

**Bibliography (transliterated):** 1. *Anokhin, V. N.* (2012). Interactive is a main sign of electronic educational editions. Materials 3 international naukovopraktichnoy conference «Information technologies and priv», Kharkov: KhNUE, 215–216. 2. *Zelenko, L. S.* (2014). Software for filling educational content among lms moodle. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, No 4–2, 471–475. 3. *Kovaleva, E. A.* (2013). Development of a training exercise for solving systems of linear algebraic equations in Adobe Captivate. Eastern European Journal of advanced technologies, V. 5, N 3 (65), 9–12. 4. *Chen, H.* (2014). Systemic risk and the interconnectedness between banks and insurers: An econometric analysis. Journal of Risk and Insurance, V. 81, No. 3, 623–652. 5. *Wells, K.* (2014). Treatment research at the crossroads: the scientific interface of clinical trials and effectiveness research. American Journal of Psychiatry, N 2, 123–125. 6. *Uvarova, I.* (2015) Model the impact of international migration on the economy of

Ukraine. Business Info, No2, 119–124. 7. *Sbordone, A. M.* (2002). Prices and unit labor costs: a new test of price stickiness. Journal of Monetary Economics, Vol. 49, No. 2, 265–292. 8. *Nakamura, E., Steinsson, J.* (2015). Five facts about prices: A reevaluation of menu cost models. The Quarterly Journal of Economics, 1415–1464. 9. *Elistratova, N. N.* (2014). Electronic textbook as a means and condition of media education in pedagogy of higher education. PEDAGOGY. EDUCATION, Vol. 869, 15. 10. *Jurkova, S. V.* (2010). Information and communication technologies in the organization of primary school. Collectors conferences SIC sociosphere, No. 5, 23–27/ 11. *Huggins D. J. et. al.* (2015). Concepts in Toxicology: Development of Online Instructional Modules. Chemistry International, Vol. 37, No 1, 12–14. 12. *Semenovskaya, T.* (2015). Electronic textbook as a means of e-learning training in high school. CSW, No 6–2, 5–8.

Поступила (received) 20.11.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Ковалева Катерина Александровна** – Кандидат технічних наук, преподаватель, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеца, Кафедра высшей математики и экономико-математических методов, пр. Ленина, 9-А, г. Харьков, Украина, 61166;

**Ковальова Катерина Олександрівна** – Кандидат технічних наук, викладач, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеца, Кафедра вищої математики та економіко-математичних методів, пр. Леніна, 9-А, м Харків, Україна, 61166; e-mail: [Kateryna.Kovalova@m.hneu.edu.ua](mailto:Kateryna.Kovalova@m.hneu.edu.ua).

**Kovalova Katerina** – Lecturer, Candidate of technical science, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, The department of Mathematics High society and economic-mathematical methods, Lenin Avenue, 9av, Kharkov, Ukraine, 61166; e-mail: [Kateryna.Kovalova@m.hneu.edu.ua](mailto:Kateryna.Kovalova@m.hneu.edu.ua).

УДК 681.586:531.768:621.385.6

**М. Ф. ЖОВНІР, О. О. ОЛІЙНИК**

### РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ НА ПАХ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ ТА КУТОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ. ЧАСТИНА 1.

Розглядаються вимірювальні перетворювачі (ВП) на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) для вимірювання лінійних та кутових переміщень з формуванням точної, проміжної та грубої шкал на основі фазового набігання ПАХ на різних частотах. Описані конструктивні особливості складових елементів перетворювачів. Для демонстрації метрологічної цінності розроблених ВП приведені результати розрахунків чутливості, похибок, роздільної здатності та інших метрологічних параметрів. Результати описаних підходів вимірювання фазового зсуву можуть бути використані для подальшого проектування прецизійних пристроїв та систем позиціонування, а також перетворювачів з широким динамічним діапазоном лінійних та кутових надмалих переміщень.

**Ключові слова:** пристрої на ПАХ, перетворювачі переміщення, вимірювання фазового зсуву, прецизійне позиціонування.

**Вступ.** Мікроелектронні пристрої, що використовують ефекти затримки поверхневих хвиль (електромагнітних, магнітостатичних, акустичних), перспективні не тільки для формування та оброблення інформаційних сигналів, але і для прецизійних вимірювань фізичних та механічних величин. 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 напруженостей електричного та магнітного полів, сили та тиску, прискорення, крутного моменту, лінійних та кутових переміщень, вологості та температури, складу газового середовища тощо [1–6]. Якщо дія механічних та фізичних ве-

личин призводить до набігу фази ПАХ не більшому  $\pi$ , то в основі ВП на ПАХ доцільно застосовувати високостабільний ПАХ-генератор, що містить регульовані під впливом вимірювальних величин резонатор або лінію затримки на ПАХ. Застосування частотного метода вимірювання дозволяє отримувати високу роздільну здатність і точність [1–3, 5].

