

УДК 621.39+621.38.049.77

Н.Г. БОРЗЯК

Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Україна

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ УДАРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО MEMS-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Предложен принципиально новый подход к реализации измерительного преобразователя (ИП) давления, основным отличием которого является использование режима ударного возбуждения электростатического MEMS-преобразователя. Разработан алгоритм построения градуировочных характеристик и предложена модель ИП давления на базе теории преобразователей А.А. Харкевича с учетом демпфирования за счет пленки газа в межэлектродном зазоре. Смоделирован сигнал на выходе ИП давления, проведена его обработка с помощью предложенной модели, получены градуировочные характеристики. Установлены зависимости влияния конструктивных параметров ИП на градуировочные характеристики.*

**Ключевые слова:** измерительный преобразователь, электростатический MEMS-преобразователь, теория А.А. Харкевича, ударное возбуждение, демпфирование.

### Введение

Измерение и контроль давления жидкостей и газов являются одними из важнейших задач современной промышленной автоматики, медицины, автомобильной и авиационной техники [1 – 3]. Датчики давления могут прямо или косвенно давать информацию о множестве параметров, используемых в автоматическом управлении [1 – 4].

Различают ИП абсолютного, относительного и дифференциального давления. Однако в основе всех датчиков давления, несмотря на их внешние различия, лежит один и тот же базовый элемент – мембрана, изменяющая свое положение под действием давления.

Существующие датчики давления основаны на различных ИП, таких как: пьезорезистивный [4, 5], емкостной [3, 5], резонансный [5]. Однако тенденция миниатюризации, снижения энергопотребления и себестоимости систем мониторинга и контроля необратимо приводит к разработке сенсоров на базе технологии MEMS.

Также важным преимуществом этой технологии является совместимость со стандартной технологией ИС, что делает принципиально возможным создание однокристалльного сенсорного узла.

В свою очередь, подход исполнения всего устройства на одном кристалле позволяет снизить влияние паразитных явлений и внешних шумов на измерительный сигнал, поскольку его обработка и передача осуществляется в непосредственной близости от ИП.

### Результаты исследований

В представленной работе предложен новый подход реализации дифференциального ИП давления на принципе ударного возбуждения электростатического MEMS-преобразователя управляющим напряжением  $U_0$ . Схематически ИП давления показан на рис. 1, основные конструктивные параметры приведены в табл. 1.

Принцип работы предложенного ИП давления заключается в следующем. Пусть на электростатический преобразователь воздействует разность давления  $\Delta P$ , вызывающая изменение положения мембраны  $\Delta x(\Delta P)$ . При подаче управляющего напряжения  $U_0$  на электростатический преобразователь происходит перемещение подвижного электрода (мембраны) из начального положения (1)  $x_0 + \Delta x(\Delta P)$  в положение (2)  $x_1(U_0, \Delta P)$ , задаваемое уровнем  $U_0$ .

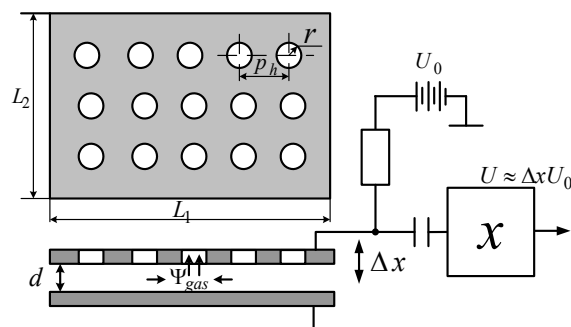


Рис. 1. ИП с ударным возбуждением на основе электростатического MEMS-преобразователя

Таблица 1  
Основные конструктивные параметры  
ИП давления

Параметр		Значение
Зазор между электродами	d	2 мкм
Радиус отверстия перфорации	r	8 мкм
Расстояние между центрами соседних отверстий	$p_h$	30 мкм
Количество отверстий в длину	$N_1$	6
Количество отверстий в ширину	$N_2$	5
Длина мембраны	$L_1$	230 мкм
Ширина мембраны	$L_2$	210 мкм
Масса мембраны	m	1,5 мкг
Коэффициент упругости	k	124 Н/м

Переход электрода из положения 1 в 2 сопровождается затухающим колебательным переходным процессом с частотой  $\omega_0$ , равной собственной частоте механического резонанса.

