

УДК 621.3.082

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ЕТАПІВ КОРПУСУВАННЯ МЕМС ЄМНІСНИХ ДАТЧИКІВ ТИСКУ НА ПАРАМЕТРИ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ

Д.т.н. І. Ш. Невлюдов<sup>1</sup>, к.т.н. І. В. Боцман<sup>1</sup>, к.т.н. О.М. Замірець<sup>2</sup>, С. І. Гресько<sup>1</sup>

1. Харківський національний університет радіоелектроніки

2. Державне підприємство Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, м.Харків

*У статті наведено результати дослідження термічного впливу на чутливу мембрану МЕМС ємнісного датчика тиску, що відбувається на етапі його пакування у корпус. Наведено аналіз структури й особливостей функціонування зазначених датчиків з прямокутною мембраною, їх математична модель функціонування та імітаційна модель.*

*В статті приведені дослідження термічного впливу на чутливу мембрану МЕМС ємнісного датчика тиску, що відбувається на етапі його пакування у корпус. Наведено аналіз структури й особливостей функціонування зазначених датчиків з прямокутною мембраною, їх математична модель функціонування та імітаційна модель.*

*In this article the results of study of the thermal effect on the capacitive pressure sensor sensitive MEMS membrane that occurs at the stage of its packaging in the body are presented. An analysis of the structure and features of the operation of this sensor with a rectangular membrane, mathematical model of its operation and simulation model are given.*

**Ключові слова:** ємнісний датчик тиску, МЕМС, теплове розширення, механічне напруження, математична модель, імітаційна модель.

## Вступ

МЕМС датчики тиску знаходять широке застосування у багатьох галузях людського життя – у автоматизованих виробничих системах різноманітного призначення, у побутових приладах, космічних та авіаційних системах, у медицині тощо. Це обумовлено їх мініатюрними розмірами та функціональними перевагами у порівнянні з аналогічними рішеннями [1].

Серед широкого різноманіття МЕМС датчиків тиску у виробничій галузі все частіше застосовуються саме ємнісні датчики. Вони є універсальними, частково завдяки механічній простоті, тому можуть використовуватися у складних умовах. Ємнісні датчики можна використовувати для вимірювання абсолютного, калібрувального, відносного або диференціального тиску. Вони можуть мати дуже низьке енергоспоживання, оскільки через елемент датчика у ньому немає постійного струму. Пасивні датчики такого типу не потребують джерела живлення – ці атрибути роблять їх прийнятними для пристроїв малої потужності, таких як віддалені або IoT-датчики. Такі датчики є більш надійними та здатними впоратись з більшими значеннями надлишкового тиску, що робить їх більш придатним для промислових умов [2, 3].

Етап розміщення МЕМС датчиків у корпус є одним з найважливіших етапів їх виробництва. При цьому використовується технологія термічного

скріплення, яка вимагає температури значно вищої, ніж допустима для датчика робоча температура. Оскільки кремній, з якого виготовляють чутливі мембрани, і сталь (матеріал корпусу) мають різні коефіцієнти теплового розширення, конденсатор і основна мембрана стискаються з різною швидкістю, коли пристрій охолоджується назад до робочої температури. Це призводить до механічних напружень на межі між двома матеріалами, що може спричинити додаткові відхилення мембрани, а отже, внести критичні похибки у роботу датчика.

## Аналіз структури та принципів роботи МЕМС ємнісного датчика тиску

Ємнісні датчики тиску вимірюють тиск, виявляючи зміни в електричній ємності, викликані рухом діафрагми. Основою такого датчика є конденсатор, який складається з двох паралельних провідникових пластин, розділених невеликим зазором. Його ємність визначається з виразу (1):

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_r$  – діелектрична постійна матеріалу між пластинами (для вакууму – 1);

$\varepsilon_0$  – електрична постійна;

$S$  – площа пластин;

$d$  – відстань між пластинами.

Зміна ємності може бути виміряна за допомогою підключення датчика в частотно-залежному колі, наприклад, генераторі або контурі ємності LC. В обох випадках резонансна частота кола буде змінюватися у міру зміни ємності з тиском. Зміна значення будь-якої зі змінних призведе до відповідної зміни ємності. Зазвичай один електрод – це діафрагма, чутлива до тиску, а другий – фіксований. Кремній є одним з найбільш поширених матеріалів для виготовлення пластин мембран у таких датчиках.

Діелектрична постійна матеріалу між пластинами може змінюватися в залежності від тиску чи температури, і це також може бути джерелом помилок. Відносна проникність повітря та більшості інших газів збільшується з тиском, тому це трохи збільшить зміну ємності з тиском. У цьому відношенні ідеально діють абсолютні датчики тиску, які мають вакуум між пластинами.

Більш лінійний датчик може бути побудований за допомогою «сенсорного режиму», коли діафрагма контактує з протилежною пластиною протягом нормального робочого діапазону (рис. 1). Геометрія цієї структури призводить до отримання більш лінійного вихідного сигналу.