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 [7]. Результати розрахунків показують [8], що при роздільній здатності  $\psi_{\text{min}} = 0,1$  ел.град. та

© М. Ф. Жовнір, О. О. Олійник. 2015

похибці  $\Delta\psi = \pm 0,5 \text{ ел.град.}$  вимірювання фази промисловими фазометрами, при 3-х частотному методі вимірювання, потенційні параметри ВП на ПАХ лінійних та кутових переміщень складають: діапазон переміщень –  $0 \dots 100 \text{ мм}$  ( $0 \dots 360^\circ$ ); роздільна здатність на точній шкалі –  $0,013 \text{ мкм}$  ( $0,175 \text{ кут. сек.}$ ); похибка на точній шкалі –  $\pm 0,065 \text{ мкм}$  ( $\pm 0,85 \text{ кут. сек.}$ ).

**Постановка проблеми.** На рис. 1 представлена функціональна схема ВП на ПАХ при збудженні хвилі у вигляді суперпозиції 3-х поверхневих акустичних хвиль з частотами  $f_1, f_2, f_3$  [7, 8]. Первинний перетворювач складається із п'єзоелектричного звукопроводу (хвилеводу) 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, над яким на відстані  $X$ , не більшій довжини поверхневих акустичних хвиль, переміщується приймач ПАХ 6, виконаний у вигляді ЗШП, сформованого на діелектричній пластині.

Електричний сигнал з генераторного блоку 7, що складається із трьох високостабільних генераторів та суматора, подається на вхідний ЗШП і збуджує у вигляді суперпозиції 3-х гармонічних коливань поверхневу акустичну хвилю, яка приймається рухомих приймачем 6 і контрольним ЗШП 5, вихідні сигнали з яких поступають на блоки підсилення і фільтрації 8 та 9, що складаються із високочастотних підсилювачів та 3-х фільтрів відповідно на частоти  $f_{1,2,3}$ . Після підсилення та фільтрації вихідні сигнали з блоків 8 та 9 поступають на фазовимірювальні блоки 10 та 11, на які подаються опорні сигнали з генераторного блоку. Результати вимірювання фаз  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$  сигналів з рухомого приймача поступають в блок обробки та формування трьох вимірювальних шкал перетворювача 12.

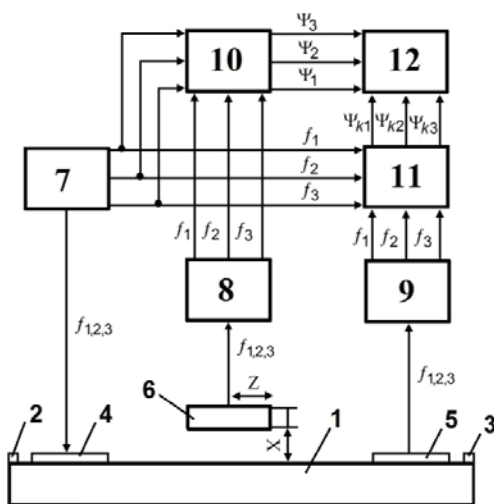


Рис. 1 – Функціональна схема ВП на ПАХ для вимірювання лінійних та кутових переміщень

Наприклад, для формування точної шкали використовуються результати вимірювання  $\Psi_1$  на частоті

$f_1$ . Визначаючи  $\Psi_{12} = \Psi_1 - \Psi_2$  або  $\Psi_{13} = \Psi_1 - \Psi_3$  можна сформувати проміжну шкалу, а визначення  $\Psi_{123} = \Psi_{13} - \Psi_{12}$  дозволить сформувати грубу шкалу вимірювального перетворювача.

В блок 12 одночасно поступають результати вимірювання фаз сигналів  $\Psi_{k1}, \Psi_{k2}, \Psi_{k3}$  з блоку 11 для коригування фаз  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$  при дії дестабілізуючих факторів на звукопровід. Для цього визначається величина додаткового набігу фази для кожної частоти  $f_{1,2,3}$  для координати  $Z$ , в якій знаходиться рухомий приймач ПАХ за формулою:

$$\Delta\Psi_{Z,1,2,3} = \Delta\Psi_{k,1,2,3} Z/L,$$

де  $\Delta\Psi_{k,1,2,3}$  – приріст фази на частотах  $f_{1,2,3}$  в результаті дії дестабілізуючих факторів;  $L$  – відстань між вхідним 4 та контрольним 5 ЗШП;  $Z$  – координата знаходження рухомого приймача ПАХ, що визначається попередньо в результаті вимірювання фаз  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$ .

