

Михайло Андрійчук¹, Богдан Каркульовський²

¹ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: mykhaylo.i.andriychuk@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-9380-88072

² Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: bohdan.v.karkulovskiy@lpnu.ua, ORCID 0009-0009-9005-315X

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КЕРУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ МЕМС

Отримано: березень 08, 2024 / Переглянуто: березень 28, 2024 / Прийнято: квітень 01, 2024

© Андрійчук М., Каркульовський Б., 2024

<https://doi.org/>

Анотація. В даній статті розглянуто МЕМС актюатори різних типів (електростатичні, магнітні, п'єзоелектричні, термоактюатори). Розглянуто особливості їх конструкцій. Проаналізовано способи побудови математичних моделей цих актюаторів та можливості їх застосування при проектуванні складних технічних систем із застосуванням таких актюаторів. Наведено приклад розрахунку характеристики індуктивності наносолоноїда, який є складовою частиною електромагнітного актюатора.

Ключові слова: МЕМС актюатори, електростатичні актюатори, магнітні актюатори, п'єзоелектричні актюатори, термоактюатори, математична модель, наносолоноїд.

Вступ

Переважаюча кількість проблем, пов'язаних з проектуванням і оптимізацією характеристик MEMS розглядалася в монографіях, які були опубліковані протягом останніх десятиріч [1] – [4]. Основна частина цих проблем стосується опису, дослідження і оптимізації рухомих складових МЕМС, таких як мікрокантелівери, мікроактюатори і мікромістки, які є керуючими пристроями МЕМС. Проблеми дослідження та застосування мікрокантеліверів/мікромісток детально досліджуються в багатьох публікаціях з МЕМС, серед яких можна відмітити [5] – [10].

Методи проектування для MEMS базуються, як правило, на одному з наступних методів або їх комбінації: аналітичні моделі (які варіюються від елементарних до більш складних), чисельні процедури – головним чином із використанням скінченних елементів, а також граничних елементів – за допомогою комерційно доступного програмного забезпечення, а також через спеціальні програмні додатки та експериментальні процедури. Доступно багато звітів науково-дослідних лабораторій, які синтезують і переглядають існуючі методи моделювання, що використовуються для конструкцій MEMS. Прикладами таких розробок є роботи [11] – [15]. Важливе значення при дослідженні і оптимізації параметрів МЕМС надається автоматизованим засобам проектування, зокрема Matlab, Simulink і Comsol [16] – [17].

Серед пристроїв МЕМС важливу роль відіграють керуючі або виконуючі пристрої (актюатори). Актюатори представляють собою елементи, які можуть виконувати елементарні механічні дії, наприклад лінійні переміщення або обертання. Мікроактюатори мають різні розміри і при їх виготовленні використовуються технології, пов'язані з використанням електромагнетизму, механіки, хімії та мікробіології. Діапазон застосування мікроактюаторів надзвичайно широкий, і він постійно зростає. Їх використовують у робототехніці, пристроях управління, космічній галузі, біомедицині, вимірювальних приладах, тощо.

В залежності від способу активації розрізняють такі типи мікроелектромеханічних актюаторів [18]:

- електростатичні актюатори;
- магнітні актюатори;

- п'єзоелектричні актюатори;
- термоактюатори.

Найпоширенішими методами перетворення сигналу в механічний рух вважаються п'єзоелектричний та електростатичний.

Стаття присвячена огляду актюаторів, які використовуються як керуючі пристрої МЕМС, опису їхніх математичних моделей стосовно принципів електромагнітного керування та розрахунку параметрів наносолоноіда, як основної складової магнітного актюатора.

Виклад основного матеріалу

Актюатори пристроїв МЕМС

Електростатичні актюатори. Робота таких мікроактюаторів ґрунтується на зворотному ефекті (електрична напруга, що прикладається переміщує кремнієві пластини). Такі актюатори працюють за рахунок електростатичного притягання і відштовхування, яке виникає між обкладками утвореного конденсатора.

Електростатичний актюатор складається із рухомого і нерухомого електродів. Рухомим електродом є консольні балки і мембрани.

Принцип дії актюаторів такого типу базується на виникненні електростатичної сили між рухомим і нерухомим електродами. Виникає електростатична сила, яка визначається виразом (1) [19]

$$F = \frac{C}{d} \int_0^d U dU = \frac{CU^2}{2d}, \quad (1)$$

де d – відстань між рухомим і нерухомим електродами; C – ємність, утворена електродами.

