УДК 621.39 + 621.38.049.77

А.А. ТАРАНЧУК
Хмельницький національний університет

БАГАТОПАРАМЕТРОВИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА ОСНОВІ СТРИБКОПОДІБНОГО ЗБУДЖЕННЯ РУХОМОГО МЕМС -ЕЛЕМЕНТА

У роботі запропонований багатопараметровий вимірювальний перетворювач на основі рухомого МЕМС-елемента з електростатичним керуванням із стрибкоподібним збудженням. Отримані характеристики перетворення двопараметрового вимірювального перетворювача у багатомірному базисі, шляхом уведення в коливальний рух рухомих МЕМС – елементів за їх стрибкоподібного збудження перепадами напруги. На основі запропонованого підходу розглянуто особливості проектування датчика, призначеного для вимірювання температури та тиску. Проведено моделювання вимірювального перетворювача в системі MATLAB та отримані його градуювальні характеристики.

Ключові слова: МЕМС - конденсатор, матричний рухомий електрод, електростатичне керування, двопараметровий вимірювальний перетворювач

A.A. TARANCHUK
Khmelnytskyi National Universyty, Khmelnytskyi, Ukraine

MULTI- PARAMETER MEASURING TRANSDUCER, BASED ON JUMP- LIKE EXCITATION OF MOVABLE MEMS – ELEMENT

Abstract – In this work, a multi-parameter measuring transducer based on a movable MEMS-element with electrostatic control with jump - like excitation is proposed. Obtained characteristics of the transuding of a two-parameter measuring transducer in a multidimensional basis, by introducing into the oscillatory motion of movable MEMS-elements for their jump - like excitation by voltage transitions. Based on the proposed approach, the design of a sensor to measure temperature and pressure is constructed. Dynamic characteristics of the electrodes motion and simulate the signals at the output of the measuring transducer are obtained. The simulation of the measuring transducer in the MATLAB system was carried out and its calibration characteristics were obtained. The proposed measuring transducer has low power consumption, works at a low level of shock control voltage (0, 1 ... 0, 5) and in pulse mode. The two-parameter sensor is characterizing by high accuracy of measurements. The theoretically determined relative error of temperature measurement is 0, 95%, of the pressure - 0,05%.

Keywords: MEMS-capacitor, matrix movable electrode, electrostatic control, two-parameter measuring transducer

Вступ

Вимірювальні перетворювачі різних фізичних величин на основі MEMS – технологій широко застосовуються практично в усіх сферах життєдіяльності людини: в аерокосмічній, автомобілебудівній, хімічній промисловості й інших. Вони є основними елементами безпроводових сенсорних мереж, численних систем контролю й моніторингу, різноманітного медичного обладнання та систем навігації [1-7].

Їх робота базується на різних фізичних принципах перетворення енергії фізичних величин в інформаційний сигнал. Найбільш інтенсивно, на теперішній час, застосовуються ємнісні датчики з електростатичним керуванням. Це пояснюється їх відносною простотою та малою споживаною потужністю, а також тим, що на основі ємнісного електричного MEMS – перетворювача можуть бути побудовані датчики різних фізичних величин: для прямих вимірювань переміщення, хімічного складу, електричних полів, непрямих вимірювань багатьох інших величин, які можуть бути перетворені в переміщення, таких як тиск, прискорення, вологість, рівень та склад рідини. На теперішній час МЕМС - електростатичні датчики, які суміщають у собі електронну та механічну частини є одними з перспективних електромеханічних перетворювачів, що використовуються при проектуванні й конструюванні різних вимірювальних приладів [8-11].

Постановка завдання

Сучасні вимоги щодо підвищення точності вимірювання, надійності та масогабаритних показників (мікромініатюризації) електронно-вимірювальних систем обумовлюють пошук нових принципів та конструкцій вимірювальних перетворювачів фізичних величин. Вельми перспективним у даному напрямку є використання електростатичних вимірювальних перетворювачів побудованих за МЕМС – технологією з керованими рухомими електродами. Використання таких ємнісних датчиків дозволяє побудувати різні параметричні перетворювачі неелектричних величин, в тому числі і багатопараметрові, зокрема датчики, призначені для одночасного вимірювання температури та тиску. Особливо цікавим є використання режимів "ударного" збудження рухомих електродів перепадами напруги, що дозволяє підвищити лінійність, розширити діапазон вимірювань та зменшити енергоспоживання.