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є дослідження параметрів розробленого 3-х частотного ВП лінійних та кутових переміщень на ПАХ, а також оцінка отриманих експериментальних результатів. Задачами дослідження є аналіз конструктивних та метрологічних параметрів та пошук методів для їх поліпшення.

**Конструкції та параметри первинних перетворювачів на ПАХ.** На рис. 2 та рис. 3 зображено експериментальні ПАХ-модулі для вимірювання лінійних та кутових переміщень. Дослідження проводились на частотах  $f_1 = 70,62 \text{ МГц}$ ,  $f_2 = 62,52 \text{ МГц}$ ,  $f_3 = 71,69 \text{ МГц}$ .

ПАХ-модуль для лінійних переміщень містить п'єзоелектричний звукопровід 1 із ніобату літія YZ-зрізу (фазова швидкість ПАХ  $V = 3488 \text{ м/с}$ ) з вхідним та контрольними трьохсекційними зустрічно-штировими перетворювачами.

ПАХ-модулі на базі плівкової структури  $ZnO$  на плавленому кварці  $SiO_{2nl}$  марки КУ-1 використовувались як для вимірювання лінійних, так і кутових переміщень.

Просторові періоди кожної секції вхідного, контрольного та ЗШП рухомого приймача ПАХ дорівнюють відповідним довжинам поверхневих акустичних хвиль  $W_{1,2,3} = \lambda_{1,2,3}$  з числом електродів  $N=40$  та апертурою  $W_0=2 \text{ мм}$ . Так, у випадку використання звукопроводу із ніобату літію  $\lambda_1 = 49,39 \text{ мкм}$ ;  $\lambda_2 = 50,17 \text{ мкм}$ ;  $\lambda_3 = 48,65 \text{ мкм}$ . Для плівкової структури  $ZnO-SiO_{2nl}$  при товщині півки  $ZnO$   $h = (1,4 \div 1,6) \text{ мкм}$  фазова швидкість ПАХ у хвилеводі  $V = 3250 \text{ м/с}$ , а довжини хвиль для відповідних частот мають наступні значення:  $\lambda_1 = 46,00 \text{ мкм}$ ;  $\lambda_2 = 46,73 \text{ мкм}$ ;  $\lambda_3 = 45,33 \text{ мкм}$ .

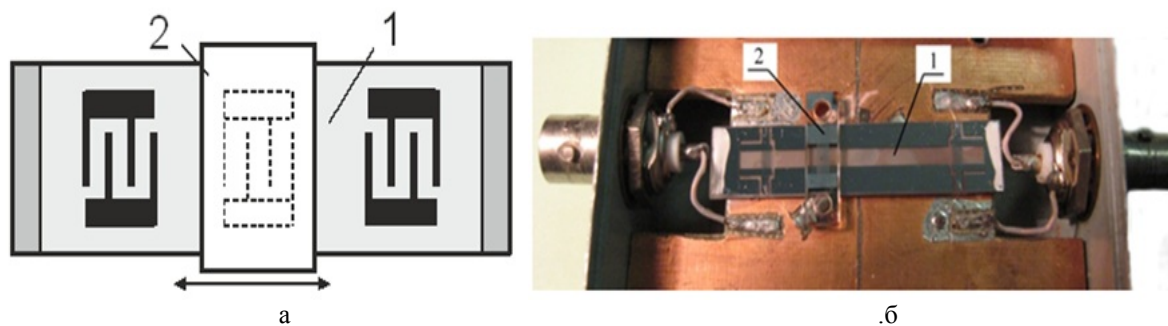


Рис. 2 – Первинний перетворювач лінійних переміщень з рухомим приймачем ПАХ: а – ескіз, б – конструкція; 1 – звукопровід ПАХ; 2 – рухомий приймач ПАХ

