

УДК 531.71; 531.78

Сенсор мікропереміщень та тиску на поверхневих акустичних хвилях

Герасименко Д.О., к.т.н., доц. Жовнір М.Ф., д.т.н., проф. Писаренко Л.Д.

Приведено результати теоретичних та експериментальних досліджень дисперсії фазової швидкості поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) при збуренні мембраною електричного поля ПАХ, що поширюється на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу. Запропонована конструкція сенсора мікропереміщень та тиску на базі ПАХ-генератора, математична модель, що зв'язує конструктивні, електричні параметри з метрологічними характеристиками. Результати експериментальних досліджень підтверджують теоретичні розрахунки.

Ключові слова: поверхневі акустичні хвилі (ПАХ); дисперсія фазової швидкості; сенсор мікропереміщень та тиску; функція перетворення, коефіцієнт перетворення; генераторний (частотний) метод вимірювання.

Вступ

Сенсори фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) активно розробляються та впроваджуються в інформаційно-вимірювальні системи. Переваги таких сенсорів обумовлені простотою збудження, приймання, високою

чутливістю перетворення інформаційних сигналів в широкому динамічному діапазоні при застосуванні частотних та фазових методів вимірювання. Такі сенсори застосовуються для вимірювання сили та тиску, вологості, температури та складу газового середовища, напруженостей електричного та магнітного полів, прискорення, лінійних, кутових переміщень та швидкості [1 – 5].

В останні роки пристрої на ПАХ активно впроваджуються також у радіовимірювальні системи, які містять пристрій опитування і обробки інформації та дистанційно віддалені пасивні сенсори 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 [6 – 9].

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Сенсори на ПАХ створюються на базі зміни [1–2]:

– фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини резонатора або лінії затримки (ЛЗ) внаслідок

деформації звукопроводу, при дії навколишнього середовища на поверхню звукопроводу (молекулярної ваги та концентрації газу, температури, вологості, електричного або магнітного поля;

- коефіцієнта відбиття ПАХ від зустрічно-штирових перетворювачів (ЗШП), що з'єднанні із зовнішніми чутливими елементами, на які діють температура, вологість, електричне або магнітне поле;
- акустичної довжини ЛЗ при переміщенні приймача ПАХ над поверхнею п'єзоелектричного звукопроводу;
- фазової швидкості ПАХ при переміщенні механічного зонда (мембрани) в електричному полі хвилі.

Якщо дія механічних та фізичних величин призводить до набігання фази хвилі у ПАХ-пристрої не більшому π , то в основі таких сенсорів доцільно застосовувати високостабільний ПАХ-генератор, що містить регульовані під впливом вимірювальних величин резонатор або ЛЗ на ПАХ [1 – 3].

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 на поверхні

п'єзоелектричного звукопроводу на різних частотах [4, 5].

Мета і завдання досліджень

Метою досліджень є оцінка потенційних параметрів сенсора мікропереміщень та тиску на базі використання дисперсії фазової швидкості поверхневої акустичної хвилі в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, що поширюється на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу.

Для досягнення поставленої мети розроблені конструкція сенсора мікропереміщень та тиску на базі ПАХ-генератора, математична модель, що зв'язує конструктивні і електричні параметри з метрологічними характеристиками, проведені експериментальні випробування.

Основна частина

Функціональна схема сенсора мікропереміщень та тиску (рис.1) містить ЛЗ на ПАХ на основі п'єзоелектричного звукопроводу, зустрічно-штирові перетворювачі якої сполучені з підсилювачем електричних коливань, утворюючи таким чином ПАХ-генератор. Усі елементи розміщуються у корпусі, який герметично закритий мембраною, котра виконана із пружного матеріалу (наприклад, бронза, сталь тощо) і змінює своє положення відносно поверхні п'єзоелектричного звукопроводу в межах $0 \dots \lambda$, де λ – довжина ПАХ.

Мембрана переміщується в електричному полі ПАХ, потенціал

якого змінюється при віддаленні від поверхні п'єзоелектричного звукопроводу за формулою $\varphi = \varphi_0 \exp(-2\pi\rho)$ [10], де φ_0 – потенціал електричного поля на поверхні звукопроводу; $\rho = x/\lambda_0$ – нормований зазор; x – відстань від п'єзоелектричної поверхні до мембрани; $\lambda_0 = V_0/f_0$; V_0 та λ_0 – фазова швидкість та довжина ПАХ на вільній поверхні звукопроводу; f_0 – частота ПАХ.

