

УДК 531.71; 681.2.083

М. Ф. ЖОВНІР

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА КУТОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ З КІЛЬЦЕВИМ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ ХВИЛЕВОДОМ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

Наведена математична модель, що розроблена на основі дельта-функцій, первинного перетворювача (ПП) кутових переміщень з використанням фазових набігань на поверхні кільцевого п'єзоелектричного хвилеводу електричного поля поверхневих акустичних хвиль (ПАХ), які приймаються рухомим приймачем. Модель дозволила отримати залежності характеристик ПП від положення кожного електрода зустрічно-штирового перетворювача приймача ПАХ відносно акустичного потоку. Теоретичні співвідношення, результати чисельних розрахунків дозволяють обґрунтувати конструктивні та електричні параметри ПП в залежності від заданих метрологічних характеристик перетворювача кутових переміщень.

Ключові слова: поверхнева акустична хвиля, вимірювальний перетворювач, п'єзоелектричний хвилевід, зустрічно-штировий перетворювач.

Приведена математическая модель, которая разработана на основе дельта-функций, первичного преобразователя (ПП) угловых перемещений с использованием фазовых набегов на поверхности кольцевого пьезоэлектрического волновода электрического поля поверхностных акустических волн (ПАВ), которые принимаются подвижным приемником. Модель позволила получить зависимости характеристик ПП от положения каждого электрода встречно-штирового преобразователя приемника ПАВ относительно акустического потока. Теоретические соотношения, результаты численных расчетов позволяют обосновывать конструктивные и электрические параметры ПП в зависимости от заданных метрологических характеристик преобразователя угловых перемещений.

Ключевые слова: поверхностная акустическая волна, измерительный преобразователь, пьезоэлектрический волновод, встречно-штировой преобразователь.

The article describes the development of a mathematical model for primary transducer (PT) of angular displacements on the basis of phasing constant on the surface of the ring piezoelectric waveguide. Electric field of surface acoustic waves (SAW) is detected by movable receiver.

It is the first time developed a mathematical model of the primary transducer for angular displacements with a movable SAW receiver calculated using Delta functions to obtain the dependences of the output characteristics of PT from the position of each electrode of the interdigital transducer of the SAW receiver relatively to the acoustic stream, which propagates on the surface for the angular piezoelectric waveguide.

The practical values of research are theoretical model; numerical results allow substantiating the requirements for structural and electrical parameters depending on the specified metrological characteristics of a measuring transducer of angular displacements.

Keywords: surface acoustic wave, measuring transducer, the piezoelectric waveguide, interdigital transducer.

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 [1–14].

В останні роки пристрої на ПАХ впроваджуються також у радіовимірювальні системи, які містять пристрої опитування і обробки інформації та дистанційно віддалені пасивні 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 [15–19].

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

– 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) [1–4, 15, 16];

– фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини лінії затримки (резонатора) внаслідок деформації звукопроводу балочного або мембранного типу [1, 2, 5–8, 17, 18];

– коефіцієнта відбиття ПАХ від зустрічно-штирових перетворювачів (ЗШП), що сполучені із зовнішніми елементами, на які діють температура, вологість, електромагнітне випромінювання [16];

– фазової швидкості ПАХ при переміщенні механічного зонда (мембрани) в електричному полі хвилі, що поширюється на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу [9–11, 19];

– акустичної довжини лінії затримки при переміщенні ПАХ – приймача в електричному полі ПАХ, що поширюється на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу [1, 2, 12–14].

Якщо дія механічних та фізичних величин призводить до набігання фази ПАХ не більшому π , 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 методу вимірювання дозволяє отримувати високу роздільну здатність і точність, але динамічний діапазон обмежується набіганням фази не більше π [1–11].

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 набіган-

© М. Ф. Жовнір. 2016

ня електричного поля кількох ПАХ, що поширюються на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу (хвилеводу) на різних частотах, на яких вимірюються інформаційні параметри, що визначають координату ПАХ – приймача [2, 12–14].

На рис. 1 представлена функціональна схема ВП лінійних (кутових) переміщень на ПАХ при збудженні хвилі у вигляді суперпозиції 3-х поверхневих акустичних хвиль з частотами f_i , де $i = 1, 2, 3$, причому $f_2 < f_1 < f_3$ [2, 12–14].

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 4 та 5, сформованих на п'єзоелектричному звукопроводі (хвилеводі), над яким на відстані X , не більшій довжини поверхневих акустичних хвиль, переміщується ПАХ – приймач, виконаний у вигляді ЗШП 6, сформованого на діелектричній пластині 7.

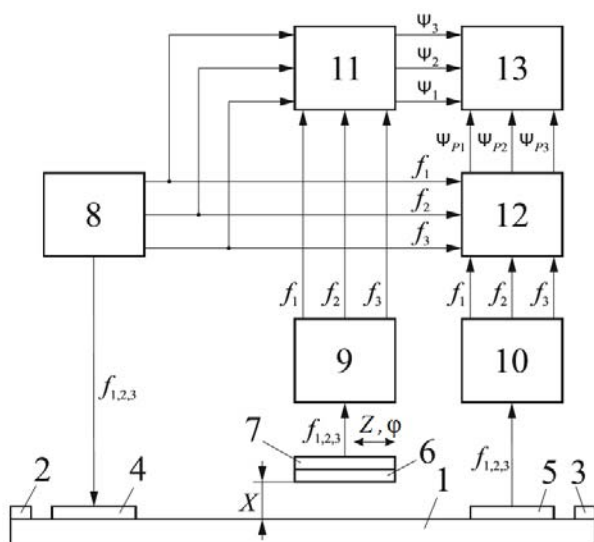


Рис. 1 – Схема функціональна ВП переміщень на ПАХ

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 поверхневу акустичну хвилю, яка приймається ЗШП 6 ПАХ – приймача 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 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 також опорні сигнали з генераторного блоку. Результати вимірювання фаз Ψ_i сигналів з ПАХ – приймача на частотах f_i поступають в блок обробки та формування трьох вимірювальних шкал перетворювача 13.

Наприклад, для формування точної шкали використовуються результати вимірювання Ψ_1 на частоті f_1 . Визначаючи $\Psi_{12} = \Psi_1 - \Psi_2$ і $\Psi_{31} = \Psi_3 - \Psi_1$, можна сформувати проміжні шкали, а визначення

$\Psi_{123} = \Psi_{12} - \Psi_{31}$ дозволить сформувати грубу шкалу вимірювального перетворювача.

В блок 13 одночасно поступають результати вимірювання фаз сигналів Ψ_{p_j} ($j=1,2,3$) з блоку 12 для коригування фаз Ψ_i при дії дестабілізуючих факторів на звукопровід (хвилевід). Для цього визначається величина додаткового набігання фази $\Delta\Psi_i$ кожної частоти f_i для координати Z (φ – для кутових переміщень), в якій знаходиться ПАХ – приймач за формулою:

$$\Delta\Psi_i = \Delta\Psi_{p_j} Z / L = \Delta\Psi_{p_j} \varphi / L,$$

де L – відстань між вхідним 4 та контрольним 5 ЗШП; Z, φ – координата знаходження ПАХ – приймача, що визначається попередньо в результаті вимірювання фаз Ψ_i .

