

**Асистент Безносик О.Ю., асистент Фіногенов О.Д.,  
ст. викладач Ладогубець Т.С., магістрант Ладогубець О.В.**

**Інститут прикладного системного аналізу НТУУ «КПІ»**

## **МЕТОД ОТРИМАННЯ СХЕМНИХ АНАЛОГІВ МАКРОМОДЕЛЕЙ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

### **Вступ**

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) є галуззю сучасної техніки, що швидко розвивається. Але на перешкоді стає майже повна відсутність сучасних засобів САПР, які б дозволяли проводити моделювання об'єктів, в яких проходять процеси різної фізичної природи. Більшість пакетів, які дозволяють проводити моделювання МЕМС, застосовують метод скінченних елементів, що призводить до отримання математичної моделі надвеликих розмірів. Тому актуальною задачею є отримання компактних макромоделей об'єктів та їх використання у єдиному засобі моделювання.

### **Постановка задачі**

Головною задачею, яку потрібно вирішити для отримання макромоделі МЕМС, є задача зменшення розмірності математичної моделі МЕМС при мінімальних або таких, що контролюються, втратах точності. На сьогодні існує декілька базових підходів для вирішення цієї проблеми.

Методи першої групи [1], або математичні методи, в якості вихідної інформації використовують математичну модель об'єкта, скорочення якої відбувається за рахунок виключення змінних, що слабо впливають, за допомогою відповідних математичних алгоритмів. Це різко обмежує розміри вихідних даних, а в підсумку не дає можливості отримати схемний аналог математичної моделі.

Методи другої групи [1], або гібридні методи, використовуючи таку ж саму інформацію в якості вхідних даних, розраховують  $Y$ -параметри об'єкта, що також обмежує розміри вихідних даних, але дозволяє отримати компактну, хоча й не дуже точну макромодель.

Методи третьої групи [1] базуються на використанні  $Y$ - $\Delta$  перетворення для послідовного виключення внутрішніх вузлів надвеликих

RLC схем, але потребують наявності вихідних даних у вигляді схемного аналога.

### Опис методу, що пропонується

Запропонований в роботі метод побудови схемних аналогів макромоделей MEMC (основні етапи наведено на рис. 1) у значній мірі позбавлений вказаних недоліків.

Вихідна модель MEMC у вигляді системи рівнянь в скінченних елементах формується за допомогою пакету ANSYS [2]. Потім, за допомогою програми mor4ansys [3], з ANSYS вибираються необхідні дані, та формується повний схемний аналог моделі MEMC. Після цього, за допомогою модифікованої процедури RLC скорочення формується схемний аналог макромоделі MEMC. На останньому етапі, за допомогою блока параметричної оптимізації пакету ALLTED [4], виконується уточнення окремих значень параметрів R, L та C елементів схемного аналога макромоделі MEMC з метою максимальної відповідності вихідних характеристик макромоделі MEMC характеристикам, отриманим за допомогою ANSYS.

Ефективність такого підходу досліджувалася на прикладах побудови ряду макромоделей механічних вузлів. Дослідження показали, що даний метод дозволяє отримувати схемні аналоги макромоделей механічних об'єктів з похибкою менше 2% порівняно з ANSYS. При цьому розмірність математичної моделі схемного аналога макромоделі механічного об'єкта може бути в десятки разів менша за розмірність математичної моделі, що отримана за допомогою ANSYS.



Рис. 1. Етапи побудови схемних аналогів макромоделей MEMC

## Приклад застосування методу

Розглянемо метод побудови схемних моделей механічних компонентів та їх подальше використання на прикладі задачі знаходження власних частот стрижня (рис. 2).

Конструкція, що розглядається, являє собою стрижень, що працює на розтягнення. Лівий кінець стрижня закріплений нерухомо, правий може рухатися вільно. Поточне положення стрижня визначається розподілом перерізів по його довжині  $u=u(x,t)$ .