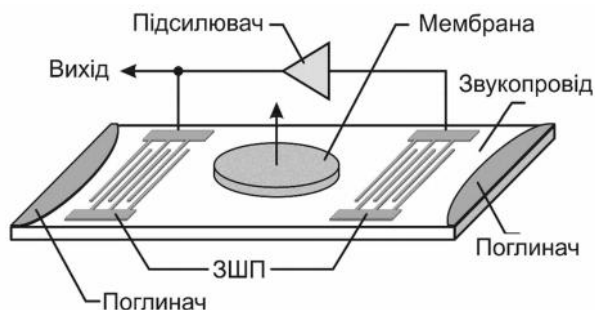


Рис. 1. Функціональна схема сенсора

При генераторному методі вимірювання частота ПАХ-генератора із врахуванням дисперсії фазової швидкості ПАХ при збуренні електричного поля хвилі мембраною визначається співвідношенням [11]:

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

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

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

де $N = W_0/\lambda_0$ – число довжин хвиль на збуреній ділянці звукопроводу; $k = -2[V(x) - V_0]/V_0$ – коефіцієнт

електромеханічного зв'язку, який практично визначає відносну зміну фазової швидкості ПАХ при наявності тонкої металевої плівки на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу; $V(x)$ – фазова швидкість ПАХ на ділянці звукопроводу під мембраною.

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

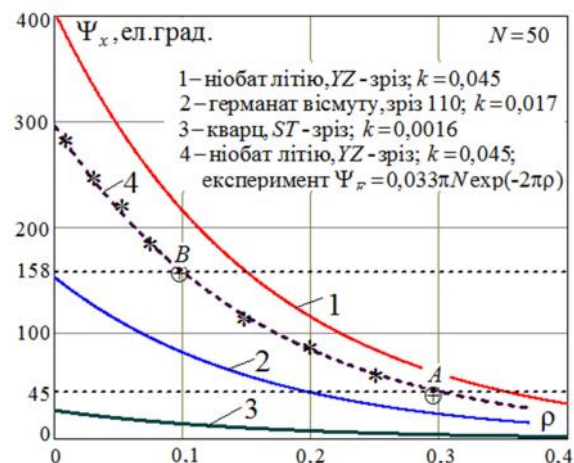


Рис. 2. Залежності фазового зсуву вихідного сигналу ЛЗ на ПАХ від нормованого зазору

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

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

Розбіжність теоретичної та експериментальної залежностей

обумовлена похибками розміщення мембрани відносно поверхні звукопроводу в процесі виконання вимірювань і становить 15...20 %.

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

$$F_x = -\frac{Nf_0k}{2n} \exp(-2\pi\rho). \quad (4)$$

На Рис. 3 представлені теоретична (графік 1) та експериментальна (графік 2 із урахуванням залежності для Ψ_E) функції перетворення сенсора.

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

Наприклад, для ніобат літію LiNbO_3 YZ - зрізу (при $N = 50$, $\lambda_0 = 77$ мкм, $f_0 = 45,2$ МГц і $n = 100$) при переміщенні мембрани в діапазоні $\rho = 0,3...0,1$ приріст частоти ПАХ-генератора змінюється в інтервалі $F_x \approx (-57...-200)$ кГц, тобто середній коефіцієнт перетворення мікропереміщень складає: $S_x \approx \Delta F_x / \Delta x \approx 9,3$ кГц/мкм.

Залежність прогинання мембрани x від тиску P визначається типом мембрани та її конструктивними параметрами. У випадку мембрани з жорстким центром прогинання

визначається співвідношенням [12]:

$$x = AR^4P/Eh^3,$$

де $A_p = 3(1-\mu^2)(c^4-1-4c^2 \ln c)/16c^4$; $c = R/r$; R та r – робочий радіус мембрани та радіус її жорсткого центру; μ і E – коефіцієнт Пуассона та модуль пружності матеріалу мембрани; h – товщина мембрани.

Із розрахунку для мембрани із сталі ($\mu = 0,28$; $E = 2,2 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $r = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $h = 10^{-3}$ м; $R = 15 \cdot 10^{-3}$ м) випливає, що її переміщення в інтервалі $\rho = 0,3...0,1$ буде здійснюватися під тиском в діапазоні $P \approx (0...4,53 \cdot 10^5)$ Н/м² $\approx (0...3398)$ мм.рт.ст.

