

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ПЕРЕМІЩЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОВИХ НАБІГАНЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

Запропонований і теоретично обґрунтований метод однозначного вимірювання переміщень з використанням фазових набігань на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу електричного поля кількох поверхневих акустичних хвиль (ПАХ), що приймаються рухомим ПАХ-приймачем.

Приведена оцінка потенційних метрологічних параметрів 3-х частотного перетворювача лінійних переміщень в діапазоні до 100 мм з формуванням точної, проміжної та грубої вимірювальних шкал.

Результати випробувань макету перетворювача лінійних переміщень на базі п'єзоелектричного звукопроводу із ніобат літію YZ-зрізу підтверджують можливість створення високочутливих перетворювачів переміщення з роздільною здатністю та точністю, які близькі до параметрів індуктосинів, фотоелектричних перетворювачів та пристроїв на основі інтерферометрів, але можуть мати значно менші масогабаритні показники, вартість та складність конструкції.

Бібл. 19, рис. 6

Ключові слова: поверхнева акустична хвиля; вимірювальний перетворювач; первинний перетворювач; п'єзоелектричний звукопровід; зустрічно-штировий перетворювач.

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, лінійних, кутових переміщень та швидкості, вологості, температури та складу газового середовища, напруженостей електричного та магнітного полів тощо [1 – 11].

В останні роки пристрої на ПАХ впроваджуються також у безпроводні радіовимірювальні системи, які містять пристрій опитування і обробки інформації та дистанційно віддалені безпроводні перетворювачі на поверхневих акустичних хвилях і застосовуються для радіомоніторингу оточуючого середовища та контролю параметрів рухомих об'єктів, у тому числі вони можуть функціонувати в агресивному середовищі [12 – 16].

1. Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Вимірювальні перетворювачі на ПАХ створюються з використанням первинних перетворювачів (ПП) на базі зміни:

- фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини лінії затримки (резонатора) внаслідок деформації звукопроводу балочного або мембранного типу [1, 2, 5 – 8, 14, 15]; фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини лінії затримки (резонатора) при дії навколишнього середовища на поверхню звукопроводу (молекулярної ваги та концентрації газу, температури, вологості, електромагнітного випромінювання тощо) [1 – 4, 12];
- коефіцієнта відбиття ПАХ від зустрічно-штирових перетворювачів, що сполучені із зовнішніми чутливими елементами, на які діють температура, вологість, електромагнітне випромінювання тощо [13];
- фазової швидкості ПАХ при переміщенні механічного зонда в електричному полі хвилі [9, 10, 16];
- акустичної довжини лінії затримки при переміщенні ПАХ-приймача над поверх-



нею п'єзоелектричного звукопроводу [1, 2, 11].

В основі більшості ВП на ПАХ лежить високостабільний ПАХ-генератор, що складається з регульованої під впливом вимірювальних фізичних або механічних величин резонатора або лінії затримки на ПАХ, які вмикаються в ланцюг зворотного зв'язку підсилювача. Застосування частотного метода вимірювання дозволяє отримувати високу роздільну здатність і точність, але динамічний діапазон обмежується набіганням фази у пристрої на ПАХ не більше π [1 – 10].

Тому, у випадку необхідності вимірювання переміщень з високою роздільною здатністю в динамічному діапазоні до 100...200 мм необхідно застосовувати фазовий метод вимірювання. Для усунення багатозначності фазових вимірювань запропоновано метод вимірювання з використанням фазових набігань кількох поверхневих акустичних хвиль на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу на різних частотах, на яких вимірюються інформаційні параметри, що визначають положення ПАХ-приймача [2, 11].

2. Мета і завдання досліджень. Метою досліджень є оцінка потенційних метрологічних параметрів вимірювального перетворювача лінійних переміщень на базі використання фазових набігань 3-х поверхневих акустичних хвиль, що поширюються на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу на різних частотах.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розробити функціональну схему перетворювача, розробити конструкції макетів первинного перетворювача лінійних переміщень, генераторного і підсилювального блоків та провести експериментальні дослідження, які дозволили б розробити вимоги до конструктивних та електричних параметрів.

3. Функціональна схема та теоретична оцінка потенційних роздільної здатності і точності 3-х частотного вимірювального перетворювача лінійних переміщень. На рис. 1 представлена функціональна схема ВП на ПАХ при збудженні хвилі у вигляді суперпозиції 3-х поверхневих акустичних хвиль з частотами f_i , де $i = 1, 2, 3$, і які пов'язані між собою співвідношеннями $f_2 = f_1(1 - \delta_2)$ та $f_3 = f_1(1 + \delta_3)$, де δ_2 та δ_3 – розстроювання відносно частоти f_i , [11].

Первинний перетворювач складається із п'єзоелектричного звукопроводу 1 з поглиначами ПАХ 2 та 3, необхідних для створення режиму біжучих хвиль, вхідного та контрольного зустрічно – штирових перетворювачів (ЗШП) 4 та 5, сформованих на п'єзоелектричному звукопроводі. ПАХ-приймач, що виконаний у вигляді ЗШП 6, сформованого на діелектричній пластині 7, переміщується в електричному полі поверхневої акустичної хвилі, електричний потенціал якого експоненціально змінюється згідно співвідношення $\varphi = \varphi_0 \exp(-2\pi X/\lambda)$ [17], де φ_0 – потенціал електричного поля на поверхні звукопроводу; λ – довжина ПАХ; X – відстань між ЗШП ПАХ-приймача та поверхнею звукопроводу.

