

УДК 623.004.67

Ю.В. Ратнакар

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ З ВИКОРИСТАННЯМ КВАРЦОВОЇ МЕМБРАНИ

Проаналізувати методи розробки прецизійних вимірювальних перетворювачів тиску на базі схеми з мембраною і чутливих елементах на поверхневих і об'ємних акустичних хвилях. Надати характеристики якості вимірювань і показати способи опрацювання результатів вимірювань для підвищення їх достовірності, розглянути питання забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань.

**Ключові слова:** газ, мембрана, тиск.

### Вступ

**Постановка задачі.** Методи вимірювання тиску відіграють важливу роль при розробці прецизійних вимірювальних перетворювачів тиску. В якості чутливого елемента у ВП тиску часто використовується кварцова мембрана, завдяки високій стабільності параметрів та передбачуваності її працездатності.

Тому оцінювання методів розробки прецизійних ВП тиску на базі схеми з мембраною і чутливих елементів на поверхневих, і об'ємних акустичних хвилях, є важливою науково – прикладною задачею, актуальність якої підтверджується необхідністю збільшення точності вимірювання тиску за допомогою кварцової мембрани.

**Аналіз літератури.** У літературі, яка присвячена порівнянню методів вимірювання тиску з використанням кварцової мембрани [1-5], розглядаються питання, які пов'язані з вимогами до вимірювальних засобів, з системою атестації та повірки датчиків тиску та перепаду тиску [1-2], базами знань систем обліку газу [3], обробки сигналів на поверхневих акустичних хвилях [4], функції приладів та питань безпеки [5], але не визначені проблеми застосування лічильників витрати газу у магістральних трубопроводах на базі давачів витрати за перепадом тиску, але в цих джерелах не висвітлювалося питання, яке пов'язано з визначенням методів збільшення точності вимірювального тиску за допомогою кварцової мембрани.

**Мета статті.** Проаналізувати існуючі методи непрямого вимірювання тиску на основі кварцових мембран з подальшим визначенням методу збільшення точності вимірювального тиску.

### Основний матеріал

Розглянемо метод вимірювання тиску з використанням вимірювальних перетворювачів прогину.

Найбільш поширені наступні ВП для вимірювання прогину кварцовою мембраною (ВПП):

– ємнісні;

– на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) [1] (резонатори на ПАХ; лінії затримки (ЛЗ) на ПАХ);

– на об'ємних акустичних хвилях (ОАХ) (резонатори на ОАХ; камертони резонатори).

Фільтри та дисперсійні лінії затримки мають широку смугу і далі не розглядаються. Особливістю всіх ВП на основі кварцових мембран є мала деформація мембран. Гранично допустима відносна деформація кварцу, відповідна його межі міцності, становить  $\varepsilon_{\sigma} = 10^{-3}$ .

Найважливішим критерієм для прийняття рішення про розробку ВП є можливість забезпечення необхідної точності. ВП на кварці дозволяють досягти наступних показників точності: ємнісні ВПП можуть забезпечити отримання інформації з відносною похибкою  $\Theta(10^{-4})$ , де  $\Theta(x)$  – величина одного порядку малості з величиною  $x$ ; ППП на основі резонаторів на ПАХ можуть забезпечити відносну похибку  $\Theta(10^{-3})$ .

Знижена точність ВП прогину з резонаторами на ПАХ визначається, з одного боку, відносно низькою добротністю резонаторів ( $i$ , отже, відносно низькою довгостроковою стабільністю відповідного генератора) і, з іншого боку, – малою девіацією частоти. Дійсно, віднесена до номінальної частоти резонатора девіація частоти ВПП з резонаторами на ПАХ становить  $\varepsilon_f \leq 10^{-3}$ . Тому при відносній похибці  $\Theta(10^{-3})$  довготривала стабільність характеризується величиною

$$S = \varepsilon_f \Theta(10^{-3}) \leq 10^{-3} \times \Theta(10^{-3}) = \Theta(10^{-6}). \quad (1)$$

Перспективним видається використання лінії затримки (ЛЗ) для визначення прогину кварцовою мембраною з метою вимірювання тиску, при цьому точність визначення прогину визначається абсолютною величиною затримки, т.е. абсолютним значенням відстані, яку проходить ПАХ по поверхні кварцової пластини. Ефективна добротність лінії затримки  $Q = \pi f \tau$ .

