

В.М. Теслюк, К.К. Колесник, П.Ю. Раєвський, Р.Т. Панчак
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра систем автоматизованого проектування

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МАГНІТНОГО ІНТЕГРАЛЬНОГО МІКРОСЕНСОРА

© Теслюк В.М., Колесник К.К., Раєвський П.Ю., Панчак Р.Т., 2005

Розроблено математичну модель інтегрального магнітного мікросенсора. Проаналізовано напружено-деформований стан мікропристрою та наведено результати моделювання.

Mathematical model for integrated magnetic microsensor is designed. Strain-deformation analysis of micro device was held and results of modeling are presented.

1. Постановка проблеми в загальному вигляді. Початок третього тисячоліття характеризується надзвичайно швидкими темпами розвитку гетерогенних мікротехнологій на основі технологій мікроелектроніки, мікромеханіки та ін. До одного з таких динамічних наукових напрямків можна зарахувати мікроелектромеханічні системи (MEMS – Micro ElectroMechanical Systems) [1]. Особливе значення при проектуванні пристроїв цього класу посідає САПР мікроелектромеханічних систем [2, 3, 4], яка дозволяє значно скоротити термін розробки виробу, зменшити вартість інтегральних пристроїв тощо. Процес розробки САПР мікроелектромеханічних систем, в теперішній час, гальмується відсутністю адекватного математичного забезпечення для гетерогенних систем. Тому ця робота, яка присвячена розробці математичного забезпечення для САПР мікроелектромеханічних систем, є актуальною.

2. Виділення невирішених частин проблеми. На сьогодні існують математичні моделі електромагнітних MEMS для базових конструкцій [5–9], але вони володіють низькою точністю та не пристосовані для використання в САПР. Разом з тим ця галузь швидко розвивається і з кожним днем з'являються нові конструкції електромагнітних інтегральних пристроїв, математичні моделі для яких відсутні.

3. Мета роботи. Метою статті є розробка математичної моделі електромагнітного мікросенсора для компонентного та функціонального рівнів проектування.

4. Основний матеріал. За принципом дії інтегральні мікроелектромеханічні системи поділяються на оптичні, термічні, електростатичні, електромагнітні, хімічні та інші. Особливе значення посідають пристрої на базі магнітних фізичних процесів та законів, які мають переваги порівняно з іншими, зокрема:

- в мікромашинах, фрикційна сила – не досяжна для інших видів енергії;
- магнітне поле надає можливість віддаленого керованого руху через магнітний ефект поля без будь-якого фізичного контакту;
- мікродвигуни, які поширено застосовують, в основному приводяться в дію за допомогою магнітного поля та обертаючого моменту.

Електромагнітний сенсор призначений для вимірювання величини магнітного поля. Разом з тим цей інтегральний пристрій можна використовувати в оптичних мікропристроях, в системах для вимірювання електричних коливальних процесів тощо.

Конструкція актюатора включає тонку діелектричну пластину як правило з діоксиду кремнію, на якій розміщено контур зі струмом та тензорезистори (рис. 1).

Принцип роботи мікросенсора полягає ось у чому. Внаслідок дії магнітного поля на рамку зі струмом виникає сила, яка змушує пружний елемент сенсора деформуватися (рис. 2). У місцях, де можуть виникати найбільші напруження в сенсорі, розміщено тензорезистори, які змінюють власний

опір залежно від зміни напружено-деформованого стану в пружному елементі. П'єзореzystори з'єднані за схемою містка. Вихідним параметром мікросенсора є напруга, зміна якої залежить від зміни опору п'єзореzystорів, і контролюється величина магнітного поля, в яке інтегровано мікропристрій.

Математична модель

З курсу фізики [10–13] відомо, що на контур зі струмом в однорідному магнітному полі діють сили (рис. 1) згідно з законом Ампера і стараються її повернути в перпендикулярному напрямку до вектора магнітної індукції.

Перша сила спрямована вгору і дорівнює

$$F_1 = BIa,$$

а друга спрямована вниз і виражається виразом

$$F_2 = BIa,$$

де I – струм, який протікає по контуру, розміщеному на діелектричній тонкій пластині, а – ширина рамки, B – вектор магнітної індукції.

Для незначних відхилень максимальний момент обертання дорівнюватиме

$$M = F_1 d = adIB = BIS,$$

де S – площа рамки ($S=ad$).

