

## АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ МЕХАНІЧНИМИ І ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОВБУДОВАНИХ СИСТЕМ

© Лобур М.В., Свірідова Т.В., Теслюк В.М., 2005

Наведено основні підходи щодо проектування мікроелектромеханічних актюаторів; рівняння для механічної та електричної моделей мікроактюаторів. Проведено дослідження кореляційних залежностей між конструктивними параметрами мікрорезонатора та його вихідними характеристиками. Як результат подано матрицю коефіцієнтів кореляції та надано рекомендації щодо проектування мікрорезонаторів.

In this paper main aspects of microelectromechanical actuators design are presented. Equations for mechanical and electrical model are carried out. Correlation dependences of mechanical and electrical parameters are investigated. As result matrix of correlation is figure out and recommendations for successful design are given.

### Вступ

В останні десятиліття успішність використання мікроелектромеханічних систем (МЕМС) у багатьох напрямках промисловості та людської діяльності стимулює продовження досліджень в області матеріалознавства, технології виготовлення та проектування інтегральних мікропристроїв на одному напівпровідниковому кристалі [1; 2; 9]. Застосування МЕМС у вбудованих системах обіцяє провести революцію майже в усіх категоріях технічних пристроїв, уможливаючи поєднати разом мікроелектроніку з мікротехнологією та зробити можливим створення систем на кристалі. Сенсори та актюатори – це базові МЕМС-складові вбудованих систем. На сьогодні, впроваджені нові технології для проектування мікросенсорів та мікроактюаторів, щоб зробити їхнє застосування більш широким. Ринок використання МЕМС є дуже великим. Вони використовуються в таких галузях людської діяльності:

- комунікації (перемикачі на оптичних ключах, побудованих з використанням мікродзеркал та інших МЕМС-пристроїв, оптичних атенюаторів, переналаштувальних фільтрах та лазерах) [6];
- військова промисловість (спорядження, системи спостереження, системи озброєння, керування літаками, інерційні системи, які використовуються в атоматично керованих поїздах та літальних апаратах) [12];
- інформаційні технології (сховища даних з використанням магніто-резистивних голівок, мініатюрні мікромагніти для довготермінованої пам'яті, репроекційні екрани) [4];
- біомедицина (біочіпи для визначення небезпечних хімічних та біологічних вірусів, геносенсори, біочіпи для аналізу ДНК, мікрорідинні сенсори, які використовуються для діагностичних цілей, в яких одна крапля крові може бути використана для тестування широкого спектра хвороб [7; 11];
- медичні (сенсори для вимірювання тиску, м'язеві стимулятори, системи введення і дозування медичних препаратів, електронні стимулятори серця, протезування, імплантанти для вимірювання тиску);
- автомобільні (внутрішні навігаційні системи, системи стиснення повітря для кондиціонерів, сенсори для повітряних подушок, сенсори рівня пального, акселерометри [8] тощо.

Особливо важливою ділянкою використання МЕМС є створення високодобротних радіочастотних пристроїв, в яких використовуються електромеханічні резонатори електростатичного типу, оскільки використання таких пристроїв у вбудованих системах дасть змогу зменшити їхні розміри та покращити вихідні характеристики.

Існує ціла низка математичних моделей для моделювання складових вбудованих систем, але вони не враховують вплив одних фізичних принципів на інші, що неможливе отримати результати, які б відображали реальні режими функціонування мікропристроїв. Отже, актуальною науково-прикладною задачею є розроблення математичних моделей мікрорезонаторів, які б уможливили покращити вихідні характеристики вбудованих систем та дослідження поведінки таких мікроскладових вбудованих систем із врахуванням як електричної, так і механічної областей.

**Метою цієї роботи** є розрахунок кореляційних залежностей між механічними та електричними параметрами складових вбудованих систем, що дасть змогу значно спростити ітераційний процес проектування.

### Основна частина

Проектування пристроїв, які будуть виготовлені з використанням мікроелектромеханічної технології, є складним завданням. Під час цього процесу множина різноманітних чинників має бути врахована перед початком проектування, а саме:

- розмір напівпровідникового кристала;
- процеси, які будуть використані при виготовленні;
- розміри пристрою;
- матеріали для виготовлення;
- режими функціонування тощо.

Основні етапи проектування можна продемонструвати на прикладі розрахунків електростатичного мікрорезонатора ємнісного типу. На рис. 1 зображена структура такого мікрорезонатора. Цей пристрій складається із рухомого гребінчастого електрода, нерухомого електрода резонаторної конструкції.