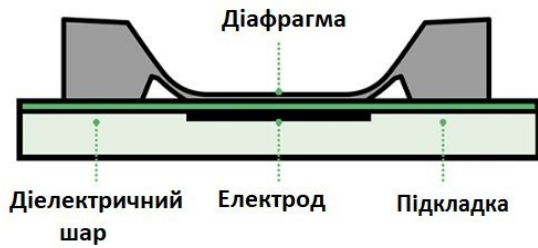


Рис. 1. Емнісний датчик тиску із «сенсорним режимом»

Цей тип датчиків також більш надійний і здатний впоратися з більшим надлишковим тиском. Це робить його більш придатним для промислових умов. Однак ця структура більш схильна до гістерезису через тертя між двома поверхнями.

Електроніку для вимірювання сигналу у таких датчиках потрібно розмішувати близько до чутливого елемента, щоб мінімізувати вплив забрудненої ємності.

Оскільки вони можуть бути включені як компоненти у високочастотні налаштовані схеми, емнісні датчики цілком підходять для бездротового вимірювання.

#### Математична модель роботи МЕМС емнісного датчика тиску з прямокутною мембраною

Зазвичай геометричні конструкції діафрагми МЕМС емнісного датчика тиску – це квадратні, прямокутні та круглі конфігурації. В усіх випадках максимальний прогин спостерігається в центрі пластини. Відповідно до теорії пластин [4, 5] за Кріггером рівняння, яке описує відхилення мембрани з тиском, що діє нормально на її поверхню, задається формулою (2) для випадку прямокутної форми пластини:

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2\alpha \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} = \frac{P}{D}, \quad (2)$$

де  $W$  – відхилення мембрани за  $(x, y)$  координатами;

$\alpha$  – числовий коефіцієнт, що характеризується відношенням довжини пластини до її ширини (або ширини до довжини);

$P$  – диференціальний тиск, що прикладається до пластини;

$D$  – жорсткість пластини, що визначається за виразом (3):

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (3)$$

де  $E$  – модуль Юнга;

$h$  – товщина діафрагми;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Максимальне відхилення за нормальних умов відбуватиметься саме в центрі діафрагми, що можна описати виразом (4):

$$W_{\max} = 0,00674 \frac{Pa^3}{D}, \quad (4)$$

де  $a$  – довжина діафрагми [6].

Під час термічного впливу на етапі пакування мембрана змінює свої розміри, які можуть, гіпотетично, не повернутися до початкового стану за рахунок механічних напружень, котрі виникають у мембрані та характеризуються її тепловим розширенням [7]. Коефіцієнт теплового лінійного розширення можливо визначити за виразом (5):

$$\alpha = \frac{1}{a_0} \cdot \frac{da}{dT}, \quad (5)$$

де  $a_0$  – початкове значення довжини мембрани;

$T$  – зміна температури, що викликала зміну розміру мембрани.

Згідно до цього, для оцінювання такої напруги доцільно використовувати вираз (6) [8]:

$$\sigma = E(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T, \quad (6)$$

де  $\sigma$  – механічна напруга у діафрагмі, що викликана різницею між коефіцієнтами теплового розширення;

$\alpha_1, \alpha_2$  – середні коефіцієнти теплового лінійного розширення мембрани та корпусу;

$\Delta T$  – різниця між температурою отримання, за якої виконується пакування, та робочою температурою датчика після охолодження.

Згідно до цього, рівняння, що регулює відхилення пластин із тиском, що діє нормально до її поверхні, з урахуванням можливих похибок, які виникають за рахунок механічних напружень, можливо описати виразом (7):

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2\alpha \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} - W_{\sigma} = \frac{P}{D}, \quad (7)$$

де  $W_{\sigma}$  – значення відхилення мембрани, яке сталося внаслідок виникнення механічної напруги під час пакування МЕМС датчика у корпус. Воно визначається за виразом (8):

$$W_{\sigma} = a_0 - a_{\lambda}, \quad (8)$$

де  $a_{\lambda}$  – значення довжини мембрани після охолодження датчика до робочої температури.

#### Імітаційна модель роботи МЕМС емнісного датчика тиску з прямокутною діафрагмою

На основі наведених моделей у середовищі COMSOL Multiphysics версії 5.3 із застосуванням МЕМС модуля була розроблена імітаційна модель МЕМС емнісного датчика тиску з «сенсорним режимом». Датчик складається з тонкої камери, герметизованої в умовах високого вакууму, яка виступає в якості діелектрика в конденсаторі. Він відділений від навколишнього повітря тонкою мембраною, яка електрично ізольована від заземленого корпусу датчика. Прогини мембрани досліджувались як через зміни тиску навколишнього середовища, так і через теплові напруження, викликані

неправильним вибором корпусу. В обох випадках відхилення виявляються шляхом вимірювання зміни ємності між мембраною та землею.

Відповідно до того, що конструкція такого датчика є симетричною, дослідження проводились на моделі, що імітує один квадрант конструкції (рис. 2).

