

# Метрологія та вимірювальна техніка

УДК 519.87:316.458.6

К.О. Крапівін, О.І. Кіпачов, О.О. Бабич

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## АНАЛІЗ ХВИЛЬОВИХ ДАТЧИКІВ ТА ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В статті проаналізовано існуючі хвильові датчики та похибки вимірювання, що виникають при визначенні засобів вимірювання навколишнього середовища, за результатами аналізу визначено, що в якості якісного й кількісного сенсора для конкретної хімічної речовини необхідно використовувати мікроваги.

**Ключові слова:** хвильові датчики, засобів вимірювання.

### Вступ

**Постановка задачі.** Використання хвильових датчиків, які дозволятимуть контролювати вплив зовнішнього навантаження на амплітуду вихідного сигналу на акустичних поверхневих хвилях є актуальною науково-технічною задачею, від вирішення якої залежить оцінка стану навколишнього середовища після різного роду техногенних катастроф. Тому питання, які пов'язані з аналізом хвильових датчиків та похибок вимірювання, що виникають при їх експлуатації є актуальними при визначенні засобів вимірювання навколишнього середовища.

**Аналіз літератури.** В [1, 2] розглянуті питання, які пов'язані із аналізом сучасних датчиків. [3–5] присвячені теоретичними відомостями щодо метрологічних вимірювань. Нажаль в [1–5] хвильовим датчикам та похибкам вимірювання, що виникають при визначенні засобів вимірювання навколишнього середовища достатньої уваги приділено не було.

**Метою статті** є проведення аналізу хвильових датчиків та похибок вимірювання, що виникають при визначенні засобів вимірювання навколишнього середовища.

### Виклад основного матеріалу

При проведенні аналізу хвильових датчиків та похибок вимірювання, що виникають при їх експлуатації перш за все розглянемо сенсори на вібраційному проводі. Це самі прості резонансні сенсори. Уявімо, що жорсткість проводу незначна і частота поперечних коливань визначається як

$$\omega_n = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad (1)$$

де  $T$  – натяг;  $\mu$  – маса на одиницю довжини;  $\ell$  – довжина проводу.

Для сенсорів можуть використовуватися провали, які зроблені з вольфраму, індію чи високоеластичної сталі, а також таких сплавів, як "Елінвар".

При проходженні змінного струму через провід, встановлений у постійному магнітному полі, виникає збудження. Поблизу резонансу буде сильно змінюватись вихідний імпеданс, тому керуюча схема повинна генерувати необхідну для виконання цієї умови частоту. При точному проектуванні захисті проводу від засмічення, точки нестабільності і гістерезис можуть бути низькими, приблизно  $\pm 0,02\%$ . Температурне розширення проводу призводить до похибок порядку 10 проміль/ $^{\circ}\text{C}$ .

Використання віброуючого проводу для вимірювання тиску представили Маршал і Хантер (1980). Промислові пристрої були виготовлені Foxboro. На рис. 1 показана структура подвійної мембрани.

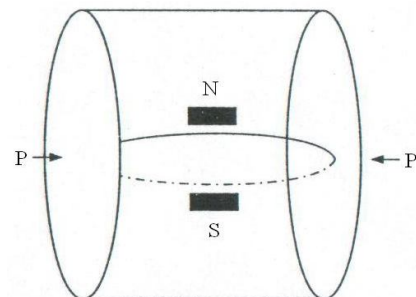


Рис. 1. Диференційний осередок тиску. Крутильно-вібраційний стержень

Сенсор густини рідини був розроблений Ленгдоном (Langdon) в GEC для застосування у свинцевих акумуляторах. В верхній частині пристрою розташований п'єзоелектричний генератор збуджуючих імпульсів, який викликає вібрацію у скляному стержні. Для живлення використовується сама батарея, що робить пристрій замкненим. Точність вимірювань була встановлена така ж, як у поплавкових ареометрів, з похибкою  $\pm 0,2\%$ .

Для системи, що обертається другого порядку рівняння представимо у вигляді формули

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + X \frac{d\theta}{dt} + c\theta = \tau, \quad (2)$$

де  $I$  – момент інерції стержня;  $X$  – коефіцієнт затування;  $c$  – крутильна жорсткість стержня;  $\tau$  – прикладений обертаючий момент.