Основні типи електростатичних актюаторів [20]:

Приводи з паралельними пластинами. Це найпоширеніша форма електростатичних актюаторів. У цьому типі дві пластини поміщені паралельно одна одній, і електростатична сила притягує або відштовхує пластини.

Актюатори з приводом гребінця. В цих пристроях один набір елементів (структури, подібні до гребінця) є нерухомими, тоді як інший набір є рухомими. Коли подається напруга, результуюча електростатична сила змушує рухомий набір елементів рухатися до або від нерухомого набору.

Ротаційні приводи. Це різновид паралельних пластинчастих приводів, де пластини розроблені таким чином, що переміщення призводить до обертального руху.

Використання електростатичних актюаторів.

Завдяки невеликому розміру, високій точності та низькому енергоспоживанню електростатичні актюатори широко використовуються в МЕМС системах. Вони використовуються в багатьох галузях, від телекомунікацій до біомедициної інженерії. Приклади використання:

Оптичні системи. В оптичних системах ці приводи можна використовувати для регулювання дзеркал, лінз або інших оптичних елементів з високою точністю.

Мікророботи. У сфері мікроробототехніки електростатичні приводи можна використовувати для керування рухами крихітних роботизованих систем.

Хоча їхні переваги суттєві, електростатичні приводи також мають певні обмеження, такі як відносно низька вихідна сила та потреба у високій напрузі. Незважаючи на це, досягнення в цій галузі продовжують розвиватись.

Магнітні актюатори. Принцип роботи магнітних актюаторів базується на здатності магнітнотворах матеріалів намагнічуватись до насичення в слабких магнітних полях і взаємодіяти з ними. Основним елементом цих актюаторів є тонка пластинка з нанесеним на неї шаром магнітнотвора матеріалу. Коли така пластинка знаходиться у зовнішньому магнітному полі з напруженістю $H_{зовн}$ всередині пермалоевої ділянки виникає вектор намагніченості, який при взаємодії із $H_{зовн}$ генерує дві компоненти магнітної сили F_N і F_S , які визначаються виразами (2) і (3) [19]:

Математичні моделі керуючих пристроїв МЕМС

$$F_N = q_m H_{зовн} \quad (2)$$

$$F_S = -q_m H_{зовн} \quad (3)$$

де q_m – магнітний заряд, $H_{зовн}$ – напруженість зовнішнього магнітного поля.

Обертальний момент актюатора, який створюється цими силами, визначається виразом (4) [19]:

$$M_{акт} = q_m l H_{зовн} \sin(\alpha), \quad (4)$$

де l – довжина шару пермалою; α – кут між напрямком вектора напруженості магнітного поля і площиною актюатора.

Основні типи магнітних актюаторів [21]:

Електромагнітні приводи. Це найпоширеніший тип магнітних актюаторів. Тут електричний струм використовується для створення магнітного поля в котушці, яка взаємодіє з постійним магнітом або іншою котушкою для створення сили.

Термомагнітні приводи. Ці приводи працюють за дещо іншим принципом. У них магнітний матеріал нагрівається до температури Кюрі, після чого його магнітні властивості змінюються, спричиняючи зсув у магнітному полі та таким чином створюючи силу.

Приводи зі сплаву з пам'яттю форми. У цих приводах використовується магнітний сплав із пам'яттю форми, який змінює форму під впливом магнітного поля. Ця зміна форми може бути використана для створення сили.

Використання магнітних актюаторів.

Автомобільна промисловість. Магнітні приводи використовуються в багатьох галузях автомобільної промисловості, включаючи електросклопідйомники та системи блокування.

Робототехніка. У робототехніці магнітні приводи можна використовувати для керування рухом роботів, зокрема в мікро- та наноробототехніці, де потрібне точне керування.

Медичні пристрої. Деякі медичні пристрої також використовують магнітні приводи, наприклад, для точного керування хірургічними роботами або системами доставки ліків.

Магнітні приводи пропонують ряд переваг, зокрема високу точність, низьке енергоспоживання та здатність працювати в суворих умовах. Однак вони також мають деякі потенційні недоліки, такі як потенційні перешкоди від зовнішніх магнітних полів і необхідність джерела живлення для генерування електричного струму.

Останні досягнення в технології магнітних приводів включають розробку мініатюрних приводів для використання в мікро- та нанороботах. Крім того, дослідники вивчають можливість використання нових матеріалів, таких як графен, для підвищення продуктивності та ефективності цих пристроїв.