Проаналізуємо точний метод визначення величини затримки – фазовий полягає у вимірюванні різниці фаз вхідного і вихідного сигналів ЛЗ.

Точність вимірювання фази визначається точністю застосовуваної вимірювальної апаратури. Об'єктивною характеристикою точності ВП тиску за допомогою ВП прогину на ЛЗ є величина похибки вимірювання тиску.

Розглянемо роботу ВП тиску, що використовує ВПП на ЛЗ.

Чутливим елементом ВПП є п'єзопластин (наприклад, з ніобіту літію), відполірована, принаймні, з того боку, на яку напилені зустрічно-штирові перетворювачі (ЗШП).

Подається на вхідний ЗШП гармонійний сигнал збуджує на поверхні п'єзопластини акустичну хвилю (зворотний п'єзоэффект), яка поширюється по поверхні пластини до вихідного ЗШП, де відбувається перетворення акустичного сигналу в електричний (прямий п'єзоэффект). Вихідний сигнал при цьому зазнає затримку в часі на величину  $T_3$ , визначальну початкову фазу вихідного сигналу і яка від відстані між вхідним і вихідним ЗШП і від швидкості розповсюдження ПАХ. Швидкість поширення ПАХ і відстань між вхідним і вихідним ЗШП, у свою чергу, залежать від деформації п'єзопластини.

Припустимо, що відносна зміна часу затримки пропорційно відносною зміні тиску:

$$\Delta T_3 = T_{3н} ДКЗ \Delta p, \quad (2)$$

де  $\Delta T_3 = T_k - T_{3н}$  – зміна часу задержці гармонічного сигналу при зміні тиску на п'єзопластині;  $T_k$  – час затримки сигналу при поточному значенні тиску;  $T_{3н}$  – час затримки сигналу при номінальному значенні тиску; ДКЗ – деформаційний коефіцієнт затримки;  $\Delta p = p - p_n$  – зміна тиску на п'єзопластині, відповідне зміни прогину;  $p, p_n$  – поточне і номінальне значення вимірюваного тиску відповідно.

Довжина акустичної хвилі  $\lambda$  визначається виразом  $\lambda = v_{ПАВ} / f_0$ , де  $v_{ПАВ}$  – швидкість поширення хвилі по поверхні п'єзопластини;  $f_0$  – частота гармонічного сигналу, що подається на вхідний ВПП п'єзопластини.

За час зміни затримки  $\Delta T_3$  поверхнева акустична хвиля проходить додаткове відстань

$$\Delta l = v_{ПАВ} \Delta T_3. \quad (3)$$

Отже, зміна часу затримки пов'язано зі зміною прохідного поверхневої хвилею відстані залежністю:

$$\Delta T_3 = \frac{\Delta l}{\lambda} \cdot \frac{1}{f_0}. \quad (4)$$

При  $\Delta l = \lambda$  (затримка ПАХ на один період) зміна часу затримки дорівнюватиме періоду вхідного сигналу, т.е.  $\Delta T_3 = 1 / f_0$

Якщо, наприклад, ЛЗ має центральну частоту  $f_0 \approx 1$  ГГц, то довжина хвилі ПАХ становить  $\lambda \approx 4$  мкм. При гранично допустимій відносній деформації кварцу  $\epsilon_\sigma = 10^{-3}$ , відповідної його межі міцності, допустиме значення абсолютної деформації кварцовою пластини на величину  $\Delta l = 4$  мм відпові-

дає абсолютному лінійній відстані між вхідним і вихідним ЗШП:  $L = \Delta l / \epsilon_\sigma = 4$  мм.