Циклічна частота вільних власних коливань може бути знайдена за формулою

$$\omega_n = \sqrt{c/I}. \quad (3)$$

Обертаючий стержень сенсора густини рідини зображений на рис. 2

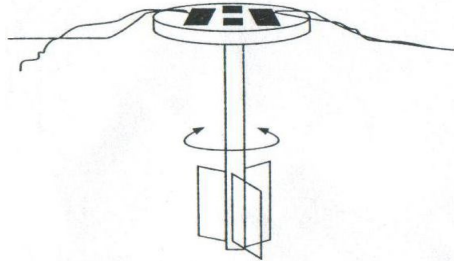


Рис. 2. Обертаючий стержень сенсору густини рідини

Вздовж вібруюча пластина: як правило, для безпосереднього вимірювання в'язкості нерезонансним методом використовується коливальна сфера, яка керується фіксованою частотою 200Гц (Matusik і Scania 1981). Більш компактний сенсор для вимірювання в'язкості був створений за допомогою тонкої прямокутної пластини, яка закріплена в центрі (рис. 3), яка може управлятися та контролюватися магнітострикційним пристроєм, який має резонанс, що виникає вздовж. Для визначення в'язкості використовується затування, яке виміряне при виключенні потужності чи за допомогою вимірювання втрат, крім того, може бути використано зміщення фази  $\varphi$ , яке задає вплив, рівний

$$\varphi = \arctg \frac{2\omega_n \alpha}{\omega^2 - \omega_n^2} \quad (4)$$

з  $\alpha$ , приблизно рівним квадратному корню динамічної в'язкості.

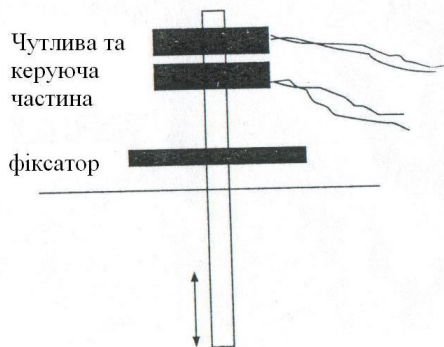


Рис. 3. Вимірювання в'язкості за допомогою вздовж резонуючої пластини

Головний недолік сенсора – це низьке проникнення хвильового руху у рідину. Для типової частоти 20 кГц проникнення має величину менше 10 мкм, тому необхідно забезпечити чистоту поверхні датчика. Використання не резонансних пристроїв, які

діють на більш низькій частоті, не припустимо із-за недостатнього проникнення.

Резонатори на структурах, що згинаються. Існує багато конструкцій для вимірювання потоку за допомогою згинаючої структури. Мак Дональд (1983) запропонував пристрій (рис. 4), який складається з невеликої пластини (з металу або кераміки), подовжньо встановленій в трубі. Він збуджувався розташованим в центрі перетворювачем на резонансній частоті приблизно 1кГц. Для визначення величини потоку рідини використовувалась різниця фаз між чутливими елементами на кінцях пластини. В компанії "Дженерал Електрик К<sup>о</sup>" були створені прототипи з розмірами пластини 150×20мм, що дозволяло проводити лінійне вимірювання потоку маси для швидкостей  $0 \div 4 \pm 0,02$  м/с. Як і в інших подібних системах, тут важливим є захист чутливих елементів від прилипання забруднюючих речовин. Газ, що потрапив у рідину, теж може впливати на показання.



