

Тарік (Мох'д Тайсір) Алі Аль Омарі, аспірант, В.М.Теслюк, к.т.н., доц., М.Р.Мельник, аспірант, кафедра САП, НУ "Львівська політехніка"

АЛГОРИТМІЧНІ МОДЕЛІ АКУСТИЧНИХ МІКРОФОНІВ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ МЕМС НА КОМПОНЕНТНОМУ РІВНІ

В статті представлено розроблені моделі акустичних елементів МЕМС на основі теорії тонких пластин і наведені результати їх аналізу. Побудовані моделі дають змогу врахувати нелінійні, нестационарні процеси та ізотропію матеріалу пружного елемента.

The developed models of acoustic elements of MEMS are presented on the basis of theory of laminas and the results of their analysis are presented in the article. The built models enable to take into account nonlinear, transients and isotrophia of material of resilient element.

Вступ

Широке впровадження інформаційних технологій аналізу та синтезу мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [1] відкриває перспективи створення та впровадження в різноманітних галузях народного господарства та оборонного комплексу принципово нових виробів здатних вирішувати традиційні задачі контролю та управління роботою різноманітних пристроїв, на якісно новому технологічному рівні з використанням інтегрально-комплексних технологій.

Проведений аналіз [2-4] математичного забезпечення для розроблення акустичних мікрофонів (АМ) виготовлених за МЕМС технологіями дає змогу стверджувати про відсутність математичних моделей саме для багаторівневої розробки акустичних мікропристроїв в інтегральному виконанні, тому дана стаття є актуальною.

1. Розроблення математичних моделей компонентного рівня розробки МЕМС для визначення зміщень та напружень

Алгоритмічні моделі акустичних мікрофонів пластинчастих конструкцій включають наступну послідовність кроків при визначенні вихідних параметрів, а саме: визначення зміщення пружного елемента; визначення напружень у конструкції пружного елемента мікрофона та визначення зміни вихідного електричного параметра.

Базовим елементом акустичних мікрофонів пластинчастої конструкції є тонка пластина. З курсу теорії пружності відомо, що якщо товщина пластини є набагато менша за її лінійні розміри, то для опису поведінки, в даному випадку переміщень пружного елемента акустичного елемента МЕМС, можна використати теорію тонких пластин [5].

1.1. Стаціонарні моделі для визначення зміщень тонкої пластини

Для опису переміщень тонкої пластини використаємо наступне рівняння в частинних похідних (РЧП), при цьому, будемо вважати, що розподіл сили по пластині є рівномірний, а її краї - жорстко защемлені [5-6]:

$$\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} = \frac{P}{D}, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (1)$$

де $w(x,y)$ – прогини пластини (вертикальні переміщення пластини); x, y – осі, які формують координатну площину xu , що рівновіддалена від основ пластини; h – товщина пластини; E – модуль пружності матеріалу пластини; ν – коефіцієнт Пуассона матеріалу пружного елемента; P – інтенсивність розподіленого на поверхні пластини навантаження.

При необхідності визначення напружень в пластині використовується наступна система РЧП:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right), \\ \sigma_y &= -\frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} \right), \\ \sigma_{xy} &= -\frac{Eh}{2(1+\nu)} \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x \partial y} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

де σ_x - напруження в напрямку осі x ; σ_y - напруження в напрямку осі y ; σ_{xy} - напруження в напрямку площини xu .

Крайові умови (КУ) на границі пружного елемента, які слід додати до вищенаведених рівнянь (1-2), щоб завершити остаточне формулювання крайової задачі по визначенню переміщень і напружень наступні:

$$w|_{\Gamma P} = w_0 = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial n} \Big|_{\Gamma P} = 0, \quad (3)$$

де n – нормаль до границі області моделювання.

Розподіл зміщень у тонкій пластині круглої форми (ТПКФ) можна описати з допомогою наступного диференціального рівняння:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \left(\frac{\partial^2 w(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w(r)}{\partial r} \right) = \frac{P(r)}{D}, \quad (4)$$

де r – поточне значення радіусу.

Для визначення напружень у ТПКФ слід скористатися наступними РЧП:

$$\sigma_r(r, \varphi) = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \nu \frac{\partial w}{\partial r} \right), \quad \sigma_\varphi(r, \varphi) = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(g \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right).$$

На завершення формалізації задач по визначенню зміщень та напружень в конструкціях пружних елементів АМ необхідно додати КУ (3).