Колебание электрода вызывает изменение емкости преобразователя  $\Delta C$ , а, следовательно, и изменение напряжения  $\Delta U = f\{x(\Delta P)\}$ , которое и является информативным параметром.

Переходной процесс изменения положения подвижного электрода может быть описан моделью (1) [6], построенной на основе теории преобразователей А.А. Харкевича [7]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{2} \left( \frac{U_0}{d-x} \right)^2 + \Delta P(t) S - \left[ \left( \frac{\alpha_1 \delta_1}{C_{p1}} + \frac{\alpha_2 \delta_2}{C_{p2}} \right) T_0 kx - \theta \right] \times \frac{k}{R_T} \left( \frac{\alpha_1 \delta_1}{C_{p1}} + \frac{\alpha_2 \delta_2}{C_{p2}} \right); \quad (1)$$

где  $x$  – смещение подвижного электрода относительно начального положения;

$\delta_1, \delta_2$  – соответственно толщина слоя золота и поликремния подвижного элементарного электрода, выполненного по MUMP;

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплового расширения золота и поликремния;

$R_T$  – тепловое сопротивление подвижного электрода;

$T_0$  – температура окружающей среды при нормальных условиях;

$\theta$  – перегрев относительно  $T_0$ ;

$\Delta P$  – разность давления;

$U_0$  – величина ударного напряжения, вызывающего перемещение подвижного электрода из начального положения в заданное.

Решение уравнения (1) относительно  $x$  методом конечных разностей позволяет получить динамическую характеристику перемещения подвижных электродов и, таким образом, смоделировать сигнал на выходе ИП давления. Поскольку между электродами преобразователя находится воздух или газ (не вакуум), необходимо учесть демпфирование за счет газа. Коэффициенты демпфирования  $b$  в данном случае будет состоять из двух составляющих – коэффициента механического демпфирования системы  $b_s$  и коэффициента демпфирования за счет сжатой пленки газа [8, 9], находящегося между параллельными электродами,  $b_{gas}$ :

$$b_j = b_s + b_{gas}, \quad (2)$$

где  $b_s$  определяется механическим сопротивлением системы [7]:

$$b_s(T) = \frac{U_{oj}}{2} \left[ \frac{1}{p(d_j - x_j)} - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_j}{(d_j - x)^2 T_0 R_{Tj}} \right],$$

$$p = \frac{d}{dt}; \quad (3)$$

$b_{gas}$  по аналогии с [9] может быть определен следующим образом:

$$b_{gas} = b_m(Le, We) + b_n(S, Sh, N), \quad (4)$$

где

$$b_n(S, Sh, N) = \frac{12\eta S^2}{N\pi} \left( \frac{Sh}{2S} - \frac{Sh^2}{2S^2} - \frac{1}{4} \ln \left( \frac{Sh}{S} \right) - \frac{3}{8} \right), \quad (5)$$

$$b_m(Le, We) = \eta(Le - 0,6We)We^3;$$

$$Le = (Ce + \sqrt{Ce^2 - 16Se})/4;$$

$$We = Se/Le;$$

$$Se = S - Stp - \pi r^2(N_1 + N_2 - 1), \quad N = (N_1 - 1)(N_2 - 1);$$

$$Stp = Np_h^2;$$

$$Sh = \pi r^2;$$

$$Ce = 2(L_1 + (N_1 - 1/2)\pi r) + 2(L_2 + (N_2 - 1/2)\pi r);$$

$r$  – радиус отверстия перфорации мембраны;

$N_1, N_2$  – количество отверстий вдоль сторон прямоугольной мембраны с длинами  $L_1, L_2$  соответственно;

$p_h$  – шаг между отверстиями (рис. 1);

$S$  – полная площадь мембраны без вычета отверстий;

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + 9,638 \text{Kn}^{1,159}} \text{ – коэффициент вязкости;}$$

$\text{Kn} = P\lambda / P_0 d$  – коэффициент Кнудсена;

$\lambda$  – длина свободного пробега молекулы газа.