Іншими словами, при максимально допустимому тиску для ЛЗ з лінійним пробігом хвилі  $l = 4$  мм різниця фаз ПАХ складе  $\Delta \varphi = 360$  град.

При вимірах фазометром ФК2-29 (з похибкою  $\delta \varphi = 0,2$  град) відносна похибка фаз  $\Delta \varphi$  складе:

$$\delta \varphi / \Delta \varphi = 0,2 / 360 = 5,55 \times 10^{-4}.$$

Отже, можна зменшити відносну похибку вимірів  $\delta \varphi / \Delta \varphi$ , наприклад, в 10 разів, збільшивши різницю фаз  $\Delta \varphi$  в 10 раз.

Фаза коливань лінійно залежить від часу затримки:

$$\varphi(T_3) = \varphi_0 + \frac{2\pi v_{ПАВ}}{\lambda} T_3, \quad (5)$$

де  $\varphi_0$  – початкова фаза коливань;  $T_3$  – час затримки. При зміні часу затримки на величину  $\Delta T_3$  зсув по фазі складає:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi v_{ПАВ}}{\lambda} \Delta T_3 = \frac{2\pi \cdot \Delta l}{\lambda}. \quad (6)$$

При збільшенні  $\Delta l$  у 10 разів до значення 40 мкм при  $\epsilon_\sigma = 10^{-3}$  довжина ЛЗ, приблизно відповідна діаметру мембрани, стане рівною  $1 - \Delta l / \epsilon_\sigma = 40$  мм без відображають структур або близько 20 мм, якщо ЛЗ виконана з відбивають структурами. Відповідно, досягне зміна фази при незмінній довжині хвилі, що дорівнює  $\lambda = 4$  мкм також збільшиться в 10 разів і складає:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = 3600 \text{ град}. \quad (7)$$

Відповідно, відносна похибка зменшиться в 10 разів

$$\frac{\delta \varphi}{\Delta \varphi} = 5,55 \cdot 10^{-5}. \quad (8)$$

Знайдемо залежність похибки вимірювання тиску від похибки вимірювання зсуву фази. У цьому випадку залежність зсуву фази від вимірювання тиску з урахуванням формул (2) – (4) може бути представлена у вигляді

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta l}{\lambda} = 2\pi \Delta T_3 f_0 = 2\pi ДКЗ \Delta p T_{3н} f_0 \quad (9)$$

У відповідності до (9), залежність похибок вимірювання фази і тиску

$$\delta(\Delta \varphi) = \frac{d(\Delta \varphi)}{d p} \delta p = \frac{d}{d p} [2\pi ДКЗ (p - p_n) T_{3н} f_0] \delta p = 2\pi ДКЗ T_{3н} f_0 \delta p. \quad (10)$$

Розділивши ліву праву частини отриманої рівності на  $\Delta \varphi$  і, скориставшись формулою (9), отримаємо залежність відносної похибки вимірю-

вання тиску від відносної похибки вимірювання зсуву фази

$$\delta p / \Delta p = \delta(\Delta\varphi) / \Delta\varphi, \quad (11)$$

де  $\delta p$ ,  $\delta(\Delta\varphi)$  – абсолютні похибки вимірювання різниці тиск  $\Delta p$  і різниці фаз  $\Delta\varphi$  відповідно;  $\delta p / \Delta p$  – відносна похибка, обумовлена по відношенню до різниці  $\Delta p$  вимірюваних тисків.