Підсумовуючи, магнітні приводи є життєво важливими компонентами в різних секторах, включаючи автомобільну, робототехнічну та медичну техніку. Їхня робота, заснована на принципах електромагнетизму, забезпечує високу точність і ефективність. Незважаючи на деякі потенційні недоліки, поточні дослідження та технологічний прогрес продовжують розширювати свої потенційні застосування, зміцнюючи своє місце в майбутньому технологічному розвитку.

П'єзоелектричні актюатори. П'єзоелектричний мікроактюатор – це актюатор, який базується на принципі зворотного п'єзоелектричного ефекту, що проявляється в зміні розмірів п'єзоелектрика під дією зовнішнього електричного поля.

Основна формула для зворотного п'єзоелектричного ефекту (5) [19]:

$$\varepsilon_k = d_{36} E, \quad (5)$$

де ε_k – величина зворотної деформації п'єзоелектрика; d_{36} – коефіцієнт зворотного п'єзоелектричного ефекту; E – напруженість електричного поля.

Для отримання п'єзоелектричного ефекту п'єзоелектричну кераміку необхідно піддавати поляризації, а для покращення п'єзоелектричних властивостей структура кристала повинна бути асиметричною.

Основні типи п'єзоелектричних актюаторів [22]:

Типи п'єзоприводів включають *пневматичні, гідравлічні, електричні та механічні*. Також ще застосовуються *стекові* приводи та *смугові* приводи.

Застосування п'єзоелектричних актюаторів [22]:

П'єзоелектричні актюатори виробляють мінімальну кількість тепла та споживають мінімум електроенергії, перебуваючи під напругою, що робить їх неймовірно корисними в різних галузях промисловості. Це включає в себе автомобільну промисловість, військову, медичну та аерокосмічну промисловість.

Завдяки спрощеній конструкції, високій надійності та мінімальній кількості рухомих частин п'єзоелектричний привід гарантує широке використання. Зокрема, у побутових електронних пристроях і точних машинах. Крім того, завдяки своїм безшумним характеристикам п'єзоприводи використовуються в мобільних телефонах, а також механізми автофокусування у відеокамерах з мікрофоном. Оскільки для роботи п'єзоприводу не потрібно змашувати, він ідеально підходить як для вакуумних середовищ, так і для криогенних застосувань.

Такі приводи забезпечують надзвичайно високу і практично нескінченну роздільну здатність, а також дуже високі напруги, які перетворюються на дрібні рухи розширення. Загалом, типовий п'єзопривід спрацьовує мільярди разів, перш ніж зношення стане очевидним. Він також забезпечує виняткову швидкість реакції лише з двома обмеженнями. Ці обмеження включають інерцію об'єкта, який рухається.

Термоактюатори. Принцип роботи термоактюаторів базується на тепловому розширенні структурних матеріалів елементів мікросистемних пристроїв.

Якщо при однорідному нагріванні температура твердого тіла зростає на ΔT , таке тіло деформується, що описується таким виразом (6) [19]:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T, \quad (6)$$

де ε – зміна розміру; α – коефіцієнт теплового розширення; ΔT – зміна температури.

Вираз для визначення сили, яка створюється термоактюатором (7):

$$F = \alpha E S \Delta T, \quad (7)$$

де E – модуль Юнга; $S = zh$ (z, h – ширина і товщина стрижня, відповідно).

Таким чином, сила, що розвивається термоактюатором, залежить від механічних характеристик робочого елемента.

Основні типи термоактюаторів [23]:

Термоактюатори із твердотільним виконавчим елементом

Термоактюатори із рідинним виконавчим елементом

Термоактюатори із газоподібним виконавчим елементом

Термоактюатори використовуються в мікроніжках, мікрозахватах, мікропозиціонування тощо. Принцип роботи заснований на асиметричному тепловому розширенні балок різної довжини та поперечного перерізу.

Переваги теплових мікроактюаторів:

- проста конструкція – робочими елементами є резистори нагрівання, а для біметалевого ефекту використовують плівкову структуру.
- розмір, що лежить в мікродіпазоні, оскільки згідно із законом Фур'є швидкодія зі зменшенням розмірів зростає квадратично.
- як активні елементи застосовні майже будь-які матеріали, які, крім різних коефіцієнтів розширення, повинні мати достатню міцність.

Недоліки:

- нагрівальний елемент споживає дуже багато енергії для того, щоб теплової актюатор зміг розвинути відносно велику силу, тому ККД теплових мікроактюаторів не перевищує 10%.
- нагрівальний елемент необхідно охолоджувати, щоб повернути актюатор у вихідне положення, а отже тепло має бути розсіяно в навколишнє середовище. Це природно займає деяку кількість часу, що обмежує швидкодію теплового мікроактюатора.