Показано [12–14], що при використанні промислових цифрових фазометрів типу Ф5126 (роздільна здатність 0,1 ел.град. та похибка $\pm 0,3$ ел.град.) потенційна роздільна здатність та похибка вимірювання лінійних переміщень на точній шкалі 3-х частотного ВП на ПАХ відповідно складає 0,015 мкм та $\pm 0,045$ мкм в діапазоні 0...100 мм, а при вимірюванні кутових переміщень – відповідно 0,2 кут.сек. та $\pm 0,6$ кут. сек. в діапазоні 0...360 кут. град.

Мета та задачі дослідження. Метою досліджень є розробка вимог до конструктивних та електричних параметрів первинного перетворювача кутових переміщень на ПАХ в залежності від заданих метрологічних характеристик вимірювального перетворювача.

Для досягнення поставленої мети необхідно з використанням Δ – функцій розробити математичну модель, що визначала би функціональні залежності вихідних характеристик ПП від положення кожного електродного зустрічно-штирового перетворювача рухомого ПАХ – приймача відносно акустичного потоку, що поширюється по кільцевому п'єзоелектричному хвилеводу.

Математична модель ПП кутових переміщень на ПАХ. Топологічна схема 3-х частотного первинного перетворювача кутових переміщень на ПАХ зображена на рис. 2 (позиції 1 – 7 на рис.1 та рис. 2 співпадають).

ПП кутових переміщень містить кільцевий хвилевід 1 з рупорними концентраторами поверхневих акустичних хвиль та поглиначами 2 и 3, необхідних для усунення відбиття ПАХ, вхідний 4 та контрольний 5 ЗШП, сформованими на п'єзоелектричному хвилеводі. Над кільцевим хвилеводом на відстані не більшій довжині хвилі обертається ПАХ – приймач у вигляді кільцевого секційного ЗШП 6 на діелектричному диску 7 з просторовими періодами електродів W_i , секції якого розподілені по колу радіусу R .

Розподілена конструкція ПАХ – приймача дозволяє приймати сигнали на частотах f_i з компенсацією похибок, що виникають в результаті торцевого та радіального биття приймача. В ВП на ПАХ кутових переміщень в якості п'єзоелектричного звукопроводу

доцільно використовувати плівковий хвилевід на базі п'єзоелектричних плівок оксид цинку ZnO або нітрид алюмінію AlN, топографічний хвилевід на основі п'єзоелектричної кераміки ЦТС, щілинний хвилевід на основі тих же матеріалів [20, 21]. В роботі [22] представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень плівкових п'єзоелектричних хвилеводів з використанням структури оксид цинку – плавлений кварц, які можуть бути використані при розробці ВП кутових переміщень.

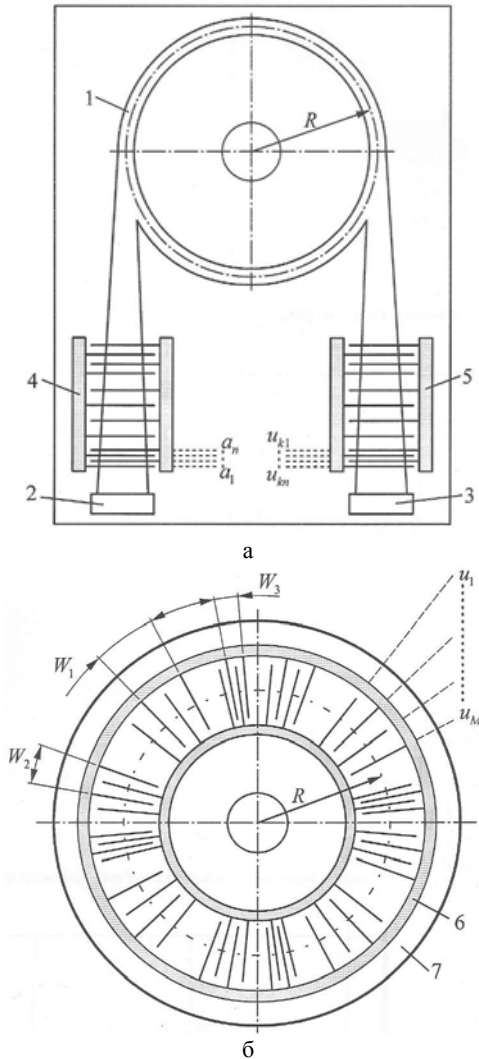


Рис. 2 – Топологічна схема ПП кутових переміщень на ПАХ: а – модуль на базі п'єзоелектричного хвилеводу ПАХ; б – кільцевий ПАХ – приймач

Для збудження та приймання ПАХ використано зустрічно – штирові перетворювачі, які запропоновані доволі давно і широко застосовуються в пристроях на ПАХ, але повний математичний опис їх роботи не знайдено із-за складності другорядних явищ, що виникають в процесі збудження, поширення та приймання ПАХ. У відомих моделях еквівалентних схем, моделях Δ – джерел, спектрального зважування, просторових гармонік розглядають ЗШП, що сформований на поверхні звукопроводу [23]. Безпосереднє використання цих моделей для опису роботи первинного перетворювача з рухомим ПАХ – приймачем неможливо, тому що при розробці математичної моделі

ПП переміщень необхідно задавати параметри, які характеризують конструктивні особливості приймача та його положення відносно поверхні п'єзоелектричного хвилеводу.

Найбільш доцільним представляється побудова математичної моделі ПП кутових переміщень на ПАХ на базі моделі Δ – джерел із урахуванням наявності рухомого ПАХ – приймача, тому що вона дозволяє знайти функціональні залежності вихідних характеристик перетворювача від положення кожного Δ – джерела приймача відносно акустичного потоку, що поширюється по п'єзоелектричному хвилеводу.

У моделі Δ – джерел електроди ЗШП вважаються дискретними джерелами акустичної або електромагнітної енергії, які описуються Δ – функціями, заданими на краях кожного електрода [23]. Для спрощення розрахунків два джерела однакової полярності, що належать одному електроду або зазору, об'єднують в одне, розташоване в центрі електроду або зазору. Залежно від значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку в реальних п'єзоелектриках переважає тангенціальна або нормальна складові електричного поля. Тому можна вважати, що поверхнева акустична хвиля в п'єзоелектриках зі слабким зв'язком (кварц) збуджується гармонічними джерелами, розташованими в центрах зазорів ЗШП, а в п'єзоелектриках з сильним зв'язком (ніобат літію, германат вісмуту, оксид цинку, нітрид алюмінію, п'єзокераміка системи ЦТС) – джерелами, розташованими в центрах електродів зустрічно – штирового перетворювача. Знак сумарного Δ – джерела визначається знаком електричного поля в зазорі або під електродом, а фаза – координатою центра зазору або електроду.

При розробці моделі використано наступну систему параметрів:

- центральні частоти генераторів f_i , частотне розстроювання другого та третього генераторів відносно частоти першого генератора відповідно позначаються δ_2 та δ_3 ;
- короткочасна нестабільність частоти генераторів δ ;
- періоди зустрічно – штирових перетворювачів відповідно дорівнюють довжинам поверхневих акустичних хвиль, тобто $W_i = \lambda_i$;
- кількість електродів вхідного і контрольного ЗШП N та ЗШП секції ПАХ – приймача M для кожної частоти f_i ;
- коефіцієнт згасання ПАХ на поверхні хвилеводу α_0 ;
- коефіцієнт дисперсії фазової швидкості поверхневої акустичної хвилі під ПАХ – приймачем α ;
- торцеве биття приймача відносно поверхні ПАХ – хвилеводу β ;
- ексцентриситет вісі приймача відносно вісі кільцевого ПАХ – хвилеводу σ ;
- відносний зазор між приймачем та поверхнею хвилеводу X_i / λ_i .