1.2. Нестационарні моделі для визначення зміщень пружного елемента

Визначення деформацій та напружень в пластині використаємо наступне РЧП:

$$\frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial y^4} - \rho h \frac{\partial w^2(x, y, t)}{\partial t^2} = \frac{P(t)}{D}, \quad (4)$$

$$\sigma_x(t) = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial y^2} \right), \quad \tau_{xy}(t) = -\frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial x \partial y} \right),$$

$$\sigma_y(t) = -\frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial x^2} \right),$$

де $w(x, y, t)$ – прогини пластини.

До нестационарної вищенаведеної задачі необхідно дати крайові умови (3) та наступні:

$$\frac{\partial w(x, y, t=0)}{\partial t} = 0, \quad w(x, y, t=0) = 0.$$

Для ТПКФ зручніше використовувати такі РЧП з вищенаведеними КУ:

$$\frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial r^2} = \frac{Eh^3}{12\rho(1-\nu)} \left(\frac{\partial^4 w(r, t)}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3 w(r, t)}{\partial r^3} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial r^2} \right), \quad (5)$$

$$\sigma_r(r, \varphi) = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial r^2} + \nu \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \right),$$

$$\sigma_\varphi(r, \varphi) = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\nu \frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \right).$$

1.3. Математична модель для компонентного рівня розроблення з врахуванням анізотропії матеріалу пружного елемента акустичних МЕМС

Ряд кристалічних матеріалів, які використовують при виготовленні МЕМС є анізотропними. Тому для опису зміщень у таких пружних елементах слід використати наступне РЧП:

$$D_x \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^4} + 2(D_0 + 2D_{xy}) \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial y^2} = P, \quad (6)$$

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})}, \quad D_y = \frac{E_y h^3}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})},$$

$$D_0 = \frac{E_x v_{xy} h^3}{12(1 - v_{xy} v_{yx})}, \quad D_{xy} = \frac{G_{xy} h^3}{12},$$

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x}, \quad E_y = \frac{\tau_y}{\varepsilon_y}, \quad v_{xy} = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}, \quad g_{xy} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}, \quad \sigma_{xy} = \frac{\tau_y}{\varepsilon_y},$$

де E_x - модуль пружності матеріалу в напрямку осі x ;

E_y - модуль пружності матеріалу в напрямку осі y ;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ - елементи матриці тензора деформацій;

G_{xy} - тангенціальне напруження.

2. Моделі для визначення зміни вихідних електричних параметрів

2.1. Алгоритмічна математична модель для визначення зміни ємності

Кожна модель електростатичного пристрою (ЕП) потребує визначення величини ємності з високою точністю. Так, ємність в усіх розроблених ММ визначається через енергію W та напругу U , прикладену до ЕП [7]:

$$W = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 D(x, y, z) E(x, y, z) dx dy dz \approx \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n D(x_i, y_j, z_k) E(x_i, y_j, z_k) \omega_i \omega_j \omega_k,$$

$$C = 2W/U^2,$$

де $D(x_i, y_j, z_k), E(x_i, y_j, z_k)$ - значення вектора електричної індукції і напруженості електричного поля в точці з координатами x_i, y_j, z_k ; $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ - вагові коефіцієнти.

Розроблений алгоритм визначення ємності передбачає визначення розподілу електростатичного потенціалу, електричного поля та вектора електричної індукції в тривимірній області моделювання.

Математична модель визначення розподілу потенціалу в тривимірному випадку для однорідного середовища потребує розв'язання системи диференціальних РЧП з відповідними крайовими умовами на межі області моделювання та розділу двох середовищ:

$$\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial z^2} = 0, \quad k = 1, 2, 3, 4,$$

де φ_k - значення електростатичного потенціалу в k -й області; k - номер середовища з відповідним значенням діелектричної проникності.

Для визначення розподілу напруженості електричного поля в тривимірному випадку, необхідно розв'язати систему тривимірних рівнянь Пуассона з відповідними крайовими умовами $\Delta \varphi_k = -\vec{E}$, $\vec{D} = \varepsilon_k \vec{E}$, де \vec{D}

- вектор електричної індукції; ϵ_k - діелектрична проникність k -го середовища; \vec{E} - напруженість електричного поля.

