена величина реалізованих переміщень.

Таким чином, актуальність роботи визначається необхідністю вирішення важливого прикладного науково-технічного завдання, присвяченого розрахунку та проєктування актюаторів дискретної дії, що застосовуються у конструкціях електротехнічних пристроїв, поліпшенням їх якості та споживчих властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актюатори, що засновані на біметалевому ефекті складаються з двох шарів, виконаних з матеріалів із різними коефіцієнтами лінійного теплового розширення (КЛТР) і міцно з'єднаних один з одним. Шар біметалу з більшим КЛТР називають активним, з меншим – пасивним. При нормальній температурі шари мають однакову довжину. При впливі температури шари подовжуються. Активний шар подовжується інтенсивніше, ніж пасивний. Тому шар з більшим КЛТР піддається стискаючим зусиллям, а шар

з меншим КЛТР – розтягуючим (рис. 1). Напруження, які виникають в перерізі біметалу розподіляються нерівномірно, тому виникають деформації і актюатор згинається в бік пасивного шару (на рисунку 2 чорний шар має менший КЛТР, ніж сірий).

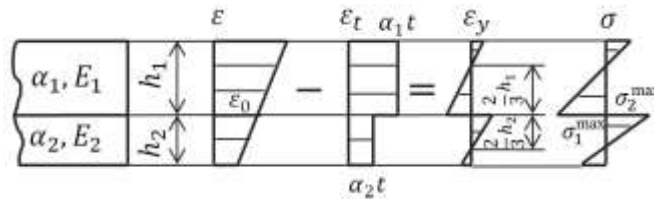


Рисунок 1 – Розподіл деформацій і напружень в біметалі



Рисунок 2 – Біметалевий актюатор у формі консольної балки

(А – недеформований стан, Б – деформований стан актюатора після нагрівання)

Прогини біметалевих стержнів значно перевищують прогини однорідних пластин. Порівняємо переміщення, одержувані при нагріванні однорідного стержня і біметалевої пластини з однаковим лінійним розміром (завдовжки 100 мм) на однакову температуру (100 °С). Стержень зі сплаву 75ГНД з високим КЛТР подовжується на 0,3 мм, що в 70 разів менше прогину біметалевої пластини марки ТБ2013 зі складовими 75ГНД і 36Н товщиною 1 мм (21 мм) [3].

Дешевий і доступний кремній є основним матеріалом, що використовується для виготовлення МЕМС. Технології мікроелектромеханіки орієнтовані на базові технології мікрообробки кремнію. Кремній має хороші термо-електроізоляційні властивості, високий коефіцієнт лінійного теплового розширення, більший, ніж у звичайних металів. Його електрофізичні характеристики стабільні протягом тривалого часу. Всі ці фактори вказують, що кремній є ідеальним матеріалом для створення актюаторів з великими переміщеннями і меншими витратами енергії [4].

Компенсування балансу хронометра за допомогою біметалу з латуні (коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha=18,7 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) і сталі ($\alpha=13 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) є першим практичним застосуванням термобіметалів (1769 р.). Однак цей біметал не отримав широкого поширення через малу різницю КЛТР шарів.

Іншим прикладом одного з перших практичних застосувань біметалів є використання біметалу зі срібла ($\alpha=19,5 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) і платини ($\alpha=9 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) для термоелемента термометра у вигляді спіральної пружини (1817 р.).

Важливий для виробництва точних інструментів і приладів сплав інвар був відкритий в 1899 р. Ш. Гійомом, за що в 1920 р. шведсько-французький фізик отримав Нобелівську премію. Інвар на 36% складається з нікелю ($\alpha=13 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) і на 64% з заліза ($\alpha=12 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$). В інтервалі температур від $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+100 \text{ }^\circ\text{C}$ у інвару виникає ефект зникнення теплового розширення – сплав має мале значення ТКЛР ($\alpha=1,2 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$).

Аналіз нелінійного деформування біметалів стає особливо актуальним у зв'язку з появою актюаторів нового покоління, що використовують ефект проклацування. Для аналізу таких елементів потрібно визначати робочу характеристику, тобто залежність між зміною температури і величиною, що характеризує зміну геометричної форми елемента, а також напруження в конструкції. Ці задачі вперше були вирішені Віларсо. Також необхідно здійснювати синтез таких елементів для спрацьовування при заданій температурі.

