

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗУСИЛЬ МІКРОАКТЮАТОРА ПРУЖИННОГО ТИПУ

Богдан Каркульовський

НУ “Львівська політехніка”, bohdan.v.karkulovskyi@lpnu.ua

Для пристроїв та конструкцій MEMS та NEMS, мікро- та нанорозмірних пристроїв та структур, інтегральних схем та антен багато інженерних проблем формуються, розглядаються та вирішуються за допомогою мікро- та наноелектромеханіки. Як правило, вивчення таких систем відбувається на основі математичного моделювання взаємозв'язаних фізичних процесів, які протікають в цих системах і пристроях. В даній роботі розглядається модель мікроактюатора (мікро електромагніта) на основі врахування електромеханічних характеристик для визначення електромагнітних зусиль під дією електромагнітного потоку постійної величини.

Нехай мікроактюатор, який має N мікрОВитків, збуджується струмом $i(t)$, створює постійний електромагнітний потік Φ_m . Невелике зміщення dy основи мікроактюатора викликає зміну магнітної енергії, яка накопичується в заповненому повітрям об'ємі мікроактюатора, яка визначається формулою

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \mu |\mathbf{H}|^2 dV = \frac{1}{2} \int_V (|\mathbf{B}|^2 / \mu) dV, \quad (1)$$

а зміна енергії в об'ємі V визначається формулою

$$dW_m = dW_{\text{mairgap}} = (B^2 / \mu_0) A dy = \Phi_m^2 / (\mu_0 A) dy, \quad (2)$$

де A – площа поперечного об'єму повітряного зазору мікроактюатора.

У випадку постійного Φ_m , що визначається постійним струмом, видно, що зростання повітряного зазору dy приводить до збільшення магнітної енергії, яка накопичується. Оскільки $F_{mx} = \partial W_m / \partial x$, то зусилля визначаються формулою

$$F_{mx} = -e_y \Phi_m^2 / (\mu_0 A). \quad (3)$$

Результат показує, що сила прагне зменшити довжину повітряного зазору, при цьому рухомий елемент прикріплений до пружин, які створюють три пружинні сили на додаток до електромагнітної сили.

Конференція молодих учених «Підстригачівські читання – 2025», 27–29 травня 2025 р., Львів

Додатковий ефект обмотки слід враховувати при високоточному моделюванні. Коефіцієнт опору повітряного зазору (два повітряні зазори послідовно з'єднані) виражається як

$$R_g = 2x / (\mu_0 (k_{g1} l_w l_d + k_{g2} x^2)), \quad (4)$$

Де k_{g1} і k_{g2} – нелінійні функції феромагнітного матеріалу, l_d / l_w – характеристика співвідношення $B-H$. Магнітний опір феромагнітних матеріалів стаціонарної і рухомої частин мікроактюатора наступні

$$R_1 = l_1 / (\mu_0 \mu_1 l_w l_d), R_2 = l_2 / (\mu_0 \mu_2 l_w l_d). \quad (5)$$

З врахуванням формули для індуктивності L [1] мікроактюатора

$$L(x) = \frac{N^2}{R_g(x) + R_1 + R_2}, \quad (6)$$

електромагнітні зусилля визначаються формулою

$$F_{mx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{d(N^2 / (R_g(x) + R_1 + R_2))}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{d \left[N^2 / \left((2 / \mu_0) (l_w l_d / x) + kl + kl + kx \right)^{-1} + R_1 + R_2 \right)}{dx}. \quad (7)$$

Остання формула демонструє явну залежність зусиль, які виникають під дією прикладеного струму, від фізичних і електричних параметрів мікроактюатора, що дозволяє проводити розрахунок електромагнітних зусиль, а також оптимізувати отримані характеристики на основі зміни значень вхідних параметрів.

1. S. E. Lyshevski. Nano- and Micro-Electromechanical Systems. Fundamentals of Nano- and Microengineering. Second edition. Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press, 722 p. 2005.

ELECTRODYNAMIC MODELING OF ELECTROMAGNETIC FORCES OF A SPRING-TYPE MICROACTUATOR

Calculation formulas for determining the electromagnetic forces that arise in a spring-type microactuator under the action of direct current have been obtained. The explicit dependence of forces on the electrical and geometric parameters of the actuator makes it possible to perform calculations in a short period of time, as well as to formulate inverse problems for optimizing the force characteristics of the microactuator.