Мета роботи є формування багатомірного вихідного базису двопараметрового МЕМС-вимірювального перетворювача, шляхом уведення в коливальний рух його матричних рухомих електродів (МРЕ) шляхом їхнього стрибкоподібного збудження перепадами напруг.

1. Основний розділ

Вимірювальний MEMS – перетворювач з електростатичним управлінням у найпростішому випадку являє собою двоелектродний конденсатор, один з електродів якого жорстко закріплений, а інший –

переміщується відносно нього під дією напруги керування та інших факторів $\Phi_i(t)$, параметри яких необхідно вимірювати. У таких перетворювачах використовується залежність ємності конденсатора від відстані між його електродами, площі електродів і діелектричної проникливості середовища між ними [10].

Застосування теорії багатостороннього перетворювача О.О. Харкевича дозволяє створити багатоелементну вимірювальну систему на базі MEMS-технології – багатопараметровий (двопараметровий) вимірювальний перетворювач (БВП), який здатен вимірювати одночасно декілька фізичних величин (рис.1). Конструктивне рішення засновано на принципі застосування матричного рухомого електрода (МРЕ) з роздільно керованими електродами [12].

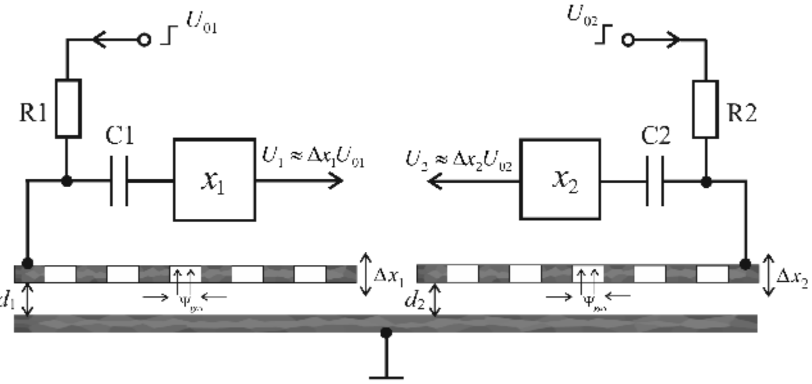


Рис.1. Двопараметровий перетворювач тиску та температури

Кожен елементарний електрод МРЕ із загальним нерухомим електродом, утворює ємнісний електростатичний перетворювач. При цьому на всі елементарні електроди впливають одні й ті самі фактори, наприклад, температура $\theta(t)$, вібрація $a(t)$, тиск $P(t)$, акустичний сигнал $A(t)$. Елементарні електроди характеризуються різними конструктивними параметрами, такими як: площа поверхні S_j, маса m_j, жорсткість підвісу k_j, коефіцієнт демпфірування b_j, власна частота механічного резонансу w_{0j}.

Застосуємо теорію багатостороннього перетворювача О. О. Харкевича для побудови моделі БВП, що описує поведінку кожного елементарного перетворювача у вигляді системи диференційних рівнянь. Для БВП з N елементарними електродами, що вимірює N параметрів фізичних величин $\Phi_i(t)$ система диференційних рівнянь у загальному вигляді може бути представлена наступним чином [12]:

$$m_j \frac{d^2 x_j}{dt^2} + b_j \frac{dx_j}{dt} + k_j x_j = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_j}{2}\left(\frac{U_{0j}}{d_j - x_j}\right)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} f\{\Phi_j(t)\}, \text{ де } j = \overline{1,N}, \tag{1}$$

де x_j – зміщення рухомого j-го електрода відносно початкового положення, U_{0j} – величина стрибкоподібної напруги, яка викликає переміщення рухомого електроду з початкового положення в задане. Перехідний процес, що при цьому виникає, характеризується загасаючим коливанням з частотою w_{0j}.

