

А.А. ТАРАНЧУК, В.О. СЛОБОДЯН

Хмельницький національний університет

О.В. ОСАДЧУК

Вінницький національний технічний університет

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИЙ МЕМС-ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЯК ОСНОВА РЕАЛІЗАЦІЇ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

У роботі показана можливість реалізації акселерометра на основі електростатичного МЕМС-перетворювача, що оснований на чутливості його характеристик до зовнішнього збурення. Проведений аналіз поведінки рухомого електрода акселерометра на основі електростатичного МЕМС-перетворювача під дією зовнішньої періодичної сили. Встановлений взаємозв'язок основних характеристик акселерометра і його конструктивних параметрів. Сформульовані рекомендації щодо раціонального вибору конструктивних параметрів акселерометрів на етапі їх проектування.

Ключові слова: мікроелектромеханічна система, електростатичний перетворювач, акселерометр, зовнішнє збурення, рухомий електрод, змінна ємність, вимірювання прискорення.

A. A. TARANCHUK, V. O. SLOBODIAN

Khmelnitskyi National University

A. V. OSADCHUK

Vinnytsia National Technical University

ELECTROSTATIC MEMS- TRANSDUCER AS A BASIS FOR REALIZATION OF MICROELECTRONIC ACCELEROMETER

The use of new principles and constructive solutions for the construction of transducers of physical quantities is an important trend in modern instrument making. Such transducers of one form of energy into another include devices that form single microstructures of mechanical and electrical elements and components, the so-called micro electromechanical systems (MEMS). At present, the development, production and introduction of inertial sensors, which include accelerometers, have received high rates. Electrostatic MEMS-transducers provide basic possibilities for the implementation on their basis of single-component and multi-component accelerometers with an appropriate number of degrees of freedom and kinematics. The work confirms the high efficiency of the use of electrostatic MEMS - transducers as microelectronic accelerometers, whose work is based on converted electric energy into the electrostatic power interaction of a stationary electrode with a movable (inertial) electrode of a given mass. The paper is devoted to the urgent questions regarding the rational choice of structural parameters of microelectronic accelerometers, realized on the basis of electrostatic MEMS - transducers with controlled voltage capacitors. The work of an accelerometer based on an electrostatic MEMS- transducer is based on the sensitivity of its characteristics to external disturbances. The sensitive element of the accelerometer is an inertial mass in the form of a moving electrode made of polysilicon, the processing technology of which is well studied. The motion of the mass of the inertial electrode is recorded by changing the capacitance between two parallel plates - electrodes MEMS. An analysis of the behavior of a movable electrode accelerometer based on an electrostatic MEMS - transducer under the action of external periodic force was carried out. The correlation of the main characteristics of the accelerometer and its constructive parameters is established. The recommendations for rational choice of constructive parameters of accelerometers at the stage of their design are formulated.

Keywords: micro electromechanical system, electrostatic transducer, accelerometer, external disturbance, a movable electrode, a variable capacitance, measuring the acceleration.

Вступ

Використання нових принципів та конструктивних рішень пид час побудови перетворювачів фізичних величин є важливим напрямом сучасного приладобудування. До таких перетворювачів однієї форми енергії в іншу відносяться пристрої, які утворюють єдині мікроструктури з механічних та електричних елементів і компонентів, так звані мікроелектромеханічні системи (МЕМС) [1].

На теперішній час, високі темпи отримали розробка, виробництво та впровадження інерційних сенсорів, до яких відносяться сенсори прискорення або акселерометри [2, 3]. Область застосування сучасних акселерометрів дуже широка: від мобільних телефонів і планшетних комп'ютерів до інтегрованих в транспортні, літакові, супутникові, надводні та підводні навігаційні системи сенсорів, що використовуються для вимірювання прискорень або перевантажень.

Одним із перспективних підходів до побудови мікроелектронних акселерометрів є використання електростатичних МЕМС-перетворювачів (МЕМСП), робота яких заснована на перетворенні електричної енергії в електростатичну силову взаємодію стаціонарного (нерухомого) електрода з рухомим (інерційним) електродом заданої маси. Електростатичні МЕМС-перетворювачі надають принципові можливості щодо реалізації на їх основі однокомпонентних та багатоконпонентних акселерометрів з відповідною кількістю ступенів свободи і кінематикою. При цьому, електричні компоненти МЕМСП використовуються для формування керуючих сигналів та отримання інформації про фізичні величини, що вимірюються [1–10].