До зустрічно – штирових перетворювачів 4 і 5 та ЗШП приймача ПАХ 6 висуваються наступні вимоги:

- ефективне збудження та приймання ПАХ на заданих трьох частотах f_i ;

– компенсація похибок вимірювання із-за неоднорідності хвилеводу і конструкторсько-технологічних неточностей виготовлення, що вимагає застосування ЗШП приймача із значною кількістю електродів.

Вхідний сигнал у вигляді суперпозиції трьох електричних сигналів $u_i^{\text{вх}} = U_i^{\text{вх}} \exp(j(2\pi f_i t + \Psi_i^0))$ поступає на вхідний ЗШП і збуджує за рахунок зворотного п'єзоefекту біжучі ПАХ, що поширюються в кільцевому п'єзоелектричному хвилеводі, який є кільцевим резонатором біжучих хвиль, в якому відбувається синфазне сумування хвиль при виконанні умови:

$$2\pi R = N_i^0 \lambda_i, \quad (1)$$

де R – середній радіус хвилеводу; λ_i – резонансні довжини ПАХ на частотах f_i ; N_i^0 – кількість довжин ПАХ λ_i , що розміщуються в кільцевому хвилеводі при резонансі, який досягається зміною частот генераторів.

Поверхневі акустичні хвилі можна представити як суму акустичних хвиль a_k , що генеруються кожним дискретним Δ – джерелом вхідного ЗШП синфазно для відповідної частоти.

Нехтуючи ефектом кінцевої ширини електродів, у разі рівності ширини електроду і зазору, за якої ефективність ЗШП максимальна, і кількості електродів $N \gg 1$, поверхневу акустичну хвилю, що збуджується вхідним ЗШП, у точці з координатою Z_i у перерізі кільцевого хвилеводу на основі моделі дискретних Δ – джерел для кожної частоти f_i можна подати у вигляді:

$$a_i = \sum_{k=1}^N a_k = A_i \sum_{k=1}^N \exp(j\Psi_i^k), \quad (2)$$

де $A_i = A_{mi} \exp(j(2\pi f_i t + \Psi_i^0 + \Psi_i^\alpha))$; $A_{mi} = \gamma \gamma_i U_i^{\text{вх}}$ – амплітуда ПАХ на частоті f_i ; γ – коефіцієнт електромеханічного перетворення електричного сигналу в ПАХ; γ_i – коефіцієнт, який враховує втрати на дифракцію і поширення хвилі до точки хвилеводу з координатою Z_i , де знаходиться перше Δ – джерело секції ПАХ – приймача з періодом електродів $W_i = \lambda_i$ (у першому наближенні γ_i можна апроксимувати функцією $\gamma_i = \exp(-\alpha_0 Z_i)$, де α_0 – стала згасання ПАХ на поверхні хвилеводу); $\Psi_i^\alpha = -2\pi(1-\delta)(Z_i + \alpha l_i)/\lambda_i$; $\delta \approx 10^{-8} \dots 10^{-7}$ – частотне розстроювання, що виникає в результаті нестабільності частот генераторів; $\lambda_i = V/f_i$; V та λ_i – фазова швидкість і довжина ПАХ на частотах f_i ; α – коефіцієнт дисперсії фазової швидкості хвиль під приймачем, залежний від конструктивних параметрів і величини зазору X_i між поверхнею хвилеводу та приймачем, при $X_i/\lambda_i \geq 0,10$ можна прийняти $\alpha \approx 0$

[10, 11]; l_i – відстань від краю підкладки приймача до першого Δ – джерела відповідної секції ПАХ – приймача; N – кількість електродів у кожній секції вхідного ЗШП; Ψ_i^k – додатковий фазовий зсув, що вноситься розташованим на відстані $Z_i^k = 0,5(k-1)W_i$ Δ – джерелом з номером k від початку відповідної секції вхідного ЗШП, визначається співвідношенням:

$$\Psi_i^k = \frac{2\pi}{\lambda_i} (1-\delta) Z_i^k - (k-1)\pi = -(k-1)\pi\delta. \quad (3)$$

Підсумовуючи у рівнянні (2) з урахуванням (1) та (3), отримаємо комплексний коефіцієнт передачі вхідного ЗШП з відрізком хвилеводу, що закінчується в області кільцевого резонатора, при малих частотних розстроюваннях ($\delta \ll 1$):

$$\bar{K}_i^{\text{вх}} = \bar{F}_i^{\text{вх}} K_i^{\text{вх}} \exp(j\Psi_i^{\text{вх}}), \quad (4)$$

де $K_i^{\text{вх}}$ та $\Psi_i^{\text{вх}}$ – відповідно модуль і аргумент коефіцієнта передачі вхідного ЗШП на частотах f_i ідеального вимірювального перетворювача ($\delta = 0$, $\alpha = 0$, $W_i = \lambda_i$), що визначаються співвідношеннями:

$$K_i^{\text{вх}} = \gamma N; \quad (5)$$

$$\Psi_i^{\text{вх}} = -\frac{2\pi}{\lambda_i} Z_i; \quad (6)$$

$\bar{F}_i^{\text{вх}}$ – комплексний коефіцієнт похибки, який можна представити у вигляді:

$$\bar{F}_i^{\text{вх}} = F_i^{\text{вх}} \exp(j\phi_i^{\text{вх}}), \quad (7)$$

де $F_i^{\text{вх}}$ і $\phi_i^{\text{вх}}$ – модуль і аргумент коефіцієнта похибки:

$$F_i^{\text{вх}} = \gamma_i \frac{\sin(N\pi\delta/2)}{(N\pi\delta/2)}; \quad (8)$$

$$\phi_i^{\text{вх}} = \left[-(N-1)\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{\lambda_i}(Z_i + \alpha l_i) \right] \delta. \quad (9)$$

При $\delta_{2,3} \gg \delta_H$, де δ_H – відносний частотний діапазон для налаштування на розрахункові частоти f_i , можна нехтувати вкладом у вихідний сигнал ПАХ – приймача сигналів за рахунок бічних пелюсток амплітудно – частотних характеристик (АЧХ) сусідніх частот. Тоді, із урахуванням експоненціального убивання потенціалу електричного поля хвилі від відстані X_i до поверхні п'єзоелектричного хвилеводу $\phi = \phi_0 \exp(-2\pi X_i/\lambda_i)$ [23], де ϕ_0 – потенціал електричного поля на поверхні хвилеводу, дисперсії фазової швидкості ПАХ під приймачем α [10, 11], наявності торцевого биття, яке призводить до нахилу приймача

на кут β (рис. 3, а) відносно поверхні хвилеводу, що призводить до того, що робочою шкалою буде проекція кільцевого хвилеводу з ПАХ на площину приймача, і ексцентриситету σ – відхилення осі приймача відносно осі хвилеводу (рис. 3, б), який призводить до зміщення дискретних Δ – джерел приймача на кут φ_i^q , сигнал u , що індукується у приймачі, можна представити як суму електричних сигналів $u_i^{\text{вих}}$ з частотами f_i , кожний з яких є сумою сигналів u_i^q , що виникають в кожному Δ – джерелі приймача відповідної секції, проекція яких на поверхню хвилеводу при $2d/R \ll 1$, де $2d$ – ширина хвилеводу, має координату Z_i^q від початку першої секції Z_i з періодом ЗШП W_i ПАХ – приймача:

$$Z_i^q = R(\theta_i^q + \varphi_i^q), \quad (10)$$

де θ_i^q і φ_i^q – відповідно проекція кутового положення Δ – джерела приймача на поверхню кільцевого хвилеводу і кут зсуву Δ – джерела в результаті торцевого биття і ексцентриситету, що визначаються співвідношеннями:

$$\theta_i^q = \arctg \left[\text{tg}(\theta_i^{q0}) (\cos \beta) \right]; \quad (11)$$

$$\varphi_i^q = \arcsin \left(\frac{\sigma}{R} \sin \theta_i^q \right), \quad (12)$$