Таким чином, вихідний сигнал $U_{вих}$, який знімається з рухомого електроду, несе в собі інформацію про зміну величини зміщення кожного елементарного рухомого електроду під дією параметрів $\Phi_i(t)$, тобто

$$U_{вих\ j}\left(f\{\Phi_i(t)\}, t\right) = g(x_j, t) \Rightarrow x_j(t) = f\{U_{вих}(t)\}. \tag{2}$$

Тоді

$$\frac{d^2 x_j}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2} f\{U_{вих\ j}(t)\};\ \frac{dx_j}{dt} = \frac{d}{dt} f\{U_{вих\ j}(t)\}. \tag{3}$$

Розв'язуючи систему рівнянь (1) з урахуванням (2, 3), отримуємо величини $\Phi_i(t)$, що вимірюються.

На основі запропонованого підходу розглянемо проектування датчика, призначеного для вимірювання температури $\theta(t)$ та тиску $P(t)$. Відповідно до (1) запишемо модель для датчика з двома елементарними електродами:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \frac{dx_1}{dt} + k_1 x_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_1}{2}\left(\frac{U_{01}}{d_1 - x_1}\right)^2 + \Delta P(t) S_1 - \left[\left(\frac{\alpha_{11}\delta_{11}}{C_{p11}} + \frac{\alpha_{12}\delta_{12}}{C_{p12}}\right) T_0 k_1 x_1 - \theta\right] \frac{k_1}{R_{T1}}\left(\frac{\alpha_{11}\delta_{11}}{C_{p11}} + \frac{\alpha_{12}\delta_{12}}{C_{p12}}\right) \tag{4}$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \frac{dx_2}{dt} + k_2 x_2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_2}{2}\left(\frac{U_{02}}{d_2 - x_2}\right)^2 + \Delta P(t) S_2 - \left[\left(\frac{\alpha_{21}\delta_{21}}{C_{p21}} + \frac{\alpha_{22}\delta_{22}}{C_{p22}}\right) T_0 k_2 x_2 - \theta\right] \frac{k_2}{R_{T2}}\left(\frac{\alpha_{21}\delta_{21}}{C_{p21}} + \frac{\alpha_{22}\delta_{22}}{C_{p22}}\right),$$

де δ_{j1}, δ_{j2} – відповідно товщина шару золота та полікремнію j-го рухомого елементарного електрода, виконаного за технологією *MUMP*; α_{j1}, α_{j2} - коефіцієнти теплового розширення золота та полікремнію; R_{Tj} - тепловий опір $j-$го рухомого електрода; T_0 - температура навколишнього середовища при нормальних умовах; θ - зміна температури, ΔP - різниця тиску.

Коефіцієнт демпфірування b_j в даному випадку складається з двох компонентів – коефіцієнта механічного демпфірування системи b_S та коефіцієнта демпфірування за рахунок стиснутої плівки газу, що знаходиться між паралельними електродами, b_{gas} :

$$b_j = b_S + b_{gas}, \tag{5}$$

де b_S визначається механічним опором системи [13]:

$$b_S(T) = \frac{U_{0j}}{2}\left[\frac{1}{(d_j - x_j)p} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_j}{(d_j - x)^2 T_0 R_{Tj}}\right], \quad p = \frac{d}{dt}; \tag{6}$$

b_{gas} за аналогією з (6) можна визначити наступним чином:

$$b_{gas} = b_m\left(L_e, W_e\right) + b_n\left(S, S_{отв}, N_{отв}\right), \tag{7}$$

