

## МОДЕЛЬ МІКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА ЄМНІСНОГО ТИПУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

© Теслюк В.М., Загарюк Р.В., 2006

**Розроблена модель акселерометра ємнісного типу. Наведено результати моделювання у вигляді залежностей ємності, максимального зміщення та напруження конструкції від прискорення та розподілу напружень конструкції інтегрального пристрою для матеріалів Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Зроблено висновки щодо використання матеріалів для проектування та виготовлення мікроакселерометрів.**

**Model of capacitive accelerometer is designed. Presented modeling results in the form of dependences of capacitance, maximal displacement and construction strain from the acceleration and construction strain distribution of integral device for following materials: Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Drawn conclusions about using materials in microaccelerometers design and fabrication.**

### Вступ

Акселерометри – це пристрої, які призначені для вимірювання прискорення. Вони займають великий сегмент сучасного світового ринку електронних пристроїв і застосовуються в різноманітних технічних системах: як в побутових, так і у пристроях спеціального призначення.

Сьогодні в Україні практично відсутні проектні організації та підприємства, які займаються виготовленням та проектуванням інтегральних акселерометрів. Разом з тим, ефективне проектування пристроїв цього класу є неможливим без використання САПР та особливо математичного забезпечення: математичних моделей, алгоритмів та методів. Саме розроблення моделі мікроакселерометра для інтеграції в системи автоматизованого проектування є метою цієї роботи. Набір автоматизованих засобів та вже готових математичних моделей дасть проектувальнику змогу підвищити ефективність та зменшити час проектування. Отже, оскільки робота стосується розроблення та дослідження моделі акселерометра ємнісного типу для автоматизованого проектування, то вона є актуальною.

### Аналіз сучасного стану проектування акселерометрів

Аналізуючи літературні джерела, варто зауважити, що значний внесок у розвиток МЕМС, а зокрема у дослідження мікроакселерометрів, належить вченим із Університету Карнегі Меллон, що у місті Пітцбург штату Пенсильванія, США. Зокрема, з 1998 по 2000 рр. науковцями цього університету було вперше запропоновано моделі КМОП-МЕМС акселерометрів [1] та розроблено основні технології синтезу пристроїв цього класу [2–4]. З 2003 року дослідження МЕМС акселерометрів продовжуються з акцентом на вдосконалення технологій виготовлення та інтеграції пристроїв [6]. Розробляються методи для вимірювання та контролю руху МЕМС структур з ультрамалою масою та ємністю [5], ведуться дослідження із зниження шумів у КМОП сумісних КНІ акселерометрах [7]. Починаючи з того самого 1998 р. тривають дослідження та побудова акселерометрів із попереднім налаштуванням, розробляються нові типи акселерометрів з різноманітними принципами дії [8, 9, 16]. Акселерометри вдосконалюються та завдяки низькій ціні та малим розмірам застосовуються все ширше.

Аналіз дає змогу стверджувати, що, на жаль, дуже мало літератури присвячено розробленню акселерометрів саме для автоматизованого проектування, переваги якого ми вже розглядали вище. Тому для підвищення ефективності проектування інтегральних акселерометрів необхідно розробити математичні моделі, які використовують при автоматизованому блочно-ієрархічному підході до проектування ємнісних сенсорів прискорення.

### Конструкція

Типова конструкція акселерометра, наведена на рис. 1, складається із рухомої сейсмічної маси, яка прикріплена до підкладки, та двох обкладок. Між обкладками та сейсмічною масою розміщуються електроди, які і будуть фіксувати зміну ємності зі зміщенням сейсмічної маси. Варто зауважити, що за такої побудови конструкції зміщення будуть відбуватись лише вздовж однієї осі.

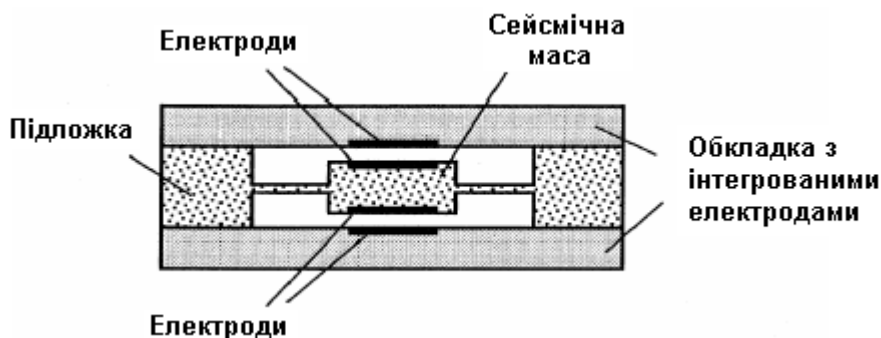


Рис. 1. Конструкція акселерометра

### Принцип роботи

В ємнісних сенсорах прискорення, основа приладу та маса відділяються одна від одної, і вимірюється ємність або заряд між ними. У разі зменшення дистанції ємність зростає і електричний струм тече у напрямку до сенсора, і навпаки – зі зростанням дистанції – струм тече у зворотному напрямку. Сенсор перетворює прискорення основної частини на електричний струм, заряд або напругу. Чутливий елемент прискорення виготовлений, як правило, з кристала кремнію або скла. Ємнісний чутливий елемент вимірює прискорення в позитивному і негативному напрямках, і є чутливим до статичного прискорення (вектор земного тяжіння) та вібрацій [14].

