

## Акустические приборы и системы

УДК 531.768

М.Ф. Жовнір, М.В. Бітов, Л.Д. Писаренко

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
вул.Політехнічна,16/9, м.Київ-56, 03056, Україна.

### Вимірювальні перетворювачі мікропереміщень та тиску на поверхневих акустичних хвилях

В даній статті приведені результати теоретичних та експериментальних досліджень вимірювальних перетворювачів (ВП) мікропереміщень та тиску на основі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль (ПАХ), що поширюються на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу. Обґрунтовано частотний метод вимірювання на основі диференціального ВП із застосуванням метода конкуренції мод коливань в ПАХ-генераторах, що забезпечує можливість збурення електричного поля ПАХ на більшій ділянці звукопроводу при збереженні одномодового режиму роботи генераторів. Бібл. 11, рис.7.

**Ключові слова:** поверхневі акустичні хвилі (ПАХ); дисперсія фазової швидкості; вимірювальні перетворювачі мікропереміщень та тиску; коефіцієнт перетворення; генераторний (частотний) метод вимірювання.

#### Вступ

В теперішній час приділяється велика увага вимірювальним перетворювачам (ВП) на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), які, при відносно невисоких частотах (десятки-сотні мегагерц) у порівнянні з електромагнітними та магнітостатичними хвилями, забезпечують, завдяки малим довжинам хвиль, простоті їх збудження та приймання, високу чутливість перетворення інформаційних сигналів в широкому динамічному діапазоні при застосуванні частотних та фазових методів вимірювання. Такі перетворювачі можуть використовуватись для вимірювання сили та тиску, прискорення, крутного моменту, лінійних та кутових переміщень, швидкості, напруженостей електричного та магнітного полів, складу газового середовища тощо [1–5].

Вимірювальні перетворювачі на ПАХ створюються на основі:

- зміни фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини лінії затримки (ЛЗ) або резонатора внаслідок деформації звукопроводу балочно-го або мембранного типу [1, 2];

- зміни фазової швидкості ПАХ при дії навколишнього середовища на поверхню звукопроводу [1, 2];
- зміни акустичної довжини ЛЗ при переміщенні приймача ПАХ над поверхнею п'єзоелектричного звукопроводу [1–4];
- зміни фазової швидкості ПАХ при збуренні мембраною (зондом) електричного поля хвилі, що поширюється на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу [5–8].

Якщо дія механічних та фізичних величин призводить до набігання фази хвилі не більшому  $\pi$ , то в основі таких перетворювачів доцільно застосовувати високостабільний ПАХ-генератор, що містить регульовані під впливом вимірювальних величин резонатор або лінію затримки на ПАХ. [1, 2, 6-8].

Однак, при необхідності вимірювання лінійних або кутових переміщень в динамічному діапазоні до 100...200 мм (360 кут. град.) необхідно застосовувати фазовий метод вимірювання. Для усунення багатозначності фазових вимірювань запропоновано метод вимірювання на основі використання фазового набігання кількох поверхневих акустичних хвиль, що поширюються на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу на різних частотах, на яких вимірюються інформаційні параметри, що визначають положення рухомого приймача ПАХ [3, 4].

В даній роботі приведені результати теоретичних та експериментальних досліджень вимірювальних перетворювачів мікропереміщень та тиску на основі зміни фазової швидкості ПАХ при збуренні мембраною (зондом) електричного поля хвилі, що поширюється на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу.

#### Основний матеріал

Функціональна схема ВП мікропереміщень та тиску (рис.1) містить ЛЗ на ПАХ на основі п'єзоелектричного звукопроводу, зустрічно-штирові перетворювачі (ЗШП) якої з'єднані з підсилювачем електричних коливань, утворюючи таким чином ПАХ-генератор. Усі елементи роз-

міщуються у корпусі, який герметично закритий мембраною (зондом), котра виконана із пружного матеріалу (наприклад, бронза, сталь тощо) і змінює своє положення відносно поверхні п'єзоелектричного звукопроводу в межах  $0 \dots \lambda$ , де  $\lambda$  - довжина ПАХ.

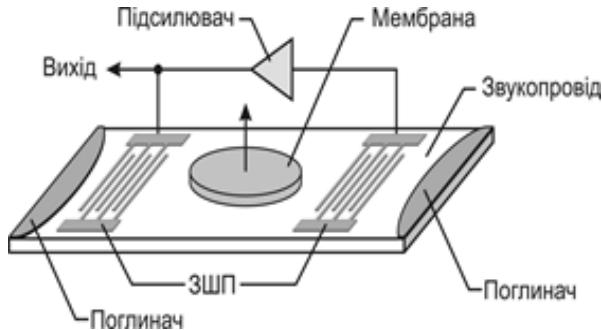


Рис. 1. Функціональна схема ВР на ПАХ

Мембрана переміщується в електричному полі ПАХ, потенціал якого змінюється при віддаленні від поверхні п'єзоелектричного звукопроводу за формулою  $\varphi = \varphi_0 \exp(-2\pi\rho)$  [9], де  $\varphi_0$  - потенціал електричного поля на поверхні звукопроводу;  $\rho = x/\lambda_0$  - нормований зазор;  $x$  - відстань від п'єзоелектричної поверхні до мембрани;  $\lambda_0 = V_0/f_0$ ,  $V_0$  та  $\lambda_0$  - фазова швидкість та довжина ПАХ на вільній поверхні звукопроводу;  $f_0$  - частота ПАХ.