На рис. 2 представлены переходные процессы перемещения мембраны  $x(t)$  (а) под действием управляющего ударного напряжения  $U_0$  для нескольких величин разности давления  $\Delta P$ , изменения емкости преобразователя  $C(t) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d - x(t)}$ , соответствующие  $x(t)$  (б) и изменения напряжения на выходе преобразователя  $U(t) = U_0 - \Delta U \{C(t)\}$  (в) для ИП давления (рис. 1, табл. 1).

Как видно из рис. 2, амплитуда колебания тем выше, чем больше величина  $\Delta P$ .

Снятый с подвижного электрода сигнал  $U(t)$  отфильтруем по частоте  $\omega_0$  с применением прямого и обратного преобразования Фурье.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) позволяет превратить  $N$  отсчетов сигнала  $\{U(k)\}$  во столько же спектральных отсчетов  $\{\dot{U}(n)\}$ .

Связь между представлениями сигнала во временной и частотной областях выражается следующими формулами [10]:

$$\dot{U}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} U(k) e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}, \quad (6)$$

$$U(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{U}(n) e^{j\frac{2\pi nk}{N}}. \quad (7)$$

Применяя выражение (6) для прямого ДПФ, получим спектр сигнала.

Последовательность  $\{U(k)\}$  в (7) представляет собой отсчеты, взятые с частотой дискретизации  $F_s$  (с интервалом  $T = 1/F_s$ ), таким образом, частоты анализа, соответствующие спектральным отсчетам, полученным в результате вычисления ДПФ, будут расположены с шагом  $F_s / N$ , то есть, первый элемент полученного вектора соответствует нулевой частоте, последний – частоте  $F_s (N-1) / N$ .

Применяя обратное преобразование Фурье к составляющей спектра с частотой  $\omega_0$ , получим значение градуировочной характеристики  $A(\Delta P)$ , соответствующее разности давлений  $\Delta P_i$  (рис. 3).

В табл. 2 приведены градуировочные характеристики  $A(\Delta P)$  для ИП с разными значениями коэффициента упругости  $k$ , массы мембраны  $m$ , зазора  $d$ , площади мембраны  $S$ .

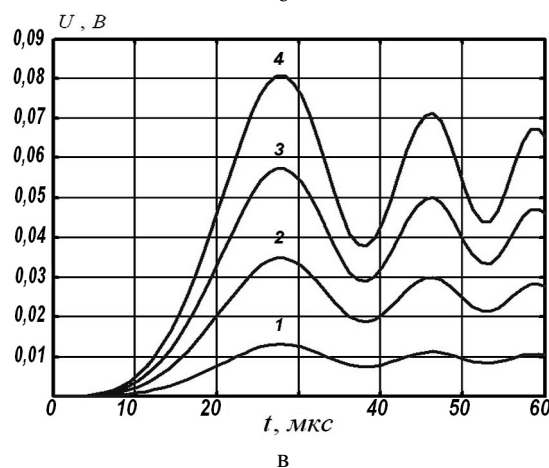
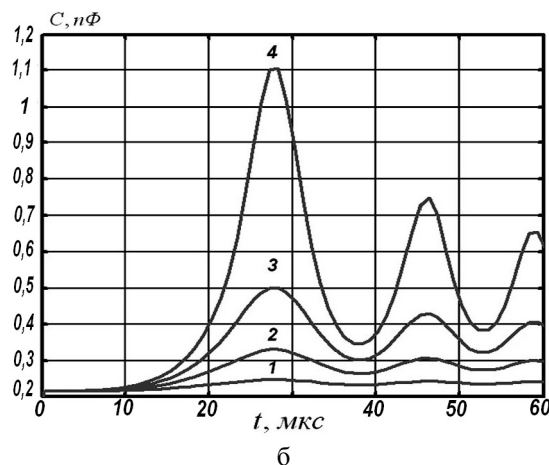
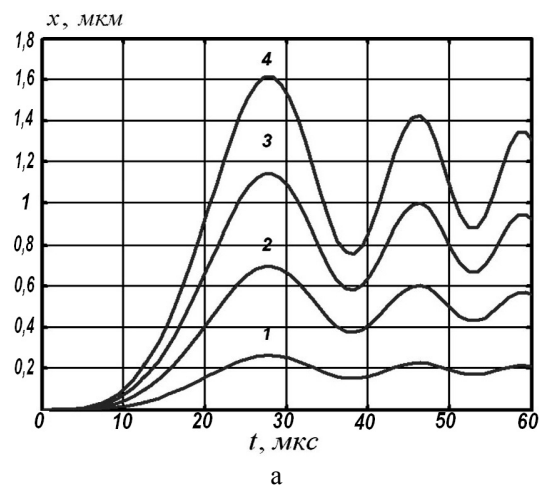