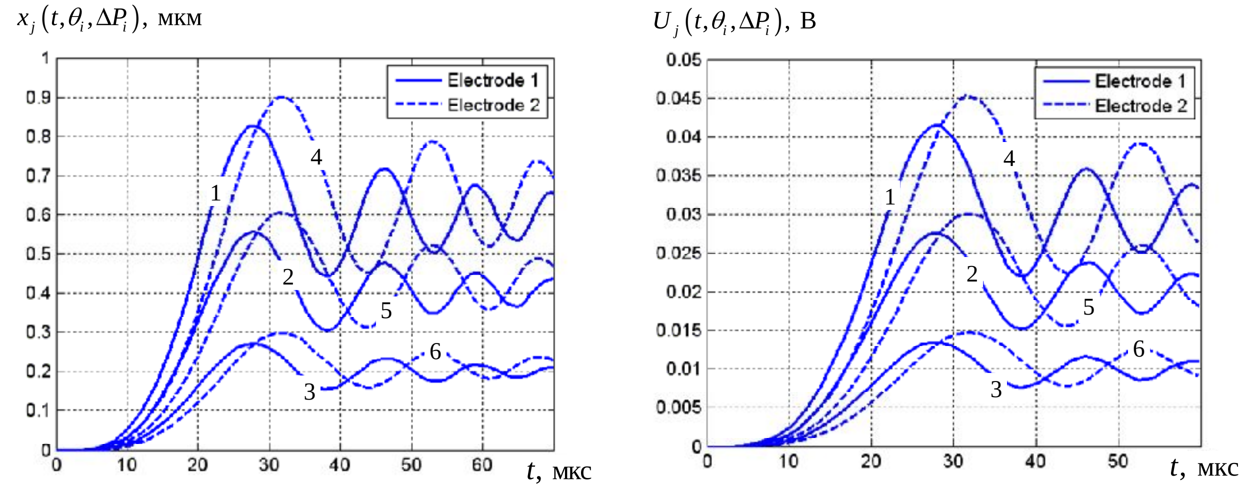
де $b_m\left(L_e, W_e\right) = \eta\left(L_e - 0,6W_e\right)\cdot W_e^{\,3}$; $b_n\left(S, S_{отв}, N_{отв}\right) = \frac{12\eta S^2}{N_{отв}\pi}\left(\frac{S_{отв}}{2S} - \frac{S_{отв}^{\;2}}{2S^2} - \frac{1}{4}\ln\left(\frac{S_{отв}}{S}\right) - \frac{3}{8}\right)$;

$W_e = S_e / L_e$; $L_e = \left(C_e + \sqrt{C_e^{\,2} - 16S_e}\right)\Big/4$; $S_e = S - S_{tp} - \pi r^2\left(N_1 + N_2 - 1\right)$; $N_{отв} = \left(N_1 - 1\right)\left(N_2 - 1\right)$;

$S_{отв} = \pi r^2$; $S_{tp} = N_{отв}\, p_{отв}^2$; $C_e = 2\left(L_1 + \left(N_1 - 1/2\right)\pi r\right) + 2\left(L_2 + \left(N_2 - 1/2\right)\pi r\right)$, $r-$ радіус отвору перфорації мембрани, N_1, N_2, – кількість отворів уздовж сторін прямокутної мембрани з довжинами L_1, L_2 відповідно, $p_{отв}-$ крок між отворами, $S-$ повна площа мембрани без вирахування отворів, $\eta = \frac{\eta_0}{1 + 9,638 K_n^{\,1.159}}-$ коефіцієнт в'язкості, $K_n = \frac{P\cdot\lambda}{P_0\cdot d}-$ коефіцієнт Кнудсена, λ – довжина вільного пробігу молекули газу.

Розв'язання рівнянь (4) за допомогою методу скінчених різниць дозволяє отримати динамічну характеристику переміщення рухомих електродів і, таким чином, змоделювати сигнали на виході ВБП [14]. На рис. 2, а представлені динамічні характеристики зсуву двох елементарних електродів під дією стрибкоподібної зміни напруги U_{0j}, температури θ, і тиску P.

