



О. О. Нарушинська, В. М. Теслюк, Л. Є. Угрин

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ДАВАЧА ТИСКУ ЄМНІСНОГО ТИПУ

Розроблено модель оптимізації конструкції давача ємнісного типу, який виготовлено з використанням технологій мікроелектромеханічних систем (МЕМС). У процесі побудови моделі, як критерії, використано чутливість, напруження механічні та електричні. Обмеженнями виступають конструктивно-технологічні параметри. Побудована оптимізаційна модель є задачею багатокритеріальної оптимізації. У процесі розв'язання цієї задачі багатокритеріальної оптимізації використано метод головної компоненти. Головним критерієм багатокритеріальної оптимізації вибрано чутливість, а інші критерії переведені в обмеження оптимізаційної задачі. Здійснено оптимізацію конструктивних параметрів чутливого елемента давача тиску, виготовленого за МЕМС технологією. Досліджено залежність чутливості давача ємнісного типу та максимального зміщення мембрани від товщини чутливого елемента давача тиску. Проведено експерименти та виявлено вплив зміни початкової товщини тонкої пластини за незмінної цільової функції та обмеженнях. З отриманих результатів слідує, що затрати часу на розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації зростають зі збільшенням різниці між початковим та кінцевим значеннями товщини мембрани інтегрального давача ємнісного типу.

**Ключові слова:** мікроелектромеханічні системи; давач тиску ємнісного типу; задачі багатокритеріальної оптимізації; метод головної компоненти; модель.

**Вступ.** Мікроелектромеханічні системи є одним із найперспективніших напрямів розвитку в сучасній галузі мікроелектроніки (Narieralski et al., 2012). Причиною популярності цих пристроїв є їхні малі розміри, низький рівень енергоспоживання, висока надійність та функціональність, низька собівартість. Зазначені переваги привели до широкомасштабного використання МЕМС у різних галузях науки та техніки (Maluf et al., 2002). Водночас виникають задачі, які необхідно розв'язувати в процесі їх автоматизованого проектування. Однією з таких задач є задача оптимізації конструкцій МЕМС, які за своєю природою є гетерогенними пристроями.

**Аналіз літературних джерел та публікацій.** Аналіз літературних джерел та інтернет-ресурсів у сфері проектування та оптимізації конструкцій МЕМС (Krushnasamy et al., 2014, George LEU et al., 2004, Guangjun Liu Robust et al., 2015, Jane et al., 2013, Kanchan Sharma et al., 2007, Mourad Benmessaoud et al., 2013, Ravishankar Dudhe et al., 2015, Salvador Mendoza-Acevedo et al., 2012) дає змогу стверджувати, що знаходженню оптимальних параметрів конструкцій МЕМС із зазначеними у технічному завданні характеристиками і покращенням ефективності проектування є актуальним завданням сьогодення та потребує врахування параметрів із різних галузей науки та техніки, технології їх виготовлення,

конструктивні особливості та мікронні розміри (Teslyuk et al., 2015).

**Мета дослідження** полягає у розв'язанні задачі параметричного синтезу на основі розробленої математичної моделі оптимізації конструкції ємнісного давача тиску за критерієм чутливості, яка ґрунтується на розв'язанні задачі багатокритеріальної оптимізації з використанням методу головної компоненти.

**Принцип дії ємнісного давача тиску.** Приклад спрощеної конструкції давача ємнісного типу зображено на рис. 1.

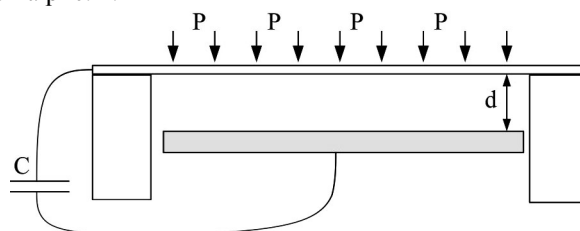


Рис. 1. Спрощена конструкція ємнісного давача тиску

Чутливим елементом ємнісного давача тиску є конденсатор, що має рухомий електрод-мембрану. Зазор між пластинами такого конденсатора є змінним завдяки зміщенню або прогину під дією прикладеного тиску рухомого електрода відносно нерухомого (Denysyuk et al., 2009). Принцип роботи зазначених давачів тиску цього

### Інформація про авторів:

**Нарушинська Ольга Олександрівна**, аспірант, кафедра систем автоматизованого проектування. Email: narushynska@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5974-9310>

**Теслюк Василь Миколайович**, д-р техн. наук, професор, кафедра систем автоматизованого проектування.

Email: vasyt.teslyuk@gmail.com, vasyt.m.teslyuk@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-5974-9310>

**Угрин Леся Євгенівна**, ст. викладач, кафедра інформаційних систем і технологій. Email: uhlesya@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-6137-313X>

**Цитування за ДСТУ:** Нарушинська О. О., Теслюк В. М., Угрин Л. Є. Оптимізація конструкції давача тиску ємнісного типу. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 1. С. 98–101.