Рис. 2. Переходные процессы  $x(t)$  (а), изменения емкости преобразователя  $C(t)$  (б), напряжения на выходе преобразователя  $U(t)$  (в) для разности давления  $\Delta P$ : 1 – 500 Па; 2 – 1300 Па, 3– 2100 Па, 4 – 2900 Па

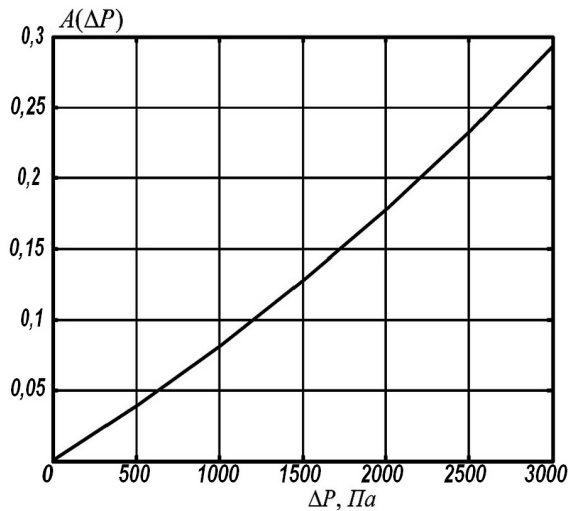


Рис. 3. Градуировочная характеристика

Таблица 2

Градуировочные характеристики  $A(\Delta P)$ 

$\Delta P$ , Па	$A(\Delta P)$			
	$m = 1,5 \text{ мкг}, d = 2 \text{ мкм}, S = (230 \times 210) \text{ мкм}^2$		$k = 124 \text{ Н/м}, d = 2 \text{ мкм}, S = (230 \times 210) \text{ мкм}^2$	
	$k, \text{ Н/м}$		$m, \text{ мкг}$	
	37	122	1,3	2
0	0,0002	$1,7e-5$	0,00023	0,00015
230	0,108	0,018	0,02	0,028
460	0,231	0,0375	0,04	0,0576
690	0,373	0,0573	0,06	0,087
920	0,5376	0,0778	0,085	0,118
1150	-	0,099	0,108	0,15
1380	-	0,121	0,1327	0,183
1610	-	0,144	0,158	0,216
1840	-	0,1684	0,185	0,251
2070	-	0,1935	0,212	0,287
2300	-	0,2196	0,24	0,324
2530	-	0,247	0,27	0,36
2760	-	0,2756	0,3	0,401
2990	-	0,3056	0,336	0,44

Из табл. 2 видно, что конструктивные параметры ИП существенно влияют на рабочий диапазон устройства: с уменьшением коэффициента упругости  $k$ , массы мембраны  $m$ , зазора  $d$  и с увеличением площади мембраны  $S$  рабочий диапазон уст-

ройства уменьшается. В то же время, другим важным фактором, ограничивающим рабочий диапазон ИП, является ограничение диапазона перемещения мембраны MEMS-преобразователя  $x$ , так как существует такое положение  $x_6$ , при котором колебание не затухает, а наоборот увеличивает амплитуду, возникает бифуркация, приводящая к выходу устройства из строя [6].

## Выводы

Таким образом, применение технологии MEMS для реализации датчиков давления позволило разработать принцип построения нового класса ИП, основанный на использовании ударного возбуждения MEMS-преобразователя.

Предложенная модель дала возможность смоделировать градуировочные характеристики и выявить влияние конструктивных параметров MEMS-преобразователя на рабочий диапазон представленного ИП давления.

Предложенный ИП обладает следующими преимуществами перед существующими ИП:

малым энергопотреблением – во-первых, работает при низком уровне ударного управляющего напряжения (порядка  $(0,1 \dots 0,5)$  В), во-вторых, работает в импульсном режиме;

не требует дополнительного источника гармонического сигнала как в резонансных ИП;

обладает линейной градуировочной характеристикой в более широком диапазоне измерения (за счет низких управляющих напряжений) по сравнению с емкостными ИП.