Математичні моделі електромагнітного керування MEMC

Для вивчення MEMS і NEMS, мікро- і нанорозмірних пристроїв і структур, мікросхем і антен застосовуються теорія електромагнітного поля і механіка. Тут наведено базові співвідношення для розрахунку електромагнітних параметрів рухомих частин MEMC [3].

Для зарядів q_1 і q_2 , розділених відстанню x у вільному просторі, величина електричної сили дорівнює

$$F = \frac{|q_1 q_2|}{4\pi\epsilon_0 x^2}, \quad (8)$$

де ϵ_0 – електрична проникність вільного простору, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$ чи $\text{С}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2$ і

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{С}^2. \quad (9)$$

Одиницею вимірювання сили є ньютон [Н], а заряди подано в кулонах [С]. Сила є вектором. Тому в цілому маємо

$$\vec{F} = \frac{|q_1 q_2|}{4\pi\epsilon_0 x^2} \vec{a}, \quad (10)$$

де \vec{a} – одиничний вектор, спрямований уздовж прямої, що з'єднує ці два заряди. Застосовність, універсальність і ефективність електромагнетизму випливають із сукупності фундаментальних законів, пов'язаних разом, і необхідних для вивчення характеристик поля. Позначимо вектор напруженості електричного поля \vec{D} (Ф/м), а вектор густини електричного потоку F (В/м). Використовуючи закон Гауса, загальний електричний потік Φ [С] через замкнуту поверхню дорівнює повному силовому заряду, який проходить через поверхню, тобто

$$\Phi = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q_S \vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad (11)$$

де $d\vec{S}$ – площа векторної поверхні, $d\vec{S} = ds \vec{a}_n$; \vec{a}_n – одиничний вектор, нормальний до поверхні; ϵ – діелектрична проникність середовища; Q_S – сумарний заряд, укладений поверхнею. Закон Ома для кіл наступний: $V = ir$. Однак для середовища закон Ома пов'язує об'ємну щільність заряду та напруженість електричного поля за допомогою провідності σ . Зокрема,

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (12)$$

де σ – провідність (А/В-м.); для міді $\sigma = 5.8 \times 10^7$, а для алюмінію $\sigma = 3.5 \times 10^7$.

Тут можна підкреслити, що застосування закону Ома до рівняння Ампера-Максвелла

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (13)$$

дає наступне рівняння

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (14)$$

Це рівняння має явний розв'язок. Наприклад, для одновимірного рівняння

$$\frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 B_x}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial B_x}{\partial t} \quad (15)$$

розв'язком є $B_x(t, x) = B_{x0} e^{i(kx - \omega t)}$. Беручи до уваги похідні

$$\frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2} = -k^2 B_x, \quad \frac{\partial B_x}{\partial t} = -i\omega B_x, \quad \frac{\partial^2 B_x}{\partial t^2} = -\omega^2 B_x, \quad (16)$$

знаходимо $k^2 = \mu \epsilon \omega^2 + \mu \sigma i \omega = \mu \omega (\epsilon \omega + i \sigma)$.

Отримані диференціальні рівняння в частинних похідних можна розв'язати. Існує безліч чисельних та аналітичних методів розв'язування диференціальних рівнянь у частинних похідних. Наприклад, тривимірне хвильове рівняння (для $\sigma \approx 0$)

$$\nabla^2 B(t, x, y, z) = \mu\epsilon \frac{\partial^2 B(t, x, y, z)}{\partial t^2} \quad (17)$$

з граничними умовами $B = 0$ при $x = 0, x = a, y = 0, y = b, z = 0, z = d$ має наступний розв'язок

$$B(t, x, y, z) = \sin(n\pi \frac{x}{a}) \sin(m\pi \frac{y}{b}) \sin(l\pi \frac{z}{d}), \quad (18)$$

де цілі змінні n, m, l є так звані номери мод, і мода з найменшою частотою є (11).