де θ_i^{q0} – кутове положення Δ – джерела при $\sigma = \beta = 0$:

$$\theta_i^{q0} = \frac{(2q-1)W_i}{4R} = \frac{(2q-1)\pi}{2N_i}. \quad (13)$$

Електричний сигнал, що індукується у приймачі, можна представити у вигляді:

$$u_i^{\text{вих}} = \gamma_b a_i \sum_{q=1}^M \exp(E_i^q + jT_i^q), \quad (14)$$

де γ_b – коефіцієнт електромеханічного перетворення ПАХ a_i (2) в електричний сигнал;

$$E_i^q = -\alpha_0 Z_i^q - \alpha_\Delta \frac{2\pi}{\lambda_i} (1+\alpha)(1-\delta)(X_i + X_i^q); \quad (15)$$

$$T_i^q = -\frac{2\pi}{\lambda_i} (1+\alpha)(1-\delta) Z_i^q + \frac{\pi}{2} (2q-1); \quad (16)$$

M – кількість електродів (джерел) секції ЗШП ПАХ – приймача для кожної частоти f_i ; X_i та X_i^q – відповідно величина зазору між першим Δ – джерелом і поверхню хвилеводу та приріст зазору для q – го джерела секції приймача з періодом ЗШП W_i , який визначається як

$$X_i^q = R \sin \beta \sin \theta_i^{q0}. \quad (17)$$

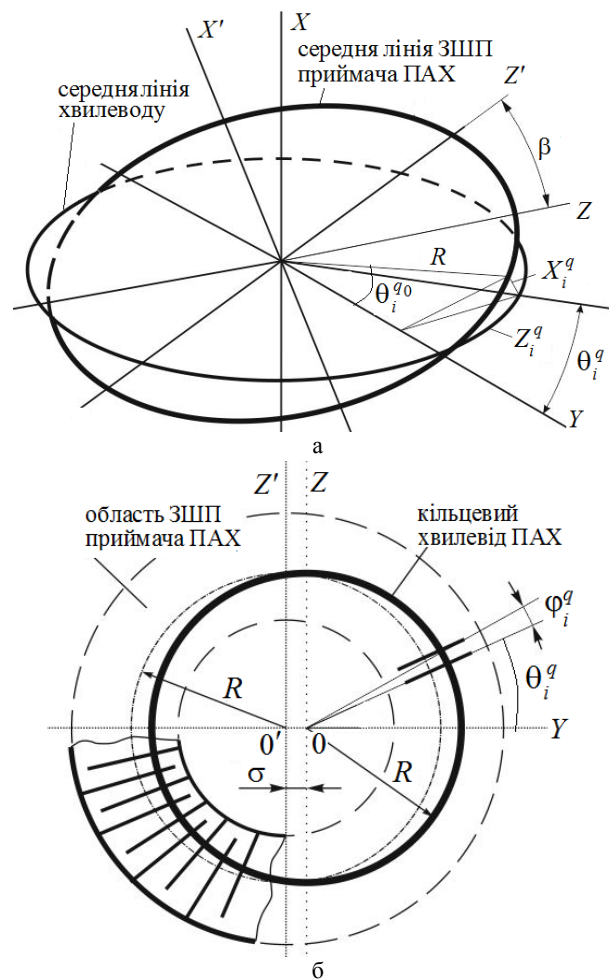


Рис. 3 – Схеми урахування впливу технологічних неточностей виготовлення ПП на похибку вимірювання кутового переміщення: а – вплив торцевого биття β ; б – вплив ексцентриситету σ

У співвідношенні (14) сумування виконується по тим дискретним Δ – джерелам приймача, які залишаються після проріджування в процесі формування секцій кільцевого ЗШП. Змінюючи номер першого Δ – джерела, з якого починається сумування, можна отримати залежність вихідного сигналу $u_i^{\text{вих}}$ від кутового положення приймача φ .

Використовуючи співвідношення (2) і (14), комплексний коефіцієнт передачі ПАХ – приймача можна представити наступним співвідношенням:

$$\bar{K}_i^{\text{вих}} = \bar{F}_i^{\text{вих}} K_i^{\text{вих}} \exp(j\Psi_i^{\text{вих}}), \quad (18)$$

де $K_i^{\text{вих}}$ та $\Psi_i^{\text{вих}}$ – модуль та аргумент коефіцієнта передачі приймача ідеального перетворювача кутових переміщень ($\alpha = \alpha_0 = \delta = \beta = \sigma = 0$, $\alpha_\Delta = 1$):

$$K_i^{\text{вих}} = \gamma_b M_\Sigma \exp \left[-\frac{2\pi X_i}{\lambda_i} \right]; \quad (19)$$

$$\Psi_i^{\text{вих}} = -\frac{2\pi R \varphi}{\lambda_i}, \quad (20)$$

де $M_{\Sigma} = PM$ – загальна кількість Δ – джерел приймача з періодом ЗШП W_i , які підлягають сумуванню; P – кількість секцій ЗШП приймача ПАХ кожної частоти; φ – кут повороту приймача; $\bar{F}_i^{\text{внх}}$ – комплексний коефіцієнт похибки ПАХ – приймача, яка виникає в результаті порушення режиму біжучих хвиль в кільцевому хвилеводі, згасання хвилі при поширенні (α_0), дисперсії фазової швидкості (α), нестабільності частот генераторів (δ), торцевого биття (β), ексцентриситету (σ) та неузгодження вихідного імпедансу ПАХ – приймача з фазометричним пристроєм (α_{Δ}), який можна представити у вигляді:

$$\bar{F}_i^{\text{внх}} = F_i^{\text{внх}} \exp(j\varphi_i^{\text{внх}}). \quad (21)$$

Забезпечуючи виконання умови $X_i / \lambda_i \geq 0,1$, при якій дисперсія фазової швидкості незначна ($\alpha \approx 0$), та приймаючи $\sigma/R \ll 1$ і $\beta \approx X_i^q / R \ll 1$, отримаємо формули для модуля $F_i^{\text{внх}}$ та аргумента $\varphi_i^{\text{внх}}$ комплексного коефіцієнта похибки ПАХ – приймача:

$$F_i^{\text{внх}} = S_{\Sigma} \exp(A^0); \quad (22)$$

$$\varphi_i^{\text{внх}} = \arctg\left(\frac{S'_{\Sigma}}{S''_{\Sigma}}\right), \quad (23)$$

$$\text{де } A^0 = \alpha_{\Delta} \frac{2\pi X_i}{\lambda_i} \delta; \quad S_{\Sigma} = \sqrt{(S'_{\Sigma})^2 + (S''_{\Sigma})^2};$$

$$S'_{\Sigma} = \sum_{q=1}^M \exp(H_i^q) \cos(G_i^q);$$

$$S''_{\Sigma} = \sum_{q=1}^M \exp(H_i^q) \sin(G_i^q);$$

$$H_i^q = -\frac{\alpha_0 \lambda_i}{4} (2q-1) + \frac{\alpha_0 N_i \lambda_i \beta^2}{8\pi} \sin(2\theta_i^q) - [\alpha_0 \sigma - \alpha_{\Delta} N_i (1-\delta) \beta] \sin \theta_i^q;$$

$$G_i^q = \frac{\pi}{2} \delta (2q-1) + \frac{N_i (1-\delta) \beta^2}{4} \sin(2\theta_i^q) - \frac{2\pi}{\lambda_i} (1-\delta) \sigma \sin \theta_i^q.$$