Електричний сигнал з генераторного блоку 8, що складається із трьох високостабільних генераторів та суматора, подається на вхідний ЗШП 4 і збуджує у вигляді суперпозиції 3-х гармонічних коливань ПАХ, яка приймається ЗШП ПАХ-приймача 6 і контрольним ЗШП 5, вихідні сигнали з яких поступають на блоки підсилення і фільтрації 9 та 10, що складаються із високочастотних підсилювачів та 3-х ПАХ-фільтрів відповідно на частоти f_i . Після підсилення та фільтрації вихідні сигнали з блоків 9 та 10 поступають на фазовимірювальні блоки 11 та 12, на які подаються опорні сигнали з генераторного блоку. Результати вимірювання фаз Ψ_j сигналів поступають в блок обробки та формування трьох вимірювальних шкал перетворювача 13.

В блок 13 одночасно поступають результати вимірювання фаз сигналів Ψ_{Pj} з блоку 12 для корегування фаз Ψ_j при дії дестабілізуючих факторів на звукопровід. Для цього визначається величина додаткового набігання фаз сигналів кожної частоти f_i для координати Z , в якій знаходиться ПАХ-приймач, за формулою $\Delta\Psi_{Zi} = \Delta\Psi_i Z/L$, де $\Delta\Psi_i$ – приріст фази на частотах f_i на виході контрольного ЗШП 5 в результаті дії дестабілізуючих факторів; L – відстань між вхідним 4 та контрольним 5 ЗШП; Z – координата знаходження ПАХ-приймача, що визначається попередньо в результаті вимірювання фаз Ψ_j .

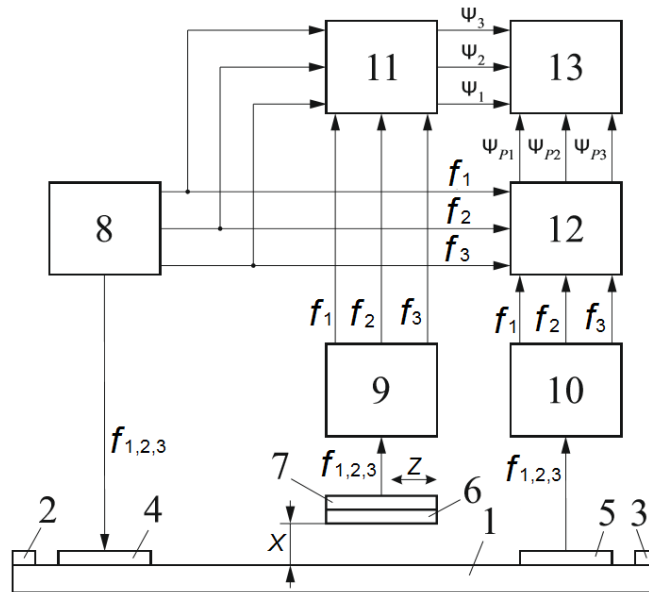


Рис. 1. Функціональна схема ВП переміщень на ПАХ

Наприклад, для формування точної вимірювальної шкали використовуються результати вимірювання Ψ_1 на частоті f_1 , чутливість (коефіцієнт перетворення) на якій визначається співвідношенням:

$$S_1 = \frac{d\Psi_1}{dZ} = \frac{2\pi}{\lambda_1},$$

де $\lambda_1 = V / f_1$ – довжина ПАХ на частоті f_1 ; V – фазова швидкість ПАХ.

Визначаючи $\Psi_{12} = \Psi_1 - \Psi_2$ або $\Psi_{31} = \Psi_3 - \Psi_1$, можна сформувати проміжні вимірювальні шкали, алгоритм визначення фазових зсувів можна представити наступним чином:

$$\begin{aligned} \Psi_{12} &= \Psi_1 - \Psi_2 \text{ при } \Psi_1 - \Psi_2 \geq 0; \\ \Psi_{12} &= \Psi_1 - \Psi_2 + 2\pi \text{ при } \Psi_1 - \Psi_2 < 0; \\ \Psi_{31} &= \Psi_3 - \Psi_1 \text{ при } \Psi_3 - \Psi_1 \geq 0; \\ \Psi_{31} &= \Psi_3 - \Psi_1 + 2\pi \text{ при } \Psi_3 - \Psi_1 < 0. \end{aligned}$$

При цьому чутливість (коефіцієнт перетворення) на проміжних вимірювальних шкалах визначається співвідношеннями:

$$\begin{aligned} S_{12} &= \frac{d\Psi_{12}}{dZ} = \frac{2\pi}{\Lambda_{12}} = \frac{S_1}{P_2}; \\ S_{31} &= \frac{d\Psi_{31}}{dZ} = \frac{2\pi}{\Lambda_{31}} = \frac{S_1}{P_3}, \end{aligned}$$

де $\Lambda_{12} = \lambda_1 / \delta_2 = P_2 \lambda_1$ та $\Lambda_{31} = \lambda_1 / \delta_3 = P_3 \lambda_1$ – ефективні довжини ПАХ на частотах биття $F_{12} = \delta_2 f_1$ та $F_{31} = \delta_3 f_1$; $P_2 = 1 / \delta_2$; $P_3 = 1 / \delta_3$; P_2 та P_3 – коефіцієнти редукції фаз проміжних шкал (кількість циклів точної шкали на відповідній частоті, що розміщуються в одному циклі проміжних шкал).