Враховуючи подання похідних

$$\nabla^2 B = - \left[\left(n\pi \frac{x}{a} \right)^2 + \left(m\pi \frac{y}{b} \right)^2 + \left(l\pi \frac{z}{d} \right)^2 \right] B \text{ і } \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = -\omega^2 B \quad (19)$$

отримаємо значення частоти осциляцій

$$\omega = \pi \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon} \sqrt{\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 + \left(\frac{l}{d} \right)^2}}. \quad (20)$$

Важливо підкреслити, що рівняння електричного поля в провідному середовищі має вигляд

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (21)$$

з розв'язком для одновимірного випадку $E_x(t, x) = E_{x0} e^{i(kx - \omega t)}$, маючи на увазі, що $k^2 = \mu\epsilon\omega^2 + \mu\sigma i\omega$, отримаємо

$$\text{Re}(k) = \omega \sqrt{\frac{1}{2} \mu\epsilon \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1}, \quad \text{Im}(k) = \omega \sqrt{\frac{1}{2} \mu\epsilon \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1}. \quad (22)$$

У вакуумі $\sigma = 0$ і тому $\text{Re}(k) = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, а $\text{Im}(k) = 0$. У ідеальному провіднику всі заряди та струми знаходяться на поверхні. У реальному провіднику поверхневі струми проникають на кінцеву відстань (так звану глибину скін-шару), яка визначається як

$$d_{skin} = \frac{1}{\text{Im}(k)} = \left(\omega \sqrt{\frac{1}{2} \mu\epsilon \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1} \right)^{-1}. \quad (23)$$

Зі збільшенням частоти глибина скін-шару зменшується. На високих частотах (мікрохвилі) зменшення стає значним, і, отже, резистивність з частотою зростає. Співвідношення $\sigma/\epsilon\omega$ визначає величину провідності.

Розглянемо рівняння густини струму

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (24)$$

Використовуючи закон Ома, ми отримаємо $\nabla \cdot (\sigma E) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$. Використовуючи закон Гауса

$\nabla \cdot \vec{E} = \rho/\epsilon$ і припустивши постійну провідність σ , ми отримуємо

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\epsilon} \rho \quad (25)$$

з розв'язком у формі

$$\rho(t, x, y, z) = \rho_0(x, y, z) e^{-(\sigma/\epsilon)t}. \quad (26)$$

Математичні моделі керуючих пристроїв МЕМС

Струм i пропорційний різниці потенціалів, а резистивність ρ провідника – це співвідношення між електричним полем та щільністю струму, таким чином, таким чином,

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}}. \quad (27)$$

Опір r провідника пов'язаний з резистивністю та провідністю наступними формулами

$$r = \frac{\rho l}{A} \text{ і } r = \frac{l}{\sigma A}, \quad (28)$$

де l – довжина, а A – площа поперечного перерізу.

Важливо підкреслити, що ці параметри змінюються зі зміною геометрії матеріалу. Проілюструємо це на прикладі дроту. Резистивність дроту змінюється при нагріванні, тобто вона залежить від температури опір залежить від температури $T[^\circ\text{C}]$, і ми отримаємо

$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha_{\rho 1}(T - T_0) + \alpha_{\rho 2}(T - T_0)^2 + \dots], \quad (29)$$

де $\alpha_{\rho 1}$, $\alpha_{\rho 2}$ – певні коефіцієнти. Наприклад, для малого температурного діапазону (до 160°C) для міді при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ми маємо $\rho(T) = 1.7 \times 10^{-8}[1 + 0.0039(T - 20)]$.

Результати та обговорення

Розрахунок індуктивності мікросолоноїда

Наведемо приклад розрахунку індуктивності соленоїда, який є важливою частиною МЕМС, в склад яких входять електромагнітні актюатори. Соленоїди зазвичай інтегрують рухомі (плунжер) та стаціонарні (фіксовані) частини МЕМС, виготовлені з феромагнітних матеріалів з високою проникністю. Обмотки являють собою зазвичай спіралі. Соленоїди, як електромеханічні пристрої, перетворюють електричну енергію в механічну енергію або навпаки. На продуктивність соленоїдів сильно впливає електромагнітна система, матеріали, механічна геометрія, магнітна проникність, резистивність обмотки, індуктивність, тертя тощо. Плунжер рухається відносно нерухомого основи. Коли напруга прикладається до обмотки, струм тече в обмотці, і електромагнітна сила збільшується, що спричиняє рух плунжера. Коли застосована напруга стає нульовою, плунжер може відновити своє початкове положення через пружину.

Крім того, небажані явища, такі як залишковий магнетизм та тертя, повинні бути зведені до мінімуму. Для досягнення мінімального тертя та мінімізації зносу слід вибирати різні матеріали для центрального елемента (немагнітної втулки) та плунжерного покриття (плати). Наповнений склом нейлон та латунь для направляючої частини та срібло, мідь, алюміній, вольфрам, платинові або інші покриття з низьким рівнем тертя вибираються для плунжера в якості конструктивних матеріалів.