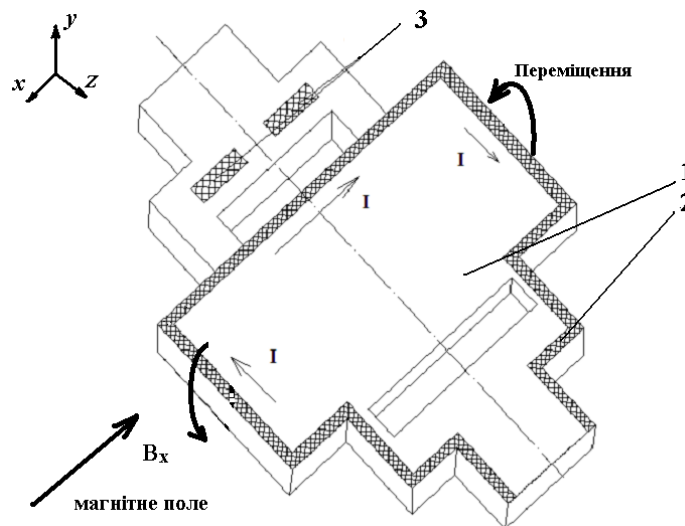


Рис. 1. Конструкція магнітного сенсора

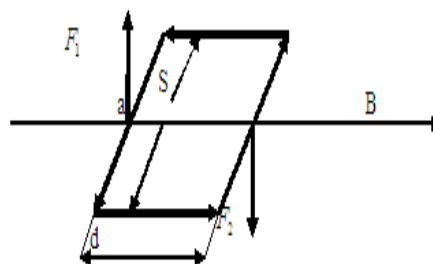


Рис. 2. Рамка зі струмом в однорідному магнітному полі

Модель зміни опору п'єзореzystивного елемента сенсора та вихідної напруги. П'єзореzystивність [14–16] – це властивість матеріалу змінювати опір під впливом механічних напружень, які виникають у матеріалі. Для вимірювання механічних напружень у п'єзореzystорах найчастіше аналізують п'єзореzystивний ефект. Опір стрижневого провідника описується такою формулою:

$$R = \frac{1}{k} \frac{l}{ab} \quad \text{або} \quad R = \rho \frac{l}{ab},$$

де k – питома провідність стрижневого провідника; ρ – питомий опір при заданій температурі та механічному навантаженні; l – довжина стрижневого провідника; a і b – розміри поперечних перерізів.

При зміні механічної сили, яка діє на п'єзореzystивний елемент, змінюються і його геометричні розміри та провідність, що призводить до змін опору стрижневого провідника і виражається формулами

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon(1 + 2\nu) - \frac{dk}{k},$$

або

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho}.$$

Наведена вище формула описує п'єзореzystивні властивості як металів, так і діелектриків. Причому одна частина формули $\varepsilon(1 + 2\nu)$ відображає геометричний ефект, а інша частина $\frac{dk}{k}$ описує п'єзореzystивний ефект. У сенсорах на металічній основі геометричний ефект є домінуючим, а в напівпровідникових сенсорах п'єзореzystивний ефект є приблизно в 50 разів більший, ніж геометричний.

Для визначення зміни опору п'єзореzystора використовується така формула:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_1 \sigma_1 + \pi_t \sigma_t,$$

$$\pi_1 = \frac{1}{2} (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}),$$

$$\pi_t = \frac{1}{2} (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}),$$

де σ_l, σ_t – напруження, які виникають при дії тиску на пластину в паралельному (поздовжнє) та перпендикулярному (поперечне) напрямках до напрямку струму в п'єзореzystорах; $\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$ – константи.

Для того, щоб збільшити чутливість мікросенсора, використовують поєднання кількох п'єзореzystорів, з'єднаних за мостовою схемою. П'єзореzystори, орієнтовані перпендикулярно до границь пластини, зазнають позитивного приросту опору, тому що присутній поздовжній ефект. Відповідно поперечний п'єзореzystивний ефект присутній у паралельно орієнтованих п'єзореzystорах і опір у них зменшується.

Вихідна напруга визначається з такого виразу:

$$U_{\text{вих.}} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_{\text{вх.}}$$

Температурна залежність у такому сенсорі практично відсутня, оскільки всі резистори при мостовому з'єднанні залежать від однієї температури в сенсорі. Проте внаслідок температурної залежності вбудованих резисторів змінюється чутливість вимірювання тиску. Тому звичайно потрібно використовувати схему для температурної компенсації вихідного параметра. Для прикладу можна використати опорне джерело струму замість джерела напруги. У цьому випадку при мостовому з'єднанні резисторів вихідна напруга практично не піддається впливу температури.

Результати моделювання

При розв'язанні поставлених задач застосовано метод скінченних елементів [17–19]. Приклад покриття мікросенсора скінченно-елементною сіткою показано на рис. 3. Результати розподілу напружень та переміщень зображені на рис. 4–5, а результати зміни вихідної напруги з пезореzystорів від вектора магнітної індукції подано на рис. 6.