Визначення $\Psi_{123} = \Psi_{12} - \Psi_{31}$ дозволяє сформувати грубу шкалу вимірювального перетворювача, алгоритм визначення фазових зсувів можна представити наступним чином:

$$\begin{aligned} \Psi_{123} &= \Psi_{12} - \Psi_{31} \text{ при } \Psi_{12} - \Psi_{31} \geq 0; \\ \Psi_{123} &= \Psi_{12} - \Psi_{31} + 2\pi \text{ при } \Psi_{12} - \Psi_{31} < 0. \end{aligned}$$

Чутливість (коефіцієнт перетворення) на грубій вимірювальній шкалі:

$$S_{123} = \frac{d\Psi_{123}}{dZ} = \frac{2\pi}{\Lambda_{123}} = \frac{S_1}{P_{123}},$$

де $\Lambda_{123} = P_{123} \lambda_1 = P_{12} \Lambda_{12} = P_{31} \Lambda_{31}$ – ефективна довжина ПАХ на частоті биття $F_{123} = (\delta_2 - \delta_3) f_1 = f_1 / P_{123}$; $P_{12} = \delta_2 / (\delta_2 - \delta_3)$; $P_{31} = \delta_3 / (\delta_2 - \delta_3)$;

$P_{123} = 1 / (\delta_2 - \delta_3) = P_2 P_{12} = P_3 P_{31}$ – коефіцієнт редукції фази грубої вимірювальної шкали (кількість циклів точної шкали, що розміщуються в одному циклі грубої шкали).

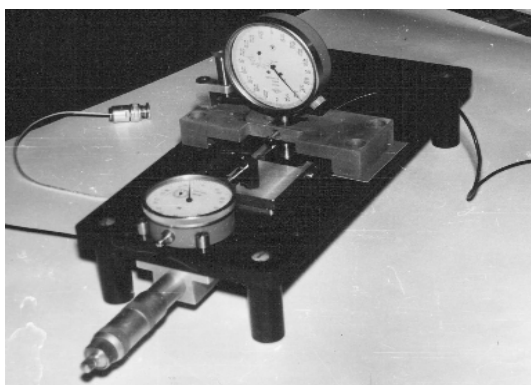
Таблиця 1.

Розрахункові метрологічні параметри 3-х частотного ВП лінійних
переміщень на ПАХ

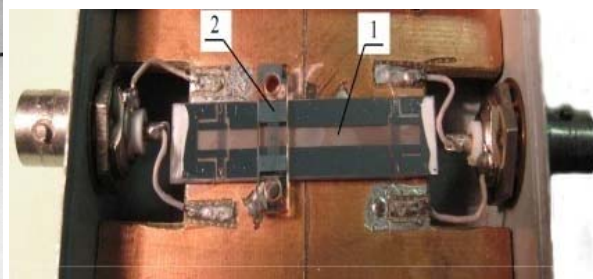
Найменування параметра	Точна шкала	Проміжна шкала	Груба шкала
Діапазон однозначного вимірювання переміщень	$Z_{1m} = \lambda_1 = 49,4 \text{ мкм}$	$Z_{2m} = P_2 Z_{1m} = 3,16 \text{ мм}$	
Чутливість (коефіцієнт перетворення)	$S_1 = \frac{d\Psi_1}{dZ} = \frac{360}{\lambda_1} \approx 7,29 \text{ ел.град./мм}$	$S_{12} = \frac{d\Psi_{12}}{dZ} = \frac{S_1}{P_2} \approx 113,9 \text{ ел.град./мм}$	$S_{123} = \frac{d\Psi_{123}}{d\varphi} = \frac{S_1}{P_{123}} \approx 3,57 \text{ ел.град./мм}$
Потенційна роздільна здатність при роздільній здатності фазометра Ф5126 $\Psi_{min} = 0,1 \text{ ел.град.}$	$Z_{1min} = \frac{\Psi_{min}}{S_1} \approx 0,014 \text{ мкм}$	$Z_{2min} = \frac{\Psi_{min}}{S_{12}} \approx 0,88 \text{ мкм}$	$Z_{3min} = \frac{\Psi_{min}}{S_{123}} \approx 28 \text{ мкм}$
Похибка при похибці фазометра Ф5126 $\Delta\Psi = \pm 0,3 \text{ ел.град.}$	$\Delta Z_{1min} = \frac{\Delta\Psi}{S_1} \approx \pm 0,04 \text{ мкм}$	$\Delta Z_{2min} = \frac{\Delta\Psi}{S_{12}} \approx \pm 2,63 \text{ мкм}$	$\Delta Z_{3min} = \frac{\Delta\Psi}{S_{123}} \approx \pm 84 \text{ мкм}$

В табл. 1 представлено результати розрахунків метрологічних параметрів 3-х частотного позиційного ВП лінійних переміщень на базі фазових набігань електричного поля ПАХ на основній частоті $f_1 = 70,62 \text{ МГц}$ при $\lambda_1 = 49,4 \text{ мкм}$ та частотах $f_2 = f_1(1 - \delta_2)$ і $f_3 = f_1(1 + \delta_3)$, де $\delta_2 = 1/64$; $\delta_3 = 31/2048$.

4. Результати експериментальних досліджень ВП лінійних переміщень. На рис. 2 зображено макет (а) та акустоелектричний модуль (б) вимірювального перетворювача лінійних переміщень.



а)



б)

Рис.2. Макет (а), модуль на базі ніобат літію YZ-зрізу (б, поз. 1) та секційний ПАХ-приймач (б, поз. 2) перетворювача лінійних переміщень

Акустоелектричний модуль (рис. 2,б) містить прямолінійний звукопровід 1 на базі ніобат

літію YZ-зрізу (фазова швидкість ПАХ $V = 3488 \text{ м/с}$) з вхідним та контрольним зу-



стрічно-штировими перетворювачами. Вхідний і контрольний ЗШП виготовлялися методом напилення ванадію товщиною 0,03 мкм і алюмінію товщиною 0,3 мкм на установці вакуумного напилення. Період однополярних електродів $\lambda_{p1} = \lambda_1 = 49,4 \text{ мкм}$, апертура $W = 2,0 \text{ мм}$.