Відомі аналітичні методики для аналізу тонкостінних оболонкових конструкцій [2] не дозволяють в повній мірі і з необхідною точністю врахувати всі особливості процесу нелінійного деформування сучасних біметалевих актюаторів, а також аналогічних виконавчих елементів, виготовлених з неметалевих матеріалів. Виявляється недостатнім досліджувати процес деформування тільки у докритичній області або розглядати задачу в лінійній постановці. Процес деформування виконавчих елементів і біметалевих актюаторів нових конструкцій є суттєво нелінійним, що залежать від багатьох параметрів, тому рішення, як правило, виявляється багатозначним і чутливим до малих збурень. Процес розрахунку і проектування подібних

елементів вимагає створення уточнених методик з використанням підходів багатокритеріальної оптимізації. Необхідно здійснити перехід від рішення задач аналізу до вирішення завдань синтезу раціональних конструкцій.

Використання для чисельного дослідження даного класу прикладних задач сучасних кінцево-елементних комплексів (ANSYS, Abaqus тощо) пов'язане зі значним часом розрахунку на ЕОМ і, по суті, є не зовсім придатним для вирішення завдань синтезу. У ряді випадків використання методу кінцевих елементів (МКЕ) важкозатратне і нераціональне, оскільки вимагає багаторазового перестроювання сітки при варіюванні геометричних параметрів конструкції [5].

Мета роботи полягає у розробці методики розрахунку та проектування складного багатопараметричного процесу нелінійного деформування актюаторів дискретної дії.

Викладення основного матеріалу. Актюатори у вигляді тонких біметалевих елементів активно використовуються в сучасних технічних пристроях. Найбільшого поширення набули біметалеві актюатори в формі ламелі, пластинки, диска з отвором в центрі або без нього (рис. 3).



Рисунок 3 – Біметалеві актюатори

Біметалевий актюатор є відповідальним елементом у великому спектрі електротехнічних пристроїв. Тому до чутливих елементів пред'являються високі вимоги за точністю і стабільністю роботи в будь-яких експлуатаційних умовах. Щоб уникнути поломки всього пристрою або аварійної ситуації, актюатор повинен бути правильно спроектований. У зв'язку з розвитком інформаційних технологій, систем автоматичного регулювання та робототехніки потрібно вдосконалювати існуючі та створювати нові конструкції біметалевих актюаторів. Тому необхідно розробити методику аналізу та синтезу таких елементів з урахуванням наявності великих переміщень і можливості дискретної зміни вихідної геометрії.

Термобіметалеві актюатори використовуються в термозапобіжниках, терморегуляторах, термореле, датчиках температури, термоелектричних перемикачах, термовимикачах, термоклапанах для контролю і регулювання температури, а також для захисту теплоенергетичних об'єктів від перегріву.

Дія таких приладів заснована на властивості актюаторів у формі пологих оболонок стрибкоподібно змінювати напрямок прогину (прокладувати) при досягненні критичної температури, забезпечуючи релейну характеристику процесу. На рисунку 4 показано принцип роботи теплового перемикача з термобіметалевим чутливим елементом [3]. Переміщення точок зовнішнього контуру осесиметричного актюатора або характерної точки актюатора складної форми передається безпосередньо або за допомогою важільної системи пристрою, що формує вихідний сигнал. Нагрівання біметалевих актюаторів може здійснюватися теплообміном з середовищем і внаслідок проходження електричного струму через актюатор. Якщо струм досягає критичної величини, оболонка втрачає стійкість, проклаує вниз і ланцюг струму, що йде через закріплені на краях оболонки контакти, розривається. При охолодженні оболонка проклаує назад. У деяких приладах перемикач включається натисненням кнопки.

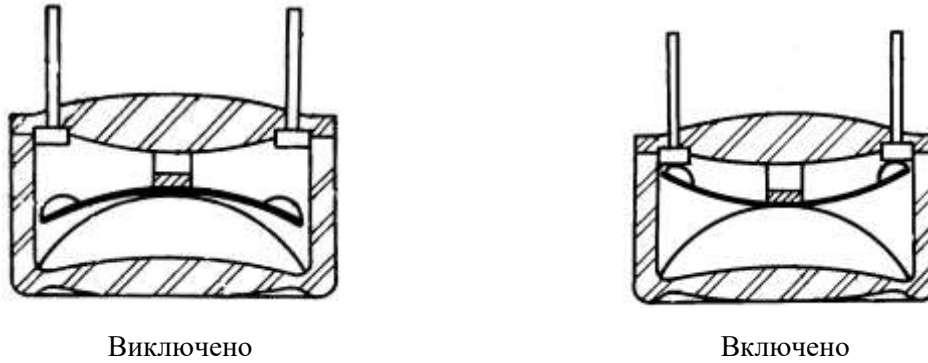


Рисунок 4 – Принцип роботи теплового перемикача з термобіметалевим чутливим елементом

Реалізація руху є основною властивістю актюаторів, що використовують принцип керованої деформації. Деформаційні процеси повинні забезпечувати великі переміщення, співмірні з характерними розмірами конструкції [3]. Тому розрахунки в рамках припущення малих переміщень та принципу незалежності початкових розмірів виявляються не застосовними.