## Литература

1. Nelsimar V. SiC MEMS Pressure Sensors For Harsh Environment Application / V. Nelsimar // *Micro nano News*, April 2008. – P. 10-13.
2. Kerry Ch. Modeling a MEMS Thermal Conductivity Pressure Sensor for the Evaluation of Glass Frit Vacuum Packaging / Ch. Kerry // *Journal of Nano-to-Macro Energy Transport (JNET)*. – 2004. – P. 1-7.
3. Sensors: Pressure [Электронный ресурс]: Официальный сайт Freescale. – Режим доступа: <http://www.freescale.com/webapp/sps/site/overview.jsp?nodeId=0112699036>
4. Characterization of MEMS Automotive Sensor for Tire Pressure Monitoring System / A Hussain, M.A. Hannan, H. Sanusi, A. Mohamed // *Journal of Applied Sciences*. – 2006. – P. 810-815.
5. Henning A.K. A MEMS-based, high-sensitivity pressure sensor for ultraclean semiconductor applications / A.K. Henning, N. Mourlas, S. Metz // *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*. – P. 165-168.

6. Колпаков Ф.Ф. Динамическое моделирование электростатически управляемого MEMS-конденсатора в диапазоне рабочих температур (293...323) К / Ф.Ф. Колпаков, Н.Г. Борзяк // Изв. ВУЗ. Радиоэлектроника. – КПИ. – 2008. – №5. – С. 33-41.

7. Харкевич А.А. Теория электроакустических преобразователей. Избр. труды: В 3 т. / А.А. Харкевич. – М.: Наука, 1973. – Т. 1. – 400 с.

8. Suhas K. Mechanical Modeling Issues in Optimization of Dynamic Behavior of RF MEMS Switches /

K. Suhas, K Sripadaraja // International Journal of Computer, Information and Systems Science and Engineering. – 2008. – P. 221-225.

9. Bery A. Substrate Effects in Squeeze Film Damping of Lateral Parallel-Plate Sensing MEMS Structures / A Bery // IEEE Int. Conf. MEMS. – 1999. – P. 296-301.

10. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

Поступила в редакцию 27.11.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. ППОС А.А. Зеленский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ НА ОСНОВІ УДАРНОГО ЗБУДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО MEMS-ПЕРЕТВОРЮВАЧА

*Н.Г. Борзяк*

Запропоновано принципово новий підхід до реалізації вимірювального перетворювача (ВП) тиску, головною відмінністю якого є використання режиму ударного збудження електростатичного MEMS-перетворювача. Розроблено алгоритм побудови градуювальних характеристик та запропоновано модель ВП на базі теорії перетворювачів А.А. Харкевича з урахуванням демпфірування плівкою газу у міжелектродному зазорі. Змодельовано сигнал на виході ВП, проведено його обробку за допомогою запропонованої моделі, отримані градуювальні характеристики. Установлені залежності впливу конструктивних параметрів ВП на градуювальні характеристики.

**Ключові слова:** вимірювальний перетворювач, електростатичний MEMS-перетворювач, теорія А.А. Харкевича, ударне збудження, демпфірування.

### IMPACT EXCITATION OPERATED ELECTROSTATIC MEMS-ACTUATOR BASED PRESSURE MEASURING CONVERTER

*N.G. Borzyak*

A fundamentally new implementation approach of the pressure measuring converter (MC) is proposed. The main distinction of this MC is impact excitation regime of the electrostatic MEMS-actuator using. Calibration characteristics building algorithm is elaborated and A.A. Kharkevich theory based pressure MC model with interelectrode gap squeeze film gas damping effect is offered. Pressure MC output signal is simulated, this signal processing by means of proposed model is carried out, calibration characteristics are obtained. The dependences of a design factor influences on calibration characteristics are established.

**Key words:** measuring converter, MEMS-actuator, A.A. Kharkevich theory, impact excitation, damping.

**Борзяк Наталья Григорьевна** – соискатель каф. ППОС, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: bnatalia@inbox.ru.