2.2. Модель для визначення змін опору п'єзоелемента

При визначенні змін опору п'єзореzystора з врахуванням типу полікремнію і його орієнтації використовується наступна формула [8]: $\Delta R/R = \pi \sigma$, де σ - напруження, які виникають при дії тиску на пластину в області п'єзореzystорів; π - константи, які залежать від орієнтації пластини, питомого опору та типу провідності ($\pi = 12 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$).

Для того, щоб збільшити чутливість мікродавача, використовують поєднання кількох п'єзореzystорів, з'єднаних за містковою схемою [8]. Тому вихідна напруга визначається з наступного виразу: $U_{\text{вих.}} = \Delta R U_{\text{вх.}}$, де $U_{\text{вх.}}$ - вхідна напруга; R_1, R_2, R_3, R_4 - опори п'єзореzystорів.

3. Метод розв'язання крайових задач

При розв'язанні вищесформульованих АМ використано метод скінченних різниць (МСР)[9], який дає змогу врахувати нелінійні процеси, визначити вихідні параметри з високою точністю, контролювати точність вихідних результатів та анізотропію матеріалів.

Результати

Побудовані моделі дали змогу визначити вихідні параметри елементів МЕМС. Зокрема на рис. 1. наведено результати дослідження залежності максимальних напружень від товщини пружного елемента та максимальних напружень від діаметра пластини (рис. 2.).

На рис. 3. і рис. 4. зображено результати залежності зміщення від товщини та діаметра пружного елемента.