Коефіцієнти тертя для змащувальних (суцільна плівка, олива) та не змащувальних матеріалів є наступними: вольфрам на вольфрамі 0.04–0.1 та 0.3; мідь на міді 0.04–0.08 та 1.2–1.5; алюміній на алюмінієві 0.04–0.12 та 1; платина на платині 0.04–0.25 та 1.2; титан на титані 0.04–0.1 та 0.6.

Очевидно, що проектування, аналіз та оптимізація соленоїдів потребують застосування базових фізичних, електромеханічних та технологічних процесів виготовлення. У багатьох випадках необхідно враховувати компроміси щодо поєднання різних механічних, електричних, теплових, акустичних та інших фізичних властивостей, на основі яких будуються рушійні складові МЕМС [24].

Знайдемо індуктивність мікросолоноїда з незаповненою порожниною (осердяч) та порожниною з матеріалом, для якого $\mu = 1000\mu_0$. Соленоїд має 10 витків ($N = 10$), довжина рівна 100 нм ($l = 1 \times 10^{-7}$ м), а рівномірна область кругового перерізу є 4×10^{-17} м² ($A = 4 \times 10^{-17}$ м²).

Магнітне поле всередині соленоїда

$$B = (\mu_0 N i A) / l. \quad (30)$$

Електрорушійна сила визначається як

$$\Omega = -N(d\Phi/dt) = -L(di/dt), \quad (31)$$

і застосувавши співвідношення

$$\Phi = BA = (\mu_0 NiA)/l, \quad (32)$$

ми отримаємо наступну формулу для індуктивності

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}. \quad (33)$$

Для соленоїда з повітряним заповненням отримаємо $L = 1.6\pi \times 10^{-13}$ Н (Генрі). Якщо соленоїд заповнений магнітним матеріалом, тоді

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (34)$$

і $L = 1.6\pi \times 10^{-10}$ Н (Генрі), тобто значення індуктивності лінійно залежить від магнітної проникності μ матеріалу заповнювача.

На рис. 1 наведено залежність індуктивності L мікросолоноїда від кількості витків N . Отримані результати свідчать, що швидкість зростання індуктивності є майже лінійною, незважаючи на квадратичну залежність від кількості витків N . Характерним також є зменшення індуктивності при збільшенні його довжини.

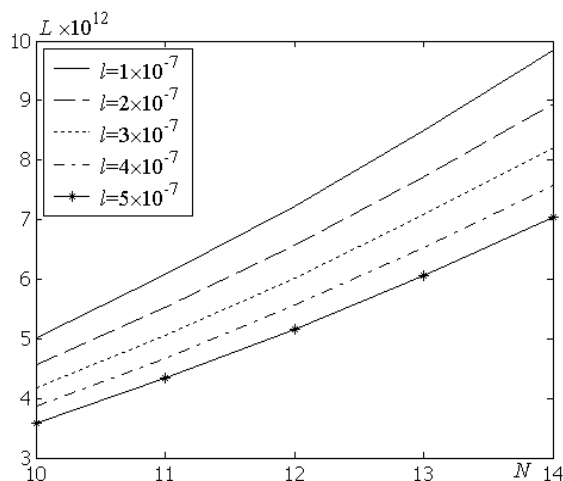


Рис. 1. Залежність індуктивності L мікросолоноїда від кількості витків N при різних довжинах l

Залежність індуктивності L мікросолоноїда від площі поперечного перерізу A показано на рис. 2. Як і у попередньому випадку, при збільшенні довжини l індуктивність зменшується. Така поведінка має природне фізичне пояснення, оскільки крок витка обмотки при цьому зростає, відповідно зменшується ступінь взаємодії між струмами, які протікають по обмотці, що призводить до зменшення індуктивності L .

На рис. 3 показано результати розрахунку індуктивності мікросолоноїда при різних площах поперечного перерізу A . Як і у випадку рис. 1, кількість витків змінюється від десяти до чотирнадцяти. На відміну від цього випадку, індуктивність L зростає швидше, ніж при зменшенні l . Це свідчить про те, що площа поперечного перетину A є більш ефективний показник для збільшення індуктивності L , ніж довжина мікросолоноїда l . Наведені результати числового моделювання індуктивності мікросолоноїда можуть бути застосовані в подальшому для електрорушійних сил кантелівера, який використовує такий тип мікросолоноїда.