**Citation APA:** Narushynska, O. O., Teslyuk, V. M., & Ugrin, L. E. (2019). Optimization Design Capacitive Pressure Sensors. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(1), 98–101. <https://doi.org/10.15421/40290121>

типу базується на зміні ємності конденсатора залежно від прикладеного навантаження до одного з електродів (тонкої пластини). Інший електрод у цьому випадку, є нерухомим.

**Математична модель критерія оптимізації конструкції давача тиску ємнісного типу.** Особливістю МЕМС є те, що вони є гетерогенними пристроями. Тому в процесі їх автоматизованого проектування необхідно враховувати цю специфіку. Зокрема ємнісний МЕМС давач тиску володіє механічною та електричною складовими, а його чутливість в математичному виді визначаються як:

$$S_{mechanical} = \frac{\Delta h}{\Delta P}, S_{electrical} = \frac{\Delta C}{\Delta h}, \quad (1)$$

де:  $\Delta P$  – зміна тиску,  $\Delta h$  – зміна зміщення тонкої пластини конденсатора,  $\Delta C$  – зміна електричної ємності ( $\Delta C = C_1 - C_0$ ).

Відповідно, чутливість ємнісного давача тиску дорівнює наступному виразу:

$$S = S_{mechanical} \cdot S_{electrical} = \frac{\Delta h}{\Delta P} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta h} = \frac{\Delta C}{\Delta P}. \quad (2)$$

Отже, вираз (2) є базовим для побудови цільової функції оптимізаційної задачі. Діаметр круглої пластини давача набагато більший за її товщину, відповідно будемо вважати, що  $w(r)$  дорівнює максимальному зміщенню. Тому використаємо наступний вираз для визначення зміщення:

$$w_{max} = \frac{3}{16} P \frac{(1-\nu^2) R^4}{E h^3}, \quad (3)$$

де:  $R$  – радіус пластини ємнісного давача тиску;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу пружного елемента;  $E$  – модуль Юнга матеріалу тонкої пластини;  $P$  – прикладене навантаження до пружного елемента давача;  $h$  – товщина тонкої пластини.

Оскільки максимальні напруження зазвичай зосереджуються при  $r = R$ , тоді вираз для визначення напружень запишемо в такій формі:

$$\sigma_r(R) = \frac{3}{4} P \frac{R^2}{h^2} (1+\nu), \quad \sigma_t(R) = \frac{3}{4} P \frac{R^2}{h^2} \nu. \quad (4)$$

Окрім цього, існують певні обмеження конструкторського і технологічного характеру, які необхідно враховувати в процесі розв'язання задачі параметричного синтезу. Будь-який інтегральний пристрій займає певну площу і в процесі оптимізації потрібно врахувати цю особливість. Тобто площа давача, що проектується, не повинна перевищувати заданого значення  $A \leq A_{max}$ .

Для підвищення чутливості давача потрібно зменшити товщину тонкої пластини. Отож, обмеження для оптимізаційної задачі, а саме: технологічне обмеження, тобто товщина пластини не може бути меншою певного значення  $t \geq t_{min}$ , а також товщина має бути набагато меншою за найменший лінійний розмір мембрани  $t \ll L$ . Проте зміщення призводить до утворення напружень, які не мають перевищувати максимально можливе значення для витраченого матеріалу тонкої пластини  $\sigma_x \leq G_{max}$  і  $\sigma_y \leq G_{max}$ .

Можливість появи напруги пробією діелектрика потребує обмеження на відстань між пластинами давача ( $\approx 3000000$  В/м в повітрі). Це породжує наступне обмеження типу  $0 \leq U \leq 3 \cdot 10^6 (d - \Delta d)$ .

Експериментально доведено (Lisovskiy et al., 2000), що для розмірів щілини між пластинами конденсатора менше 5 мкм крива напруги пробією має наступний вигляд (рис. 2). Враховуючи цю особливість для такого типу щілини, пробій настане у разі напруги, близькій  $E_d \approx 10^8$  В/м і, відповідно, необхідно модифікувати наведене вище обмеження:  $0 \leq U \leq 2 \cdot 10^8 (d - \Delta d)$ .