При генераторному методі вимірювання частота ПАХ-генератора із врахуванням дисперсії фазової швидкості ПАХ при збуренні електричного поля хвилі мембраною визначається співвідношенням [8, 10]:

$$f \approx \left( n - \frac{\Psi_x}{2\pi} \right) \frac{V_0}{L}, \quad (1)$$

де  $n$  - ціле число, що визначає моду коливань, звичайно  $n = 100 \dots 250$ ;  $L$  - відстань між центрами ЗШП;  $\Psi_x$  - додаткове фазове набігання хвилі на збуреній ділянці п'єзоелектричного звукопроводу, яке визначається співвідношенням [8]:

$$\Psi_x = \pi N k \exp(-2\pi\rho), \quad (2)$$

де  $N = W_0/\lambda_0$  - число довжин хвиль на збуреній ділянці звукопроводу;  $k = -2[V(x) - V_0]/V_0$  - коефіцієнт електромеханічного зв'язку, який практично визначає

відносну зміну фазової швидкості ПАХ при наявності тонкої металевої плівки на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу;  $V(x)$  - фазова швидкість ПАХ на ділянці звукопроводу під мембраною.

На рис. 2 зображені теоретичні (графіки 1...3) залежності фазового зсуву вихідного сигналу ЛЗ на ПАХ при збуренні мембраною електричного поля для різних матеріалів.

Експериментальна залежність фазового зсуву вихідного сигналу (графік 4 на рис. 2) була отримана в результаті апроксимації експериментальних даних при дослідженні дисперсії фазової швидкості ПАХ при збуренні мембраною електричного поля ПАХ на поверхні ніобіт літію YZ-зрізу і визначається співвідношенням:

$$\Psi_E = 0,033\pi N k \exp(-2\pi\rho). \quad (3)$$

Розбіжність теоретичної та експериментальної залежностей обумовлена похибками встановлення мембрани відносно поверхні звукопроводу в процесі виконання вимірювань і становить 15...20 %.

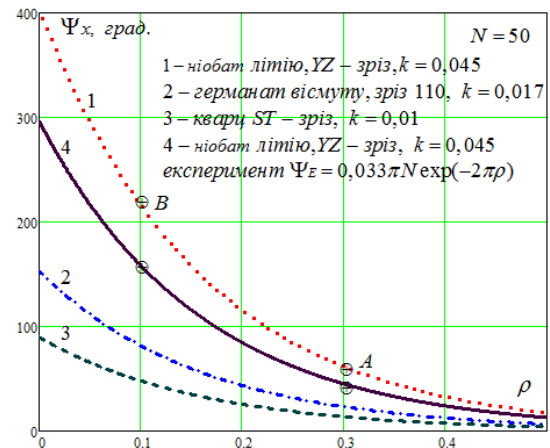


Рис. 2. Теоретичні та експериментальна залежності фазового зсуву вихідного сигналу ЛЗ на ПАХ від нормованого зазору

Використовуючи співвідношення (1) і (2), приріст частоти ПАХ-генератора (функцію перетворення) при переміщенні мембрани перпендикулярно поверхні п'єзоелектричного звукопроводу можна представити у вигляді:

$$F_x = - \frac{N f_0 k}{2n} \exp(-2\pi\rho). \quad (4)$$

На рис.3 представлені теоретична (графік 1) та експериментальна (графік 2 із врахуванням залежності для  $\Psi_E$ ) функції перетворення вимірювального перетворювача.

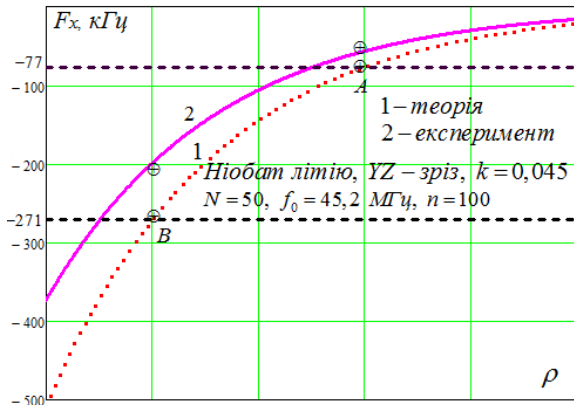


Рис. 3. Теоретична та експериментальна функції перетворення ВП мікропереміщень на ПАХ

Для забезпечення одномодового режиму роботи ПАХ-генератора необхідно вибирати робочу ділянку А-В таким чином, щоб діапазон зміни фазового зсуву не перевищував 180° (рис.2 та 3).

Наприклад, для ніобіт літію YZ-зрізу (при  $N = 50$ ,  $\lambda_0 = 77$  мкм,  $f_0 = 45,2$  МГц і  $n = 100$ ) при переміщенні мембрани в діапазоні  $\rho = 0,3 \dots 0,1$  приріст частоти ПАХ-генератора змінюється в інтервалі  $F_x \approx (77,21 \dots 271,30)$  кГц, тобто середній коефіцієнт перетворення мікропереміщень складає:  $S_x \approx \Delta F_x / \Delta x \approx 12,6$  кГц/мкм.