ПАХ-приймач 2 (рис. 2,б) складається із трьох секцій ЗШП з періодами однополярних електродів:

$$\lambda_{p1} = \lambda_1 = 49,4 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{p2} = \lambda_2 = 50,2 \text{ мкм}; \quad \lambda_{p3} = \lambda_3 = 48,6 \text{ мкм}.$$

ЗШП ПАХ-приймача виготовлялись методом вакуумного напилення алюмінію товщиною 0,3 мкм на підкладку із плавненого кварцу. Промислове обладнання дозволило забезпечити виготовлення елементів акустоелектричних модулів на задані частоти з похибкою не гірше $\pm 0,1\%$.

Акустоелектричний модуль ВП переміщень розміщувався на платформі, яка переміщувалась відносно ПАХ-приймача за допомогою мікрометричного гвинта, а контроль переміщення здійснювався за допомогою індикатора 1 МИГ з ціною поділок 1 мкм (рис. 2, а). Зазор між поверхнею звукопроводу та ПАХ-приймачем і його контроль забезпечувався також за допомогою індикатора 1 МИГ.

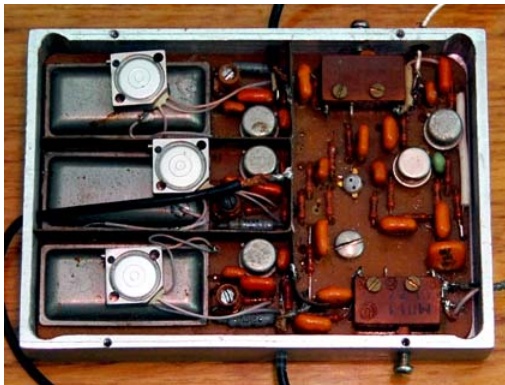


Рис. 3. 3-х частотний генераторний блок ВП переміщень на ПАХ

Для формування високочастотного сигналу у вигляді суперпозиції гармонічних коливань з частотами $f_1 = 70,62 \text{ МГц}$, $f_2 = 69,52 \text{ МГц}$ та $f_3 = 71,69 \text{ МГц}$ розроблено генераторний блок (рис. 3), що складається із трьох ПАХ-генераторів [18], вихідні сигнали яких поступають на суматор. В якості частотнозадавальних елементів використано лінії затримки на ПАХ на базі кварцу ST-зрізу, перестроювання частот ПАХ-генераторів здійснювався за допомогою варикапів KB109Д. Амплітуда сигналу на кожній частоті на виході генераторного блоку станови-

ла не менше 1,0 В. Експериментально отримано перестроювання частот $\Delta f/f_0 = \pm 0,28\%$, що дозволяє здійснювати підстроювання частот в заданих границях при короткочасній нестабільності частоти генератора не гірше $5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$.



Рис. 4. 3-х частотний блок підсилення та фільтрації вихідного сигналу ПАХ-приймача

Для підсилення та фільтрації вихідного сигналу з ПАХ-приймача та контрольного ЗШП розроблено блок підсилення та фільтрації (рис. 4), що складається із підсилювача вихідного сигналу, трьох ПАХ-фільтрів [19] та каналних підсилювачів на частоті f_i .

В якості активних елементів високочастотних підсилювачів вибрана мікросхема типу M42177-2. Смуги пропускання ПАХ-фільтрів (470...530) кГц, внесені втрати при компенсації статичних ємностей ЗШП складали (16...18) дБ. Гарантоване послаблення сигналів за смугами пропускання не менше 45 дБ. Схеми автоматичного регулювання підсилення складаються із діодних детекторів високочастотних коливань, побудованих за схемами подвоєння напруги, диференційних підсилювачів, керованих атенюаторів на $p-i-n$ -діодах типу KA517. Вихідні напруги на кожній частоті не менше 0,1 В, рівень бічних складових у спектрі вихідних сигналів не менше -23 дБ.

Для вимірювання фази вихідних сигналів ПАХ-приймача на робочих частотах використано фазометри Ф5126, роздільна здатність яких складає 0,1 ел.град. при основній похибці вимірювання $\pm 0,3$ ел.град.

Вихідні сигнали ПАХ-приймача після підсилення та фільтрації і опорні сигнали з генераторного блоку з частотами f_i поступали на фазометри для вимірювання фазових зсувів Ψ_i , по яким здійснюється формування точних шкал $(\Psi_{1,2,3})$, проміжних шкал $(\Psi_{12} = \Psi_1 - \Psi_2)$ і $(\Psi_{31} = \Psi_3 - \Psi_1)$ та грубої

вимірювальної шкали ($\Psi_{123} = \Psi_{12} - \Psi_{31}$) ВП переміщень.

Вимірювання проводились на окремих ділянках в діапазоні переміщень $Z = 0...30$ мм.

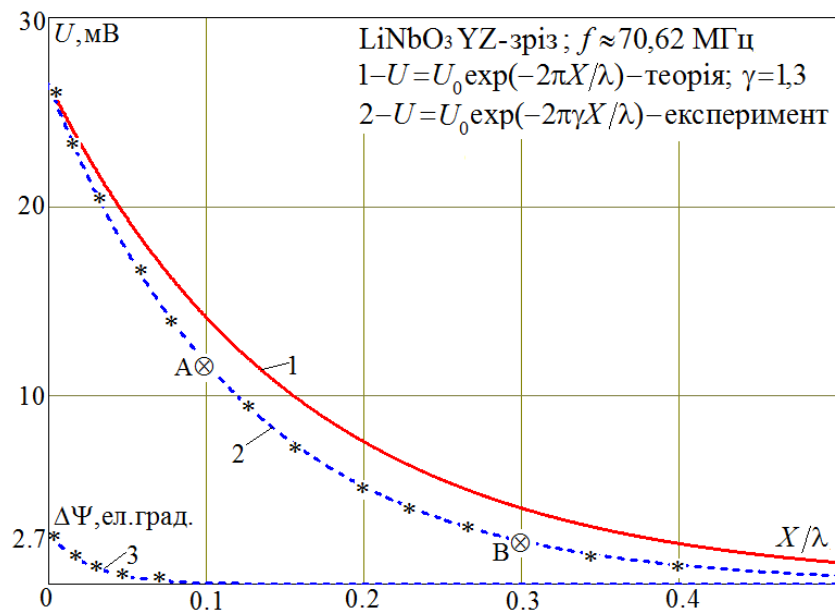


Рис. 5. Залежності амплітуди та приросту фази вихідного сигналу ПАХ-приймача від нормованого зазору

На рис. 5 представлено результати вимірювання рівня вихідного сигналу ПАХ-приймача U та приріст фази $\Delta\Psi$ від нормованого зазору X/λ між поверхнею звукопроводу та ЗШП ПАХ-приймача.