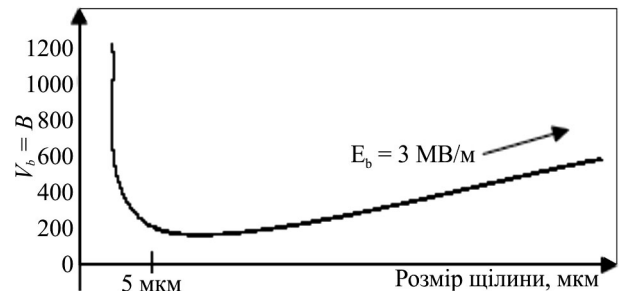


Рис. 2. Графік залежності напруги пробією від розміру щілини між пластинами мікропристрою

Тому в кінцевому випадку необхідно розв'язати оптимізаційну задачу, де потрібно знайти максимум чутливості ємнісного мікродавача тиску:

$$\max S(t, L, \Delta d, U, \sigma_x, \sigma_y), \quad (5)$$

після виконання таких обмежень:

$$A \leq A_{max}, t \geq t_{min}, t \ll L,$$

$$\sigma_x \leq k_1 G_{max}, \sigma_y \leq k_2 G_{max}, \quad (6)$$

$$0 \leq U \leq 2 \cdot 10^8 (d - \Delta d),$$

де  $k_1, k_2$  – коефіцієнти запасу ( $1,1 \leq k_1, k_2 \leq 1,5$ ).

Відповідно, модель оптимізаційної задачі визначаємо виразами (5) та (6).

**Метод головної компоненти.** Задача оптимізації конструкції давача тиску ємнісного типу є задачею багатокритеріальної оптимізації, де необхідно максимізувати чутливість, мінімізувати механічні напруження та напругу пробією. Окрім цього, в процесі оптимізації необхідно враховувати технологічні та конструктивні параметри. У цьому випадку маємо справу з механічними й електричними параметрами мікродавача, які поєднати в одній моделі надзвичайно важко. Для розв'язання задачі використано метод головної компоненти. Ідея методу полягає у тому, що узагальнений критерій зв'язується з одним із критеріїв, що вибраний в ролі основного (головного), а на основі інших критеріїв необхідно побудувати обмеження. У цьому випадку за головним показником реалізується критерій оптимальності, за іншим – придатності.

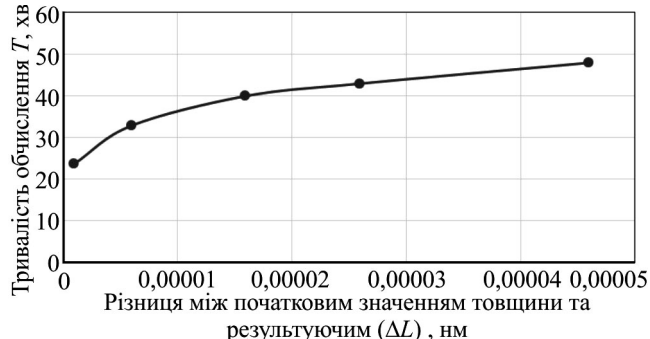
Отже, одним з основних параметрів ємнісного давача тиску є його чутливість, яку визначають як відношення приросту вихідного параметра до приросту вхідного. Відповідно, головним критерієм оптимізації обрано чутливість, а інші критерії переведено обмеження оптимізаційної задачі.

**Особливості розв'язання оптимізаційної задачі.** У процесі розв'язання задачі оптимізації (5), (6) можна скористатися виразами (1–4). Водночас мікронні розміри, специфіка МЕМС, необхідність врахування нелінійностей створює проблеми та неточності під час отримання вихідних результатів.

Геометричні параметри проектованого виробу для тонкої пластини: радіус 3000 мкм, товщина 100 мкм. Матеріалом моделі обрано Si. До верхньої поверхні пластини прикладемо тиск  $1e6$  Па, до нижньої пласти-

ни – атмосферний тиск, а бокові стінки повинні бути жорстко защемлені.

**Результати та їх аналіз.** Проведено вичислювальні експерименти, в яких змінювалася початкова товщина пластини, а обмеження та цільова функція при цьому залишаються незмінними. За результатами досліджень побудовано графік залежності тривалості обчислення  $T$  від початкового рішення, а результати зображено на рис. 3 та наведено в табл. 1.