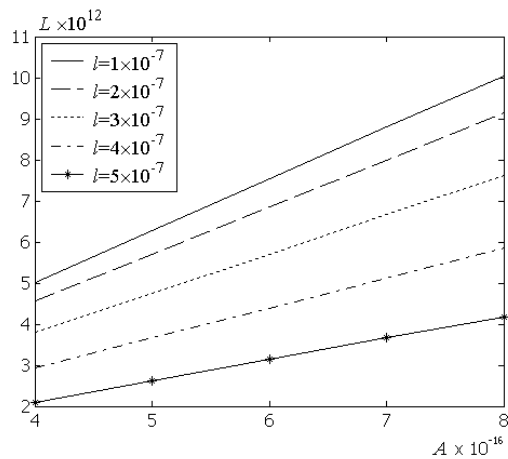


Рис. 2. Залежність індуктивності L мікросолоноїда від площі поперечного перерізу A при різних довжинах l

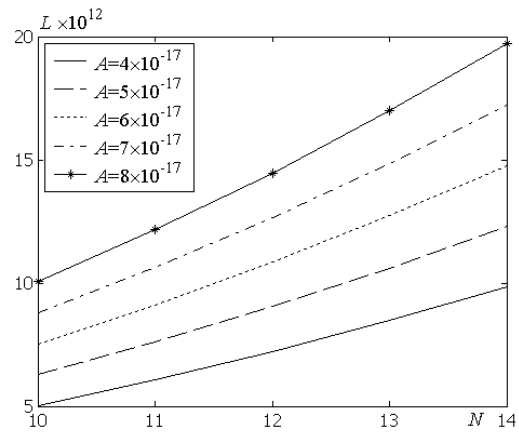


Рис. 3. Залежність індуктивності L мікросолоноїда від кількості витків N при різних площах поперечного перерізу A

Висновки

В роботі наведено огляд типів актюаторів, які використовуються на сучасному етапі при конструюванні МЕМС, а також розглянуто математичний опис електрофізичних процесів, які відбуваються їхніх приводах.

В сучасних мікротехнічних системах широко застосовуються мікроактюатори. Їх використовують в робототехніці, пристроях управління, космічній галузі, біомедицині, у вимірювальних приладах.

Електростатичні мікроактюатори становлять значну частину ринку мікрометричних і нанометричних операцій. Вони конкурують з іншими технологіями, але мають постійну область застосування.

Магнітні мікроактюатори є життєво важливими компонентами в різних секторах. Вони мають ряд переваг, зокрема високу точність, низьке енергоспоживання та здатність працювати в суворих умовах.

Пієзоелектричні мікроактюатори мають плавний рух без люфту в діапазоні від мікронів до міліметрів. Завдяки конструкції прямого приводу вони забезпечують рух без люфту забезпечують велику силу на одиницю площі.

Термічні мікроактюатори є основними компонентами багатьох конструкцій МЕМС. Їх переваги включають вищу силу, нижчу робочу напругу та меншу схильність до пошкоджень адгезії порівняно з електростатичними мікроактюаторами. Всі ці мікроактюатори широко застосовуються в мікромоторах та мікропередачах.

Результати моделювання індуктивності мікросолоноїда можуть бути використані при розрахунку параметрів керування мікроактюаторів, в яких використовується мікросолоноїд даного типу.

Перелік використаних джерела

- [1] S.D. Senturia, *Microsystem Design*, Kluwer Academic, Boston, 2001. <https://doi.org/10.1007/b117574>
- [2] M. Gad-El-Hak, *The MEMS Handbook*, CRC Press, Boca Raton, 2001. <https://doi.org/10.1201/9781420050905>
- [3] S.E. Lyshevski, *MEMS and NEMS: Systems, Devices, and Structures*, CRC Press, Boca Raton, 2002.
- [4] J.A. Pelesko, D.H. Bernstein, *Modeling MEMS and NEMS*, CRC Press, Boca Raton, 2002. <https://doi.org/10.1201/9781420035292>
- [5] J.-H. Fabian, L. Scandella, H. Fuhrmann, R. Berger, T. Mezzacasa, C. Musil, J. Gobrecht, E. Meyer, Finite element calculations and fabrication of cantilever sensors for nanoscale detection, *Ultramicroscopy*, vol. 82, 2000, pp. 69-77. [https://doi.org/10.1016/S0304-3991\(99\)00121-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3991(99)00121-7)
- [6] Z. Djuric, I. Jokic, M. Frantlovic, O. Jaksic, Influence of adsorption-desorption process on resonant frequency and noise of micro- and nanocantilevers, *Proceedings of the 23rd International Conference on Microelectronics (MIEL 2002)*, vol. 1, 2002, pp. 243-246.