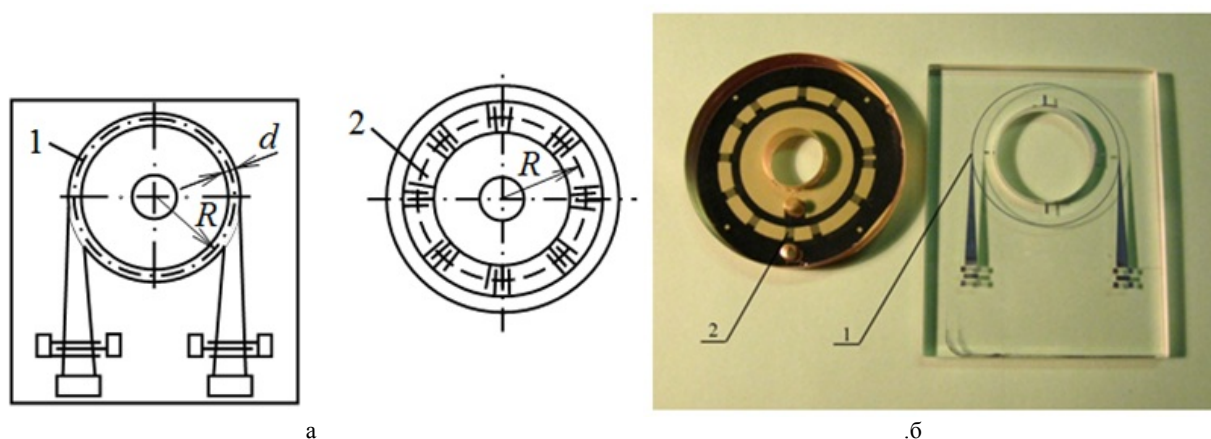


Рис. 3 – Первинний перетворювач кутових переміщень з рухомим приймачем ПАХ: а – ескіз, б – конструкція; 1 – хвилевід ПАХ; 2 – рухомий приймач ПАХ

Для збудження хвиль у плівкових структурах застосовано плівковий зустрічно-штировий перетворювач ПАХ: плавлений кварц – ЗШП – п’єзоелектрична плівка  $ZnO$  – металевий електрод, що закорочує електричне поле плівки [9, 10]. Така конструкція дозволяє отримувати високу ефективність електроакустичного перетворення при тонких п’єзоелектричних плівках, що мають товщину  $h/\lambda = 0,03 \dots 0,04$ , де  $h$  – товщина плівки оксиду цинку;  $\lambda = V/f$ , де  $V$ ,  $\lambda$ ,  $f$  – фазова швидкість, довжина хвилі і частота ПАХ відповідно.

Для вимірювання кутових переміщень хвилевід виконаний у вигляді кільця з радіусом  $R = 15$  мм з рупорним концентратором. На установці оптичного зондування гомодинного типу були досліджені прямолінійні та кільцеві ПАХ-хвилеводи шириною  $d = (3 \div 5)\lambda = (120 \div 200)$  мкм та товщиною п’єзоелектричної плівки  $ZnO$   $h = (1,4 \div 1,6)$  мкм. При вказаних геометричних параметрах у хвилеводах спостерігався одномодовий характер поширення ПАХ при втратах на поширення  $2,0 \dots 2,5$  дБ/см.

Рухомий приймач ПАХ виконаний у вигляді ексцентричних ЗШП на кожну частоту  $\lambda_{1,2,3}$ , сформованих на плавненому кварці.

Приймач ПАХ для ВП кутових переміщень виконаний у вигляді ексцентричних рівномірно розпо-

ділених по кільцю ЗШП, по чотири секції на кожну частоту  $f_{1,2,3}$ , сформованих на плавненому кварці.

Внесені втрати при зміні відстані в інтервалі  $X/\lambda = 0 \dots 0,5$  між поверхнею п’єзоелектричного звукопроводу (хвилеводу) та рухомим ПАХ-приймачем складають  $25 \dots 50$  дБ.

Вхідні, контрольні та ЗШП рухомого приймача виготовлялися методом наплення алюмінію товщиною  $0,27$  мкм (для звукопроводу із ніобат літію напильявся також підшар ванадію товщиною  $0,03$  мкм) на установці вакуумного наплення УВН-71П-3 і формування структури електродів методом фотолітографії.

Наплення п’єзоелектричної плівки  $ZnO$  товщиною  $1,4 \dots 1,6$  мкм на підкладку із плавненого кварцу  $SiO_{2nl}$  виконувалось на установці іонно-плазменного наплення УРМ3.279.026.

Технологічна база, що базується на промислово-му обладнанні, дозволила забезпечити виготовлення елементів первинних перетворювачів на задані частоти з похибкою не гірше  $\pm 0,1$  %.

**Результати експериментальних досліджень вимірювальних прететворювачів на ПАХ.** Для формування високочастотного сигналу у вигляді суперпозиції синусоїдних електричних коливань на частоті

тах  $f_{1,2,3}$ :  $f_1 = 70,62$  МГц;  $f_2 = f_1(1 - \delta_2)$  та  $f_3 = f_1(1 + \delta_3)$ , де  $\delta_2 = 1/64$  і  $\delta_3 = 31/2048$  було розроблено генераторний блок, що складається із трьох ПАХ-генераторів, вихідні сигнали яких поступають на суматор.