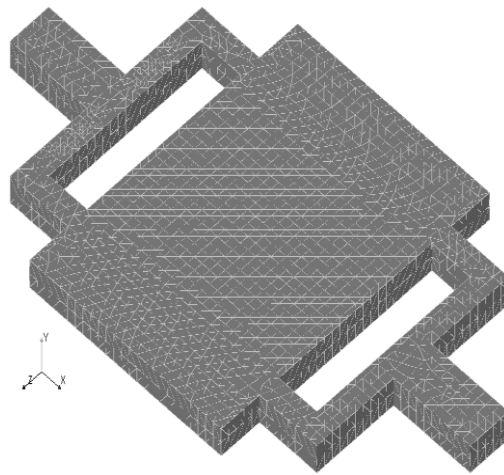


Рис. 3. Скінченно-елементна модель магнітного мікросенсора

Отримані результати дозволяють стверджувати, що залежність між зміною опору тензорезисторів і вектором магнітної індукції має лінійний характер.

Науковою новизною статті є розроблена метематична модель для базової конструкції електромагнітного сенсора, яка базується на рівняннях в часткових похідних і дозволяє отримати вихідні параметри з високою точністю.

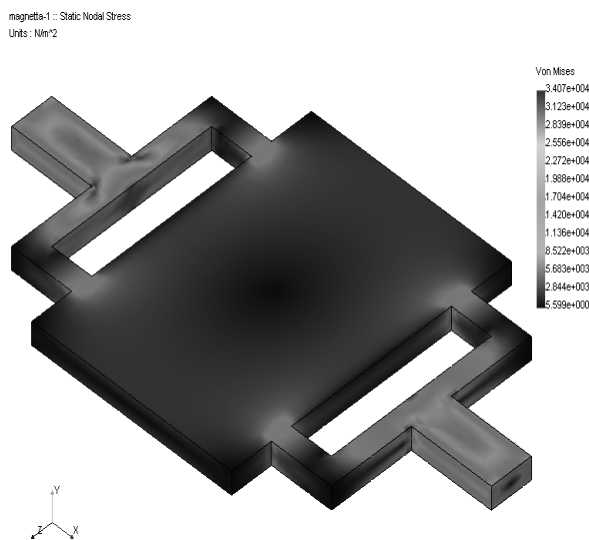


Рис. 4. Розподіл напружень у конструкції мікросенсора

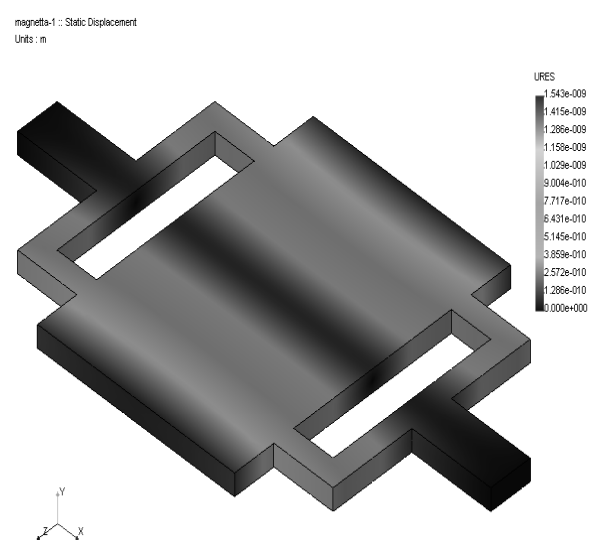


Рис. 5. Розподіл переміщень у конструкції мікросенсора

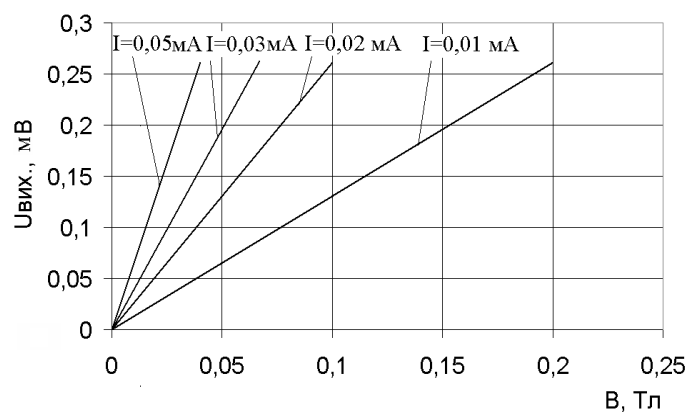


Рис. 6. Залежність зміни вихідної напруги з мікросенсора від вектора магнітної індукції для різних параметрів струмів у контурі

5. Висновки. У роботі розроблено математичну модель та методику розрахунку вихідної характеристики мікросенсора. Проаналізовані розподіли напружень та переміщень у конструкції мікросенсора. Одержано вихідну характеристику магнітного мікросенсора.