Постановки завдання

До сучасних акселерометрів пред'являються підвищені вимоги щодо точності вимірювання, чутливості та мікромініатюризації. Чутливість характеристик електростатичних МЕМС-перетворювачів до зовнішніх механічних збурень надає принципові можливості щодо реалізації на основі МЕМСП мікроелектронних сенсорів прискорення. Основою акселерометра, побудованого на основі

електростатичного МЕМСП, є керований напругою конденсатор (КНК). Чутливий елемент (ЧЕ) акселерометра являє собою інерційну масу у вигляді рухомого електрода, виготовленого з полікремнію, технологія обробки якого добре вивчена [4–7]. Рух маси інерційного електрода реєструється шляхом зміни ємності між двома паралельними пластинами – електродами МЕМС - КНК, один з яких рухомий з заданою ємності, закріплений за допомогою пружних підвісів, а інший – стаціонарний, розміщується на елементах основи. При впливі прискорень відбувається відхилення рухомої частини КНК, що призводить до змін його ємності, які несуть інформацію про величину і напрямком прикладеного прискорення [4, 8–10].

Робота присвячена актуальним питанням щодо раціонального вибору конструктивних параметрів мікроелектронних акселерометрів, реалізованих на основі електростатичних МЕМС-перетворювачів з керованими напругою конденсаторами.

Метою роботи є встановлення аналітичних залежностей основних характеристик електростатичних МЕМС-акселерометрів від їх конструктивних параметрів та надання рекомендацій щодо раціонального вибору конструктивних рішень на етапі проектування.

Аналіз поведінки рухомого електрода під дією зовнішньої періодичної сили

Розглянемо окремий випадок роботи електростатичного перетворювача в усталеному режимі при зміщенні електрода $x = x_1$ і напрузі керування $U = U_1$. Будемо вважати, що в даному випадку електростатична сила F_{el} не залежить від коливань електрода, викликаних зовнішньою періодичною силою, і для усталеного режиму є постійною величиною.

Для таких умов рівняння руху рухомого електрода запишеться у вигляді [11]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_{el} + mA_m \cos \omega t, \tag{1}$$

де m – ефективна маса рухомого електрода; b – коефіцієнт механічного опору (в'язкість середовища); k – ефективна жорсткість підвісу; F_{el} – електростатична сила притягування електродів; A_m , ω – амплітуда та частота зовнішнього гармонійного збурення (прискорення).

Електростатична сила притягування електродів визначається так

$$F_{el} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{(d - x_1)^2} \cdot U^2, \tag{2}$$

де d – початковий зазор між рухомим і стаціонарним електродами; x_1 – величина ходу рухомого електрода; S – площа взаємного перекриття електродів; $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна; ϵ – відносна діелектрична проникність середовища (для вакууму $\epsilon = 1$); U – напруга керування.

Для отримання розв'язку розділимо ліву і праву частини рівняння (1) на m та введемо наступні позначення:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2n \frac{dx}{dt} + p^2 x = \frac{F_{el}}{m} + A_m \cos \omega t, \tag{3}$$

де $p = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – кутова частота власних коливань акселерометра; $2n = 2\eta p$ – коефіцієнт загасання коливань, $\eta = n/p$ – коефіцієнт демпфірування.

Представимо частинний розв'язок рівняння (3) за умови $F_{el} = 0$ ($U = 0$) у вигляді

$$x = M \cos \omega t + N \sin \omega t, \tag{4}$$

де M і N – постійні, які визначаються після підстановки (4) в (3):

$$M = \frac{A_m(p^2 - \omega^2)}{(p^2 - \omega^2)^2 + 2n^2 \omega^2}, \quad N = \frac{A_m 2n \omega}{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \omega^2}. \tag{5}$$

Тоді загальний розв'язок (3) такий

$$x(t) = x_1 + e^{\alpha t} \{C_1 \cos(\beta t) + C_2 \sin(\beta t)\} + \left\{ \frac{A_m [(p^2 - \omega^2) \cos \omega t + 2n \omega \sin \omega t]}{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \omega^2} \right\} + \frac{F_{el}}{mp^2}, \tag{6}$$

де $\alpha = -n$, $\beta = \sqrt{n^2 - p^2}$ – дійсна та уявна частини комплексних коренів $\lambda_{1,2} = \alpha \pm j\beta$ характеристичного рівняння (3).