Із результатів експериментальних досліджень випливає, що по мірі приближення ПАХ-приймача до поверхні п'єзоелектричного звукопроводу виникає додатковий фазовий зсув $\Delta\Psi$ (рис. 5, крива 3) у вихідному сигналі приймача в результаті дисперсії фазової швидкості хвилі, що викликається збуренням електричного поля ПАХ. Це вимагає високої точності виготовлення первинного перетворювача для забезпечення переміщення ПАХ-приймача паралельно поверхні звукопроводу. Таким чином, рекомендований діапазон зазору між приймачем та поверхнею звукопроводу знаходиться в інтервалі $X/\lambda = 0,10...0,30$, при якому рівень вихідного сигналу достатній для подальшого підсилення та обробки інформації, а дисперсією фазової швидкості під приймачем можна нехтувати.

Вносимі втрати по напрузі при $X/\lambda = 0$ на центральній частоті $f_1 = 70,62$ МГц перетворювача склали $K_1 = -15,1$ дБ, смуга пропускання $\Delta f \approx 0,74$ МГц на рівні $-3,0$ дБ. При зміні нормованого зазору в інтервалі $X/\lambda = 0,1...0,3$ (ділянка А-В на рис. 5) вносимі втрати змінювалися в межах $K_1 = -(18,6...25,7)$ дБ.

Вимірювання градуювальних характеристик $\Psi_i = F(\varphi)$ ВП переміщень і розрахунок метрологічних параметрів проводилися для сигналів на трьох частотах: $f_1 = 70,62$ МГц; $f_2 = 69,52$ МГц; $f_3 = 71,69$ МГц. З метою усунення похибок вимірювання із-за дисперсії фазової швидкості хвилі ПАХ-приймач переміщувався уздовж п'єзоелектричного звукопроводу на відстані $X/\lambda_1 \approx 0,15$ від його поверхні.

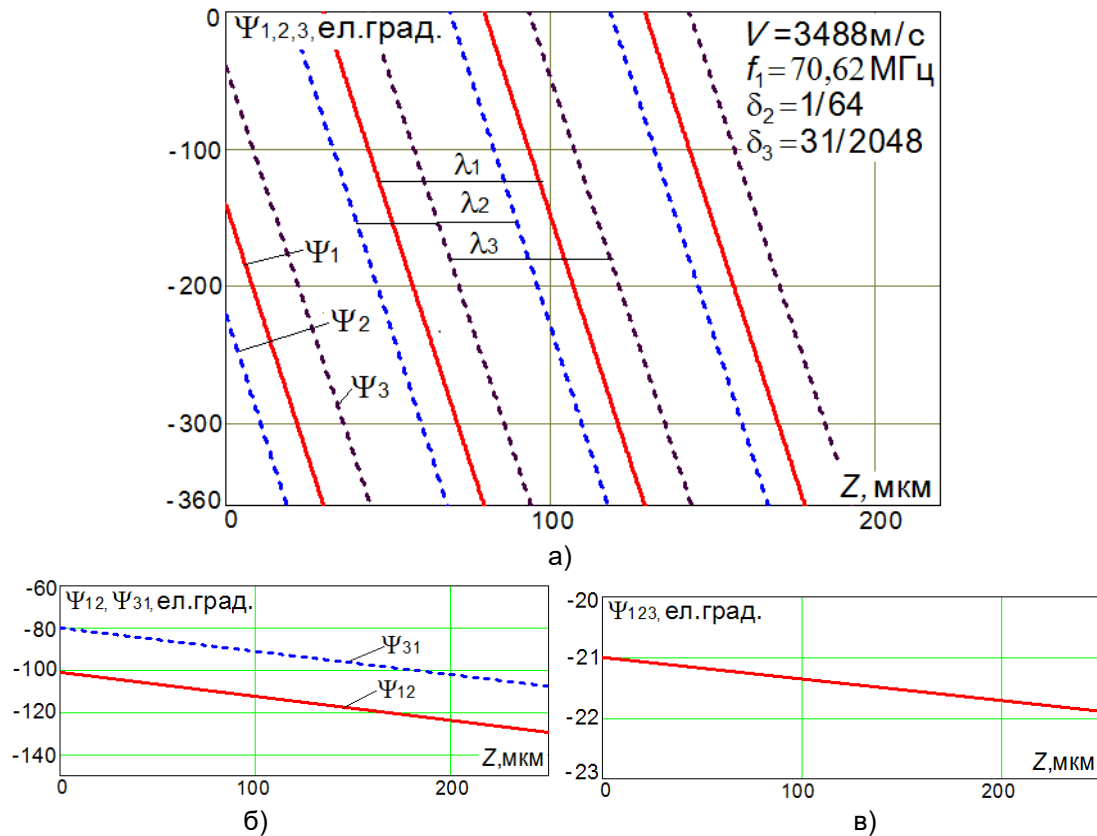


Рис. 6. Градувальні характеристики 3-х частотного перетворювача лінійних переміщень

Осередненні градувальні характеристики по 16 ділянкам звукопроводу на частотах f_i (точні вимірювальні шкали, рис. 6,а) мають лінійний характер в інтервалі (0...360) ел.град. з періодами, що дорівнюють довжинам ПАХ λ_i .