Автогенератори виконані на базі транзисторів КТ 3101, лінії затримки на ПАХ на базі кварцу ST-зрізу в якості частотно-задавальних елементів, перестроювання частот ПАХ-генераторів здійснюється за допомогою варикапів КВ 109Д.

Амплітуда сигналу на кожній частоті на виході генераторного блоку становить 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  $10^{-7} c^{-1}$ .

Для підсилення та фільтрації вихідного сигналу з приймача ПАХ та контрольного ЗШП розроблено блок підсилення та фільтрації, що складається із підсилювача трьохчастотного сигналу, трьохканальних підсилювачів та трьох ПАХ-фільтрів. В якості активних елементів високочастотних підсилювачів вибрана мікросхема типу М42177-2 – напівпровідниковий двокаскадний підсилювач з буферним каскадом. Смуги пропускання ПАХ-фільтрів 470...530 кГц, внесені втрати при компенсації статичних ємностей ЗШП складають 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, диференціальних підсилювачів, керованих атенуаторів на  $p-i-n$  діодах типу КА517. Вихідні напруги на кожній частоті не менше 0,1 В, рівень бічних складових у спектрі вихідних сигналів не менше -23 дБ.

Величина зазору між поверхнею п'єзоелектричного звукопроводу та рухомих приймачем ПАХ встановлювалась за допомогою індикатора 1МИГ з ціною поділки 1 мкм. Переміщення приймача ПАХ вздовж звукопроводу здійснювалось за допомогою мікрометричного гвинта та контролювалось індикатором 1 МИГ у ВП лінійних переміщень та автоколіматором АК-0,2У з ціною поділки секундної шкали в кутовому полі 0,2 кут.сек. і ціною поділки грубої шкали 10 кут. сек. при діапазоні вимірювання 600 кут.сек.

Для вимірювання фази вихідних сигналів рухомого приймача ПАХ 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 рухомого приймача ПАХ і опорні сигнали з генераторного блоку з частотами  $f_{1,2,3}$  поступають на цифрові фазометри Ф5126 для вимірювання фазових зсувів  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ , по яким здійснюється формування точної шкали ( $\psi_1$ ), проміжних

шкал ( $\psi_{12} = \psi_1 - \psi_2$ ) та ( $\psi_{13} = \psi_1 - \psi_3$ ) та грубої вимірювальної шкали ( $\psi_{123} = \psi_{12} - \psi_{13}$ ) ВП на ПАХ лінійних та кутових переміщень.

Вимірювання проводилося на окремих ділянках діапазонів: лінійних переміщень  $Z = 0...50$  мм; кутових переміщень  $\varphi = 0...360$  кут.град. Отримані графіки вимірювання фази та їх різниць для окремої ділянки зображено на рис.4.

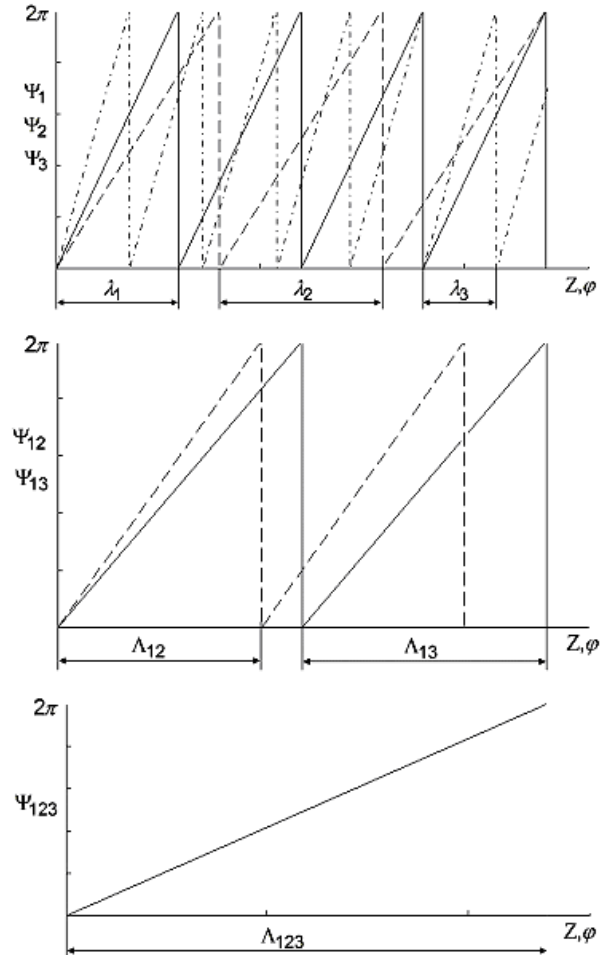


Рис. 4 – Типові фазові характеристики 3-х частотного ВП на ПАХ лінійних та кутових переміщень

Градувальні характеристики на кожній частоті мають лінійний характер в інтервалах  $Z = 0...50$  мм та  $\varphi = 0...360$  кут.град. з просторовими періодами, що дорівнюють довжинам ПАХ  $\lambda_{1,2,3}$ .