З урахуванням початкових умов отримаємо:

$$C_1 = x_1, \quad C_2 = \left(\frac{dx_1(t)}{dt} + nx_1 \right) \frac{1}{\sqrt{n^2 - p^2}}. \quad (7)$$

З рівняння (3) визначимо $\frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{2U^2 \epsilon \epsilon_0 S}{(d - x_1(t))^3} - k$, тоді вираз (7) набуде наступного вигляду:

$$C_2 = \left(\frac{2U^2 \epsilon \epsilon_0 S}{(d - x_1(t))^3} - k + nx_1 \right) \frac{1}{\sqrt{n^2 - p^2}}. \quad (8)$$

З урахуванням (7), (8) розв'язок (6) запишеться наступним чином:

$$x(t) = e^{-nt} \left\{ x_1 \cos(t\sqrt{n^2 - p^2}) + \left(\frac{2U^2 \epsilon \epsilon_0 S}{(d - x_1)^3} - k + nx_1 \right) \frac{1}{\sqrt{n^2 - p^2}} \sin(t\sqrt{n^2 - p^2}) \right\} + A_m \left\{ \frac{(p^2 - \omega^2) \cos \omega t + 2n\omega \sin \omega t}{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \omega^2} \right\} + \frac{F_{el.}}{mp^2}. \quad (9)$$

Перша частина рішення (9) з множником e^{-nt} описує демпфировані вільні коливання електрода з періодом $\tau = \frac{2\pi}{\sqrt{n^2 - p^2}}$, а друга частина рішення (9) з множником A_m – демпфировані вимушені коливання

з періодом $T = \frac{2\pi}{\omega}$, який співпадає з періодом коливань сили збурення.

Вільні коливання будуть поступово загасати і в усталеному режимі залишаться тільки вимушені коливання. Таким чином, вираз для усталеної поведінки системи може бути представлений в еквівалентній формі [13]

$$x(t) = A \cos(\omega t - \theta) + \frac{F_{el.}}{mp^2}, \quad (10)$$

з фазовим кутом

$$\theta = \arctg\left(\frac{N}{M}\right) = \arctg\frac{2\gamma\omega/p}{(1 - \omega^2/p^2)}, \quad (11)$$

і амплітудою

$$A = \sqrt{M^2 + N^2} = \frac{A_m}{\sqrt{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \omega^2}} = \frac{A_m/p^2}{\sqrt{(1 - \omega^2/p^2)^2 + 4\gamma^2 \omega^2/p^2}}. \quad (12)$$

З урахуванням (11) і (12) запишемо рішення (10) в наступному вигляді

$$x(t) = \frac{mA_m}{k} \beta \cos(\omega t - \theta) + \frac{F_{el.}}{mk}, \quad (13)$$

де β – коефіцієнт підсилення, що залежить від співвідношення ω^2/p^2 та від γ :

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 / p^2)^2 + 4\gamma^2 \omega^2 / p^2}} \tag{14}$$

На рис. 1,а,б показані зміни коефіцієнта підсилення β і кута фазового зсуву θ залежно від співвідношення ω/p для різних значеннях коефіцієнта γ . Видно (рис. 1,а) що:

а) при $\omega \ll p$, коефіцієнт підсилення β наближається до 1 та мало залежить від коефіцієнта демпфірування γ ;

б) при $\omega \gg p$, коефіцієнт підсилення β близький до нуля і також практично нечутливий до зміни величини демпфірування γ ;

в) при $\omega \approx p$, коефіцієнт підсилення різко зростає β (носить резонансний характер) і сильно залежить від коефіцієнта демпфірування γ .

Аналогічна залежність спостерігається і з фазовим зсувом θ (рис. 1,б): при $\omega \ll p$ та $\omega \gg p$ ця величина практично не чутлива до зміни величини демпфірування, а при резонансі – завжди дорівнює $\pi/2$, незалежно від значення γ .