Градувальні характеристики для проміжних (рис. 6, б) та грубої вимірювальної шкали (рис. 6,в) побудовані по результатам вимірювання на точних шкалах.

Результати випробувань макету вимірювального перетворювача лінійних переміщень з рухомим ПАХ-приймачем приведено в табл.2.

Результати експериментальних досліджень значно відрізняються від теоретичних розрахунків (табл. 1), що пояснюється неточностями виготовлення макету первинного перетворювача. Використання сучасної технологічної бази, цифрової вимірювальної техніки та оптимізація конструкції дозволить покращити метрологічні параметри вимірювального перетворювача переміщень на ПАХ.

Висновки. Теоретичні розрахунки та результати досліджень макету ВП лінійних переміщень дозволяють сформулювати наступні висновки:

1. Дослідження залежності вихідного сигналу ПАХ-приймача від зазору між поверхнею п'єзоелектричного звукопроводу та приймачем показали, що при нормованому зазорі $X/\lambda < 0,1$ виникає додатковий фазовий зсув. Тому при проектуванні вимірювальних перетворювачів переміщень необхідно забезпечувати зазор між ПАХ-приймачем та поверхнею п'єзоелектричного звукопроводу в інтервалі $(0,1 \dots 0,3)$. Це дозволить усунути вплив дисперсії фазової швидкості в результаті збурення ПАХ-приймачем електричного поля ПАХ на точність вимірювання.
2. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що використання фазових набігань на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу електричного поля трьох ПАХ на різних частотах, що приймаються рухомим ПАХ-приймачем, дозволяє формування точ-

ної, проміжної та грубої вимірювальних шкал. Для представлення результатів вимірювання можна використати, наприклад, 22 розряди двійкового коду: точна шкала – 11 розрядів (ціна розряду –

0,176 ел. град.); проміжна шкала – 6 розрядів (ціна розряду – 5,625 ел. град.); груба шкала – 5 розрядів (ціна розряду – 11,25 ел. град.).

Таблиця 2.

Експериментальні значення метрологічних параметрів вимірювального перетворювача лінійних переміщень на ПАХ

Найменування параметрів	Одиниця вимірювання	Значення параметра
Матеріал звукопроводу		Ніобат літію LiNbO ₃ , YZ-зріз
Діапазон переміщень Z	мм	0...30
Коефіцієнт перетворення на точних шкалах в границях однієї довжини хвилі λ_k :		
$S_1 = \bar{S}_1 \pm \delta_t$	ел.град./мкм	7,1 ± 3 %
$S_2 = \bar{S}_2 \pm \delta_t$		7,0 ± 3 %
$S_3 = \bar{S}_3 \pm \delta_t$		7,2 ± 3 %
Коефіцієнт перетворення на проміжних шкалах в границях однієї ефективної довжини хвилі Λ_{12} та Λ_{31} :		
$S_{12} = \bar{S}_{12} \pm \delta_t$, ел.град/мм	ел.град./мм	110,9 ± 3 %
$S_{31} = \bar{S}_{31} \pm \delta_t$, ел.град/мм		107,5 ± 3 %
Коефіцієнт перетворення на грубій шкалі в границях однієї ефективної довжини хвилі Λ_{123} : $S_{123} = \bar{S}_{123} \pm \delta_t$	ел.град./мм	3,47 ± 3 %
Роздільна здатність на точній шкалі	мкм	0,025 ± 3 %
Похибка на точній	мкм	0,10 ± 3 %

3. Вимірювальні перетворювачі на базі застосування фазових набігань на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу електричного поля кількох поверхневих акустичних хвиль з рухомим ПАХ-приймачем можуть знайти використання у високочутливих інформаційно-вимірювальних системах для вимірювання лінійних та кутових (при кільцевому

п'єзоелектричному хвилеводі) переміщень. Метрологічні параметри таких вимірювальних систем близькі до параметрів індуктоснів, фотоелектричних перетворювачів та пристроїв на основі інтерферометрів, але можуть мати значно менші масогабаритні показники, вартість та складність конструкції.

Надійшла до редакції 19 січня 2017р.

Література:

1. Поляков П. Ф. Акустоэлектроника. Физико-технологические основы и применение: Справ. пособие: В 2 т. / П. Ф. Поляков, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков // Под общ. ред. проф. П. Ф. Полякова. – Харьков: ООО «Компания СМІТ». – 2007. – том. 1. – 552 с.
2. Жовнір М. Ф. Вимірювальні перетворювачі фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях / М. Ф. Жовнір, М. Г. Черняк, Д. В. Черненко, Л. М. Шеремет // Електроніка і зв'язь. – 2011. – № 1(60). – С. 153 – 157.
3. Fachberger R. Monitoring of the temperature inside a lining of a metallurgical vessel using a SAW temperature sensor / R. Fachberger, A. Erlacher // Procedia Chemistry. – 2009. – № 1(1). – P. 1239 – 1242. DOI: [10.1016/j.proche.2009.07.309](https://doi.org/10.1016/j.proche.2009.07.309).