Залежність прогинання мембрани  $x$  від тиску  $P$  визначається типом мембрани та її конструктивними параметрами. У випадку мембрани з жорстким центром прогинання визначається співвідношенням [11]:

$$x = \gamma P, \quad (5)$$

де  $\gamma = AR^4 / Eh^3$ ;

$$A = 3(1 - \mu^2)(c^4 - 1 - 4c^2 \ln c) / 16c^4; \quad c = R/r;$$

та  $r$  – робочий радіус мембрани та радіус її жорсткого центру;  $\mu$  і  $E$  – коефіцієнт Пуассона та модуль пружності матеріалу мембрани;  $h$  – товщина мембрани.

Із розрахунку для мембрани із сталі ( $\mu = 0,28$ ;  $E = 2,2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>;  $r = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $h = 10^{-3}$  м;  $R = 15 \cdot 10^{-3}$  м)  $\gamma = 3,4 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/Н впливає, що її переміщення в інтервалі  $\rho = 0,3 \dots 0,1$  буде здійснюватися під тиском в діапазоні

$$P \approx (0 \dots 4,53 \cdot 10^5) \text{ Н/м}^2 \approx (0 \dots 3398) \text{ мм.рт.ст.}$$

При цьому частота ПАХ-генератора змінюється в інтервалі  $F_P = F_x \approx (77,21 \dots 271,30)$  кГц, а серед-

ній коефіцієнт перетворення перетворювача тиску складає:

$$SP \approx \Delta F_P / \Delta P \approx 0,43 \text{ Гц/Н} \cdot \text{м}^{-2} \approx 57 \text{ Гц/мм.рт.ст.}$$

Змінюючи число довжин хвиль на збуреній ділянці звукопроводу  $N$ , робочу частоту генератора  $f_0$  та застосовуючи сильні п'єзоелектрики (ніобат літію, германат вісмуту, окис цинку, нітрид алюмінію та ін.), можливо забезпечити необхідний коефіцієнт перетворення.

Для підвищення чутливості та точності вимірювання доцільно використання частотного методу вимірювання на базі диференціального ВП, який містить два ПАХ-генератори, із застосуванням метода конкуренції мод коливань [1, 6] в ПАХ-генераторі, що забезпечує можливість збурення електричного поля ПАХ на більшій ділянці п'єзоелектричного звукопроводу при одномодовому режимі роботи ПАХ-генератора.

На рис. 4 наведено функціональну схему ВП на основі двох ПАХ-генераторів 1 та 2, вихідні сигнали яких надходять на змішувач 3, з якого сигнал проміжної частоти надходить на фільтр 4 та підсилювач 5. Переміщення мембрани 6 викликає фазове набігання ПАХ згідно співвідношення (2), в результаті чого відбувається зміна частоти коливань керованого ПАХ-генератора.

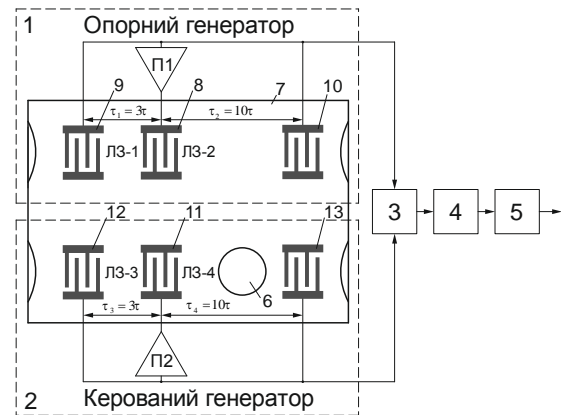


Рис. 4. Функціональна схема диференціального ВПперетворювача мікропереміщень та тиску на ПАХ

Метод конкуренції мод полягає у тому, що в генераторі створюються два різних за акустичною довжиною канали зворотного зв'язку. Затримка сигналу в одному каналі  $\tau_1 = L_1 / V$ , а в другому  $\tau_2 = L_2 / V$ . При цьому в автоколивальній системі виникають дві зсунуті одна відносно іншої сітки власних частот. В одній сітці власні частоти знаходяться на відстані  $\Delta f_1 \approx 1/\tau_1$ , а в іншій - на  $\Delta f_2 \approx 1/\tau_2$ . Стійкі коливання в автоге-

нераторі при обмеженому запасі за самозбудженням виникають лише на тій частоті, на якій власні частоти різних сіток співпадають. Для цієї частоти результуючий коефіцієнт зворотного зв'язку буде найбільшим. ЗШП при цьому можуть бути досить широкосмуговими. Реалізувати два акустичні канали зворотного зв'язку можливо, використовуючи дві лінії затримки або використовуючи ЛЗ на ПАХ, яка має один вхідний ЗШП 8 та два вихідні ЗШП 9 та 10, розміщені по різні боки від вхідного.