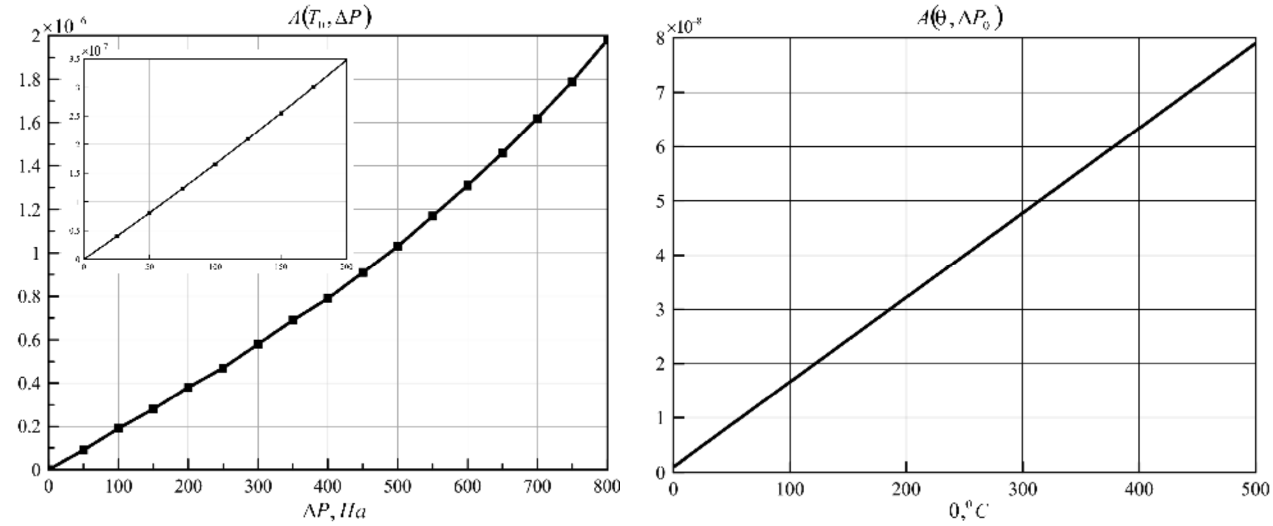
Таким чином, кожний окремий рухомий електрод (мембрана) під дією ударної напруги U_{0j} здійснює вакуумний рух, що несе в собі інформацію про θ, і ΔP, що діють на БВП. При цьому кожен окремий елементарний перетворювач може виступати як однопараметровий вимірювальний перетворювач [15].



а) б)

Рис.2 – Динамічні характеристики двоелектродного БВП під дією стрибкоподібного збудження: зміщення x_j рухомого j -го електроду (а) та вихідна напруга U_j (б) для ΔP =1500 Па, θ =200°С (1,4); ΔP =1000 Па, θ =200°С (2,5); ΔP =500 Па, θ =100°С (3,6)

На рис. 3, а,б представлені градуювальні характеристики, відповідно, для вимірювального перетворювача тиску P при $T_0 = const$ і температури T при відомому значенні тиску $P_0 = const$.



а) б)

Рис. 3. Грудуювальні характеристики для вимірювального перетворювача тиску ΔP (а) та температури θ (б)

Як видно, градуювальна характеристика вимірювача тиску (рис.3,а,б) має незначну нелінійність, яка проявляється зі збільшенням діапазону вимірювання. У той же час, в діапазоні $\Delta P \in [0;200]$ Па градувальна характеристика за тиском і температурою практично лінійна (рис. 3,а фрагмент).

Для реалізації двопараметрового датчика вимірювання тиску P і температури T на основі (4) запишемо систему рівнянь, яка дозволить отримати квазістатичне рішення [16]:

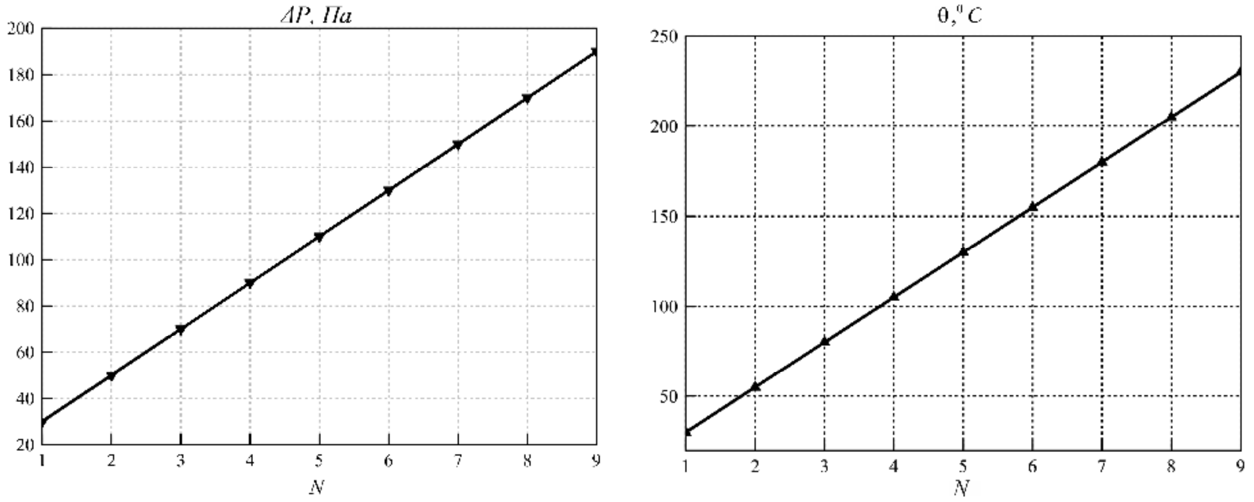
$$\Delta P_i S_1 + \theta_i \frac{k_1}{R_{T1}}\left(\frac{\alpha_{11}\delta_{11}}{C_{p11}}+\frac{\alpha_{12}\delta_{12}}{C_{p12}}\right) = k_1\frac{A_{1i}(\theta_i,\Delta P_i)}{G_1} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_1}{2}\left(\frac{U_{01}}{d_1 - \frac{A_{1i}(\theta_i,\Delta P_i}{G_1}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{11}\delta_{11}}{C_{p11}}+\frac{\alpha_{12}\delta_{12}}{C_{p12}}\right)^2 \frac{k_1^2}{R_{T1}} T_0 \frac{A_{1i}(\theta_i,\Delta P_i)}{G_1};$$