Рис. 4. Гнучка пластина сенсору потоку

Труба, що згинається. В цій конструкції в резонансі знаходиться ціла секція труби. Процес резонансу приблизно такий же, як в сенсорі на вібруючому проводі. Резонансна частота буде визначатися зальною масою пристрою (включаючи масу труби). Це дає можливість використання сенсора у багатозначних або багатокомпонентних додатках. Компанія Саросота (Sarosota) розробила вимірювач густини (рис. 4, а), в якому вираз для густини задано як

$$\rho = \frac{A}{\omega_n^2} + \frac{B}{\omega_n} + C. \quad (5)$$

Інший підхід – використання ефекту Коріоліса. Коріоліс показав, що при переміщенні об'єкту в неінерційній системі відліку на його дії сторонні сили. Не інерційна система відліку в цьому додатку – труба, яка коливається. Векторне рівняння сили Коріоліса представимо формулою

$$F_C = 2m\omega A \left( \frac{dr}{dt} \right), \quad (6)$$

де  $m$  – маса оберту, що переміщується з кутовою швидкістю  $\omega$ , викликаній зміною радіуса вектора  $r$   $F_C$  перпендикулярна  $r$ .

Пристрій служить для вимірювання масового потоку. Оскільки необхідна велика довжина, часто труби згинають U-подібно (рис. 4, б).

Коріолісова сила викликає невелике викривлення труби, яке може бути визначено сенсорною парою або датчиком деформацій.

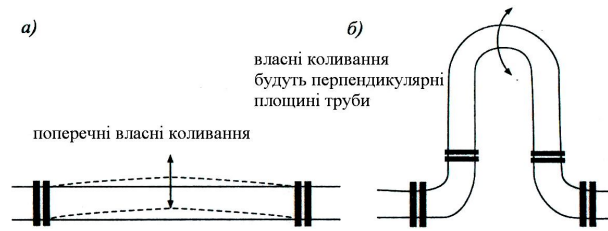


Рис. 4. Приклади сенсорів потоку рідини на вібруючій трубі

Сенсор рівня рідини був створений на основі трубки, що згинається, довжиною 300 мм і діаметром 6мм (Langdon 1983). Ефективна згибаюча маса трубки змінюється рідиною, що її оточує. При цьому резонансна частота буде знаходитись біля 5кГц і зменшуватися при збільшенні рівня рідини. Характеристика лінійна за виключенням випадків, коли рідина досягає вузлових точок труби. Цю проблему можна вирішити: керуючи пристроєм послідовно на різних резонансних частотах; використовуючи лопасті на трубі, щоб коливання мали „плоскополяризовану” форму, при цьому збуджуючи коливання на двох різних частотах одночасно.

В кожному методі вузли проявляються інших точках. Нелінійність може бути видалена комбінуванням вихідних характеристик. Ці пристрої є масовими сенсорами рівня, і, так як на вихідну величину впливає густина рідини, може знадобитися її окреме вимірювання. Тим не менше вони знаходять застосування в деяких додатках, як наприклад, заправка палим літака. Вібруючий циліндр: для зміни густини рідини використовується тонкий металічний циліндр, який встановлено всередині труби совісно з нею (рис. 5).

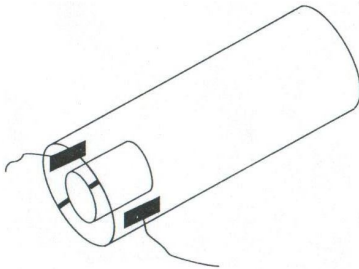


Рис. 5. Вібруючий циліндр вимірювача густини рідини

Жорстко закріплений на одному кінці циліндр, зроблений з феромагнітного матеріалу, може збуджуватися електромагнітним полем зовнішніх катушок. Якщо рідина агресивна, то використовується керамічна трубка з розташованим в ній п'єзоелектричним пристроєм. Так як трубка тонка, вона не обмежує потік. Рідина проходить крізь обидві поверхні, тому перепад радіального тиску мінімальний. Для низького акустичного зв'язку розміри сенсору повинні бути значно меншими за довжину хвилі. При виконанні цього обмеження рідина не зжимається і не впливає на  $\omega_n$ . Крім того, вібруючий циліндр використовується в конструкції гіроскопу (рис. 6).