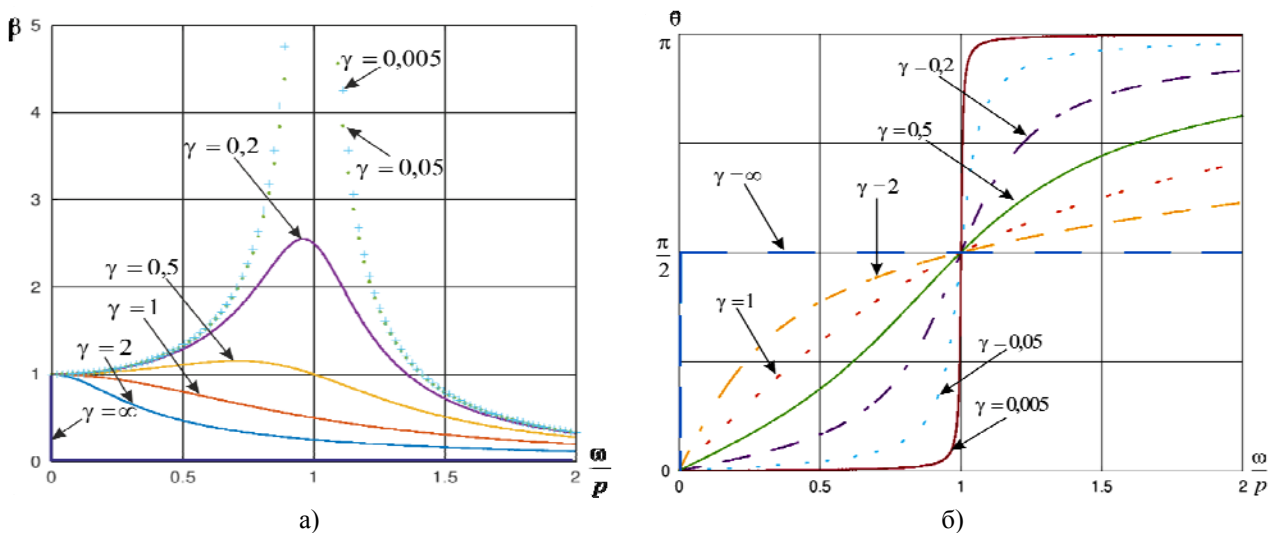


Рис. 1. Залежності коефіцієнта підсилення β (а) та кута фазового зсуву θ (б) залежно від відношення $\frac{\omega}{p}$ за різних значень коефіцієнта γ

Для значень $\frac{\omega}{p} \approx 1$ коефіцієнт підсилення β різко збільшується і його величина в околі резонансної області стає надчутливою до зміни γ (рис. 1,а). Максимальне значення β спостерігається за умови $\frac{\omega}{p} = \sqrt{1 - 2\gamma^2}$. На рис. 2 наведена залежність співвідношення $\frac{\omega}{p}(\gamma) = \sqrt{1 - 2\gamma^2}$, при якому настає резонанс. Як видно з рис. 2, існує значення γ , за якого резонансні явища не спостерігаються.

Залежності $x(t)$ для усталеного режиму за умови $U_1 = 1,65$ В та $x_1 = 0,11$ мкм для різних частот збурюючого коливання для різних значень коефіцієнта γ наведені на рис. 3.

З рис. 3 видно, що вплив на систему періодичної сили з частотою ω близької до власної частоти механічного резонансу p за малих коефіцієнтів $\gamma = 0,009$ і $\gamma = 0,09$ викликає явище самогенерації коливань; в той час, для значення $\gamma = 0,9$ явище резонансу не спостерігається. При цьому, амплітуда коливань, що генеруються, зростає зі зменшенням γ . На частотах, значно більших ніж частота власних коливань (25 кГц), явище резонансу не настає, і, незалежно від величини γ амплітуда коливань рухомого електроду залишається однаковою.