Результати оцінки метрологічних параметрів експериментальних вимірювальних перетворювачів лінійних та кутових переміщень з рухомих приймачем ПАХ на точній шкалі приведено в табл. 1. Причому довіряча вірогідність результатів оцінки метрологічних параметрів не менше 0,95.

Таблиця 1 – Метрологічні параметри ВП при роботі на точній шкалі.

Найменування параметрів	Вимірювальний перетворювач		
	лінійних переміщень		кутових переміщень
Матеріал звукопроводу (хвилеводу)	Ніобат літію $LiNbO_3$ , YZ-зріз	Плівкова структура $ZnO - SiO_{2nl}$ .	
Діапазон переміщень, $Z$ , мм; $\varphi$ , кут.град.	0...50	0...50	0...360
Коефіцієнт перетворення в границях однієї довжини хвилі, ел.град./мкм (ел.град./кут.сек): $S_1 = \bar{S}_1 \pm \delta_1$	$7,8 \pm 2 \%$	$7,8 \pm 2 \%$	$0,57 \pm 0,5 \%$
Основна похибка в границях однієї довжини ПАХ:	0,25	0,28	0,30
1. Найбільше значення основної приведенної похибки: $\gamma_{np,1}^{очн}$ , %	0,75	0,83	0,52
2. Найбільше значення основної відносної похибки, що визначається за формулою: $\delta^{очн} = \pm \left[ c + d \left( \frac{Z_{kp} n}{Z} - 1 \right) \right] \cdot 100\%$ – $c_1$ , % – $d_1$ , %	0,80 0,43	0,82 0,48	0,65 0,30
3. Найбільше значення приведенної нелінійності функції перетворення: $\gamma_{np,1}^H$ , %	0,25	0,28	0,30
4. Найбільше значення приведенної варіації (гістерезису) вихідного сигналу: $\gamma_{np,1}^r$ , %	0,35	0,40	0,35

Із системи метрологічних параметрів ВП випливає, що розроблені ПАХ-модулі забезпечують достатньо високу чутливість та роздільну здатність, яка обмежується метрологічними характеристиками приладів для вимірювання фази. Проблема підвищення чутливості та точності вимірювань лінійних та кутових переміщень полягає у вирішенні проблем вимірювання надмалого значення фазового зсуву  $\psi_1$ , який відповідає за точну шкалу. Для прецизійного вимірювання фазового зсуву рекомендується використати переваги методу синхронно-фазового детектування прийнявши за опорний сигнал  $f_0$ , який відрізняється від сигналу  $f_1$  не більше ніж на  $\Delta f / f_0 = \pm 0,28\%$ . Це дозволяє на виході отримати сигнал прямо пропорційний фазовому зсуву  $\psi_1$ :

$$U_{опорний} = U_1 \sin(2\pi f_0 t),$$

$$U_{сигналу} = U_2 = B \sin(2\pi f_1 t + \psi),$$

$$U_{вих} = C \sin \psi, \quad \psi = [-\pi / 6; \pi / 6];$$

де  $A, B, C$  – масштабні коефіцієнти сигналу [12,13].

На виході фазочутливого детектора постійна напруга виникає в результаті детектування корисного сигналу протягом сталої вимірювання  $\tau$ . При постійній спектральній щільності шумів  $S_0$  в межах  $\Delta f$  відношення сигнал/шум  $SNR$  описується залежністю [13]:

$$SNR = 20 \lg \frac{U_{вих} \sqrt{\tau}}{2\sqrt{S_0}}$$

Відношення сигнал/шум при найшвидшій реєстрації корисного сигналу на фоні адитивного білого гаусівського шуму складає  $SNR = 16$  дБ. У випадку, коли необхідно вимірювати лінійні та кутові переміщення, які відповідають фазовим зсувам  $10^{-5} \div 10^{-6}$  радіан, необхідно підібрати оптимальні параметри

вимірювальної системи в залежності від вимог до швидкості вимірювань [13].

**Висновки.** Методика вимірювання лінійних та кутових переміщень дозволяє проводити вимірювання на грубій, проміжній та точній шкалі. Остання розглянута більш детально, оскільки представляє собою особливу цінність в системах точного позиціонування. Описаний підхід вимірювання фазового зсуву між опорним та зсунутим на кут  $\psi_1$  сигналами дозволяє збільшити точність вимірювання на 4-5 порядків за рахунок оптимального підбору параметрів вимірювальних засобів.