Для визначення діапазону вимірювання проведемо аналіз роботи ПАХ-генераторів. Умови існування автоколивань ПАХ-генератора, як лінійної резонансної системи, визначаються рівняннями балансу амплітуд та фаз:

### Баланс амплітуд

#### 1. Опорний генератор:

$$\begin{aligned} A_{\Gamma 1}(f) A_1(f) A_2(f) &\geq 1; \\ A_{\Gamma 1}(f) A_2(f) A_3(f) &\geq 1, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $A_{\Gamma 1}, A_1, A_2, A_3$  - амплітудно-частотні характеристики підсилювача П1, ЗШП-1 і ЗШП-2 ЛЗ-1 та ЗШП-3 ЛЗ-2.

#### 2. Керований генератор:

$$\begin{aligned} A_{\Gamma 2}(f) A_4(f) A_5(f) &\geq 1; \\ A_{\Gamma 2}(f) A_5(f) A_6(f) &\geq 1, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $A_{\Gamma 2}, A_4, A_5, A_6$  - амплітудно-частотні характеристики підсилювача П2, ЗШП-4 і ЗШП-5 ЛЗ-3 та ЗШП-6 ЛЗ-4.

У випадку використання неаподизованих еквідистантних зустрічно-штирових перетворювачів АЧХ ЗШП апроксимуються функціями  $A_i(f) = \sin X_i / X_i$ , де  $X = m_i \pi \delta_i / 2$ ;  $m_i$  - кількість електродів відповідного ЗШП;  $\delta_i = (f_i - f_{0i}) / f_{0i}$ ;  $f_{0i} = V_0 / \lambda_{0i}$  - частота акустичного синхронізму;  $\lambda_{0i}$  - довжина відповідної ПАХ.

При ідентичних ЗШП АЧХ ліній затримок ЛЗ-1...ЛЗ-4 визначаються співвідношеннями:

$$K_i(f) = 20 \lg \frac{\sin [m_i \pi (f - f_{0i}) / 2f_{0i}]}{m_i \pi (f - f_{0i}) / 2f_{0i}}. \quad (8)$$

### Баланс фаз

#### 1. Опорний ПАХ-генератор:

$$\begin{aligned} \Psi_{L1}(f_1) + \Psi_{\Gamma 1}(f_1) &= 2\pi m_1; \\ \Psi_{L2}(f_1) + \Psi_{\Gamma 1}(f_1) &= 2\pi n_2, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\Psi_{\Gamma 1}$  - набігання фази в електричному колі підсилювача;  $m_1$  і  $n_2$  цілі числа, що визначають моди коливань в ЛЗ-1 та ЛЗ-2;  $\Psi_{L1}(f_1)$  і  $\Psi_{L2}(f_1)$  - набігання фаз в ЛЗ-1 і ЛЗ-2 відповідно визначаються співвідношеннями:

$$\Psi_{L1} = 2\pi f_1 \tau_1 = 2\pi f_1 L_1 / V,$$

$$\Psi_{L2} = 2\pi f_1 \tau_2 = 2\pi f_1 L_2 / V, \quad (10)$$

де  $\tau_1 = L_1 / V$  та  $\tau_2 = L_2 / V$  - час затримки у ЛЗ-1 і ЛЗ-2 відповідно;  $f_1$  - частота генерованих коливань.

З рівнянь (9) і (10) одержуємо при  $\Psi_{\Gamma 1}(f_1) \ll \Psi_{L1,2}(f_1)$  співвідношення для частоти коливань опорного генератора:

$$f_1 = f_{01} = \frac{n_2 - m_1}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (11)$$

#### 2. Керований ПАХ-генератор:

$$\begin{aligned} \Psi_{L3}(f_2) + \Psi_{\Gamma 2}(f_2) &= 2\pi n_3; \\ \Psi_{L4}(f_2) + \Psi_{\Gamma 2}(f_2) &= 2\pi n_4, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $\Psi_{\Gamma 2}$  - набігання фази в електричному колі підсилювача;  $n_3$  і  $n_4$  - цілі числа, що визначають моди коливань в ЛЗ-3 та ЛЗ-4;  $\Psi_{L3}(f_2)$  і  $\Psi_{L4}(f_2)$  набігання фаз в ЛЗ-3 і ЛЗ-4 відповідно визначаються співвідношеннями:

$$\Psi_{L3} = 2\pi f_2 \tau_3 = 2\pi f_2 L_3 / V;$$

$$\Psi_{L4} = 2\pi f_2 \tau_4 + \Psi_x = 2\pi f_2 L_4 / V + \Psi_x, \quad (13)$$

де  $\tau_3 = L_3 / V$  - час затримки у ЛЗ-3;  $\tau_4 = L_4 / V$  - час затримки у ЛЗ-4 за відсутності зовнішнього впливу;  $f_2$  - частота генерованих коливань;  $\Psi_x$  - додатковий зсув фази в результаті збурення електричного поля ПАХ в ЛЗ-4 мембраною (рівняння (2)).

З рівнянь (12) та (13) одержуємо вираз для частоти коливань керованого генератора:

$$f_2 = f_{02} - f_{02} \frac{\Psi_x}{2\pi(n_4 - n_3)}, \quad (14)$$

$$f_{02} = \frac{n_4 - n_3}{\tau_4 - \tau_3}, \quad (15)$$

де  $f_{02}$  - початкова частота керованого ПАХ-генератора.