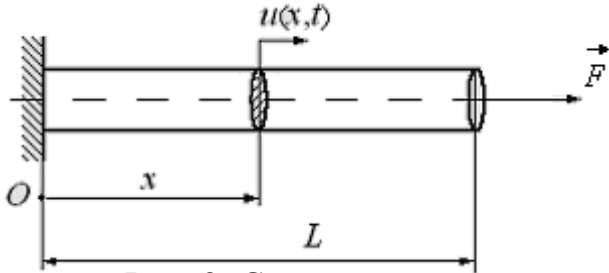


Рис. 2. Схема стрижня

Моделювання в ANSYS здійснювалося при таких параметрах: довжина стрижня  $L=1.0$  м, переріз стрижня  $S=0.01$  м<sup>2</sup>, модуль пружності матеріалу  $E=2 \cdot 10^{11}$  Па, густина матеріалу  $\rho=7 \cdot 10^3$  кг·м<sup>-3</sup>, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0.3$ . До правого кінця стрижня прикладена постійна поздовжня сила  $F=200$  Н.

Для об'єктів зі складною геометрією скінченноелементна модель може містити сотні тисяч рівнянь. У цьому випадку еквівалентна схема заміщення може містити мільйони і більше елементів. Ця обставина унеможливує використання даної схеми в якості моделі об'єкта, тому доцільно скористатися алгоритмами скорочення розмірності схеми на основі Y-Δ перетворення [5].

Таблиця 1. Результати частотного аналізу

	Результати ANSYS	Результати ALLTED				
		Почат. ланцюг	Ущільнений ланцюг			Оптим. ланцюг
$\tau_{\min}$	-	-	$5 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Кількість вузлів	-	101	24	12	5	5
Кількість елементів	-	314	76	38	14	14
Скорочення по вузлах, %	-	-	76.24	88.12	95.05	95.04
Скорочення по елементам, %	-	-	75.80	87.90	95.54	95.54
1-пік, Гц	1336.3	1336.3	1336.1	1334.9	1327.0	1336.2
2-пік, Гц	4009.3	4009.3	4009.4	3993.3	3612.1	4012.2
Максимальна похибка, %	-	-	0.015	0.399	9.907	0.072

Розрахунком визначено дві нижні власні частоти конструкції в діапазоні від 1 до 5 МГц. Результати частотного аналізу, отримані за допомогою пакету ANSYS Multiphysics, а також в результаті моделювання

еквівалентної та скорочених схем в пакеті ALLTED, наведено в табл. 1.

Очевидно, що точність моделі, отриманої при  $\tau_{\min} = 3 \cdot 10^{-5}$ , відносно невелика, однак отримана скорочена схема містить малу кількість як вузлів, так й елементів. Для більш точного моделювання можна скористатися або скороченою схемою, отриманою при менших значеннях  $\tau_{\min}$ , однак в такому разі збільшується розмір еквівалентної скороченої схеми, або за допомогою методів оптимізації «підігнати» модель в діапазоні, що розглядається. Результати моделювання схеми з параметрами після оптимізації представлені в табл. 1.

## Висновки

Перевагою підходу, що ґрунтується на оптимізації параметрів схеми, є малий розмір еквівалентної скороченої схеми, а також, при вузькому діапазоні робочих частот, можливість одержати необхідні частоти з високою точністю. Недоліком є необхідність проведення додаткового аналізу схеми для виділення найбільш чутливих елементів. При занадто малому розмірі скороченої схеми чутливість кожного елемента буде зростати, що створює складнощі як для визначення діапазонів зміни варійованих параметрів, так і для роботи методів оптимізації при пошуку глобального оптимуму.

В подальшому планується дослідити ефективність запропонованого методу до об'єктів, принципи роботи яких, базуються на внутрішньому перетворенні енергії (п'єзоелементів).

## Література

1. Безносик А.Ю., Ладогубец В.В., Финогенов А.Д., Чкалов А.В. Построение пассивных моделей МЭМС // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 285 с.
2. Ansys Inc.: <http://www.ansys.com>.
3. Rudnyi E., Lienemann J., Greiner A., Korvink J. G. mor4ansys: Generating Compact Models Directly from ANSYS Models // Technical Proceedings of the 2004 Nanotechnology Conference and Trade Show (Nanotech 2004, March 7-11, 2004). – Boston, Massachusetts, USA, vol. 2. – P. 279-282.
4. Petrenko A., Ladogubets V., Tchkalov V., Pudlowski Z. ALLTED – a computer-aided engineering system for electronic circuit design. – Melbourne: UICEE, 1997, p. 205.
5. Руденко Ю.А., Ладогубец В.В., Ладогубец А.В. Алгоритм уменьшения размерности RLC цепей // Электроника и связь.– 2004. – №21. – С. 72-74.