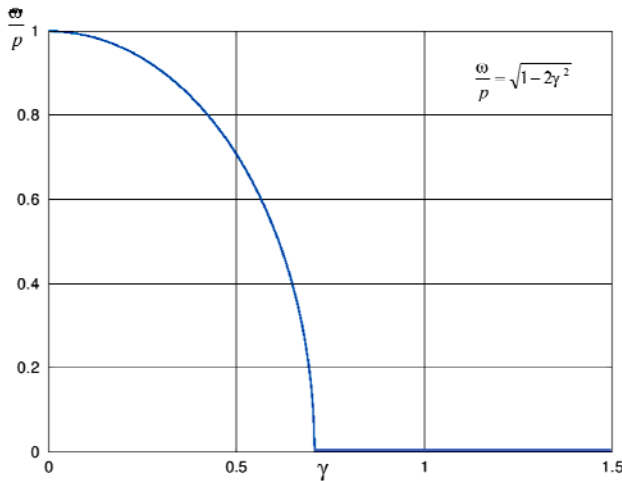


Рис. 2. Залежність відношення $\frac{\omega}{p}(\gamma)$ при якому наступає резонанс

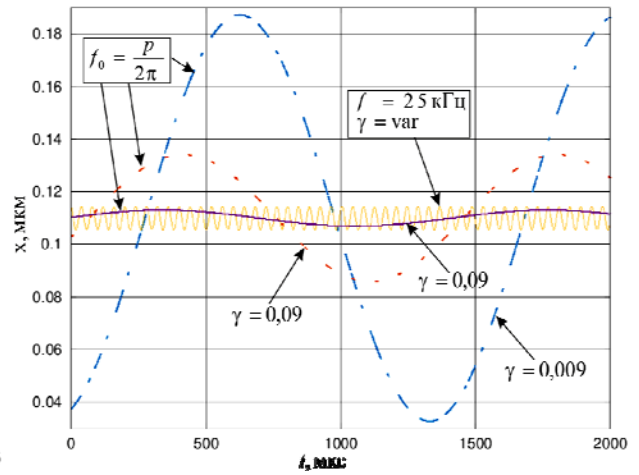


Рис. 3. Залежність $x(t)$ для усталеного режиму за умови $U_1 = 1,65$ В та $x_1 = 0,11$ мкм

Взаємозв'язок конструктивних параметрів та характеристик акселерометрів

Розглянемо роботу ємнісного акселерометра, який описується рівнянням (1) за умови $F_{en} = 0$:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = -ma(t), \quad (15)$$

де $a(t)$ – залежність величини прискорення у часі.

Поклавши $a = const$ запишемо розв'язок рівняння (15) у формі [13]:

$$x(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + \frac{ma}{k}, \quad (16)$$

де $\lambda_{1,2}$ – корні характеристичного рівняння (15).

Для знаходження констант C_1, C_2 використаємо наступні початкові умови: $x_0 = x(t_0) = x(0) = 0$; $x'(t_0) = x'(0) = 1$. Тоді отримаємо:

$$C_{1,2} = -\frac{m}{2k} \frac{a\sqrt{b^2 - 4km} \pm (ab - 2k)}{\sqrt{b^2 - 4km}}. \quad (17)$$

З рівняння (17) слідує, що повинна виконуватися умова $b > 2\sqrt{km}$.

Оскільки коефіцієнт демпфірування $\gamma = \frac{b}{2\sqrt{km}}$, то виникнення резонансних явищ напряму пов'язане з конструктивними характеристиками b, k, m , змінюючи які, можна керувати резонансом. Залежності $\gamma(m)$, $\gamma(b)$ і $\gamma(k)$ наведені на рис. 4, 5.

Аналіз отриманих залежностей показує що, величина γ лінійно залежить від механічного опору b , при цьому крутизна характеристики $\gamma(b)$ тим більше, чим менше жорсткість k і маса рухомого електрода m (рис. 4,а). Залежності $\gamma(m)$ і $\gamma(k)$ носять гіперболічний характер. При цьому $\gamma(m)$ (рис.4,а) збільшується зі збільшенням опору b і зменшенням k (рис. 4,б), а $\gamma(k)$ (рис. 5) збільшується зі зменшенням маси m і збільшенням опору b .