Використовуючи вирази (2), (11) та (14), одержимо співвідношення для проміжної частоти вимірювального перетворювача:

$$F = f_1 - f_2 = F_0 + F_x, \quad (16)$$

де  $F_0 = f_{01} - f_{02}$  - початкова проміжна частота за відсутності зовнішнього впливу;  $F_x$  - приріст проміжної частоти (функція перетворення) при переміщенні мембрани електричному полі ПАХ визначається співвідношенням:

$$F_x = f_{02} \frac{Nk \exp(-2\pi r)}{2(n_4 - n_3)}. \quad (17)$$

Із співвідношення (17) випливає, що приріст частоти ПАХ-генератора визначається числом довжин хвиль на збуреній ділянці  $N$ , електро-механічними параметрами матеріала звукопроводу ( $k, v_0$ ), початковою частотою  $f_{02}$  та різницею  $(n_4 - n_3)$ .

Наприклад, проведемо оцінку для ВП на основі п'єзоелектричного звукопроводу, виконано-

го із ніобіт літію  $YZ$  - зрізу (фазова швидкість ПАХ на вільній поверхні  $V_0 = 3488 \text{ м/с}$ , коефіцієнт електромагнітного зв'язку  $k = 0,045$ ).

### 1. Опорний ПАХ-генератор

Прийmemo затримку сигналу у кожному ЗШП опорного ПАХ-генератора (рис.4)  $\tau_{01} = 10\lambda_{01}/V_0$  і затримку сигналів у каналах ліній затримки  $\tau_1 = n_1\lambda_{01}/V_0$  ( $n_1=30$ ) і  $\tau_2 = n_2\lambda_{01}/V_0$  ( $n_2=100$ ). Для довжини хвилі  $\lambda_{01} \approx 77 \text{ мкм}$  отримаємо  $\tau_1 \approx 0,662 \text{ мкс}$  та  $\tau_2 \approx 2,207 \text{ мкс}$ .

Тоді за формулою (11) знаходимо частоту коливаний опорного ПАХ-генератора  $f_{01} \approx 45,3 \text{ МГц}$ .

На рис.5, а зображено АЧХ для ЛЗ-1 та ЛЗ-2 при  $f_{01} = 45,3 \text{ МГц}$  та  $m_i = 20$ , смуга пропускання на рівні -3 дБ складає  $\Delta f_{АЧХ} \approx 4,01 \text{ МГц}$ .

На рис.5, б зображено ФЧХ ліній затримки ЛЗ-1 (А, В, С, D, E) та ЛЗ-2 (а, b, c, ..., s).

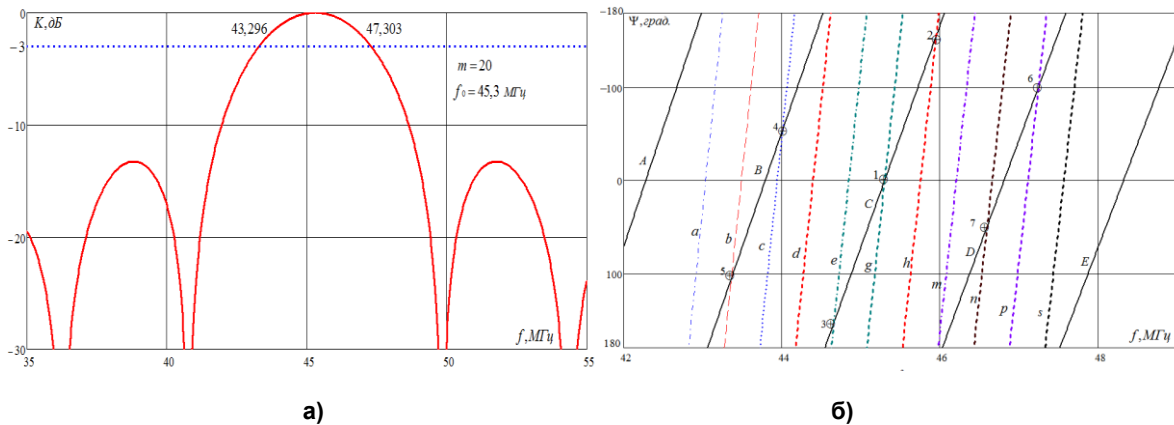


Рис. 5. Амплітудно-частотна (а) та фазочастотні характеристики, (б) каналів ліній затримки ЛЗ-1 та ЛЗ-2 опорного ПАХ-генератора

Точки перетину 1...3 фазочастотних характеристик визначають діапазон частот можливих стійких коливаний в автогенераторі, якщо виконється умова балансу амплітуд  $K\beta \geq 1$ , де  $K\beta$  - коефіцієнт підсилення підсилювача;  $\beta$  - втрати у колі зворотного зв'язку.

У точці 1 перетину ФЧХ ЛЗ-1 і ЛЗ-2 частота  $f_{01} \approx 45,3 \text{ МГц}$ , а в точках 2 і 3 частоти визначаються за формулою:

$$f_{2,3} = \frac{f_{01}(n_2 - m)(n_2 \pm 1)}{n_2^2 - n_1(n_2 \pm 1)}, \quad (18)$$

тобто  $f^{[2]} \approx 45,950 \text{ МГц}$  і  $f^{[3]} \approx 44,655 \text{ МГц}$ .