Задача аналізу полягає у визначенні робочої характеристики термобіметалевого елемента, тобто залежності між переміщенням характерної точки і зміною температури T , при відомих конструктивних параметрах. На рисунку 5 зображені положення термобіметалевої оболонки до і після проклацування.

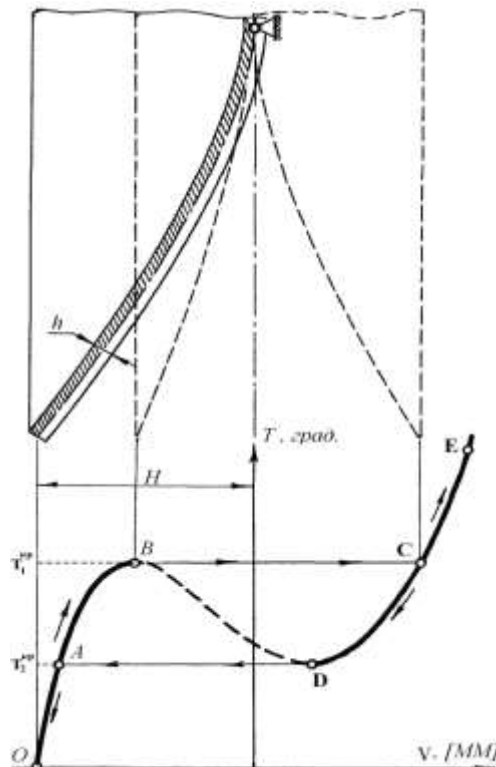


Рисунок 5 – Робоча характеристика чутливого елемента температурного перемикача

При підвищенні температури актюатор починає деформуватися. У точці В (верхнє критичне навантаження) актюатор миттєво змінює напрямок прогину, проклачуючи при прогині v_B . Нова робоча точка С потрапляє на верхню стабільну частину характеристики. При зниженні температури елемент проклацує в точці D (нижнє критичне навантаження). Тобто релейна частина характеристики термобіметалевого диска визначається різницею переміщень $v_C - v_B$, а зона нечутливості за температурою дорівнює $T_1^{кр} - T_2^{кр}$.

Проектовані конструкції повинні задовольняти традиційним вимогам міцності,

довговічності, надійності, поряд зі специфічними вимогами швидкодії, забезпечення необхідних контактних зусиль і відсутності брязкоту [3, 4, 5]. Завдання синтезу полягає в підборі оптимальних конструктивних параметрів для реалізації необхідної нелінійної характеристики. На властивості термометалевого актюатора впливають фактори, які залежать:

- від властивостей термометалів (товщини шарів, модулі пружності шарів, коефіцієнти Пуассона шарів, КЛТР шарів);
- від конструкції актюатора (форма термометалевої оболонки, її радіус кривизни, висота підйому купола, умови закріплення);
- від технології виготовлення;
- від умов експлуатації (температурні і механічні навантаження на елемент, величина попереднього підтискання).

Експериментальний підбір раціонального поєднання параметрів представляється надзвичайно трудомістким завданням, тому що для його здійснення потрібно виготовити велику кількість типорозмірів у металі [5]. Тому розробка методики чисельного аналізу і синтезу термометалевих актюаторів розглянутого класу є актуальною задачею.

При деякому значенні зовнішнього тиску (критичне значення) сферична форма оболонки виявляється нестійкою і на ній з'являються вм'ятини [5]. Критичний тиск сферичної оболонки визначається за формулою:

$$Q_{cr} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{h}{R_m} \right)^2, \quad (1)$$

де E – модуль пружності матеріалу оболонки,

ν – коефіцієнт Пуассона,

h – товщина оболонки,

R_m – радіус кривизни сферичної оболонки.

Можливість врахувати нелінійність процесу деформування оболонки і отримати аналітичний опис процесу втрати стійкості при прокладуванні і закритичної поведінки з'явилася після отримання К. Маргерром диференціальних рівнянь тонких пружних оболонок. Е. Рейсснер запропонував уточнену систему диференціальних рівнянь [2].

Незважаючи на прогрес в області розрахунків, було помічено, що теоретичні значення критичних навантажень для оболонок виявлялися більше експериментальних. Залежність критичних навантажень від параметра тонкостінних b :

$$b = \sqrt[4]{1-\nu} \frac{r}{\sqrt{R_m h}}, \quad (2)$$

де r – радіус опорної поверхні сферичної оболонки.

Тому потрібно було оцінити вплив початкових недосконалостей форми купола і уточнити характер процесу нелінійного деформування, в тому числі в закритичній області [2].