Детальний розгляд метрологічних параметрів, методики їх розрахунку, взаємні залежності між складовими похибок вимірювань будуть розглянуті в Ч. 2

**Список літератури:** 1. Поляков, П. Ф. Акустоэлектроника. Физико-технологические основы и применение [Текст]: 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. Фізико-технічні основи побудови вимірювального перетворювача мікропереміщень на поверхневих акустичних хвилях [Текст] / М. Ф. Жовнір, М. Г. Черняк, А. А. Дідківський, С. С. Наушенко, В. М. Дейнеко // Електроніка і зв'язь. – 2004. – № 23. – С. 5–8. 3. Жовнір, М. Ф. Вимірювальні перетворювачі фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях [Текст] / М. Ф. Жовнір, М. Г. Черняк, Д. В. Черненко, Л. М. Шеремет // Електроніка і зв'язь. – 2011. – №60. – С. 153–157. 4. Chernenko, D. Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures [Text] / D. Chernenko, M. Zhovnir, O. Oliinyk, V. Tsyganok // 35th International Spring Seminar on Electronics Technology „Power Electronics” (ISSE 2012). – Bad Aussee (Austria). – 2012. – P. 424 – 428. 5. Черненко, Д. В. Вимірювальні перетворювачі тиску на основі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль [Текст] / Д. В. Черненко, О. М. Кузьменко, М. Ф. Жовнір // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2013. – №78. – С. 62–66. 6. Zhovnir, M. Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement [Text] / M. Zhovnir, O. Kuzmenko, S. Pokutnyi // Journal of Applied Chemistry. – 2015. – 3(1). – P. 7–13. 7. Жовнір, Н. Ф. Измерительный преобразователь перемещений на основе использования фазовых набегов ПАВ [Текст] / Н. Ф. Жовнір // Сборник докладов Международной науч.-

техн.конф. «Проблемы физической и биомедицинской электроники», г. Киев, 27–30 мая 1996. – С. 279–283. **8.** Жовнір, М. Ф. Оцінка потенційних роздільної здатності і точності вимірювальних перетворювачів лінійних та кутових переміщень на базі використання фазових набігань поверхневих акустичних хвиль [Текст] / М. Ф. Жовнір, О. В. Шостак // Електроніка і зв'язь. – 2015. – Том 20, № 3(86). – С. 101–106. **9.** Морозов, А. И. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств [Текст] / А. И. Морозов, В. В. Проклов, Б. А. Станковський. – М.: Радио и связь, 1981. – 184 с. **10.** Шермегор, Т. Д. Пленочные пьезоэлектрики [Текст] / Т. Д. Шермегор, Н. Н. Стрельцова. – М.: Радио и связь, 1986. – 136 с. **11.** Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] : Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с. **12.** Перекрестов, І. С. Застосування методу компенсації фазового зсуву при синхронному детектуванні сигналів цифрових видів модуляції [Текст] / І. С. Перекрестов, П. В. Іващенко // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – № 2. – С 54–62. **13.** Матяш, І. Є. Детектування індукованим тепловим потоком напружень в твердому тілі за допомогою фотопружного мікроскопу [Текст] / І. Є. Матяш, І. А. Мінайлова, О. М. Мішук, О. О. Олійник, Б. К. Сердега, Б. А. Циганок // Електроніка та зв'язок. – 2014. – №2(79). – С. 9–22.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Polyakov, P., Xorunzhyj, V., Polyakov, V. (2007). Akustoelektronika. Fiziko-technologicheskie osnovy i primeneniye: Sprav. posobyе (2nd ed., Vol. 1, 552). Xarkiv: Kompaniya SMYT. **2.** Zhovnir, M., Chernyak, M., Didkivskiy, A., Naushenko, S., Dejneko, V. (2004). Fizyko-tekhnichni osnovy pobudovy vymiryuvalnogo peretvoryuvacha mikroperemishhen na poverknevyyh akustychnyh hvulyakh. Electronics and Communications, 23, 5–8. **3.** Zhovnir, M., Chernyak, M., Chernenko, D., Sheremet, L. (2011). Vymiryuvalni