При відомих значеннях параметрів ДКЗ,  $T_{zn}$ ,  $f_0$  абсолютну похибку  $\delta p$  тиску на ПАР можна оцінити відповідно до формули

$$\delta p = \frac{1}{2\pi \cdot \text{ДКЗ} \cdot T_{zn} \cdot f_0} \delta\varphi. \quad (12)$$

Як випливає з формули (12), при збільшенні різниці фаз або часу затримки, т.е. при збільшенні відстані між вхідним і вихідним ЗПП, похибка вимірювання тиску зменшується.

До недоліків ЛЗ на кварці слід віднести відносно високі втрати на поширення енергії на високих частотах (більше 500 МГц). Один із способів усунення цього недоліку-застосування підсилювача ПАХ. У цьому випадку чутливий елемент являє собою здвоєну мембрану з кварцу і кремнію. Основною областю застосування ЛЗ і резонаторів є безконтактні системи знімання інформації.

ВПП на об'ємних акустичних хвилях (ОАХ) дозволяють забезпечити отримання інформації з відносною похибкою  $\Theta$  ( $10^{-4}$ - $10^{-5}$ ).

Резонатори на ОАХ мають більш високу довгострокову стабільність, так як характеризуються величиною  $S = \Theta$  ( $10^{-7}$ ). При цьому відносна девіація частоти складає  $\epsilon_f = 10^{-2}$ . Недоліком застосування ОАХ є необхідність розробки технології або безгітерезисного кріплення, чи виготовлення резонатора безпосередньо на мембрані.

Досяжна відносна похибка вимірювальних перетворювачів на основі камертонах резонаторів не перевершує  $O(10^{-4})$ .

Довготривала стабільність камертонах резонаторів  $S = \Theta$  ( $10^{-4}$ ) порівнянна з довготривалою стабільністю резонаторів на ПАХ  $S = \Theta$  ( $10^{-4}$ ).

У той же час відносна девіація частоти камертона на два порядки більше, ніж у резонаторів на ПАХ, і становить  $\epsilon_f = 10^{-1}$ .

## Висновок

1. В результаті аналізу існуючих методів непрямого вимірювання тиску на основі кварцових мембран визначено, що фазовий метод визначення величини затримки є найбільш бажаним при збільшенні точності вимірювального тиску, тому, що ВП на основі камертонах резонаторів, ємнісних перетворювачів і ліній затримки мають високу точність вимірювання (0,01%).

2. Основний напрямок застосування ліній затримки і резонаторів – в безконтактних системах знімання інформації.

3. Вимірювальні перетворювачі на ПАХ більше на порядок поступаються у точності вимірювальних перетворювачів на ОАХ.

## Список літератури

1. Морган Д. Пристрій обробки сигналів на поверхност-них акустичних хвилях: пер. з англ. / Д. Морган. - М.: Радіо і зв'язок, 1990. – 320 с.
2. Theory and application of passive SAW radio transponders as sensors / L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, et. al. // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. – 1998. – Vol. 45. – P. 1281-1292.
3. Фізична акустика / под ред. У. Мезона. – М.: Світ, 1969. – 430 с.
4. Kalinin V. Modeling of a wireless SAW system for multiple parameter measurement / V. Kalinin // Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. – 2001. – P. 1790-1793.
5. ДСТУ 2682-94. Метрологія. Метрологічне забезпечення. Основні положення. – К: Держстандарт України, 1994.

Надійшла до редколегії 16.11.2010

Рецензент: канд. техн. наук, доц. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАРЦЕВОЙ МЕМБРАНЫ

Ю.В. Ратнакар

Рассмотрены возможные подходы к реализации прецизионных измерительных преобразователей давления на базе схемы с мембраной и чувствительных элементах на поверхностных и объемных акустических волнах.

**Ключевые слова:** газ, мембрана, давление.

## COMPARISON OF PRESSURE MEASUREMENT USING A QUARTZ MEMBRANE

Yu.V. Ratnakar

The possible approaches to the precision measuring of pressure transducers on the basis of the scheme with the membrane and sensitive elements of surface and bulk acoustic waves.

**Keywords:** gas, membrane, pressure.