4. Bogdan O. ZnO Nanostructures as Sensing Element of Acoustic Wave Sensor / O. Bogdan, A. Orlov, O. Petrishev, V. Ulianova // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2012. – № 6/12 (60). – P. 16–22. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/6021/5417>.
5. Zbrutsky A. Creation of low cost linear accelerometers for navigation and control systems / A. Zbrutsky, N. Chernyak, G. Skripkovsky // *Symposium Gyro Technology*. – 2005. – P. 4.1 – 4.11.
6. Лепих Я. И. Датчик угла поворота генераторного типа с элементом на поверхностных акустических волнах / Я. И. Лепих // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2009. – №3. – С. 24 – 25.
7. Kalinin V. Development of a calibration procedure for contactless torque and temperature sensors based on SAW resonators / V. Kalinin, R. Lohr, A. Leigh // *2008 IEEE Ultrasonics Symposium*. – 2008. – С. 1865 – 1868.
DOI: [10.1109/ultsym.2008.0459](https://doi.org/10.1109/ultsym.2008.0459).
8. Hribsek M. F. Surface Acoustic Wave Sensors in Mechanical Engineering / M. F. Hribsek, D. V. Tosic, M. R. Radosavljevic // *FME Transactions*. – 2010. – №38. – С. 11 – 18.
9. Жовнір М. Ф. Математичні моделі сенсорів переміщень та тиску на основі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль / М. Ф. Жовнір, О. О. Олійник, Л. Д. Писаренко // *Журнал нано – та електронної фізики*. – 2016. – Т.8, № 1. – С. 01024 – 01025.
DOI: [10.21272/jnep.8\(1\).01024](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01024)
10. Жовнір М. Ф. Вимірювальні перетворювачі мікропереміщень та тиску на поверхневих акустичних хвилях / М. Ф. Жовнір, М. В. Бітов, Л. Д. Писаренко // *Електроніка та зв'язок*. – 2016. – Т.21, № 4(93). – С. 49 – 57.
11. Жовнір М. Ф. Математична модель первинного перетворювача лінійних переміщень з рухомим приймачем поверхневих акустичних хвиль / М. Ф. Жовнір. // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси»*. – 2016. – №7(1179). – С. 48-57.
12. Reindl L. Wireless Passive Sensors: Basic Principles and Performances / L. Reindl // *IEEE SENSORS*. – 2008. – P. 1607 – 1610. DOI: [10.1109/icsens.2008.4716758](https://doi.org/10.1109/icsens.2008.4716758)
13. Zhovnir M. F. Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement / M. F. Zhovnir, O. M. Kuzmenko, S. I. Pokutnyi // *Journal of Applied Chemistry*. – 2015. – № 3 (1). – P. 7 – 13.
14. Mackensen E. Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors / E. Mackensen, L. Reindl // *Smart Sensors and MEMS*. – 2004. – № 181. – P. 155 – 202. DOI: [10.1007/978-1-4020-2929-5_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2929-5_5)
15. Matsuzaki R. Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires / R. Matsuzaki, A. Todoroki // *MDPI – Sensors*. – 2008. – № 8. – P. 8123 – 8138. DOI: [10.3390/s8128123](https://doi.org/10.3390/s8128123)
16. Chernenko D. Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures / D. Chernenko, M. Zhovnir, O. Oliinyk, B. Tsyganok // *35th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2012*. – P. 424 – 428. DOI: [10.1109/isse.2012.6273174](https://doi.org/10.1109/isse.2012.6273174).
17. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах / Д. Морган. – М.: Радио и связь, 1990. – 416 с.
18. Дворников А. А. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах / А. А. Дворников, В. И. Огурцов, Г. М. Уткин. – М.: Радио и связь, 1983. – 136 с.
19. Орлов В. С. Фильтры на поверхностных акустических волнах / В. С. Орлов, В. С. Бондаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.

УДК 531.71; 534.74; 681.2.082

Жовнір М. Ф., к.т.н. OrcID [0000-0002-9443-527X](https://orcid.org/0000-0002-9443-527X)

e-mail: zhovnir101@gmail.com

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВЫХ НАБЕГОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН



Предложен и теоретически обоснован метод однозначного измерения перемещений с использованием фазовых набегов на поверхности пьезоэлектрического звукопровода электрического поля нескольких поверхностных акустических волн (ПАВ), принимаемых подвижным ПАВ-приемником.

Приведена оценка потенциальных метрологических параметров 3-х частотного преобразователя линейных перемещений в диапазоне до 100 мм с формированием точной, промежуточной и грубой измерительных шкал.

Результаты испытаний макета преобразователя линейных перемещений на базе пьезоэлектрического звукопровода из ниобат лития YZ-срезы подтверждают возможность создания высокочувствительных преобразователей перемещения с разрешением и точностью, которые сравнимые с параметрами индуктоцинов, фотоэлектрических преобразователей и систем на базе интерферометров, но могут иметь значительно меньшие массогабаритные показатели, стоимость и сложность конструкции.

Библ. 19, рис. 6

Ключевые слова: *поверхностная акустическая волна; измерительный преобразователь; первичный преобразователь; пьезоэлектрический звукопровод; встречно-штыревой преобразователь.*

UDC 531.71; 534.74; 681.2.082

Zhovnir M. F., PhD, ORCID [0000-0002-9443-527X](https://orcid.org/0000-0002-9443-527X)

e-mail: zhovnir101@gmail.com

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute"

RANSDUCER OF DISPLACEMENTS USING PHASE RAIDS OF THE ELECTRIC FIELD OF SURFACE ACOUSTIC WAVES

The method for unambiguous measurement displacements is proposed and theoretically justified. The phase incursion on the surface of the piezoelectric sound-conductor electric field of several surface acoustic waves (SAW) is taken by moving SAW receiver.

The rating of potential metrological parameters of the three-frequency transducer measuring linear displacement in the range of up to 100 mm with the formation of precise, intermediate and rough measurement scales is carried out.

The test results of model of such device, based on piezoelectric sound-conductor of lithium niobate YZ-cut, confirm the possibility of creating highly sensitive displacement transducers. They have a resolution and accuracy properties, that are close to the parameters inductosyns and photoelectric converters based on interferometers, but can be much smaller mass and dimensional indexes, cost and complexity of construction.