При цьому частота ПАХ-генератора змінюється в інтервалі $F_p = F_x \approx (-57...-200)$ кГц, а середній коефіцієнт перетворення сенсора тиску складає: $S_p \approx \Delta F_p / \Delta P \approx 42,6$ Гц/мм.рт.ст.

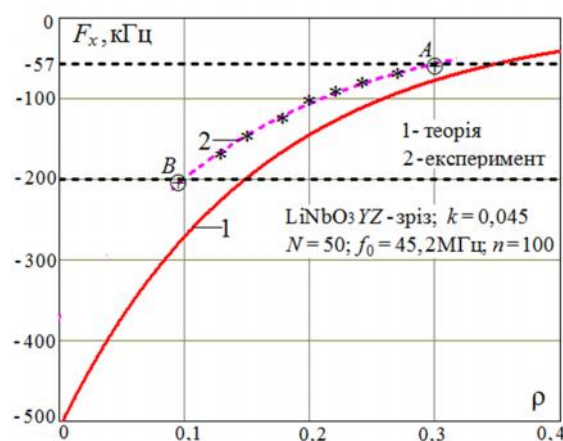


Рис. 3. Функції перетворення сенсора мікропереміщень на ПАХ

Висновки

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, аналіз отриманих співвідношень показують, що коефіцієнт

перетворення сенсорів на базі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль залежить як від конструктивних параметрів модуля на ПАХ і коефіцієнта електромагнітного зв'язку, так і від форми та напрямку переміщення мембрани (зонда).

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

Запропоноване конструктивне рішення дозволяє застосовувати універсальний акустоелектронний модуль, а первинний перетворювач (мембрану, шток) виготовляти для конкретного виду вимірювальної величини та заданого динамічного діапазону.

Для підвищення чутливості та точності вимірювання доцільно використання частотного методу вимірювання на базі диференційної вимірювальної схеми, що містить опорний та вимірювальний ПАХ-генератори.

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

Література

1. Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич, А. О. Дружинін та ін. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем – Одеса: Астропринт. – 2010. – 296 с.
2. Жовнір М. Ф., Черняк М. Г., Черненко Д. В., Шеремет Л. М. Вимірювальні перетворювачі фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях / *Electronics and Communications*. – 2011. Т. 18, № 1(60). – С. 153 – 157.
3. Bogdan O., Orlov O., Petrishev O., Ulianova V. ZnO Nanostructures as Sensing Element of Acoustic Wave Sensor / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2012. – № 6/12 (60). – P.16–22.
4. Жовнір М. Ф. Математична модель первинного перетворювача лінійних переміщень з рухомим приймачем поверхневих акустичних хвиль / *Вісник НТУ «ХП»*. Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». – 2016. – №7(1179). – С. 48–57.
5. Жовнір М.Ф., Шостак О.В. Оцінка потенційних роздільної здатності і точності вимірювальних перетворювачів лінійних та кутових переміщень

- на базі використання фазових набігань поверхневих акустичних хвиль // *Electronics and Communications*. – 2015, том 20, № 3(86). – С.101-106
6. Chernenko D., Zhovnir M., Tsyganok B., Oliinyk O. Wireless passive pressure sensor using frequency coded SAW structures. 35th International Spring Seminar on Electronics Technology. – 2012. – P. 424 – 428.
7. Mackensen E., Reindl L. Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors / *Smart Sensors and MEMS*. – 2004. – № 181. – P. 155 – 202.
8. Zhovnir M. F., Kuzmenko O. M., Pokutnyi S. I. Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement. *Journal of Applied Chemistry*. – 2005, № 3 (1). – P. 7 – 13.
9. Пат. UA 88694 U, МПК (2014.01) G01D 5/00. Сенсор фізичної величини на поверхневих акустичних хвилях. Патент на корисну модель / М. Ф. Жовнір, О. М. Кузьменко, Л. Д. Писаренко, Д. В. Черненко (Укр.). – u2013 12927; заявл. 07.11.2013; опубл. 25.03.2014. Бюл. № 6.
10. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах.– М.: Радио и связь. – 1990. – 416 с.
11. Жовнір М. Ф., Олійник О.О., Писаренко Л.Д. Математичні моделі сенсорів переміщень та тиску на основі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль / *Journal of Nano-and Electronic Physics*. – 2016. – Т.8, № 1. – С. 01024 – 01025.
12. Пономарев С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. –М.: Машиностроение – 1980. – 326 с.