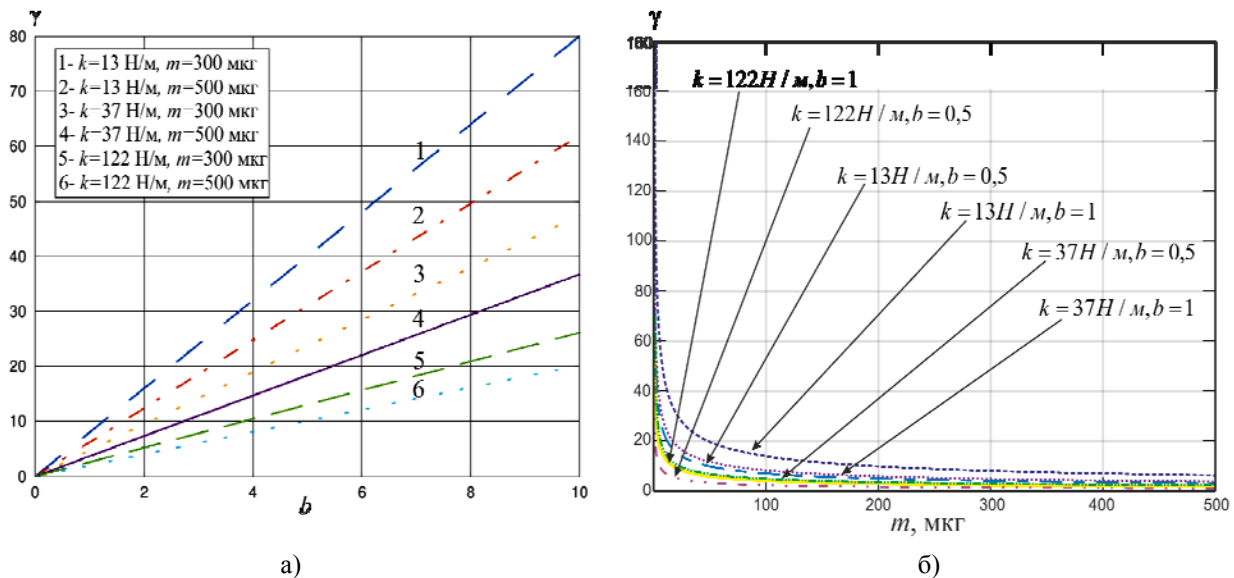


Рис. 4. Графіки залежностей коефіцієнта демпфірування $\gamma(m)$ (а) і $\gamma(b)$ (б)

Основні розрахункові характеристики акселерометра (чутливість $S_{стат}$, власна частота ω_0) в залежності від конструктивних параметрів електростатичного перетворювача (жорсткості k , маси m , ємнісного зазору d) зведені до таблиці 1. При цьому, природно найменша чутливість $S_{стат}$ отримується при найбільшій жорсткості $k = 122 \text{ Н/м}$, найбільшому зазорі $d = 2 \text{ мкм}$ і найменшій масі $m = 100 \text{ мкг}$; найбільша чутливість $S_{стат}$ за найменшої жорсткості $k = 13 \text{ Н/м}$, найменшому зазорі $d = 0,75 \text{ мкм}$ і найбільшій масі $m = 500 \text{ мкг}$.

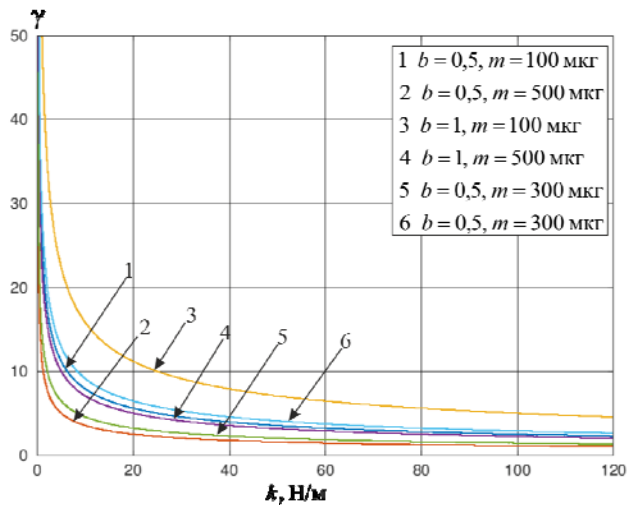


Рис. 5. Графіки залежностей коефіцієнта демпфірування $\gamma(k)$

Таблиця 1

Чутливість акселерометра $S_{стат}$ залежно від конструктивних параметрів електростатичного перетворювача k, m, d