На рисунку 6 зображена залежність безрозмірного прогину центральної точки пологої сферичної оболонки:

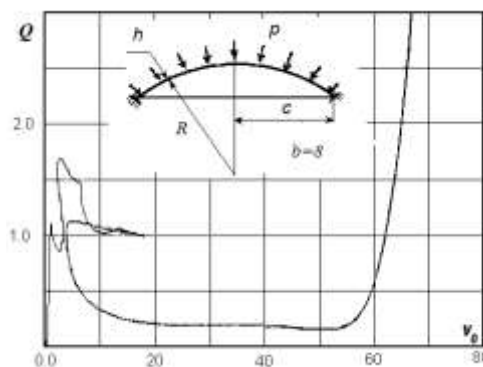


Рисунок 6 – Залежність прогину центральної точки пологої сферичної оболонки від безрозмірного параметра тиску Q

$$v_0 = \frac{\sqrt{12(1-\nu^2)}\nu(0)}{h}, \quad (3)$$

де $v(0)$ – розмірний прогин центральної точки) від безрозмірного параметру тиску $Q \left(Q = \sqrt[4]{12(1-v^2)} \frac{pR^2}{4Eh^2} \right)$.

При аналізі осесиметричної деформації купола вирішується крайова задача для системи диференціальних рівнянь 6-го порядку, тому рішення задачі Коші при відомих умовах навантаження і закріплення визначається значеннями трьох невідомих компонент початкового вектора і параметром навантаження.

Висновки. Термобіметалеві актюатори дискретної дії є відповідальними елементами пристроїв, так як від їх роботи залежить функціонування всієї системи. Термобіметалеві елементи деформуються нелінійно, прокладаючи при досягненні критичної температури. Найбільшого поширення отримали біметалічні актюатори в формі ламелі, пластинки, диску з отвором в центрі або без нього.

При аналізі актюаторів визначається їхня робоча характеристика, тобто залежність між величиною, що характеризує зміну геометричної форми і температурою навколишнього середовища. Завдання аналізу біметалічного актюатора дискретної дії полягає у визначенні його пружної характеристики, тобто залежності між переміщенням характерної точки і зміною температури T , при відомих конструктивних параметрах. Особливістю даної характеристики є стрибкоподібна зміна форми елемента при досягненні критичної температури T_1^{kp} . При цьому нова робоча точка потрапляє на верхню стабільну частину характеристики і при охолодженні до критичної температури T_2^{kp} реалізується зворотний перескок.

Інформаційні джерела

1. Філяшкін М. К. Мікроелектромеханічні системи: навч. посібн. Київ: НАУ, 2019. 276 с.
2. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А. Мікросистемна техніка та нанотехнології: монографія. Київ: НАУ, 2017. 528 с.
3. Теслюк В. М., Кривий Р. З., Мельник М. Р. Автоматизація проектування МЕМС з використанням системи COMSOL: навч. посіб. Львів: Львівська політехніка, 2016. 216 с.
4. Боровий М. О., Куницький Ю. А., Каленик О. О., Овсієнко І. В., Цареградська Т. Л. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої: навч. посіб. Київ: Інтерсервіс, 2015. 350 с.
5. Денисюк В. Ю. Дослідження методів проектування і розрахунку актюаторів дискретної дії. «Прогресивні напрямки розвитку автоматичних технологічних комплексів»: зб. наук. праць VII Міжнар. наук.-техн. конф. м. Луцьк, 28-30 трав. 2022 р. Луцьк: ЛНТУ, 2022. С. 172-173.

Denysiuk V.

Lutsk National Technical University

METHOD OF CALCULATION AND DESIGN OF DISCRETE ACTION ACTUATORS

The article describes the use of thermobimetallic actuators of discrete action in the designs of modern electrical devices. It has been established that thermobimetallic actuators of discrete action are the responsible elements of these devices, as the functioning of the entire system depends on their operation. Thermobimetallic elements deform non-linearly, cracking when a critical temperature is reached. When analyzing the actuators, their operating characteristics are determined, that is, the dependence between the value characterizing the change in geometric shape and the ambient temperature. The task of analyzing a bimetallic actuator of discrete action is to determine its elastic characteristics, that is, the dependence between the movement of a characteristic point and a change in temperature, with known design parameters. A feature of this characteristic is a sudden change in the shape of the element when the critical temperature is reached. At the same time, the new operating point falls on the upper stable part of the characteristic, and upon cooling to the critical temperature, a reverse jump is realized. A method of numerical analysis and synthesis of thermobimetallic actuators of discrete action is proposed, which allows to improve existing and create new designs of actuators with given parameters.

Key words: discrete action actuator, bimetallic actuator, movement, analysis, signal, control, technique, calculation.