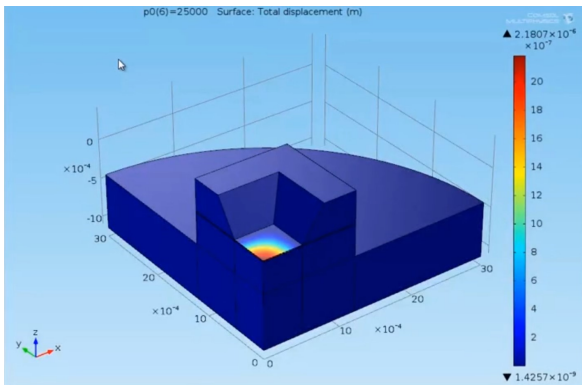


Рис. 2. Імітаційна модель MEMC ємнісного датчика тиску

Під час дослідження моделі були отримані графічні залежності ємності мембрани як функції прикладеного тиску, як з урахуванням механічної напруги, що виникає на етапі корпусування, так і без неї (рис. 3). Можна бачити, що отримані залежності значно відрізняються для досліджених випадків.

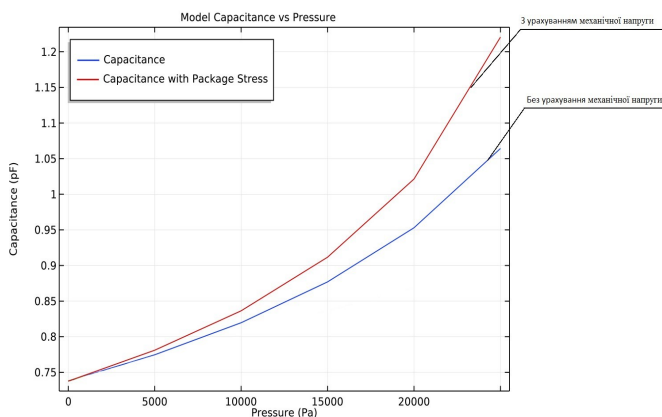


Рис. 3. Результати дослідження імітаційної моделі

### Висновки

У роботі наведені результати аналізу структури та принципів роботи MEMC ємнісного датчика тиску. Представлено розроблену математичну модель регулювання відхилення мембрани з тиском, що діє на її поверхню, яка дозволяє враховувати значення відхилення мембрани внаслідок виникнення механічної напруги під час пакування MEMC датчика у корпус.

Розроблено імітаційну модель у середовищі COMSOL Multiphysics. За результатами її дослідження отримані графічні залежності ємності мембрани як з урахуванням механічної напруги, що виникає на етапі корпусування, так і без неї. Аналіз отриманих результатів свідчить про достатньо великі відмінності для обох випадків (0,16 пФ за тиску у 25 кПа), що вказує на необхідність урахування похибок зазначеної етимології для адекватної роботи ємнісних MEMC датчиків тиску

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. *An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)*. PRIME Faraday Partnership, Jan., 2002. [Електронний ресурс]: Prime Faraday Partnership's Technology Watch website. Режим доступу ([https://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology\\_review/introduction-to-mems.pdf](https://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology_review/introduction-to-mems.pdf)); дата звернення [17.09.2019].
2. *MEMS pressure sensors* [Електронний ресурс]: Avnet Abacus Режим доступу (<https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/mems/>); дата звернення [04.10.2019].
3. Timoshenko, S., *Theory of Plates and Shells* / S. Timoshenko, S. Woinowsky-Kriger/ – Mc. Graw-Hill, 1959. – 575 p.
4. Eshwaran, P., *MEMS Capacitive Pressure sensors: A review on Recent Development and Prospective* / P. Eshwaran, S. Malarvizhi // *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, Vol. 5, No. 3, Jun.-Jul. 2013. – pp. 2734-2746.
5. Balavalad, B. Kirankumar. *A Critical Review of MEMS Capacitive Pressure Sensors* / Kirankumar B. Balavalad, B.G. Sheeparamatti // *Sensors & Transducers*, Vol. 187, Issue 4, April 2015. – pp. 120-128.
6. Синева, Л.С. *Согласование коэффициентов термического расширения при электростатическом соединении кремния со стеклом* / Л.С. Синева, В.Т. Рябов // *Нано- и микросистемная техника*, № 5 (130), 2011. – С. 24–27.
7. Zemen, Y., *The impact of yield strength of the interconnector on the internal stress of the solar cell within a module* / Y. Zemen, T. Prewitz, T. Geipel // *5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 2010*. – pp. 4073–4078.
8. *Capacitive Pressure Sensor* [Електронний ресурс]: COMSOL Multiphysics. Режим доступу (<https://www.comsol.com/blogs/video-tutorial-capacitive-pressure-sensor/>); дата звернення [22.10.2019].
9. Kaajakari, V. *Practical MEMS: Analysis and Design of Microsystems, MEMS Sensors, Electronics, Actuators, RF MEMS, Optical MEMS, and Microfluidic Systems* / V. Kaajakari // *Small Gear Publishing, Las Vegas, 2009*. – 484 p.