**Рис. 3.** Графік залежності тривалості обчислення  $T$  від початкового рішення оптимізаційної задачі

**Табл. 1.** Тривалість обчислення залежно від початкового рішення

№ з/п	Початкове значення товщини пластини, нм	Обчислене значення товщини пластини, нм	$\Delta L$ , нм	Час обчислення, хв
1	7,50E-05	7,41E-05	9,24E-07	23,64
2	8,00E-05	7,41E-05	5,92E-06	32,85
3	9,00E-05	7,41E-05	1,59E-05	40
4	1,00E-04	7,41E-05	2,59E-05	43
5	1,20E-04	7,41E-05	4,59E-05	48

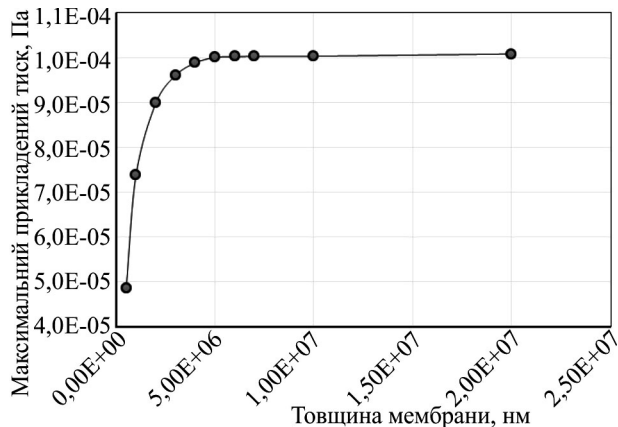
З рис. 3 можна зробити висновок, що початкове рішення істотно впливає на тривалість обчислення. Тому важливо, які параметри задаються під час розв'язання задачі багатопараметричної оптимізації. З отриманих результатів слідує, що найкращим початковим рішенням для мінімізації затрат часу є рішення, близьке до оптимального. Затрати часу на розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації зростають зі збільшенням різниці між початковим та кінцевим значеннями товщини мембрани.

Окрім цього, проведено експерименти, що показують залежність товщини мембрани давача від прикладеного тиску. Обмеження та цільова функція при цьому залишаються незмінними. Результати зображено на рис. 4 та у табл. 2.

З отриманих результатів слідує, що зі збільшенням прикладеного тиску зростає оптимальне значення товщини мембрани.

**Табл. 2.** Товщина мембрани залежно від прикладеного тиску

№ з/п	Максимальний тиск, Па	Товщина мембрани, нм
1	2,00E+07	1,0100E-04
2	1,00E+07	1,0050E-04
3	7,00E+06	1,0046E-04
4	6,00E+06	1,0040E-04
5	5,00E+06	1,0020E-04
6	4,00E+06	9,9000E-05
7	3,00E+06	9,6200E-05
8	2,00E+06	9,0000E-05
9	1,00E+06	7,4000E-05
10	5,00E+05	4,8700E-05



**Рис. 4.** Графік залежності товщини мембрани від прикладеного тиску

**Висновки.** Розроблено модель оптимізації конструкції давача тиску ємнісного типу, яка ґрунтується на розв'язанні задачі багатокритеріальної оптимізації. Отримані результати досліджень дають змогу стверджувати, що тривалість розв'язання задачі оптимізації за допомогою системи автоматизованого проектування прямо пропорційна різниці між початковим та результуючим значеннями товщини пластини. Обмеження оптимальної товщини пластини залежать від електричної напруги пробою та механічних напружень пружного елемента ємнісного давача тиску. Окрім цього, виявлено залежність між прикладеним тиском та товщиною пластини: оптимальне значення товщини мембрани збільшується у разі зростання навантаження.