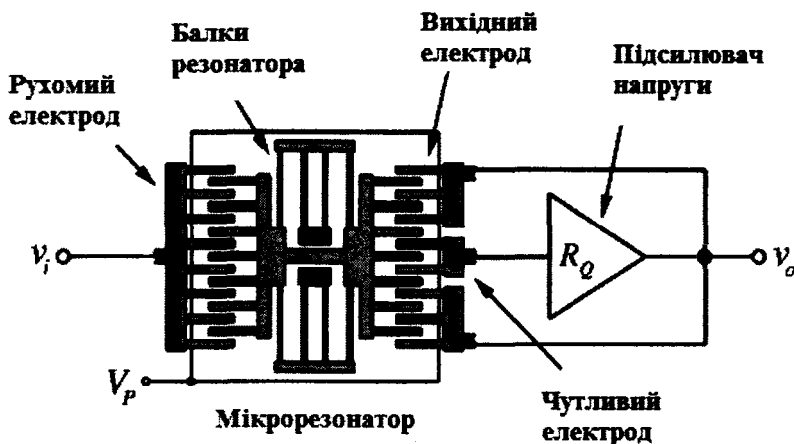


Рис. 1. Структура мікрорезонатора

Напруга, яка прикладається до резонатора, складається з постійної та змінної складових. У кожному з вузлів резонатора це призводить до появи електрорушійної сили між електродом та резонатором. У той момент, коли частота напруги наближається до частоти резонансу контуру, мікрорезонатор починає вібрувати і створює змінну в часі ємність [13].

Отже, процес проектування пристрою може бути поділений на два етапи: механічне та електричне проектування. На початковій стадії механічного проектування необхідно визначити: жорсткість, масу, затухання. Для першого та третього параметрів мікрорезонатора має виконуватися закон Гука.

Коли структура пристрою є визначеною, то необхідно провести аналіз вже існуючих пристроїв, оскільки деколи можна покращити структуру шляхом внесення змін щодо геометрії, що є дешевше від проектування абсолютно нової. Одним із таких підходів є проведення аналізу кореляційних зв'язків вхідних та вихідних параметрів. Перед проведенням такого аналізу для мікроактюатора визначимо основні вирази для обчислення його механічних і електричних параметрів, які використовуються під час проектування.

На рис. 2. показані основні складові механічної конструкції резонатора. Основні конструктивні параметри:

– жорсткість  $k_x$ , яка може бути отримана із рівняння (1) [3]

$$k_x = \frac{2Et w_b^3}{L_b^3} \frac{L_t^2 + 14\alpha L_t L_b + 36\alpha^2 L_b^2}{4L_t^2 + 41\alpha L_t L_b + 36\alpha^2 L_b^2}; \quad (1)$$

$$\alpha = (w_t / w_b)^3, \quad (2)$$

де  $E$  – модуль Юнга матеріалу [ГПа];  $t$  – товщина полікремнію [м];  $L_t$ ,  $L_b$ ,  $w_t$ ,  $w_b$  – геометричні параметри балок [μм], показані на рис. 2.

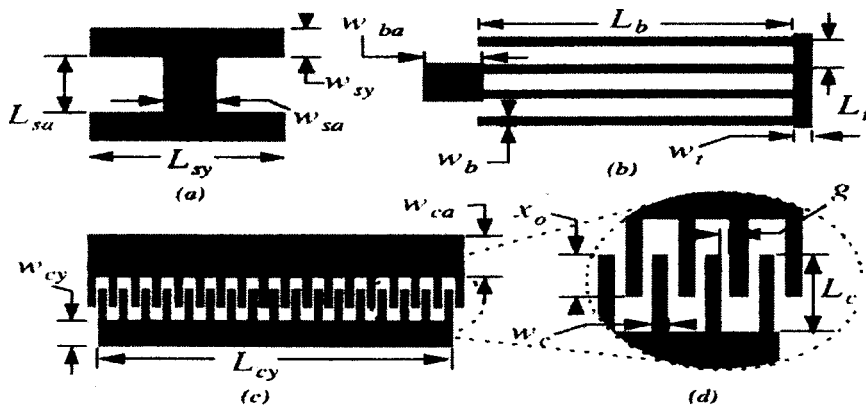


Рис. 2. Основні конструктивні складові мікрорезонатора

Фундаментальна механічна частота  $f_r$  та електрична частота  $f_e$  обчислюються з врахуванням вибраних розмірів за такими виразами відповідно [14]:

$$f_e = \frac{f_r}{2}; \quad (3)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{M_p + 0.37M}}, \quad (4)$$

де  $M_p$  – маса рухомої пластини, кг;  $M$  – маса балок, кг; густина полікремнію – 2330 кг/м<sup>3</sup>.