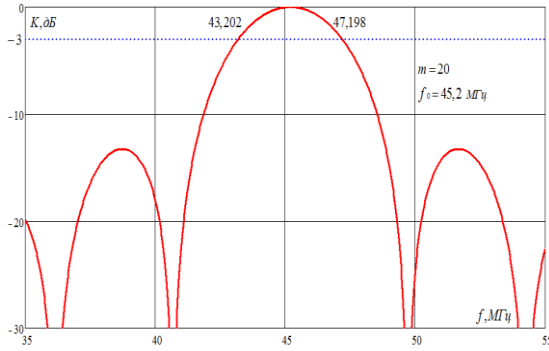
Таким чином діапазон можливого пере-строювання частоти опорного генератора  $\Delta^0 \approx f^{[2]} - f^{[3]} = 1,295 \text{ МГц}$ .

### 2. Керований ПАХ-генератор

Для керованого ПАХ-генератора (рис.4) приймаємо  $\tau_{01} = 10\lambda_{02}/V_0$  і затримку сигналів у каналах лінії затримки  $\tau_3 = n_3\lambda_{02}/V_0$  ( $n_3 = 30$ ) та  $\tau_4 = n_4\lambda_{02}/V_0$  ( $n_4 = 100$ ). Для довжини хвилі  $\lambda_{02} = 77,2 \text{ мкм}$  отримаємо  $\tau_3 \approx 0,664 \text{ мкс}$  та  $\tau_4 \approx 2,213 \text{ мкс}$ . Тоді за формулою (15) знахо-

димо початкову частоту коливань керованого ПАХ-генератора  $f_{02} \approx 45,2$  МГц.

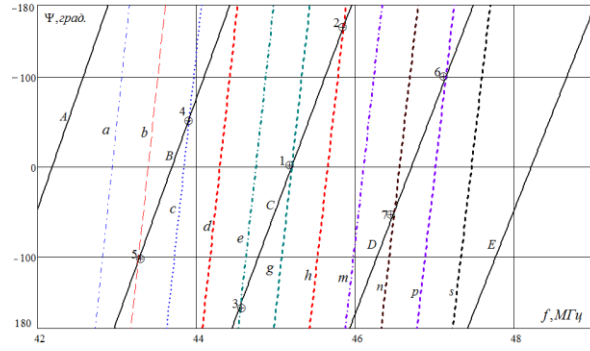
Тоді, з урахуванням рівнянь (11) та (15), отримаємо початкову проміжну частоту вимірювального перетворювача  $F_0 = f_{02} - f_{01} \approx 100$  кГц, а функція перетворення вимірювального перетворювача буде визначатися співвідношенням (17).



а)

На рис. 6,а зображено АЧХ для ЛЗ-3 та ЛЗ-4 при  $f_{02} = 45,2$  МГц та  $m_i = 20$ , смуга пропускання на рівні - 3 дБ складає  $\Delta f_{АЧХ} \approx 3,996$  МГц.

На рис. 6,б зображено ФЧХ ліній затримки ЛЗ-3 (А, В, С, D, E) та ЛЗ-4 (а, b, c,...,s) при  $N = 50$ .



б)

Рис. 6. Амплітудно-частотна (а) та фазочастотні характеристики, (б) каналів ліній затримки ЛЗ-3 та ЛЗ-4 керованого ПАХ-генератора

Точки перетину 1...3 фазочастотних характеристик визначають діапазон частот можливих стійких коливань в керованому ПАХ-генераторі, якщо виконується умова балансу амплітуд  $K_y \beta \geq 1$ .

У точці 1 перетину ФЧХ ЛЗ-3 і ЛЗ-4 частота  $f_{02} \approx 45,2$  МГц, а в точках 2 і 3 частоти визначаються за формулою:

$$f^{2,3} = \frac{f_{02}(n_4 - n_3)(n_4 \pm 1)}{n_4^2 - n_3(n_4 \pm 1)}, \quad (19)$$

тобто  $f^{[2]} \approx 45,848$  МГц та  $f^{[3]} \approx 44,557$  МГц.

Діапазон можливого перестроювання частоти керованого ПАХ-генератора  $\Delta K \approx f^{[2]} - f^{[3]} = 1,291$  МГц.

На рис. 7. представлена теоретична залежність функції перетворення (17) диференціального ВП від нормованого зазору, звідки випливає, що для ніобат літію YZ-зрізу (при  $N = 50$ ,  $\lambda_0 = 77,2$  мкм,  $f_0 = 45,2$  МГц,  $n_3 = 30$ ,  $n_4 = 100$ ) при переміщенні мембрани в діапазоні  $\rho = 0,3...0,1$  приріст проміжної частоти змінюється в інтервалі  $F_{xd} \approx (110...387)$  кГц, тобто середній коефіцієнт перетворення мікропе-