Комплексний коефіцієнт передачі перетворювача кутових переміщень знаходиться як добуток коефіцієнтів передачі вхідного ЗШП (4) та ПАХ – приймача (18):

$$\bar{K}_i = \bar{K}_i^{\text{вх}} \bar{K}_i^{\text{внх}} = \bar{F}_i K_i^0 \exp(j\varphi_i^0), \quad (24)$$

де K_i^0 і φ_i^0 – модуль і аргумент (функція перетворення) коефіцієнта передачі ідеального перетворювача ($\alpha = \alpha_0 = \delta = \beta = \sigma = 0$, $\alpha_{\Delta} = 1$):

$$K_i^0 = \gamma_1 \gamma_b N M_{\Sigma} \exp\left[-\frac{2\pi X_i}{\lambda_i}\right]; \quad (25)$$

$$\Phi_i^0 = -\frac{2\pi}{\lambda_i} (Z_i + R\varphi) = \Delta\Phi_i + 2\pi N_i + \Psi_i, \quad (26)$$

де $\Delta\Phi_i$ – початкові фази сигналів ПАХ-приймача на частотах f_i ; N_i – кількість довжин хвиль (кількість циклів фази) на відповідних частотах при переміщенні приймача на кут φ ; Ψ_i – дробні частки фазового набігання на частотах f_i , які фіксуються фазометричними пристроями і дозволяють однозначно визначити положення ПАХ – приймача в межах кута λ_i/R .

Із співвідношень (4), (18) та (24) при $\alpha = \alpha_0 = \beta = \sigma = 0$, $\alpha_{\Delta} = 1$ та $\delta \neq 0$ отримуємо залежність модуля коефіцієнта передачі (амплітудно-частотної характеристики) K_i^{δ} первинного перетворювача кутових переміщень від частоти:

$$K_i^{\delta} = \gamma \gamma_b N P M \frac{\sin(0,5N\pi\delta)}{\sin(0,5\pi\delta)} \cdot \frac{\sin(0,5M\pi\delta)}{\sin(0,5\pi\delta)} \times \frac{\sin(PM\pi\delta)}{\sin(M\pi\delta)} \exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda_i} (1-\delta) X_i\right]. \quad (27)$$

Комплексний коефіцієнт похибки перетворювача кутових переміщень \bar{F}_i у формулі (24) можна представити у вигляді добутку коефіцієнта похибки вхідного ЗШП $\bar{F}_i^{\text{вх}}$ (7) і ПАХ – приймача $\bar{F}_i^{\text{внх}}$ (21), тобто:

$$\bar{F}_i = \bar{F}_i^{\text{вх}} \bar{F}_i^{\text{внх}} = F_i \exp(j\varphi_i); \quad (28)$$

де F_i і φ_i – модуль і аргумент коефіцієнта похибки перетворювача:

$$F_i = F_i^{\text{вх}} F_i^{\text{внх}}; \quad (29)$$

$$\varphi_i = \varphi_i^{\text{вх}} + \varphi_i^{\text{внх}}. \quad (30)$$

Тоді функція перетворення перетворювача кутових переміщень приймає вигляд:

$$\Phi = \Phi_i^0 + \varphi_i. \quad (31)$$

На рис. 4, а представлено теоретичні нормовані амплітудно – частотні характеристики (27), а на рис. 4, б функції перетворення (26) 3-х частотного первинного перетворювача кутових переміщень при $R = 2048\lambda_i/2\pi$.

На рис. 5 – 9 представлено теоретичні залежності модуля F_1 (29) та аргумента φ_1 (30) коефіцієнта похибки перетворювача кутових переміщень від нестабільності частоти генератора δ при різних конструктивних параметрах.

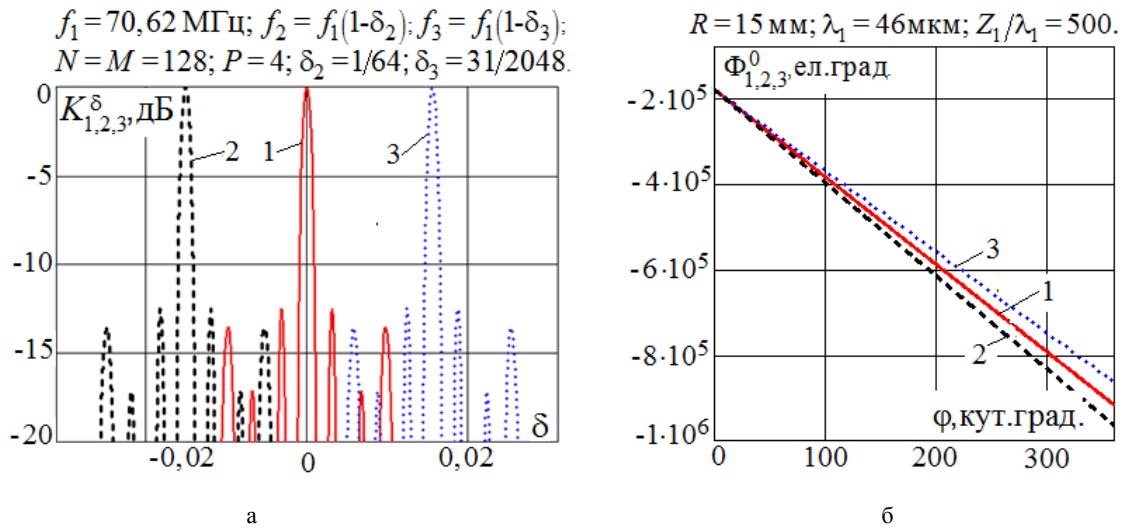


Рис. 4 – Теоретичні вихідні характеристики ПП кутових переміщень на ПАХ: а – нормована АЧХ; б – функції перетворення

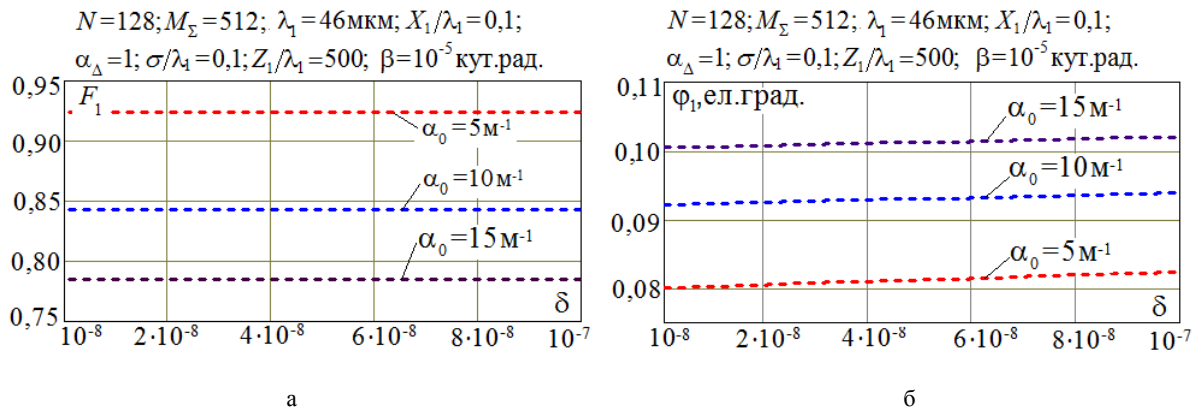


Рис. 5 – Теоретичні залежності коефіцієнта похибки ПП кутових переміщень на ПАХ від нестабільності частоти генератора δ при $X_1/\lambda_1 = 0,1$, $\sigma/\lambda_1 = 0,1$ та $\beta = 10^{-5}$: а – модуля F_1 ; б – аргумента Φ_1