- [7] R. Raiteri, M. Grattarola, H.-J. Butt, P. Skladal, Micromechanical cantilever-based bisensors, *Sensors and Actuators A*, vol. 79, 2001, pp. 115-126. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(01\)00856-5](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(01)00856-5)
- [8] J. Yang, T. Ono, M. Esashi, Mechanical behavior of ultrathin microcantilever, *Sensors and Actuators A*, vol. 82, 2000, pp. 102-107. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00319-2](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00319-2)
- [9] B. Ilic, D. Czaplewski, M. Zalutudinov, H.G. Craighead, Single cell detection with micromechanical oscillators, *Journal of Vacuum Science Technology B*, vol. 19, 2001, pp. 2825-2828. <https://doi.org/10.1116/1.1421572>
- [10] N. Lobontiu, E. Garcia, Two microcantilever designs: modeling for static deflection and modal analysis', *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2003.823239>
- [11] Z. Zhang and X. Liao, Modeling on RF Circuit and Thermal Conduction of a MEMS Amplitude Demodulator, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 777-783, Oct. 2022, <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2022.3186642>
- [12] X. Cheng et al., A Bidirectional Deep Learning Approach for Designing MEMS Sensors, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 42, no. 5, pp. 1610-1617, May 2023. <https://doi.org/10.1109/TCAD.2022.3199965>
- [13] K. Shibata et al., Simplified Analytical Damping Constant Model for Design of MEMS Capacitive Accelerometer With Gold Perforated Proof-Mass Structure, *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 15, pp. 14769-14778, 1 Aug. 1, 2022, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3184340>
- [14] E. Martínez-Cisneros et al., Analytical Modeling of the Mechanical Behavior of MEMS/NEMS-Multilayered Resonators With Variable Cross-Sections for Sensors and Energy Harvesters, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 81040-81056, 2021, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3084600>
- [15] Z. Bielek, D. Bielek, V. Biolková and Z. Kolka, Predictive Modeling of MEMS via Generic Meminductors: The Multiport Inductor Approach, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 785-792, Dec. 2022, <https://doi.org/10.1109/JETCAS.2022.3207690>
- [16] Modeling MEMS Devices with COMSOL Multiphysics®: <https://www.comsol.com/video/modeling-mems-devices-comsol-multiphysics>
- [17] A. Holovaty, V. Teslyuk, R. Panchak, S. Koshyrets, Mathematical modelling and simulation of the mechanical component of the fully differential capacitive MEMS accelerometer using Matlab/Simulink environment *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія "Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика"*, 2015, № 829, pp. 20-26.
- [18] <https://www.hitechnectar.com/blogs/different-types-mems/>
- [19] М.К. Філяшкін, Мікроелектромеханічні системи: Навчальний посібник. – К.: НАУ, 2019. – 276 с.
- [20] <https://www.electricity-magnetism.org/electrostatic-actuators/>
- [21] <https://www.electricity-magnetism.org/magnetic-actuators/>
- [22] <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-types-of-piezo-actuators-and-the-applications-of-the-piezoelectric-force>
- [23] https://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/linear_actuators/thermal_actuators
- [24] П. Кособуцький, М. Лобур, В. Каркульовський, Мікро- і нано електромеханічні системи. Базові принципи проектування явищ, матеріалів та елементів. Львів: В-во Львівської політехніки, 2017. – 396 с.

Mykhaylo Andriychuk¹, Bohdan Karkulovskiy²

¹ Computer Aided Design Department, Lviv Polytechnic National University, S. Bandery st. 12, Lviv, Ukraine, E-mail: mykhaylo.i.andriychuk@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-9380-88072

² Computer Aided Design Department, Lviv Polytechnic National University, S. Bandery st. 12, Lviv, Ukraine, E-mail: bohdan.v.karkulovskiy@lpnu.ua, ORCID 0009-0009-9005-315X

MATHEMATICAL MODELS OF MEMS CONTROL DEVICES

Received: March 08, 2024/ Revised: March 28, 2024/ Accepted: April 01, 2024

© Andriychuk M., Karkulovskiy B., 2024

Abstract. This article discusses MEMS actuators of various types (electrostatic, magnetic, piezoelectric, thermal actuators). The features of their designs are considered. Methods for constructing mathematical models of these actuators and possibilities of their application in the design of complex technical systems using such actuators are analyzed. An example of calculating the characteristic of the inductance of a nano-solenoid, which is a component of an electromagnetic actuator, is provided.

Keywords: MEMS actuators, electrostatic actuators, magnetic actuators, piezoelectric actuators, thermal actuators, mathematical model, nano-solenoid.