реміщень складає  $S_{xd} \approx \Delta F_x / \Delta x \approx 18$  кГц/мкм, що на 5,4 кГц/мкм перевищує значення  $S_x \approx 12,6$  кГц/мкм для ВП, зображеного на рис. 1. Для мембрани з жорстким центром (формула (5)) з тими же конструктивними параметрами середній коефіцієнт перетворення тиску

$$S_{Pd} \approx \Delta F_{xd} / \Delta P \approx 0,61 \text{ Гц} / \text{Н} \cdot \text{м}^{-2} \approx 81 \text{ Гц} / \text{мм.рм.см.}$$

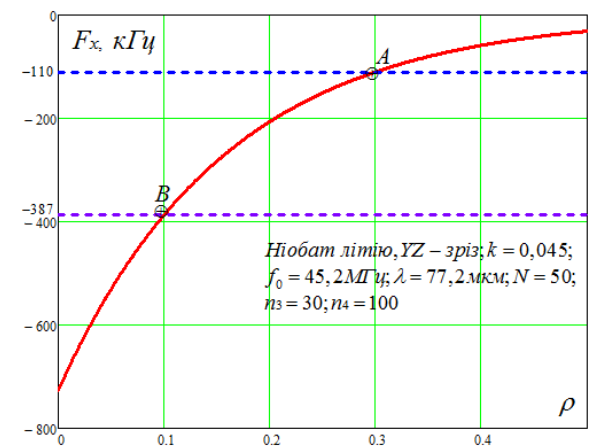


Рис. 7. Теоретична залежність функції перетворення диференціального ВП мікропереміщень на ПАХ

**Висновки**

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, аналіз отриманих співвідношень показують, що коефіцієнт перетворення вимірювальних перетворювачів на базі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль залежить як від конструктивних параметрів модуля на ПАХ і матеріалу п'єзоелектричного звукопроводу, так і від форми та напрямку переміщення мембрани (зонда).

Змінюючи число довжин хвиль на збуреній ділянці звукопроводу, робочу частоту генератора та застосовуючи сильні п'єзоелектрики (ніобат літію, германат вісмуту, окис цинку, нітрид алюмінію та ін.), можливо забезпечити необхідний коефіцієнт перетворення ВП. Запропоноване конструктивне рішення дозволяє застосовувати універсальний акустоелектронний модуль, а первинний перетворювач (мембрану, шток) виготовляти для конкретного виду вимірювальної величини та заданого динамічного діапазону.

Використання диференціальної схеми ВП із застосуванням модової селекції методом конкуренції мод коливань ПАХ-генераторів дозволяє використовувати широкосмугові ЗШП, усувати втрати, пов'язані з двохнаправленістю випромінювання ПАХ вхідним ЗШП, зменшувати вплив дестабілізуючих факторів та підвищувати коефіцієнт перетворення ВП шляхом збільшення активної ділянки звукопроводу, на якій відбувається збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ. Частотний вихідний сигнал ВП дозволяє застосовувати сучасні методи комп'ютерної обробки інформації з високою точністю та надійністю.

Розглянутий ВП може бути застосований для вимірювання мікропереміщень, прискорення, сили, тиску, а також в якості приймача акустичних сигналів.

**Список використаних джерел**

1. Поляков П.Ф., Хорунжий В.А., Поляков В.П. Акустоэлектроника. Физико-технологические основы и применение: Справ. пособие: Том1.- Харьков: ООО «Компания СМИТ», 2007. – 552 с.
2. Жовнір Н.Ф., Черняк Н.Г., Дидковский А.А. и др. Измерительные преобразователи физических величин на ПАВ // Электроника и связь. – 2003, № 18. – С.22–27.
3. Жовнір М.Ф., Шостак О.В. Оцінка потенційних роздільної здатності і точності вимірювальних перетворювачів лінійних та кутових переміщень на базі використання фазових набігань поверхневих акустичних хвиль // Електроніка та зв'язок. – 2015, том 20, № 3(86). – С.101-106.
4. Жовнір М.Ф., Олійник О.О. Розробка пристроїв на ПАХ для вимірювання лінійних та кутових переміщень // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 52(1161). – С.60-65.
5. Chernenko D., Zhovnir M., Oliinyk O., Tsyganok B. Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures //35th International Spring Seminar on Electronics Technology „Power Electronics” (ISSE 2012). – Bad Aussee (Austria). – 2012. – P. 424 – 428.
6. Пат. № UA55497U Україна, МПК (2009) G01L 11/00. Пристрій на поверхневих акустичних хвилях для вимірювання тиску / Жовнір М.Ф., Черняк М.Г., Черненко Д.В., Шеремет Л.М.; заявник НТУУ «КПІ»; № u2010 08841; заявл. 15.07.2010; опубл. 10.12.2010, бюл. № 23.
7. Пат. № UA77113U Україна, МПК (2013.1) H03N 9/00, G01L 7/08 (2006.01), H04Q 5/22 (2006.01). Сенсор на поверхневих акустичних хвилях для вимірювання тиску / Черненко Д.В., Жовнір М.Ф.; заявник Черненко Д.В., Жовнір М.Ф.; № u2012 09622; заявл. 08.08.2012; опубл. 25.01.2013, бюл. 2.
8. Жовнір М.Ф., Олійник О.О., Писаренко Л.Д. Математичні моделі сенсорів переміщень та тиску на основі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль // Журнал нано–та електронної фізики. – 2016, том. 8, № 1. – С. 01024-01025.
9. Фильтры на поверхностных акустических волнах (расчет, технология и применение): Пер. с англ. / Под ред. Г.Мэттьюза. М.: Радио и связь, 1981. – 472 с.
10. Шитиков Г.Т. Стабильные автогенераторы метровых и дециметровых волн – М.: Радио и связь, 1983. – 256 с.
11. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. – М.: Машиностроение, 1980. – 326 с.