Реалізовану на програмному рівні математичну модель можна використати під час реалізації математичного забезпечення САПР мікроелектромеханічних систем.

1. Maluf, Nadim *An introduction to microelectromechanical system engineering*//Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. 2. Петренко А.И., Семенов А.И. *Основы построения систем автоматизированного проектирования*, – К.: Вища школа, 1984. – 296 с. 3. Петренко А.И. *Основы автоматизации проектирования*. – К.: Техніка, 1982. – 295 с. 4. Лобур М.В. *Проектування мікроелектромеханічних структур для вбудованих систем з використанням сучасних САПР*. // *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. Вісник НУ “Львівська політехніка”, № 479, 2003, – с. 121 – 125. 5. Guckel, H, (1998). ‘Progress in Magnetic microactuators,’ *Microsys. Technol.*, 5, 59–61. 6. Галушков А.А., Чаплыгин Ю.А. *Микроэлектронные матричные преобразователи магнитных полей на основе магнитотранзисторов*. // *Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления*. VIII научно-техническая конференция. Тезисы докладов. Гурзуф. Май. 1996. – С. 210-211. 7. T. Hirano, L. S. Fan, and J. Q. Gao, “Invar MEMS milliactuator for hard disk drive applications,” in *10th IEEE Workshop Micro Electromech. Syst., Nagoya, Japan, 1997*, – pp. 378–382. 8. Васильева Н.П., Касаткин С.И., Муравьев А.М. *Тонкопленочные магниторезистивные датчики магнитного поля и области их применения* // *Датчики и системы*. 1999. №1. – с. 29-36. 9. C. Liu, T. Tsai, Y.-C. Tai, W. Liu, P. Will, and C.-M. Ho, “A micromachined permalloy magnetic actuator array for micro robotics assembly systems,” in *Transducers '95 Dig. 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators/Eurosensors IX, vol. 1, Stockholm, Sweden, June 1995*, – pp. 328–331. 10. Савельев И.В. *Курс общей физики: Учеб. пособие: для вузов. В 5 кн. Кн.2. Электричество и магнетизм – 4-е изд., перераб.*– М.: Наука, Физматлит, 1998, С. 9–30, 41-71. 11. Трофимова Т.И. *Курс физики: Учеб. Пособие для вузов. – 5-е изд., стер.*– М.: Высш. шк., 1998, – с. 148–164. 12. Детлаф А.А., Яворский Б.М. *Курс физики: Учеб. пособие для вузов.– 2-е изд., испр. и доп.* – М.: Высш. шк., 1999, сс. 182–190, 193–202. 13. Иродов И.Е. *Электромагнетизм. Основные законы. – 3-е изд., испр.* – М.: Лаборатория базовых знаний, 2000, – с. 6–34. 14. Киреев П.С. *Физика полупроводников: Учеб. пособие для втузов. – М. Высшая школа, 1969*. 15. Campbell S.A. and Lewerenz H.J. *Semiconductor Micromachining. Techniques and Industrial Applications, Vol. 2, John Wiley & Sons*. 8. T. Ikeda, “Fundamentals of Piezoelectricity,” *Oxford Science Publications, New York NY (1996)*. 16. Клокова Н.П. *Пьезорезисторы: Теория, методики расчета, разработки.* – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с. 17. Зенкевич О. *Метод конечных элементов в механике.* – М.: Мир, 1975. – 524 с. 18. Тихонов А.Н., Самарский А.А. *Уравнения математической физики.* – М.: Наука, 1966. – 724с. 19. Самарский А.А., Николаев Е.С. *Методы решения сеточных уравнений.* – М.: Наука. 1978.– 592 с.

А.М. Пелецишин

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційних систем та мереж

АНАЛІЗ ФОРМ ТА МЕТОДІВ ВЗАЄМОДІЇ ВЕБ-САЙТІВ

© Пелецишин А.М., 2005

Розглянуто основні форми взаємодії сайтів у середовищі WWW, проаналізовано наслідки взаємодії, визначено спеціальні випадки ефективної взаємодії сайтів.

This paper considers main forms of web-site interaction. Interaction results are detailed researched. Special happening of efficient interaction are defined.

Постановка проблеми та її актуальність. World Wide Web – це розподілене глобальне інформаційне середовище, в якому функціонує значна кількість Веб-сайтів, що активно взаємо-