Використовуючи рівняння (1)–(4), може бути обчислена частота нашого пристрою.

Наступний крок – це визначення величини зміщення [3] та необхідної напруги

$$d = \frac{F_x}{k_x} = \frac{N\epsilon_0\epsilon_r t}{gk_x} V^2, \quad (5)$$

де  $F_x$  – сила у напрямку  $x$  [Н];  $N$  – кількість конструктивних компонентів гребінки;  $\epsilon_0$  – 8.854х 10-12 [Ф/м];  $\epsilon_r$  – діелектрична проникність середовища;  $t$  – товщина полікремнію [μм];  $g$  – відстань між пальцями гребінки;  $V$  – прикладена напруга [V];  $k_x$  – жорсткість [Н/м].

У табл. 1 наведені конструктивні параметри мікрорезонатора, які використовуються для розрахунку кореляційних залежностей між електричними та механічними параметрами.

Таблиця 1

### Конструктивні параметри

Назва	Значення	Одиниці
$w_b$ (ширина балки)	$2 \cdot 10^{-6}$	м
$L_b$ (довжина балки)	$190 \cdot 10^{-6}$	м
$L_t$ (довжина траси)	$16 \cdot 10^{-6}$	м
$w_t$ (ширина траси)	$2 \cdot 10^{-6}$	м
$g$ (відстань між конструктивними компонентами гребінки)	$2 \cdot 10^{-6}$	м
$N$ (кількість конструктивних компонентів гребінки)	47	
$E$ (модуль Юнга)	192	ГПа
$t$ (товщина)	$2 \cdot 10^{-6}$	м
$d$ (густина матеріалу)	2330	кг/м <sup>3</sup>

Після обчислення вихідних механічних характеристик, необхідним є визначення електричних параметрів мікрорезонатора, які можуть бути отримані за допомогою електромеханічних аналогій [3], використовуючи такі рівняння:

$$\frac{I_0}{V_i} = j\omega V_{pi}^2 \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_i \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_0 \cdot \left( \frac{X_1}{F_i} \right), \quad (6)$$

де  $X$  – зміщення гребінки вихідного електрода [мм];  $F$  – сила, прикладена на вхідний електрод;

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{2N\epsilon_0 h}{d}, \quad (7)$$

де  $N$  – кількість конструктивних компонентів гребінки;  $\epsilon_0$  – діелектрична проникність середовища;  $d$  – відстань між конструктивними складовими гребінки;  $h$  – товщина структури.

Отже, для визначення параметрів RLC-контуру, який відповідає структурі на рис. 2, можна використати рівняння (8)

$$L_i = M_i \eta_i^2; \quad R_i = D_i \eta_i^2; \quad C_i = \frac{1}{K_i \eta_i^2}. \quad (8)$$

Шляхом розв'язання цих рівнянь буде отримане RLC-подання механічної системи.

### Результати

Для досягнення необхідних параметрів необхідно здійснювати ітераційний процес дослідження. Але виникає істотна складність, пов'язана з тим, що конструктивні елементи мікрорезонатора виготовляються в одному технологічному процесі з їх електричною складовою. Тому необхідно здійснити ітераційний процес із врахуванням їх кореляційних зв'язків. З цією метою на початку визначимо коефіцієнти кореляції між електричними та механічними параметрами мікрорезонатора.

На рис. 3 зображена схема використання мікрорезонатора високої добротності фільтрації, а його електрична принципова схема показана на рис. 4.