Поступила в редакцию 23 июля 2016 г.

УДК 531.768

**Н.Ф. Жовнир, М.В. Битов, Л.Д. Писаренко**

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,  
ул. Политехническая, 16/9, г.Киев-56, 03056, Украина.

## **Измерительные преобразователи микроперемещений и давления на поверхностных акустических волнах**

*В данной статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований измерительных преобразователей (ИП) микроперемещений и давления на основе возмущения электрического поля поверхностных акустических волн (ПАВ), которые распространяются на поверхности пьезоэлектрического звукопровода. Обоснован частотный метод измерения на основе дифференциального ИП с использованием метода конкуренции мод колебаний в ПАВ-генераторах, что позволяет осуществлять возмущение электрического поля ПАВ при сохранении одномодового режима работы генераторов. Бібл.11, рис.7.*

**Ключевые слова:** *поверхностные акустические волны (ПАВ); дисперсия фазовой скорости; измерительные преобразователи микроперемещений и давления; коэффициент преобразования; генераторный (частотный) метод измерения.*

UDC 531.768

**M. Zhovnir, M. Bitov, L. Pysarenko**

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,  
Polytechnique St., 16/9, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

## **Measurement transformers of micromoving and pressure based on the surface acoustic wave**

*The results of theoretic and experimental researches of measurement transformers of micromoving and pressure, based on disturbance of surface acoustic wave, which expanded on the surface of piezoelectric acoustic line in the electric field, are presented. Frequency method of measurement based on the measurement transformers with using the method of modes competition of oscillations in the surface acoustic wave generator, that provided the possibility of disturbance of electric field on the largest length of acoustic line with maintaining one-mode regime of generator operation. Ref. 11, Fig. 7.*

**Keywords:** *surface acoustic wave; dispersion of phase velocity; measured transformers of micromoving and pressure; transformer coefficient; generator (frequency) measurement method.*

### **References**

1. Polyakov, P. F., Horungyy, V. A., Polyakov, V. P. (2007). Acoustics. Physical and Technological Fundamentals and Application: Ref.: Part 1. Kharkiv: OOO "Company SMIT", Pp. 552. (Rus)
2. Zhovnir, M. F., Chernyak, M. G., Didkivskyy, A. A. and others. (2003). Measuring converters of physical quantities on the surface acoustic wave. Electronics and Communications. № 18. Pp.22–27. (Rus)
3. Zhovnir, M. F., Shostak, O. V. (2015). Evaluation of potential resolution and accuracy transducers of linear and angular movements on the basis of the use of phase shifts of surface acoustic waves. Electronics and Communications. Vol. 20, № 3(86). Pp.101–106.(Ukr)
4. Zhovnir, M. F., Oliinyk, O. O. (2015). Development of SAW devices for measuring linear and angular displacements Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. Kharkov: NTU "KhPI". No. 52(1161). – Pp. 60–65. (Ukr)
5. Chernenko, D. V., Zhovnir, M. F., Oliinyk, O. O., Tsyganok, B. A. (2012). Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures // 35th International Spring Seminar on Electronics Technology „Power Electronics” (ISSE 2012). Bad Aussee (Austria). Pp. 424–428.
6. Zhovnir, M. F., Cherniak, M. G., Chernenko, D. V., Sheremet, L. M. (2009). Pat. № UA55497U Ukraine, MPK. G01L 11/00. Device on surface acoustic waves for pressure measurement /; declarant NTUU «KPI»; № u201008841; declared 15.07.2010; published 10.12.2010, byul. № 23.



7. *Chernenko, D. V., Zhovnir, M. F.* (2013). № UA77113U Ukraine MPK (2013.1) H03H 9/00, G01L 7/08 (2006.1), H04Q 5/22 (2006.1). Sensor on surface acoustic waves for pressure measurement № U201209622; declared. 08.08.2012; published 25.01.2013, byul. № 2.
8. *Zhovnir, M. F., Oliinyk, O. O., Pysarenko, L. D.* (2016). Mathematical Models of Pressure and Micro-displacement Sensors Based on Electric Field Perturbation of the Surface Acoustic Waves. Journal of Nano–and Electronic Physics. Vol.8, No. 1. Pp. 01024-01025. (Ukr)
9. (1981). Filters on the surface acoustic waves. Calculation, technology and application. Under edition of G. Metuse. Translation from English. Moscow, Radio i svyaz, P. 432. (Rus)
10. *Shitikov, G. T.* (1983). Stable autogenerators of metres and decametres waves. Moscow, Radio i svyaz, P. 427. (Rus)
11. *Ponomariov, S. D., Andreeva, L. E.* (1980). Calculation of elastic elements of machines and devices. Moscow, Mashinostroenie, P. 326. (Rus)