$m, \text{мкг}$		100			300			500		
$k, \text{Н/м}$		13	37	122	13	37	122	13	37	122
$\omega_0 = \sqrt{k/m}, \text{с}^{-1}$		360,56	608,28	1104,54	208,17	351,19	637,70	161,25	272,03	493,96
$d, \text{мкм}$	$C_0, \text{пФ}$	$S_{стат} = \frac{C_0}{d\omega_0^2}, \text{пФ с}^2/\text{м}$								
0,75	0,57	5,85	2,05	0,62	17,54	6,16	1,87	29,23	10,27	3,11
1,0	0,43	3,31	1,16	0,35	9,92	3,49	1,06	16,54	5,81	1,76
1,5	0,29	1,49	0,52	0,16	4,46	1,57	0,48	7,44	2,61	0,79
2,0	0,21	0,81	0,28	0,09	2,42	0,85	0,26	4,04	1,42	0,43

Висновки

В роботі підтверджено високу ефективність використання електростатичних МЕМС-перетворювачів в якості мікроелектронних акселерометрів, робота яких заснована на перетворенні електричної енергії в електростатичну силову взаємодію стаціонарного (нерухомого) електрода з рухомих (інерційним) електродом заданої маси.

Проведений аналіз поведінки рухомого електрода акселерометра на основі електростатичного МЕМС-перетворювача під дією зовнішньої періодичної сили. Встановлений аналітичний зв'язок чутливості та резонансної частоти акселерометрів з їх основними конструктивними параметрами: масою рухомого

електрода, жорсткістю пружного підвісу і механічним опором системи. Надані рекомендації щодо оптимального вибору конструктивних параметрів акселерометрів на етапі їх проектування.

В той же час, недоліками використаних аналітичних методів розв'язку рівнянь руху механічних систем є необхідність прийняття достатньо жорстких обмежень, справедливих тільки для усталених режимів роботи, що не дозволяє в повній мірі досліджувати перехідні процеси та явища нестабільності електростатичної рівноваги.

Література

1. Варадан В. В. МЭМС и их применение / Варадан В., Виной К., Джозе К. – М. : Изд-во Техносфера, 2004. – 528 с. – ISBN 5-94836-030-X.
2. Датчики инерциальной информации : учебное пособие / под ред. А.И. Черноморского. – М. : МАИ-ПРИНТ, 2011. – 356 с. : ил. – ISBN 978-5-7035-2298-1.
3. Hindrichsen C. C. MEMS accelerometer with screen printed piezoelectric thick film / C. C. Hindrichsen, R. Lau-Moeller, T. Bove, E. V. Thomsen // Proc. IEEE Sensors. IEEE. – 2006. – P. 1477–1480.
4. Wagner J. Piezoelectric accelerometers. Theory and application. Radebeul / Wagner J., Burgemeister J. – Germany : Manfred Weber Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K., 2012. – 47 p.
5. Je Ch. H. Sensing gap reconfigurable capacitive type MEMS accelerometer / Ch. H. Je, M. Lee, S. Jung et al. // Proc. SPIE. – 2008. – 6800. – 68001Z.
6. Renard S. Industrial MEMS on SOI / S. Renard // Journ. Micromech. Microeng. – 2000. – 10, N 2. – P. 245–249.
7. Narasimhan V. Monolithic CMOS-MEMS integration for high-g accelerometers / V. Narasimhan, H. Li, Ch. S. Tan // Proc. SPIE. – 2014. – 9254. – 925410.
8. Колпаков Ф. Ф. Квазистатические характеристики системы двухэлектродных MEMS-конденсаторов / Ф. Ф. Колпаков, Н. Г. Борзяк // Радиотехника. – 2007. – № 148. – С. 245–249.
9. Багинский И.Л. Ёмкостные МЭМС-акселерометры сверхвысоких ускорений / И.Л. Багинский, Э.Г. Косцов // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 107–116.
10. Колпаков Ф. Ф. Динамическое моделирование электростатически управляемого MEMS-конденсатора в диапазоне рабочих температур (293...323) / Ф. Ф. Колпаков, Н. Г. Борзяк // К. Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника, [S.I.]. – May 2008. – V. 51, n. 5. – P. 33–42. – ISSN 2307-6011.
11. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний / Пановко Я.Г. – Л. : Наука, 1989. – 252 с.
12. Daniel J. Effects of squeezed film damping on dynamic finite element analyses of MEMS / Daniel J. Keating, Dr. Lee Ho. – ISMA, 2000.
13. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле : монография / Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. – 3-е изд. – М., 1984. – 470 с.
14. Babak Vakili Amini. Micro-gravity capacitive silicon-on-insulator accelerometers / Babak Vakili Amini and Farrokh Ayazi // Journal of Micromechanics and Microengineering. – (2005). – 15. – P. 2113–2120.