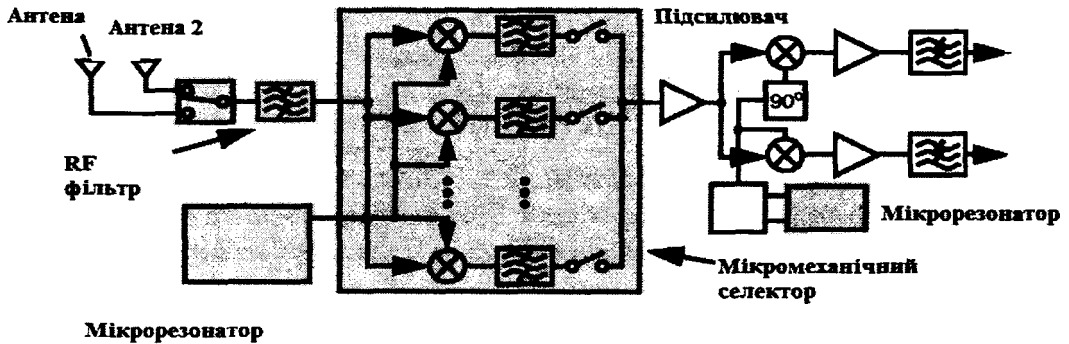


Рис. 3. Схема використання мікрорезонатора для фільтрації

Мікрорезонатор, як вже було сказано, складається як з механічної, так і з електричної моделей. Еквівалентна електрична схема для мікрорезонатора, зображеного на рис. 1, має вигляд, показаний на рис. 4.

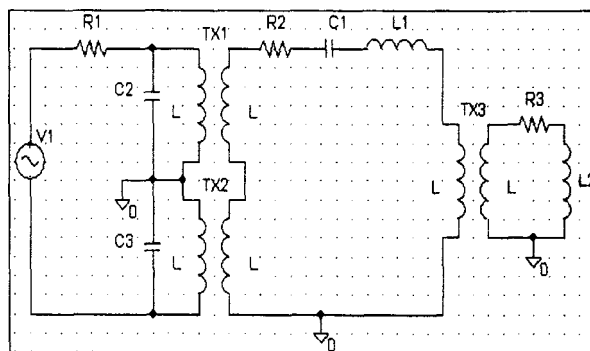


Рис. 4. Електрична схема мікрорезонатора

Для дослідження кореляційних зв'язків був згенерований вектор конструктивних параметрів  $Z_1 (L_a, L_b, w_a, w_b, N, t)$ , використовуючи нормальний закон. Використовуючи рівняння (1)–(7), отримано вектор електричних змінних  $Z_2 (R, L, C, Cp)$ . Кореляційні залежності між кожною парою параметрів обчислені за формулою Пірсона (9)

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i Y_j - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{j=1}^n Y_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2 - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2}} \quad (9)$$

Отримана матриця коефіцієнтів кореляції наведена у табл. 2.

Таблиця 2

Матриця коефіцієнтів кореляції

	R2	L1	C1	R1	C2	Lb	Lt
R2	***	0,908	-0,805	0,908	0,047	0,764	0,315
L1	0,908	***	-0,805	0,908	0,007	0,764	0,315
C1	-0,805	-0,805	***	-0,805	0,997	0,155	-0,229
R1	0,908	0,908	-0,805	***	-0,047	0,986	0,315
C2	0,047	0,007	0,997	-0,047	***	0,074	0,229
Lb	0,764	0,764	0,155	0,986	0,074	***	0,986
Lt	0,315	0,315	-0,229	0,315	0,229	0,986	***

Результати у вигляді матриці коефіцієнтів кореляції дають змогу вибрати елементи, які є найбільш корельованими і за допомогою методів статистичної оптимізації здійснювати рух в напрямку оптимальної структури. Проаналізувавши матрицю коефіцієнтів, можна зробити висновок, що найбільший вплив на вихідну частоту мікрорезонатора мають довжини балок мікрорезонатора та кількість конструктивних компонентів гребінки, тоді як значеннями паразитивної ємності можна знехтувати під час проектування.

### Висновки

Проектування мікроелектромеханічних пристроїв для мікробудованих систем потребує врахування багатьох чинників, але в той самий час не всі параметри потрібно брати до уваги. У цій роботі показаний процес проектування таких пристроїв з використанням статистичного аналізу кореляційних зв'язків між електричними та механічними параметрами. Такий аналіз дає змогу передбачити та оцінити вихідні характеристики структури та змінити її геометрію в необхідний спосіб. Для прикладу наведено матрицю коефіцієнтів кореляції.