peretvoryuvachi fizychnyyh velychyn na poverknevyyh akustychnyh hvulyakh. Electronics and Communications, 1(60), 153–157. **4.** Chernenko, D., Zhovnir, M., Tsyganok, B., Oliinyk, O. (2012). Wireless passive pressure sensor using frequency coded SAW structures. 35th International Spring Seminar on Electronics Technology „Power Electronics“, 424–428. doi:10.1109/ISSE.2012.6273174 **5.** Chernenko, D., Kuzmenko, O., Zhovnir, M. (2013). Vymiryuvalni peretvoryuvachi tysku na osnovi zburennyh elektrychnogo polya poverknevyyh akustychnyh hvyl. Visnyk Kremenchukskogo Nacionalnogo Universytetu Imeni Mykhajla Ostrogradskogo, 62–66. **6.** Zhovnir, M., Kuzmenko, O., Pokutnyi, C. (2015). Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement. Journal of Applied Chemistry, 3(1), 7–13. **7.** Zhovnir, M. (1996). Proceedings from Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauch.-texn.konf.: Problemy fizicheskoy biyomedycynskoj elektroniki. Kyiv: Ukraine, 279–283. **8.** Zhovnir, M., Shostak, O. (2015). Ocinka potencijnyx rozdilnoy zdatnosti i tochnosti vymiryuvalnyx peretvoryuvachiv linijnyh ta kutovyh peremishchen na bazi vykorystannya fazovyh nabigan poverknevyyh akustychnyh hvyl. Electronics and Communications, 101–106. **9.** Morozov, A., Proklov, V., Stankovsky, B. (1981). Pezoelektrycheskyye preobrazovateli dlya radioelektronnyx ustrojstv. Moscow: Radio i svyaz, 184 **10.** Shermegor, T., Strelczova, N. (1986). Plenochnye pezoelektriki. Moscow: Radio i svyaz, 136. **11.** Gonorovsky, Y. (1986). Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: Uchebnik dlya vuzov (4th ed.). Moscow: Radio i svyaz, 512. **12.** Perekrstov, I., Ivashhenko, P. (2009). Zastosuvannya metodu kompensacii fazovogo zsuvu pry synhronnomu detektuvanni signaliv cyfrovyyh vydiv modulyciyi. Naukovi Praci ONAZ Im. O.S. Popova, 2, 54–62. **13.** Matyash, I., Minailova, I., Mishhuk, O., Oliinyk, O., Serdega, B., Tsyganok, B. (2014). Detektuvannya indukovanym teplovym potokom napruzhen v tverdomu tili za dopomogoyu fotopruzhnogo mikroskopu. Electronics and Communications, 2(79), 9–22.

Надійшла (received) 20.12.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Жовнір Микола Федорович** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра Електронних приладів та пристроїв, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; вул. Політехнічна, 16, корпус №12. Київ, Україна, 03056.

**Олійник Остап Олегович** – аспірант, кафедра Електронних приладів та пристроїв, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; вул. Політехнічна, 16, корпус №12. Київ, Україна, 03056; тел.: 066-310-36-20; e-mail: [ostap.oliinyk@gmail.com](mailto:ostap.oliinyk@gmail.com).

**Жовнір Николай Федорович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра Электронных приборов и устройств, факультет электроники, Национальный технический университет Украины «КПИ»; ул. Политехническая, 16, корпус №12. Киев, Украина, 03056.

**Олейник Остап Олегович** – аспирант, кафедра Электронных приборов и устройств, факультет электроники, Национальный технический университет Украины «КПИ»; ул. Политехническая, 16, корпус №12. Киев, Украина, 03056; тел.: 066-310-36-20; e-mail: [ostap.oliinyk@gmail.com](mailto:ostap.oliinyk@gmail.com).

**Zhovnir Nikolai** – candidate of technical sciences, associate professor, Department of Electronic Devices and Equipment, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"; 16 Polytechnique str, Kyiv, Ukraine, 03056.

**Oliinyk Ostap** – PhD student, Department of Electronic Devices and Equipment, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "KPI"; 16 Polytechnique str, Kyiv, Ukraine, 03056; tel.: 066-310-36-20; e-mail: [ostap.oliinyk@gmail.com](mailto:ostap.oliinyk@gmail.com).

УДК 004.93'11

**О. В. ПРОХОРЧУК, І. О. КУЧЕРЯВЕНКО**

### ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДУ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ НАВІГАЦІЙНИХ КАРТ ГЕОФІЗИЧНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Розглядається порівняння існуючих методів інтерполяції для побудови еталонних навігаційних карт геофізичних полів Землі з метою знаходження оптимального. Для порівняння методів використовуються їх математичні моделі, моделювання відбувається за допомогою середовища MathLab, на основі якого формуються висновки оптимальності методу, спираючись на критерії оптимальності. Також розглядається модифікація отриманого оптимального методу з метою покращення його кількісних характеристик. Результати можуть бути використані для побудови кореляційно – екстремальних навігаційних систем, які працюють за геофізичними полями Землі.

**Ключові слова:** навігаційні системи, геофізичне поле Землі, побудова еталонних карт, методи інтерполяції.

© О. В. Прохорчук, І. О. Кучерявенко. 2015