Ref. 19, fig. 6

Key words: *surface acoustic wave; measuring transducer; primary transducer; the piezoelectric sound conductor; interdigital transducer.*

References

- [1]. Polyakov, P. F., Khorunzhiy, V. A., Polyakov, V. P., Akustoelektronika. Fiziko-tekhnologicheskie osnovy i primeneniye. Spravochnoe posobie v 2 t. [Acoustoelectronics. Physical – technological Fundamentals and Application: Handbook: In 2 v.], v. 1, Ed. prof. P. Polyakov, Kharkiv: "SMIT company" Ltd, 2007, p. 552.
- [2]. Zhovnir, M. F., Chernyak, M. G., Chernenko, D. V., Sheremet, L. M., «Vymiriuvalni peretvoriuvachi fizichnikh velychyn nf poherhnevnyh akustychnyh khvyliakh [Measuring transducers of surface acoustic wave physical quantities],» Electronics and Communications, v. 16, № 1 (60), pp. 153-157, 2011.



- [3]. Fachberger, R., Erlacher, A., "Monitoring of the temperature inside a lining of a metallurgical vessel using a SAW temperature sensor," *Procedia Chemistry*, no. 1 (1), p. 1239 – 1242, 2009. DOI:[10.1016/j.proche.2009.07.309](https://doi.org/10.1016/j.proche.2009.07.309).
- [4]. Bogdan, O., Orlov, A., Petrishev, O., Ulianova, V., "ZnO Nanostructures as Sensing Element of Acoustic Wave Sensor," *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, no. 6/12 (60), p. 16 – 22, 2012. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/6021/5417>.
- [5]. Zbrutsky, A., Chernyak, N., Skripkovsky, G., "Symposium Gyro Technology," in *Creation of low cost linear accelerometers for navigation and control systems*, Stuttgart (Germany), 2005.
- [6]. Y. I. Lepykh, «Datchik uhla povorota heneratornogo tipa s elementom na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh [The turn angle gauge of generating type with an element on surface acoustic waves],» *Technology and design in electronic equipment*, № 3, p. 24 – 25, 2009.
- [7]. Kalinin, V., Lohr, R., Leigh, A., "2008 IEEE Ultrasonics Symposium," in *Development of a calibration procedure for contactless torque and temperature sensors based on SAW resonators*, 2008. DOI:[10.1109/ultsym.2008.0459](https://doi.org/10.1109/ultsym.2008.0459)
- [8]. Hribsek, M. F., Tomic, D. V., Radosavljevic, M. R., "Surface Acoustic Wave Sensors in Mechanical Engineering," *FME Transactions*, no. 38, p. 11 – 18, 2010.
- [9]. Zhovnir, M. F., Oliinyk, O. O., Pysarenko, L. D., «Matematychni modeli sensoriv peremishchen ta tysku na osnovi zburennia elektrichnihi polia poverkhnevikh akustychnykh khvyl [Mathematical Models of Pressure and Microdisplacement Sensors Based on Electric Field Perturbation of the Surface Acoustic Waves],» *Journal of Nano and Electronic Physics*, № 8 (1), p. 010241 – 010245, 2016. DOI:[10.21272/jnep.8\(1\).01024](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01024).
- [10]. Zhovnir, M. F., Bitov, M. V., Pysarenko, L. D., «Vymiriuvalni peretvoriuvachi mikroperemishchen ta tysku na poverkhnevikh akustychnykh khvyl [Measurement transformers of micromoving and pressure based on the surface acoustic wave],» *Electronics and Communications*, v. 21, № 4(93), p. 49 – 57, 2016. DOI: [10.20535/2312-1807.2016.21.4.81907](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.4.81907)
- [11]. M. F. Zhovnir, «Matematychna model pervynnoho peretvoriuvacha liniinykh peremishchen z rukhomym prymachem poverkhnevikh akustychnykh khvyl [A mathematical model of the linear displacements primary transducer with a movable surface acoustic waves receiver],» *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mechanical – technological systems and complexes*, № 7 (1179), p. 48 – 57, 2016.
- [12]. L. Reindl, "Wireless Passive Sensors: Basic principles and performances," *IEEE Sensors*, p. 1607 – 1610, 2008. DOI:[10.1109/icsens.2008.4716758](https://doi.org/10.1109/icsens.2008.4716758)
- [13]. Zhovnir, M. F., Kuzmenko, O. M., Pokutnyi, S. I., "Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement," *Journal of Applied Chemistry*, no. 3 (1), p. 7 – 13, 2015.
- [14]. Mackensen, E., Reindl, L., "Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors," *Smart Sensors and MEMS*, no. 181, p. 155 – 202, 2004. DOI:[10.1007/978-1-4020-2929-5_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2929-5_5).
- [15]. Matsuzaki, R., Todoroki, A., "Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires," *MDPI–Sensors*, no. 8, p. 8123 – 8138, 2008. DOI:[10.3390/s8128123](https://doi.org/10.3390/s8128123)
- [16]. Chernenko, D., Zhovnir, M., Tsyganok, B., Oliinyk, O., "35th International Spring Seminar on Electronics Technology," in *Wireless passive pressure sensor using frequency coded SAW structures*, 2012. DOI:[10.1109/isse.2012.6273174](https://doi.org/10.1109/isse.2012.6273174)
- [17]. D. Morgan, *Ustroistva obrabotki signalov na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh [Devices for processing signals on surface acoustic waves]*, Moscow: Radio and communication, 1990, p. 416.
- [18]. Dvornikov, A. A., Ogurtsov, V. I., Utkin, G.M., *stabilie heneratory s filtrami na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh [Stable generators with filters on surface acoustic waves]*, Moscow: Radio and communication, 1983, p. 136.
- [19]. Orlov, V. S., Bondarenko, V. S., *filtry na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh [Filters on surface acoustic waves]*, Moscow: Radio and communication, 1984, p. 272.