## Перелік використаних джерел

- Bao, M.-H. (2004). Micro mechanical transducers: pressure sensors, accelerometers and gyroscopes. *Handbook of sensors and actuators*, 8, 10–12. (2nd ed.). Elsevier, Amsterdam [u.a.].
- Benmessaoud, Mourad, & Nasreddine, Mekkaia Maaza. (2013). *Optimization of MEMS capacitive accelerometer*. Received: 1 December 2011. Accepted: 15 January 2013. Published online: 1 March 2013. This article is published with open access at Springerlink.com.
- Denysyuk, P., Teslyuk, V., & AlOmari, T. A., & Teslyuk, T. (2009). Development and study of subsystem for solution of tasks of multicriterial optimization. *Proceedings of the 5th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design. (MEMSTECH'2009)*, (pp. 166–167). Polyana, Lviv, Ukraine.
- Dudhe, Ravishankar, & Ayyalusamy, Sumathi. (2015). COMSOL Multiphysics based simulation and optimization of residual stress effect in MEMS array based actuator. *Manipal International Conference on Technology Management MiCTM*.
- Guangjun, Liu Robust, Feng, Yang, Xiaofan, Bao, & Tao, Jiang. (2015). Optimization of a MEMS Accelerometer Considering Temperature Variations, *15*(3), 6342–6359
- Jane, E., & Valentine, B. S. (2013). Modeling and optimization of a MEMS membrane-based acoustic-wave biosensor (Mathematical Sciences). *Carnegie Mellon University Pittsburgh*, (pp. 227–230), Pennsylvania.
- Kanchan, Sharma, Macwan, Isaac G., Zhang, Linfeng, Hmurcik, Lawrence, & Xiong, Xingguo. (2007). Design Optimization of MEMS Comb Accelerometer. *New England American Society for Engineering Education Conference*, (pp. 42–45).
- Krushnasamy, V. S., & Juliet, A. Vimala. (2014). Design parameter optimization based on artificial bee colony (abc) algorithm for MEMS accelerometers. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology 20th February*, *60*(2), 123–128.
- Leu, George, Simion, Stefan, & Serbanescu, Alexandru. (2004). MEMS Optimization using genetic algorithms. *Semiconductor Conference, (CAS 2004)*, (pp. 32–37), Proceedings, 2004. International.

- Lisovskiy, V. A., Yakovin, S. D., & Yegorenkov, V. D. (2000). Low-pressure gas breakdown in uniform dc electric field. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 33(21), 2722–2730.
- Maluf, Nadim. (2002). An introduction to microelectromechanical systems engineering. *Measurement Science and Technology*, 13(2), 229.
- Mendoza-Acevedo, Salvador, Reyes-Barranca, Mario Alfredo, Vázquez-Acosta, Edgar Norman, Moreno-Cadenas, José Antonio, & González-Vidal, José Luis. (2012). *Release Optimization of Suspended Membranes in MEMS*. InTechOpen.
- Napieralski, A., Napieralska, M., Szermer, M., & Maj, C. (2012). The evolution of MEMS and modeling methodologies. *International Journal for computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 31, 1458–1469.
- Powell, M. J. D. (1994). A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation in *Advances in Optimization and Numerical Analysis*. *Kluwer Academic: Dordrecht*, 51–67.
- Sang-Won, Park Chris D. McCoy, Mehr, Alexander, Kuypers, Jan H. & Pisano, Albert P.. (2008). Design Optimization of a MEMS Magneto-Static Linear Actuator. *IMAC-XXVI: Conference & Exposition on Structural Dynamics*.
- Teslyuk, V., Melnyk, M., & Kernyskyy, A., & Matviichyk, K., & Denysyuk, P., (2015). Modeling and Analysis of Three-Dimensional Design of the Mixer Considering Production Technology. *Proceeding of the XIth International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*. (MEMSTECH'2015), (pp, 42–44). Polyana, Lviv, Ukraine.

**O. O. Narushynska, V. M. Teslyuk, L. E. Uhryn**  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

## OPTIMIZATION DESIGN CAPACITIVE PRESSURE SENSORS

A design optimization model of a capacitance-type sensor was developed. The latter is manufactured using the technology of microelectromechanical systems (MEMS). In the process of building the optimization model, the sensitivity, mechanical stress, and voltage breakdown were used as criteria. The optimization task requires the sensor's sensitivity to be maximized whereas the mechanical stress alongside the voltage breakdown to be minimized. The limitations for this task have proven to be design and manufacturing parameters, specifically the thickness of a thin plate, a material that the sensitive element is made of, the area and the technological constraints on the integrated techniques for manufacturing the device. The constructed optimization model is found to be an issue of the multicriteria optimization, and, therefore, in the process of solving it, the main component method was used. The paper presents an algorithm to apply the said method. Sensitivity was chosen as the main criterion for multicriteria optimization, and other criteria were converted to the range of limitations encountered in the optimization problem. A software tool has been developed that lends itself to solve multicriteria optimization problems using the main component technique. For software engineering, Java was used, which makes it platform-independent. The design parameters of the sensitive element of the MEMS-based pressure sensor have been optimized. The dependence of the capacitance-type sensor's sensitivity together with the maximum membrane offset on the thickness of the sensitive element of the sensor of capacitive pressure was studied. A number of computable experiments were made, culminating in identifying the impact of change in the initial thickness of the thin plate with the unchanged objective function and constraints. The findings are presented as graphs, from which it can be concluded that the time spent on solving the multicriteria optimization problem increases with the difference between the initial and final values of the membrane thickness of the integral capacitance-type sensor.

**Keywords:** microelectromechanical systems; pressure sensor of capacitive type; tasks of multiobjective optimization; method of main component; model.