$$\Delta P_i S_2 + \theta_i \frac{k_2}{R_{T2}}\left(\frac{\alpha_{21}\delta_{21}}{C_{p21}}+\frac{\alpha_{22}\delta_{22}}{C_{p22}}\right) = k_2\frac{A_{2i}(\theta_i,\Delta P_i)}{G_2} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_2}{2}\left(\frac{U_{02}}{d_2 - \frac{A_{2i}(\theta_i,\Delta P_i}{G_2}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{21}\delta_{21}}{C_{p21}}+\frac{\alpha_{22}\delta_{22}}{C_{p22}}\right)^2 \frac{k_2^2}{R_{T2}} T_0 \frac{A_{2i}(\theta_i,\Delta P_i)}{G_2} \quad (9)$$

де G_1, G_2 - нормуючі коефіцієнти або функції, $i = \overline{1,M}$ - вимір у певний момент часу.

На рис. 4 а,б приведені визначені відповідно (9) зміни тиску ΔP та зміни температури θ на і-му замірі, а також дійсні значення ΔP і θ.

При цьому, похибка визначення температури складає θ = (1…2)°С за похибки визначення змін тиску ΔP = (0,02…0,06) Па, що вважається допустимим для багатопараметрових датчиків тиску і температури даного типу.



а) б)

Рис. 4. Результати визначення змін тиску ΔP (а) та зміни температури θ (б) за допомогою БВП (прямою лінією показані дійсні значення).

Висновки

Таким чином, запропонований вимірювальний перетворювач зі стрибкоподібним збудженням рухомого МЕМС- елемента з електростатичним керуванням, окрім багатофункціональності, має наступні переваги перед існуючими вимірювальними перетворювачами.

1. Мале енергоспоживання. Багатопараметровий ВП працює в імпульсному режимі при низькому рівні ударної керуючої напруги (0,1…0, 5) В та не потребує додаткового джерела гармонійного сигналу як у резонансних ВП.

2. Характеризується більш високою точністю вимірювань: теоретично визначена відносна похибка вимірювання температури складає 0, 95%, тиску – 0,05%.

3. Має меншу нелінійність та більш широкий діапазон вимірювання (за рахунок низьких керуючих напруг) у порівнянні з ємнісними ВП інших типів.

Література

1. R. Aigner, K-G. Oppermann, H. Kapels, S. Kolb. “Cavity- Micromachining” Technology: Zero-Package Solution for Inertial Sensors // Proc. ll"1 Int. Conf. On Solid-state Sensors and Actuators, Munchen, Germany, June 10-14 – 2001. –Vol. 1. – Pp. 186-189.

2. M. Ylimaula, M. Aberg, J. Kiihamaki, H. Ronkainen. Monolithic SOI-MEMS capacitive pressure sensor with standard bulk CMOS readout circui / Proc. Solid-State Circuits Conference, 2003. ESSCIRC '03. Proceedings of the 29th European, 2005. – Pp. 145-154.