Ємнісні сенсори прискорення пристрої мають декілька переваг, а саме: висока чутливість, низький рівень шумів та дрейфу струму, низька чутливість до температури, а також мале значення розсіювання потужності. Більше того, додаткові конденсатори можуть бути вбудовані і використані для допрацювання електростатичної схеми компенсації кільцевого зворотного зв'язку чи для тестових цілей.

Недоліком ємнісного сенсора є значне ускладнення вимірювальної електроніки. Електронна схема спряження має бути розташована якнайближче до сенсора, щоб зменшити паразитні ємності. Для того, щоб запобігти електромагнітним завадам, на пристрої встановлюють відповідне екранування [15].

### Математична модель для визначення ємності базової конструкції інтегрального сенсора

Зміщення робочого елемента конструкції залежно від значення зовнішньої сили описується диференціальним рівнянням другого порядку [12]:

$$m_y d^2y / dt^2 + B_y dy/dt + k_y y = F_{ext}, \quad (1)$$

де  $y$  – зміщення точки;  $t$  – час;  $m_y$ ,  $B_y$ ,  $k_y$  – параметри конструкції;  $F_{ext}$  – зовнішня прикладена сила.

Відповідно, рівняння зміни відстані між обкладками конденсаторів матиме вигляд:

$$d_{верх} = x + (y - y_0), \quad d_{нижн} = x - (y - y_0), \quad (2)$$

де  $d_{верх}$  – відстань між обкладками верхнього конденсатора;  $d_{нижн}$  – відстань між обкладками нижнього конденсатора;  $x$  – відстань між пластинами;  $y$  – координата зміщення точки;  $y_0$  – початкова координата точки конструкції.

Враховуючи те, що елемент сейсмічної маси є достатньо великим, ми можемо знехтувати його деформацією і припустити, що електроди рухаються паралельно. Тоді для розрахунку ємності можемо скористатись такими формулами [17, 18]:

$$C_{\text{верх}} = \varepsilon \frac{lb}{d_{\text{верх}}}, \quad C_{\text{нижн}} = \varepsilon \frac{lb}{d_{\text{нижн}}}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу між пластинами акселерометра;  $d_{\text{верх}}$ ,  $d_{\text{нижн}}$  – відстані між пластинами;  $l$  – довжина пластини;  $b$  – ширина пластини.

Для розв'язання задачі використано метод Рунге–Кутта IV порядку [11].

### Результати

Під час аналізу роботи акселерометра для реалізації його конструкції було використано матеріали, основні параметри яких наведено у табл. 1.

Таблиця 1

#### Характеристики матеріалів

	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Коефіцієнт Пуассона	Модуль Юнга, 10Е-9
Si	2330	0.22	165
SiO <sub>2</sub>	2200	0.17	75
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3100	0.24	380

Під час дослідження вихідних параметрів були отримані графіки залежності зміщення та максимального напруження конструкції від вхідного прискорення (рис. 2, 3). На рис. 4 зображено графіки залежності ємностей нижнього та верхнього конденсаторів. Графіки обернено пропорційні між собою, оскільки відстані між обкладками є взаємозалежними.