References

1. Varadan V. V. MEMS i ih primenienie / Varadan V., Vinoy K., Djoze K. – M. : Izd-vo Tehnosfera, 2004. – 528 s. – ISBN 5-94836-030-X.
2. Datchiki inertsiyalnoy informatsii : uchebnoe posobie / pod red. A.I. Chernomorskogo. – M. : MAI-PRINT, 2011. – 356 s. : il. – ISBN 978-5-7035-2298-1.
3. Hindrichsen C. C. MEMS accelerometer with screen printed piezoelectric thick film / C. C. Hindrichsen, R. Lau-Moeller, T. Bove, E. V. Thomsen // Proc. IEEE Sensors. IEEE. – 2006. – P. 1477–1480.
4. Wagner J. Piezoelectric accelerometers. Theory and application. Radebeul / Wagner J., Burgemeister J. – Germany : Manfred Weber Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K., 2012. – 47 p.
5. Je Ch. H. Sensing gap reconfigurable capacitive type MEMS accelerometer / Ch. H. Je, M. Lee, S. Jung et al. // Proc. SPIE. – 2008. – 6800. – 68001Z.
6. Renard S. Industrial MEMS on SOI / S. Renard // Journ. Micromech. Microeng. – 2000. – 10, N 2. – P. 245–249.
7. Narasimhan V. Monolithic CMOS-MEMS integration for high-g accelerometers / V. Narasimhan, H. Li, Ch. S. Tan // Proc. SPIE. – 2014. – 9254. – 925410.
8. Kolpakov F. F. Kvazistaticheskie harakteristiki sistemyi dvuhelektroodnyih MEMS-kondensatorov / F. F. Kolpakov, N. G. Borzyak // Radiotekhnika. – 2007. – № 148. – S. 245–249.
9. Baginskiy I.L. Ёmkostnyie MEMS-akselerometriyi sverhvyisokih uskoreniy / I.L. Baginskiy, E.G. Kostsov // Avtometriya. – 2017. – T. 53, № 3. – S. 107–116.
10. Kolpakov F. F. Dinamicheskoe modelirovanie elektrostatiicheski upravlyaemogo MEMS-kondensatora v diapazone rabochih temperatur (293...323) / F. F. Kolpakov, N. G. Borzyak // K. Izvestiya vysshih uchebnyih zavedeniy. Radioelektronika, [S.I.]. – May 2008. – V. 51, n. 5. – P. 33–42. – ISSN 2307-6011.
11. Panovko YA.G. Vvedenie v teoriyu mehanicheskikh kolebaniy / Panovko YA.G. – L. : Nauka, 1989. – 252 s.
12. Daniel J. Effects of squeezed film damping on dynamic finite element analyses of MEMS / Daniel J. Keating, Dr. Lee Ho. – ISMA, 2000.
13. Timoshenko S.P. Kolebaniya v injenernom dele : monografiya / Timoshenko S.P., YAng D.H., Uiver U. – 3-e izd. – M., 1984. – 470 s.
14. Babak Vakili Amini. Micro-gravity capacitive silicon-on-insulator accelerometers / Babak Vakili Amini and Farrokh Ayazi // Journal of Micromechanics and Microengineering. – (2005). – 15. – R. 2113–2120.

Рецензія/Peer review : 25.11.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.12.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Підченко С.К.