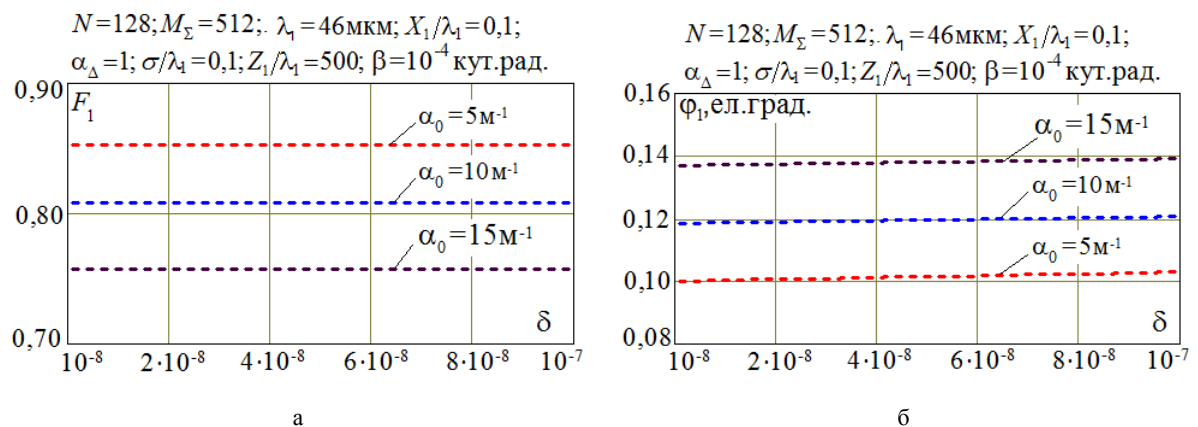


Рис. 6 – Теоретичні залежності коефіцієнта похибки ПП кутових переміщень на ПАХ від нестабільності частоти генератора δ при $X_1/\lambda_1 = 0,1$, $\sigma/\lambda_1 = 0,1$ та $\beta = 10^{-4}$: а – модуля F_1 ; б – аргумента Φ_1

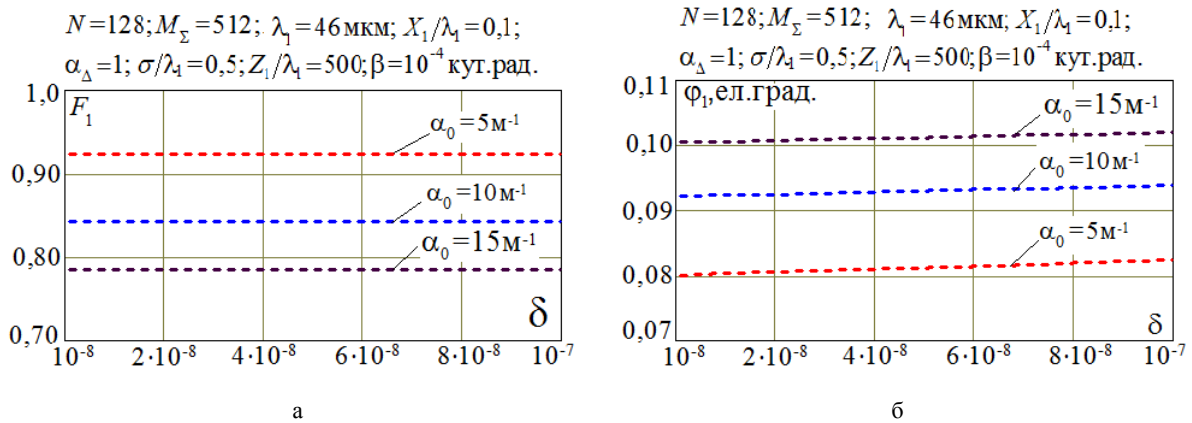


Рис. 7 – Теоретичні залежності коефіцієнта похибки ПП кутових переміщень на ПАХ від нестабільності частоти генератора δ при $X_1/\lambda_1=0,1$, $\sigma/\lambda_1=0,5$, $\beta=10^{-4}$: а – модуля F_1 ; б – аргумента φ_1

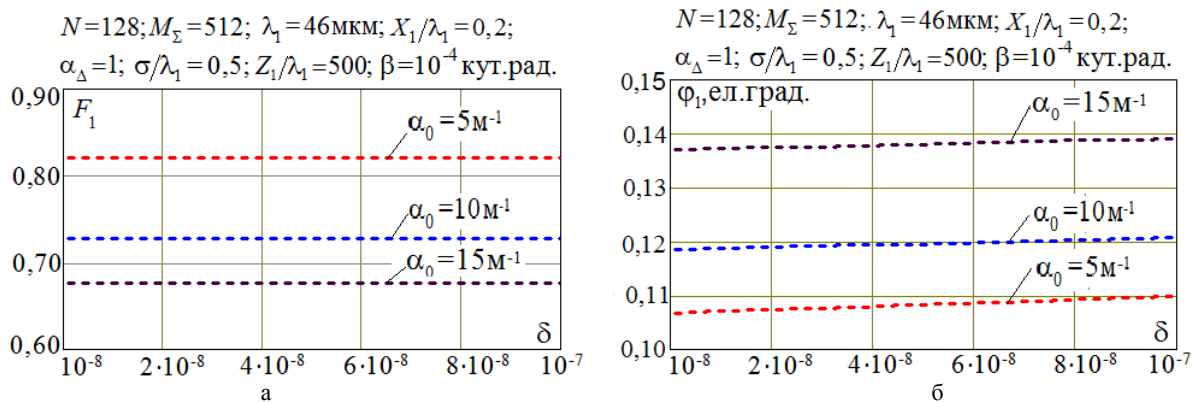


Рис. 8 – Теоретичні залежності коефіцієнта похибки ПП кутових переміщень на ПАХ від нестабільності частоти генератора δ при: $X_1/\lambda_1=0,2$, $\sigma/\lambda_1=0,5$, $\beta=10^{-4}$: а – модуля F_1 ; б – аргумента φ_1