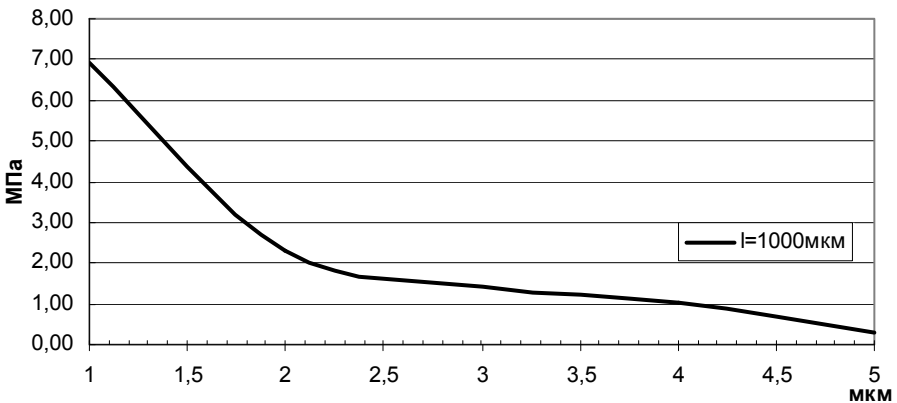


Рис. 1. Залежність максимальних напружень від товщини пластини

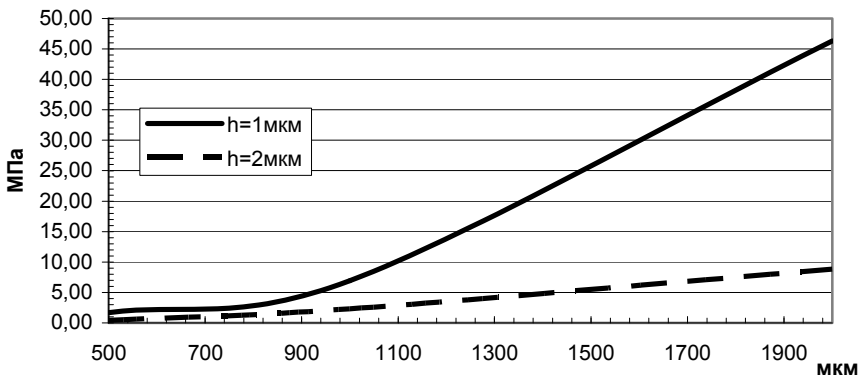


Рис. 2. Залежність максимальних напружень від ширини пластини

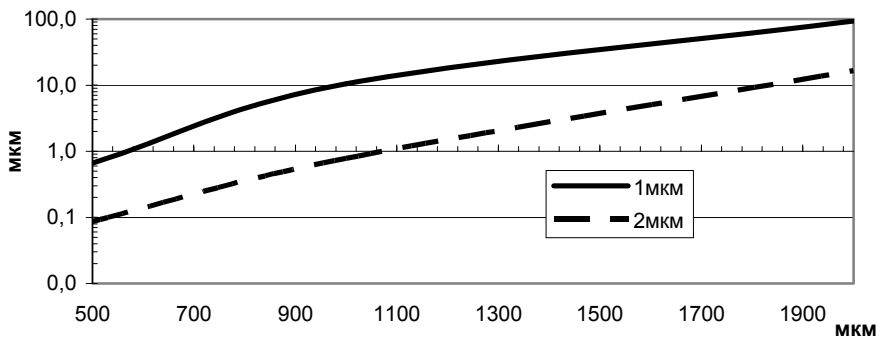


Рис. 3. Залежність зміщення від ширини пластини

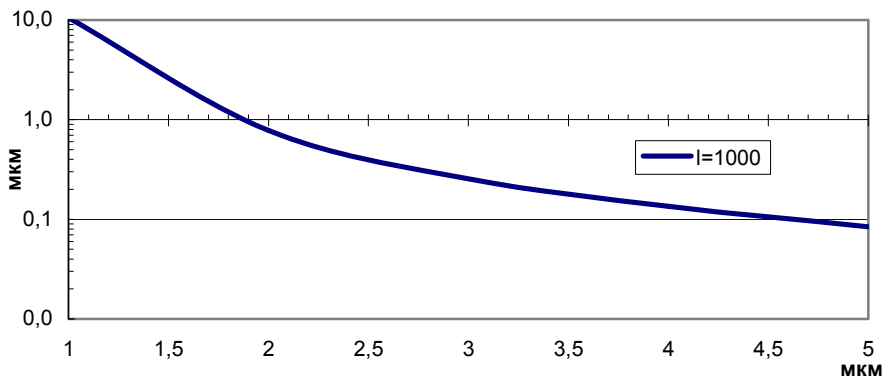


Рис. 4. Залежність зміщення від товщини пластини

Висновки

Побудовані алгоритмічні математичні моделі для компонентного рівні розробки АМ, що дасть змогу підвищити рівень автоматизації розробки елементів МЕМС. Розроблені ММ базуються на РЧП з використанням МСР, що дозволяє врахувати нелінійні та нестационарні процеси в конструкціях інтегральних пристроїв і анізотропію пружного елемента пластинчастих конструкцій МЕМС.

1. *Лысенко И.Е.* Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог: Изд. ТРТУ. – 2005. – 103 с.
2. *Horowitz S.B. et al.* AMEMS acoustic energy harvester // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2006. Vol. 16. P. 174-181.
3. *Allan R.* MEMS Microphone-Amp chips breaks acoustics ground // Electronic Design Online ID #5149. - 2003.
4. *Neumann J.J., Gabriel K.J.* CMOS-MEMS membrane for audio-frequency acoustic actuation // Sensors and actuators A: Physical. – 2001.- Article 3122.
5. *Подгорный А.Н., Марченко Г.А., Пустынников В.И.* Основы и методы прикладной теории упругости: Учеб. пособие для вузов. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 328 с.
6. *Писаренко Г. С.* Сопротивление материалов. Изд-во:Техника. –Киев.– 1967.– С.791.
7. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества: Учеб. Пособие для вузов.-10-е изд., испр.- М.: Наука. Гл. Ред. Физ.-мат. Лит., 1989. – 504 с.
8. *Клокова Н.П.* Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
9. *Вольнский Б.А., Бухман В.Е.* Модели для решения краевых задач. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960.–452с.

Поступила 16.02.2009р.

УДК 621.3

Ю.О.Головін, к.т.н., доц., ІСЗЗІ НТУУ «КПІ»

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ ЕМС РЕЗ

Вступ. Широке впровадження електротехнічних і радіоелектронних засобів (РЕЗ) приводить до зростання рівнів електромагнітних полів, які створюються ними в навколишньому просторі. Ці поля є завадами для інших подібних пристроїв, погіршуючи умови їхнього функціонування й знижуючи ефективність застосування. У цьому процесі неважко побачити характерні риси діалектичного розвитку - прогрес у даній області техніки став усе більше стримуватися негативними явищами, породженими її кількісним ростом. Нині в Таблиці розподілу смуг частот значиться тільки близько 40

166 © Ю.О.Головін