3. A. Taranchuk. Controlled Oscillator on the Base of MEMS – Structures / A. Taranchuk, V. Mishan, A. Akulinechev // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science : Procedings of the Xth International Conference TCSET’2010 February 23-27, 2010. – Lviv - Slavske, Ukraine. – P. 350.

4. Yafan Zhang; S. Massoud-Ansari; Guangqing Meng; Woojin Kim; N. Najafi. An ultra-sensitive, high-vacuum absolute capacitive pressure sensor / Technical Digest. MEMS 2001. 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No.01CH37090), 2001.– Pp: 166 – 169.

5. Iftekhar Ibne Basith; Nabeeh Kandalaft; Rashid Rashidzadeh. Built-In Self-Test for Capacitive MEMS Using a Charge Control Technique / 2010 19th IEEE Asian Test Symposium, 2010. – Pp. 135 – 140.

6. Duck-Bong Seo, Robin Shandas. Design and simulation of MEMS- based comb- drive pressure sensor for pediatic post-operative monitoring applications, 2003 Summer Bioengineering Conf., June 25-29, Sonesta Beach Resort in Key Biscayne, Florida. – Pp. 1239 -1240.

7. F. L. Lewis. Wireless Sensor Networks, to appear in smart environments: Technologies, Protocols, and Applications. - New York, 2004. – Pp.1-18.

8. Gilbert J. R. 3D Coupled Electro–mechanics for MEMS: Applications of CoSolve–EM / J. R. Gilbert, R. Legtenberg and S. D. Senturia // MEMS’95. – Pp. 122–127.

9. Alla Taranchuk, Sergey Pidchenko. Frequency Measuring Transducers Based on the Piezoresonance Oscillator Systems with External MEMS Control. International Journal of Sensors and Sensor Networks. – Science Publishing Group: NEW YORK, U.S.A., 2013. - Vol. 1, No. 4. – Pp. 41-49.

10. Dec A. Micromachined electro–mechanically tunable capacitors and their applications to RF IC’s / A. Dec, K. Suyama // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – Dec. 1998. – Vol. 46, No.12. – Pp. 2587–2596.

11. Таранчук А. А. Пьезорезонансные измерительные преобразователи с внешним MEMS-управлением / А. А. Таранчук, С. К. Підченко, В. В. Мішан // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2013. – № 3. – С. 37-43.

12. Харкевич А. А. Теория электроакустических преобразователей : избр. труды : в 3 т. Т. 1 /

А. А. Харкевич. – М. : Наука, 1973. – 400 с.

13. P G Steeneken, Th G SM Rijks, J T M van Beek, M J E Ulenaers, J De Coster and R Puers. Dynamics and squeeze film gas damping of a capacitive RF MEMS switch // Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004 – Vol. 15 – No. 1. – P.p. 176-184.

14. Колпаков Ф. Ф. Динамическое моделирование электростатически управляемого MEMS-конденсатора в диапазоне рабочих температур (293...323) К. / Ф. Ф. Колпаков, Н. Г. Борзяк // Изв. высш. учеб. зав. Радиоэлектроника, серия 1. – 2008. – № 51. – С. 33–42.

15. Колпаков Ф. Ф. Тепловое моделирование MEMS-конденсатора с электростатическим управлением / Ф. Ф. Колпаков, Н. Г. Борзяк // Вісн. технол. ун-ту Поділля. : Ч. 1. - Т. 2 : Технічні науки. – Хмельницький, 2005. – № 4.– С. 37–41.

16. Колпаков Ф. Ф. Квазистатические характеристики системы двухэлектродных MEMS-конденсаторов / Ф. Ф. Колпаков, Н. Г. Борзяк // Радиотехника. – 2007. – № 148. – С. 245 – 249.

References

1. R. Aigner, K-G. Oppermann, H. Kapels, S. Kolb. “Cavity- Micromachining” Technology: Zero-Package Solution for Inertial Sensors // Proc. ll"1 Int. Conf. On Solid-state Sensors and Actuators, Munchen, Germany, June 10-14 – 2001. –Vol. 1. – Pp. 186-189.

2. M. Ylimaula, M. Aberg, J. Kiihamaki, H. Ronkainen. Monolithic SOI-MEMS capacitive pressure sensor with standard bulk CMOS readout circui / Proc. Solid-State Circuits Conference, 2003. ESSCIRC '03. Proceedings of the 29th European, 2005. ¬– Rp. 145-154.