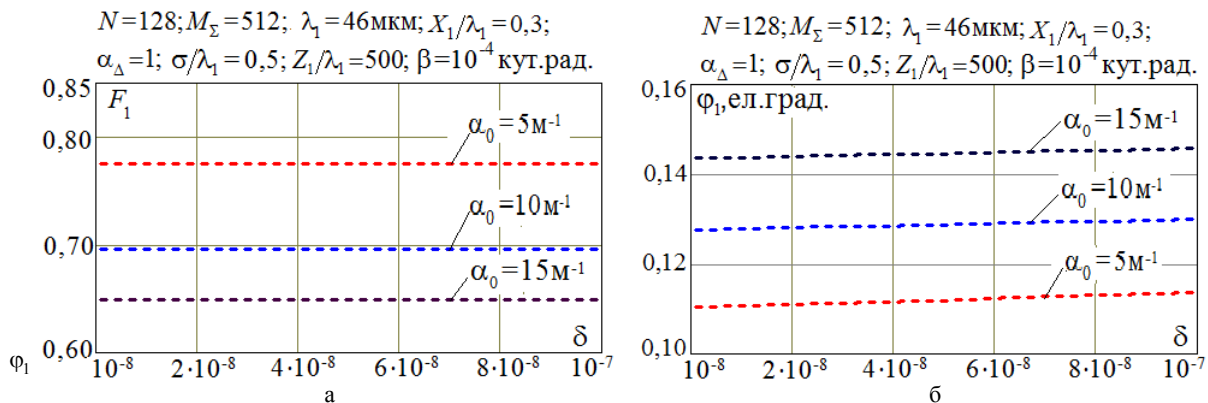


Рис. 9 – Теоретичні залежності коефіцієнта похибки ПП кутових переміщень на ПАХ від нестабільності частоти генератора δ при: $X_1/\lambda_1=0,3$, $\sigma/\lambda_1=0,5$, $\beta=10^{-4}$: а – модуля F_1 ; б – аргумента φ_1

Із результатів теоретичних розрахунків випливає, що при частотному розстроюванні в результаті нестабільності частоти генератора $\delta=10^{-8}\dots 10^{-7}$ модуль коефіцієнта похибки при заданих параметрах змінюється в інтервалі $F_1=0,65\dots 0,93$, а аргумент — $\varphi_1=0,08\dots 0,15$ ел.град.

Наприклад, при $\delta=10^{-8}\dots 10^{-7}$, $\beta=10^{-4}$, $\sigma/\lambda_1=0,5$, $X_1/\lambda_1=0,2$ теоретичне значення фазової похибки буде в інтервалі $\varphi_1=0,11\dots 0,14$ ел.град., що

сумірна роздільній здатності цифрового фазометра типу Ф5126.

Висновки. Аналіз математичної моделі, результатів чисельних розрахунків дають змогу сформулювати вимоги до конструктивних та електричних параметрів первинного перетворювача кутових переміщень на ПАХ:

- діапазон вимірювання $\varphi=0\dots 360$ кут.град.;
- довжина поверхневої акустичної хвилі $\lambda_1=30\dots 100$ мкм;

- торцеве биття приймача не більше $\beta = 10^{-4}$ радіан;
- відносний ексцентриситет приймача не більше $\sigma/\lambda_i \leq 0,5$;
- відносний зазор між поверхнею хвилеводу та ПАХ – приймачем $X_i/\lambda_i = 0,1 \dots 0,3$;
- кількість електродів секції вхідного ЗПП $N < 200$;
- кількість електродів секції ПАХ-приймача $M < 200$;
- кількість секцій приймача на кожну частоту $P = 4$;
- радіус хвилеводу $R = 10 \dots 20$ мм .
- короткочасна нестабільність частоти генератора $\delta = 10^{-8} \dots 10^{-7}$ за 1 секунду.

Таким чином, виконання цих вимог дозволяє створення перетворювачів для однозначного вимірювання кутових переміщень в діапазоні $\varphi = 0 \dots 360$ кут.град. при потенційних значеннях роздільної здатності і абсолютної похибки на точній шкалі, які сумірні с метрологічними параметрами індуктосинів, фотоелектричних перетворювачів та пристроїв на основі інтерферометрів, але мають значно менші масогабаритні показники, вартість та складність конструкції.

Список літератури:

1. Поляков, П. Ф. Акустоэлектроника. Физико-технологические основы и применение [Текст]: спр. пос. / П. Ф. Поляков, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков. – Харьков: СМІТ, 2007. – 552 с.
2. 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. – № 1(60). – С. 153-157.
3. Fachberger, R. Monitoring of the temperature inside a lining of a metallurgical vessel using a SAW temperature sensor [Text] / 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 [Text] / 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 [Текст] / A. Zbrutsky, N. Chernyak, G. Skripkovsky // Symposium Gyro Technology. – 2005. – P. 4.1-4.11.
6. Ленух, Я. И. Датчик угла поворота генераторного типа с элементом на поверхностных акустических волнах [Текст] / Я. И. Ленух // 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 [Text] / V. Kalinin, R. Lohr, A. Leigh // 2008 IEEE Ultrasonics Symposium, 2008. – P. 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 [Текст] / M. F. Hribsek, D. V. Tomic, M. R. Radosavljevic // FME Transactions. – 2010. – № 38. – P. 11-18.
9. Черненко, Д. В. Вимірювальні перетворювачі тиску на основі збудження електричного поля поверхневих акустичних хвиль [Текст] / Д. В. Черненко, О. М. Кузьменко, М. Ф. Жовнір // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – № 1. – С. 62-66.
10. Жовнір, М. Ф. Математичні моделі сенсорів переміщень та тиску на основі збудження електричного поля поверхневих акустичних хвиль [Текст] / М. Ф. Жовнір, О. О. Олійник, Л. Д. Писаренко // Журнал нано та електронної фізики. – 2016. – № 8 (1). – С. 01024-01025. doi: [10.21272/jnep.8\(1\).01024](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01024)
11. Жовнір, М. Ф. Вимірювальні перетворювачі мікропереміщень

- та тиску на поверхневих акустичних хвилях [Текст] / М. Ф. Жовнір, М. В. Бітов, Л. Д. Писаренко // Електроніка та зв'язок. – 2016. – Т. 21, № 4 (93). – С. 49-57.
12. 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 та зв'язок. – 2015. – Т. 20, № 3 (86). – С. 101-106.
13. Жовнір, М. Ф. Розробка пристроїв на ПАХ для вимірювання лінійних та кутових переміщень [Текст] / М. Ф. Жовнір, О. О. Олійник // Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – № 52 (1161). – С. 60-65.
14. Жовнір, М. Ф. Математична модель первинного перетворювача лінійних переміщень з рухомим приймачем поверхневих акустичних хвиль [Текст] / М. Ф. Жовнір // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». – 2016. – № 7 (1179). – С. 48-57.
15. Reindl, L. Wireless Passive Sensors: Basic Principles and Performances [Text] / L. Reindl // IEEE SENSORS. – 2008. – P. 1607-1610. doi: [10.1109/icsens.2008.4716758](https://doi.org/10.1109/icsens.2008.4716758)
16. Zhovnir, M. F. Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement [Text] / M. F. Zhovnir, O. M. Kuzmenko, S. I. Pokutnyi // Journal of Applied Chemistry. – 2015. – № 3 (1). – P. 7-13.
17. Mackensen, E. Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors [Text] / 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)
18. Matsuzaki, R. Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires [Text] / R. Matsuzaki, A. Todoroki // MDPI – Sensors. – 2008. – № 8. – P. 8123-8138. doi: [10.3390/s8128123](https://doi.org/10.3390/s8128123)
19. Chernenko, D. Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures [Text] / D. Chernenko, M. Zhovnir, O. Oliinyk, B. Tsyganok // 35th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2012. doi: [10.1109/isse.2012.6273174](https://doi.org/10.1109/isse.2012.6273174)
20. Олинер, А. Поверхностные акустические волны [Текст] / А. Олинера. – Москва: Мир. – 1981. – 390 с.
21. Бирюков, С. В. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах [Текст] / С. В. Бирюков, Ю. В. Гуляев, В. В. Крылов, В. П. Плесский. – Москва: Наука. – 1991. – 416 с.
22. Жовнір, М. Ф. П'єзоелектричні плівкові хвилеводи поверхневих акустичних хвилях [Текст] / М. Ф. Жовнір // Журнал нано- та електронної фізики. – 2016. – Т. 8, № 4 (1), – С. 04007-1-04007-7. doi: [10.21272/jnep.8\(4\(1\)\).04007](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(1)).04007)
23. Морган, Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах [Текст] / Д. Морган. – Москва: Радио и связь, 1990. – 416 с.