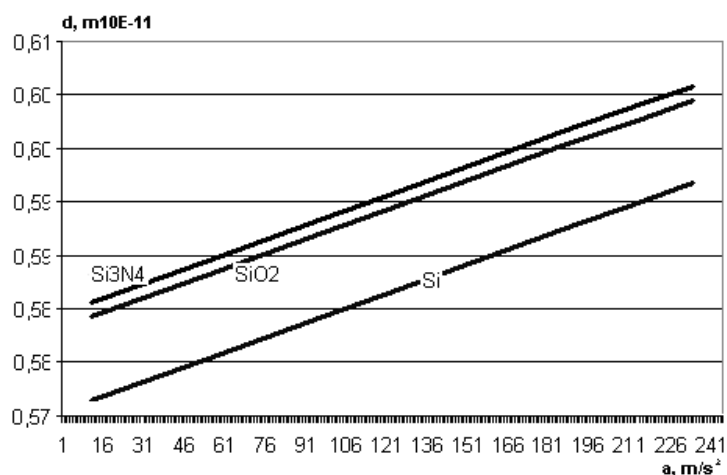


Рис. 2. Залежність зміщення від прискорення

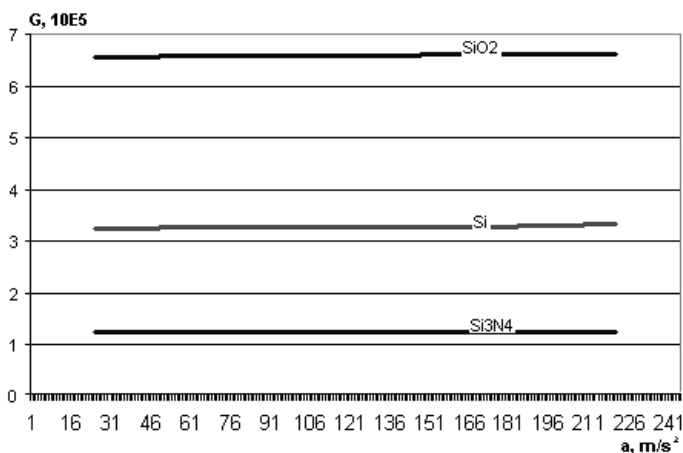


Рис. 3. Залежність максимального напруження від прискорення

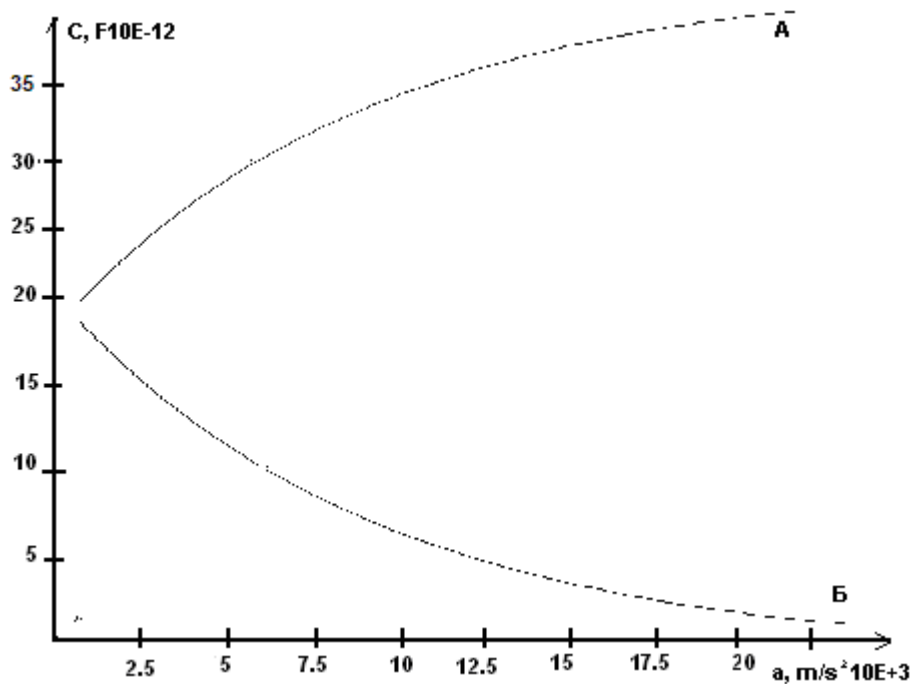


Рис. 4. Залежність відносної зміни  $A$  – нижньої та  $B$  – верхньої ємності від прискорення

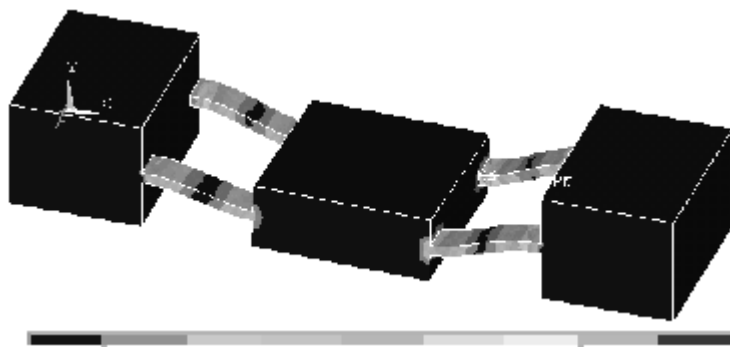


Рис. 5. Міця напруження у конструкції акселерометра

### Висновки

У ході виконання роботи було досліджено максимальне зміщення та максимальне напруження конструкції для різних видів матеріалів. Ці результати можуть бути використані для проектування мікроакселерометрів. З отриманих результатів випливає, що найкращими характеристиками за зміщенням (рис. 2) володіють  $Si_3N_4$  та  $SiO_2$ .