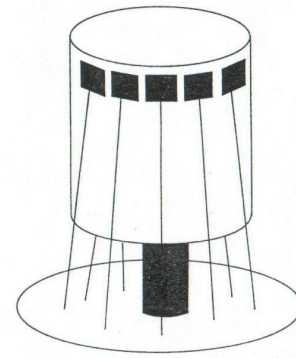


Рис. 6. Вібруючий циліндр гіроскопу

Розгалуження, яке коливається. Сенсор густини агресивної рідини, запропонований Шлюмбергером, зроблений на основі коливаючогося вилкоподібного розгалуження. Сенсор може застосовуватися в статичних резервуарах чи в трубопроводах, де витрати нижчі 3 м/с. Розгалуження збуджується і інформація зчитується п'єзоелектричними пристроями. Умова резонансу підтримується за допомогою контролю фази. Співвідношення між густиною  $\rho$  і власною частотою:

$$\rho = K_0 + K_1\tau + K_2\tau^2, \quad (7)$$

де  $K_0, K_1, K_2$  – константи;  $\tau$  – період резонансної частоти.

Ічіносе і Терада (1995) повідомили про розробку датчика кута для автомобільних додатків. Мініатюрна структура розвилки була розроблена за допомогою високотехнологічних елементів. При цьому резонансна частота приблизно дорівнює

$$\omega_n = \frac{\alpha^2 t}{\ell^2} \sqrt{\frac{\rho}{E}}, \quad (8)$$

де  $\alpha$  – характеристична цифра;  $t$  – товщина;  $\ell$  – довжина;  $E$  – модуль Юнга;  $\rho$  – густина.

Сила Коріоліса, яка діє на резонуюче розгалуження, вимірюється п'єзоелектричними датчиками. Отриманий сигнал посилюється синхронним знаходженням.

Датчики на основі подвійного розгалуження. Датчики цього типу були розроблені для безпосереднього вимірювання густини (рис. 7).

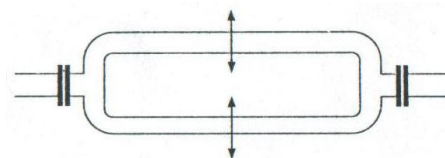


Рис. 7. Вимірювання густини за допомогою роздвоєної трубки

Трубопровід, розгалужуючись, формує подвійну розвилку. Протифазний рух бокових секцій компенсує силу, яка згибає, та котра виникала б при іншому розташуванні. Тим не менше вістова напруга при монтажі може вплинути на резонансну частоту, тому повинні використовуватися гнучкі кріплення. Резонансна частота пов'язана з густиною  $\rho$ :

$$f = f_0 \sqrt{\rho_0 / (\rho_0 + \rho)}, \quad (9)$$

де  $\rho_0$  – константа.

Можуть бути досягнуті похибки більш 0,1%. Датчик тиску, який використовує структуру на основі подвійного розгалуження, представлено японською фірмою Yokogawa. Вібруючий елемент зроблено з твердого сплаву Елінвар. В цій конфігурації коефіцієнт еластичності  $E$  змінюється пропорційно вісьовій силі. Силу створює діафрагма, розташована в одному кінці коливальної структури. Залежність резонансної частоти від тиску нелінійна, тому для виводу лінійної відповіді мікропроцесор використовує таблицю перетворення. Значення  $Q > 10^4$ , і типова похибка при зчитуванні –  $\pm 0,02\%$ . При гарній температурній компенсації (більша частина похибки обумовлена тепловим розширенням діафрагми), нуль та дрейф чутливості можуть бути знижені до  $\pm 0,001\%$  на  $1^\circ\text{C}$  в усьому діапазоні.

Резонансні сенсори на об'ємних акустичних хвилях на кварцових кристалах для контролю осадження тонких плівок в вакуумі з випаровувачів. Відкритий кварц є частиною коливального ланцюга і зазвичай працює в режимі, коли резонансна частота змінюється при збільшенні маси. Такі пристрої іноді називають мікроваги. На жаль, на резонансну частоту також впливає температура. Для зміни температури можна використовувати доступні промислові термометри з чутливістю  $0,001^\circ\text{C}$ . Комбінуючи обидва датчики, для температурної компенсації пристрою, що контролює тонкі плівки, можна контролювати опадання матеріалу з точністю до атомного прошарку (рис 8).