Bibliography (transliterated):

1. Polyakov, P., Horunzhyj, V., Polyakov, V. (2007). Akustoelektronika. Fiziko-technologicheskie osnovy i primenenie. Kharkiv: SMYT, 552.
2. Zhovnir, M. F., Chernyak, M. G., Chernenko, D. V., Sheremet, L. M. (2011). Vymiryuvalni peretvoryuvachi fizychnyh velychyn na poverknevnyh akustychnyh hvylyah. Electronics and Communications, 1 (60), 153-157.
3. Fachberger, R., Erlacher, A. (2009). Monitoring of the temperature inside a lining of a metallurgical vessel using a SAW temperature sensor. Procedia Chemistry, 1 (1), 1239-1242. 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. (2012). ZnO Nanostructures as Sensing Element of Acoustic Wave Sensor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 6(12(60)), 16-22. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/6021/5417>
5. Zbrutsky, A., Chernyak, M., Skripkovsky, G. (2005). Creation of low cost linear accelerometers for navigation and control systems. Symposium Gyro Technology, 4.1-4.11.
6. Lepykh, Ya. I. (2009). The turn angle gauge of generating type with an element on surface acoustic waves. Technology and design in electronic equipment, 3, 24-25.
7. Kalinin, V., Lohr, R., Leigh, A. (2008). Development of a calibration procedure for contactless torque and temperature sensors based on SAW resonators. 2008 IEEE Ultrasonics Symposium. 1865-1868. doi: [10.1109/ultsym.2008.0459](https://doi.org/10.1109/ultsym.2008.0459)

8. Hribsek, M. F., Tomic, D. V., Radosavljevic, M. R. (2010). Surface Acoustic Wave Sensors in Mechanical Engineering. FME Transactions, 38, 11–18.
9. Chernenko, D. V., Kuzmenko, O. M., Zhovnir, M. F. (2013). Vymiryvalni peretvoryuvachi tysku na osnovi zburennya elektrychnogo polya poverknevnykh akustychnykh hvyl. Visnyk Kremenchuk'skogo Nacionalnogo Universytetu Imeni Mykhajla Ostrogradskogo, 1, 62–66.
10. Zhovnir, M. F., Oliinyk, O. O., Pysarenko, L. D. (2016). 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), 010241–010245. doi:[10.21272/jnep.8\(1\).010241](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).010241)
11. Zhovnir, M. F., Bitov, M. V., Pysarenko, L. D. (2016). Vymiryvalni peretvoryuvachi mikropremishchen' ta tysku na poverkhnovykh akustychnykh khvylyakh. Elektronika ta zv'yazok, 21, 4 (93), 49–57.
12. Zhovnir, M. V., Shostak, O. V. (2015). Ocinka potencijnykh rozdilnoy zdatnosti i tochnosti vymiryvalnykh peretvoryuvachiv liniynykh ta kutovykh peremishchen' z vykorystannya fazovykh nabigan poverknevnykh akustychnykh hvyl. Electronics and Communications, 20, 3 (86), 101–106.
13. Zhovnir, M. V., Oliinyk, O. O. (2015). Rozrobka prystroyiv na PAKh dlya vymiryvannya liniynykh ta kutovykh peremishchen'. Visnyk NTU «KhPI» Seriya: Mekhaniko-tehnologichni systemy ta komplekxy, 52 (1161), 60–65.
14. Zhovnir, M. (2016). Matematychna model' pervynnoho peretvoryuvacha liniynykh peremishchen' z rukhomym pryumachem poverkhnovykh akustychnykh khvyly. Visnyk NTU «KhPI». Seriya «Mekhaniko-tehnologichni systemy ta komplekxy», 7 (1179), 48–57.
15. Reindl, L. M. (2008). Wireless Passive Sensors: Basic principles and performances. IEEE Sensors. 1607–1610. doi:[10.1109/icsens.2008.4716758](https://doi.org/10.1109/icsens.2008.4716758)
16. Zhovnir, M. F., Kuzmenko, O. M., Pokutnyi, S. I. (2015). Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement. Journal of Applied Chemistry, 3 (1), 7–13.
17. Mackensen, E., Reindl, L. (2004). Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors. Smart Sensors and MEMS, 181, 155–202. doi:[10.1007/978-1-4020-2929-5_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2929-5_5)
18. Matsuzaki, R., Todoroki, A. (2008). Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires. MDPI – Sensors, 8 (12), 8123–8138. doi:[10.3390/s8128123](https://doi.org/10.3390/s8128123)
19. 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. doi:[10.1109/isse.2012.6273174](https://doi.org/10.1109/isse.2012.6273174)
20. Oliner, A. (1981). Poverkhnostnyye akusticheskiye volny. Moscow: Mir, 390.
21. Byryukov, S., Hulyaev, Yu., Krylov, V., Plessky, V. (1991). Poverkhnostnyye akusticheskiye volny v neodnorodnykh sredakh. Moscow: Nauka, 416.
22. Zhovnir, M. F. (2016). Piezoelectric Film Waveguides for Surface Acoustic Waves. Journal of Nano- and Electronic Physics, 8(4(1)), 04007–1–04007–7. doi:[10.21272/jnep.8\(4\(1\)\).04007](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(1)).04007)
23. Morhan, D. (1990). Ustroystva obrabotky sygnalov na poverkhnostnykh akustycheskykh volnakh. Moscow: Radyo y svyaz, 416.

Надійшла (received) 15.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Математична модель первинного перетворювача кутових переміщень з кільцевим п'єзоелектричним хвилеводом поверхневих акустичних хвиль/ М. Ф. Жовнір// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.42–51. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-5459.

Математическая модель первичного преобразователя кутовых перемещений с кольцевым пьезоэлектрическим волноводом поверхностных акустических волн/ Н. Ф. Жовнір// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.42–51. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-5459.

A mathematical model of the primary transducer of angular displacements with piezoelectric waveguide surface acoustic waves/ M. Zhovnir//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.42–51. – Bibliogr.: 23. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жовнір Микола Федорович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; доцент, кафедри Електронних приладів та пристроїв, вул. Політехнічна, 16, корпус №12. Київ, Україна, 03056; e-mail: zhovnir101@gmail.com.

Жовнір Николай Федорович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; доцент кафедры Электронных приборов и устройств, ул. Политехническая, 16, корпус №12. Киев, Украина, 03056; e-mail: zhovnir101@gmail.com.

Zhovnir Mykola – candidate of technical sciences, senior research assistant, associate professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»; Department of Electronic Devices and Equipment, Polytechnique str, 16, Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: zhovnir101@gmail.com.