1. [www.ansys.com](http://www.ansys.com). 2. N. Debt, S.V. Iyer, T. Mukherjee, R.D. Blanton "MEMS Resonators Synthesis for Defect Reduction", *Journal of Modelling and Simulation of Microsystems*. – Vol. 2. – No. 1. – P. 11–20, 2001. 3. Kun Wang, Clark T. – C. Nguyen "High-order medium frequency micromechanical electronics filters", *IEEE J. of Microelectromechanical Systems*. – Vol. 8 – No. 4 – Dec. 1998 – P. 534–557. 4. L. Lin, R.T. Howe, A.P. Pisano "Micromechanical filters for signal processing", *IEEE J. of Microelectromechanical Systems*. – Vol. 7. – No. 3 – Sept. 1998 – P. 286–294. 5. <http://www.mems.ru>. 6. M. Lobur, A. Napieralski, T. Sviridova "Application of CFDRC software for modeling of chosen microstructures" // *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceeding of the International Conference TCSET'2002, Lviv*. – 2002. – P. 172–175. 7. <http://www.stdmems.com>. 8. T.B. Gabrielson, "Mechanical-thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors", *IEEE Trans. On Electron. Dev.* – 1993. – Vol 40. – P. 903–909. 9. K.-F. Bohringer, B.R. Donald, and N.C. MacDonald. Programmable vector fields for distributed manipulation, with applications to MEMS actuator arrays and vibratory parts feeders. *Int. Journal of Robotics Research*, Feb. 1999. 10. K.-F. Bohringer, B.R. Donald, N.C. MacDonald, G. T.A. Kovacs and J.W. Suh. *Computational*

*methods for design and control of MEMS micromanipulator arrays. IEEE Computer Science and Engineering, pages 17–29, January, March 1997. 11. H. Fujita. Group work of microactuators. In International Advanced Robot Program Work-shop on Micromachine Technologies and Systems, pages 24–31, Tokyo, Japan, Oct. 1993. 12. T. Furuhashi, T. Hirano, and H. Fujita. Arraydriven ultrasonic microactuators. In Transducers Digest Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pages 1056–1059, Montreux, France, June 1991. 13. H. Nakazawa, Y. Watanabe, and O. Morita. The two-dimensional micro conveyor: Principles and fabrication process of the actuator. In Transducers Digest Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, volume 1, pages 33–36, Chicago.*

УДК 681.211

Н.Я. Возна

Тернопільська академія народного господарства

## МЕТОДИ КОДУВАННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ РУХУ ДАНИХ В АСУ

© Возна Н.Я., 2005

**Висвітлено проблему розробки автоматизованих систем управління, яка тісно пов'язана з теоретичними основами комп'ютерних систем розподіленого типу на основі сіткових технологій і на принципах ефективного кодування технічних і економічних даних.**

**In this work the described problem of planning of the automated control systems. It is closely as bound up with theoretical bases of the computers systems of the distributed type on the basis of networks technologies and also principles of effective code of technical and economical information.**

### 1. Актуальність впровадження нових інформаційних технологій кодування техніко-економічних (ТЕД) та технологічних даних (ТД) в АСУ

Сучасні АСУ ґрунтуються на широкому використанні програмно-апаратних засобів комп'ютерних систем та мереж. Аналіз світової практики застосування АСУ показує, що в загальному обсязі інформаційних потоків ТЕД займають 20–40 %. Тому задача ефективного кодування та захисту від помилок ТЕД в АСУ є актуальною. Слід зауважити, що незважаючи на великі інтелектуальні можливості сучасних комп'ютерних систем, які характеризуються обсягами пам'яті даних 2–20 Гбайт, високою швидкістю 0,5–2 Гбіт/с, потужними операційними системами Windows, Unix, Linux ..., а також великим пакетом прикладного програмного забезпечення, проблема ефективного кодування ТЕД до цього часу не вирішена. Аналіз існуючих способів кодування ТЕД показує їх еволюційний та евристичний характер. Тобто ТЕД кодуються лінгвістичними текстовими абрєвіатурами. При цьому обсяг ТЕД, які циркулюють в комп'ютерній мережі АСУ, на 1–2 порядки більший по відношенню до власної ентропії джерел ТЕД. Тому розробка теоретичних основ побудови та створення каталогу формалізованих ідентифікаторів ТЕД є актуальною задачею.

Іншим важливим чинником оптимізації кодування даних в АСУ є розвиток теорії джерел інформації та розробка нових технологій кодування технологічних даних. При цьому ефективно можуть бути використані принципи кодування в інших теоретико-числових базисах по відношенню до широко вживаного базису Радемахера, який поданий двійковою системою числення.

Наприклад, використання базису Крестенсона дає змогу виконати ефективний захист як телеметричних, так і техніко-економічних даних від помилок на основі арифметичних корегуючих кодів. Застосування базису Галуа дає можливість використовувати рекурентні методи захисту від