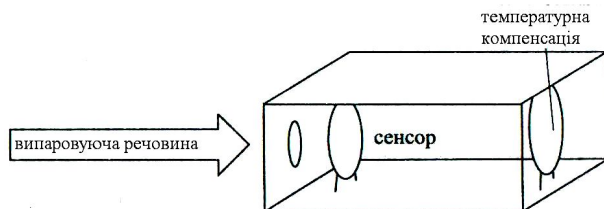


Рис. 8. Контроль опадання тонких плівок за допомогою кварцевих резонаторів

Типовий генератор на п'єзокварці АТ-зрізу – це диск діаметром біля  $10 \div 16$  мм чи квадрат (прямокутник) аналогічного розміру. Рівняння Сауербрая визначає залежність зсуву частоти від зміни маси і визначається за формулою

$$\Delta f = \frac{-f_0^2 \Delta m}{\rho k A}, \quad (10)$$

де  $\rho$  – густина;  $k$  – частотний коефіцієнт;  $A$  – площа поверхні кварцового кристалу  $\text{м}^2$ .

Підставивши константи, для кварцу отримаємо

$$\Delta f = \frac{-2,25 \cdot 10^{-2} f_0^2 \Delta m}{A}, \quad (11)$$

Робочі частоти звичайно дорівнюють 5,9 чи 10 МГц. При частоті 10 МГц досягнута чутливість 0,3 Гц на нанограмм. Розроблені покриття для вибіраючої адсорбції певного газу чи пари. Таким чином, мікроваги становляться якісним і кількісним сенсором для конкретної хімічної речовини. Складністю є знаходження високо селективного покриття.

## Висновки

1. В статті проаналізовані хвильові датчики та похибки вимірювання, що виникають при визначенні засобів вимірювання навколишнього середовища, а саме: прості резонансні сенсори; вібруючі проводи для вимірювання тиску; вздовж вібруюча пластина; резонатори на структурах, що згинаються; сенсор рівня рідини; вібруючий циліндр вимірювача густини рідини; вібруючий циліндр гіроскопу; сенсор густини агресивної рідини; датчик кута для автомобільних додатків; датчики на основі подвійного розгалуження; резонансні сенсори на об'ємних акустичних хвилях на кварцових кристалах; мікроваги.

2. Похибки вимірювань коливаються від  $\pm 0,001\%$  до  $\pm 0,2\%$  в усьому діапазоні вимірювань хвильових датчиків засобів вимірювання навколишнього середовища.

3. Визначено, що в якості якісного й кількісного сенсора для конкретної хімічної речовини необхідно використовувати мікроваги.

## Список літератури

1. Джерсон Р.Г. Новейшие датчики: пер. с англ. / под ред. В.В. Кулинина. – М.: Техносфера, 2007.
2. Фрайден Д.Ж. Современные датчики. Справочник: пер. с англ. Ю.А. Заболотной / под ред. Е.Л. Свициова. – М.: Техносфера, 2006.
3. Чинков В.Н. Цифровые измерительные приборы / В.Н. Чинков. – МО, 1991. – 245 с.
4. Шляндин В.М. Цифровые измерительные устройства / В.М. Шляндин. – М.: Высш. школа, 1981. – 254 с.
5. Чинков В.М. Основы метрологии та вимірювальної техніки / В.М. Чинков. – Х.: ХВУ, 2001. – 423 с.

Надійшла до редколегії 4.04.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ДАТЧИКОВ И ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

К.А. Крапивин, А.И. Кипачев, О.О. Бабич

В статье проанализировано существующие волновые датчики и погрешности измерения, возникающие при определении средств измерения окружающей среды, по результатам анализа определено, что, в качестве качественного и количественного сенсора для конкретного химического вещества необходимо использовать микровесы.

**Ключевые слова:** волновые датчики, средства измерения.

**ANALYSIS OF WAVE SENSORS AND MEASURING ERRORS, ARISING UP AT THEIR OPERATION**

K.O. Krapivin, O.I. Kirachev, O.O. Babich

*In the article existent wave sensors and errors are analysed measurements, arising up at determination of facilities of measuring of environment, it is certain on results an analysis, that, as high-quality and quantitative sensor for a concrete chemical matter not walked around to utilize microbalance.*

**Keywords:** *wave sensors, measuring facilities.*