На рис. 5 показано розподіл напруженості в акселерометрі після прикладення зовнішньої сили, виконаний у середовищі проектування Ansys [13]. Результати розподілу напружень в критичних місцях пристрою (рис. 3) показують, що найменше напруження конструкції є у матеріалі  $Si_3N_4$  порівняно з конструкціями, виготовленими з матеріалів  $Si$  та  $SiO_2$ .

Підсумувавши усе вищесказане, зазначимо, що оптимальним матеріалом для проектування мікроакселерометрів із вищеперерахованих є  $Si_3N_4$ .

1. Zhang G. Design and Simulation of A CMOS-MEMS Accelerometer // Carnegie Mellon University.
2. Zhou Y. Layout Synthesis of Accelerometers // Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, August, 1998.
3. Gupta V. and Mukherjee T. Layout Synthesis of CMOS MEMS Accelerometers // Department of ECE, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA-15213.
4. Gupta V. Approaches to Synthesis of a CMOS Accelerometer // Department of Electrical and Computer

gineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, August, 2000. 5. Jiangfeng Wu. *Sensing and Control Electronics for Low-Mass Low-Capacitance MEMS Accelerometers* // Carnegie Mellon University, Spring 2002. 6. Hao Luo. *Integrated Multiple Device CMOS-MEMS IMU Systems and RF MEMS Applications* // Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213. 7. Babak Vakili Amini, Siavash Pourkamali and Farrokh Ayazi *A High Resolution, Stictionless, CMOS Compatible SOI Accelerometer with a Low Noise, Low Power, 0.25 $\mu$ m CMOS Interface* // School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0250. 8. Scott Valoff and William J. Kaiser, "Pre-settable Micromachined MEMS Accelerometers" // Electrical Engineering Department, University of California, Los Angeles. 9. Scott A. Valoff and William J. Kaiser, "Self-Balancing Interface Circuit for Pre-settable Micromachined MEMS Accelerometers", Electrical Engineering Department, University of California, Los Angeles. 10. <http://www.memsnet.org>. 11. Тихонов А.Н., Самарский А.А. *Уравнения математической физики*. – М., 1966.. 12. V. Teslyuk, R. Zaharyuk, M. Pereyma. *Mathematical Model of the Capacitive Accelerometer*. CADSM'2005 – 525. 13. Басов К.А., Ansys. *Справочник пользователя. ДМК, Москва, 2005*. 14. VTI Technologies, *Accelerometers and inclinometers*, <http://www.vti.fi/technology/accelometers.html> 2.3.2004. 15. M. Elwenspoek, R. Wiegink: *Mechanical Microsensors*. Sprinkler-Verlag Berlin Heidelberg New York. pp. 230-236. 16. Varadan, V K and Varadan, V V, *Microelectromechanical Systems (MEMS)*, 2000. 17. Allet, G.D., *Interdigital Capacitors and Their Applications to Lumped-element Microwave Integrated Circuits*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.MTT-18, Dec.1970. – P.1028–1033.18. Гунтн К., Гардж Р., Чадха Р. *Машинное проектирование СВЧ устройств*. – М., 1987.

УДК 621.396:519.6

М.І. Андрійчук

Інститут прикладних проблем механіки і математики  
ім. Я.С. Підстригача НАН України

## РОЗРАХУНОК І ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗСІЯННЯ ХВИЛЕВІДНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

© Андрійчук М.І., 2006

З використанням різних за точністю математичних моделей досліджено властивості випромінювання і оптимізація параметрів лінійної хвильовідної антенної решітки. Параметрами оптимізації є комплексні коефіцієнти збудження окремих хвильоводів. Оптимізація функціоналів зводиться до розв'язування відповідних нелінійних рівнянь Ейлера або ж застосовують прямі градієнтні методи. Результати числового моделювання наведено для решіток з різними геометричними та електрофізичними параметрами, а також для різних типів заданої амплітудної діаграми.

The investigation of radiative performances and optimization of parameters for linear waveguide antenna array using the various on the accuracy mathematical models is performed. The complex excitation coefficients of separate waveguides are the objective parameters. The optimization of used functionals is carried out either by means of solving the corresponding nonlinear Euler equations or applying the direct gradient methods. The results of numerical modeling are shown for the arrays with various geometrical and electrophysical parameters, as well as for several types of the prescribed amplitude pattern.

### Вступ

Використання методів математичного моделювання для розроблення і впровадження у практику сучасних радіоелектронних засобів є невід'ємною частиною інженерних досліджень. Побудова систем автоматизованого проектування на підставі розроблених математичних моделей відповідних радіо та телекомунікаційних пристроїв значно здешевлює і пришвидшує їхне