3. 3. A. Taranchuk. Controlled Oscillator on the Base of MEMS – Structures / A. Taranchuk, V. Mishan, A. Akulinechev // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science : Procedings of the Xth International Conference TCSET’2010 February 23-27, 2010. – Lviv - Slavske, Ukraine. – P. 350.

4. Yafan Zhang; S. Massoud-Ansari; Guangqing Meng; Woojin Kim; N. Najafi. An ultra-sensitive, high-vacuum absolute capacitive pressure sensor / Technical Digest. MEMS 2001. 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No.01CH37090), 2001.– Pr: 166 – 169.

5. Iftekhar Ibne Basith; Nabeeh Kandalaft; Rashid Rashidzadeh. Built-In Self-Test for Capacitive MEMS Using a Charge Control Technique / 2010 19th IEEE Asian Test Symposium, 2010. – Pr. 135 – 140.

6. Duck-Bong Seo, Robin Shandas. Design and simulation of MEMS- based comb- drive pressure sensor for pediatic post-operative monitoring applications, 2003 Summer Bioengineering Conf., June 25-29, Sonesta Beach Resort in Key Biscayne, Florida. – Pp. 1239 -1240.

7. F. L. Lewis. Wireless Sensor Networks, to appear in smart environments: Technologies, Protocols, and Applications. - New York, 2004. – Pp.1-18.

8. Gilbert J. R. 3D Coupled Electro–mechanics for MEMS: Applications of CoSolve–EM / J. R. Gilbert, R. Legtenberg and S. D. Senturia // MEMS’95. – Pp. 122–127.

9. Alla Taranchuk, Sergey Pidchenko. Frequency Measuring Transducers Based on the Piezoresonance Oscillator Systems with External MEMS Control. International Journal of Sensors and Sensor Networks. – Science Publishing Group: NEW YORK, U.S.A., 2013. - Vol. 1, No. 4. – Pp. 41-49.

10. Dec A. Micromachined electro–mechanically tunable capacitors and their applications to RF IC’s / A. Dec, K. Suyama // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – Dec. 1998. – Vol. 46, No.12. – Pp. 2587–2596.

11. Taranchuk A. A. P’ezorezonansnye izmeritel’nye preobrazovateli s vneshnim MEMS-upravleniem / A. A. Taranchuk, S. K. Pidchenko, V. V. Mishan // Vimirjuval’na ta obchisljuval’na tehnika v tehnologichnih procesah. – Hmel’nic’kij, 2013. – № 3. – S. 37-43.

12. Harkevich A. A. Teorija jelektroakusticheskih preobrazovatelej : izbr. trudy : v 3 t. T. 1 / A. A. Harkevich. – M. : Nauka, 1973. – 400 s.

13. P G Steeneken, Th G SM Rijks, J T M van Beek, M J E Ulenaers, J De Coster and R Puers. Dynamics and squeeze film gas damping of a capacitive RF MEMS switch // Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004 – Vol. 15 – No. 1. – P.p. 176-184.

14. Kolpakov F. F. Dinamicheskoe modelirovanie jelektrostaticheski upravljaemogo MEMS-kondensatora v diapazone rabochih temperatur (293...323) K. / F. F. Kolpakov, N. G. Borzjak // Izv. vyssh. ucheb. zav. Radiojelektronika, serija 1. – 2008. – № 51. – S. 33–42.

15. Kolpakov F. F. Teplovoe modelirovanie MEMS-kondensatora s jelektrostaticheskim upravleniem / F. F. Kolpakov, N. G. Borzjak // Visn. tehnol. un-tu Podillja. : Ch. 1. - T. 2 : Tehnichni nauki. – Hmel’nic’kij, 2005. – № 4.– S. 37–41.

16. Kolpakov F. F. Kvazistaticheskie harakteristiki sistemy dvuhjelektrodnyh MEMS-kondensatorov / F. F. Kolpakov, N. G. Borzjak // Radiotehnika. – 2007. – № 148. – S. 245 – 249.

Рецензія: 27.03. 2018.03.27
Рецензент: д.т.н., проф. кафедри телекомунікацій та комп’ютерно-інтегрованих технологій
Підченко С.К.