

УДК 621.396.61, 621.396.62, 531.768

Акустoeлектронні радіосенсори фізичних величин

Решетник Д.М., к.т.н., доц. Жовнір М.Ф.

Вступ

Інформаційно-вимірювальні системи, системи автоматичного контролю, системи управління технологічними процесами містять різноманітні сенсори фізичних величин (температури та вологості, сили та тиску, переміщення, прискорення та швидкості, складу газового середовища, параметрів електромагнітного поля тощо). По інформації, отриманій від сенсорів, можна передбачити виникнення небезпечних ситуацій на контрольованих об'єктах та унеможливити їх, що є особливо важливим на теплових, атомних електростанціях, хімічних підприємствах тощо. Оскільки, саме від характеристик сенсорів та їх безвідмовної роботи залежать надійність та достовірність отриманої інформації про вимірювальні величини та стан контрольованих об'єктів, сенсори відіграють ключову роль у функціонуванні будь-якої інформаційно-вимірювальної системи. Зважаючи на можливі агресивні умови експлуатації сенсорів (високі температура та вологість, радіоактивність тощо), використання систем контролю, конструкції яких передбачають наявність кабельних ліній зв'язку та джерел живлення, не

гарантують безвідмовність функціонування системи контролю та не дають гарантії передбачення небезпечних ситуацій на контрольованих об'єктах. Тому, найбільш придатними для функціонування в таких умовах є радіосенсори, побудовані на основі лінії затримки (ЛЗ) на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) [1-7]. Такі сенсори не вимагають наявності джерел живлення та кабельних ліній зв'язку із пристроями приймання та обробки вимірювальної інформації, а тому є стійкими до відмов в таких умовах експлуатації.

Вдосконалення існуючих і розробка нових радіосенсорів є ключовими напрямками дослідження, що спрямовані на покращення надійності контролю вимірювальних величин та безвідмовності і безпеки функціонування контрольованих об'єктів.

Схемо-технічні принципи побудови радіосенсорів на ПАХ

Принцип роботи радіосенсорів полягає у взаємодії фізичної величини із чутливою до її впливу поверхнею ЛЗ та формуванні модульованого затриманого сигналу, що є носієм інформації про вимірювальну величину, і який передається від

сенсора до пристрою опитування та обробки інформації від сенсора по радіоканалу [1-7]. Недоліком сенсорів [1-3] є необхідність безпосереднього контакту агресивного середовища із поверхнею ЛЗ, що зменшує тривалість експлуатації сенсора (через можливі забруднення та руйнації його поверхні) і призводить до втрати інформаційного сигналу. Цього недоліку позбавлені сенсори на ПАХ із зовнішніми чутливими до вимірювальної фізичної величини елементами [4-7], які містять п'єзоелектричний звукопровід, на поверхні якого розташовані два ЗШП ПАХ, один з яких з'єднаний з антеною, а інший - із зовнішнім чутливим до вимірюваної фізичної величини елементом. Принцип роботи таких сенсорів полягає в залежності від значення фізичної величини коефіцієнту відбиття (а отже і амплітуди відбитого імпульсу) від ЗШП, який з'єднаний із зовнішнім чутливим елементом. Таким чином, по параметрам відбитого сигналу від навантаженого на зовнішній елемент ЗШП можна отримати інформацію про значення вимірювальної фізичної величини. Проте, недоліком сенсорів, представлених у [4], є залежність їхніх показів від відстані між пристроєм обробки інформації і антеною та їхнім взаємним розташуванням, що може призвести до значних відхилень результатів вимірювання. Від цих недоліків вільні радіосенсори на ПАХ для вимірювання температури [5, 6] та вологості [7].

Радіосенсор температури на ПАХ

Радіосенсор температури (Рис. 1) містить п'єзоелектричний звукопровід 1, на поверхні якого розташовані ЗШП 2, з'єднаний з антеною 3, та ЗШП 4, що з'єднаний із зовнішнім чутливим до температури елементом 5, та група відбивачів 6. При цьому група відбивачів 6 та ЗШП 2 утворюють опорну лінію затримки ПАХ, що формує опорний сигнал. ЗШП 2 та ЗШП 4 утворюють вимірювальну лінію затримки, що формує контрольний вимірювальний сигнал. Для зменшення рівня помилкових сигналів та забезпечення режиму біжучої хвилі на торцях звукопроводу нанесені поглиначі ПАХ 7. Сенсор, окрім чутливого елемента 5, розміщено у герметичному корпусі 8. Наявність групи відбивачів разом із вхідним/вихідним ЗШП дозволяє сформувати опорний сигнал, наявність якого після кореляційного аналізу із вимірювальним сигналом, дозволяє усунути залежність показів сенсору від відстані між антеною та пристроєм опитування і обробки інформації та їхнім взаємним розташуванням

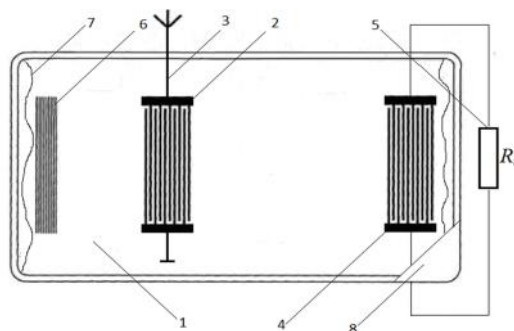


Рис. 1. Радіосенсор температури на ПАХ

Сигнал радіозапиту від пристрою опитування та обробки інформації поступає на вхід антени 3 сенсору. ЗШП 2 за рахунок зворотного п'єзоэффекту збуджує у звукопроводі 1 поверхневі акустичні хвилі, що поширюються по звукопроводу в обидва напрямки від ЗШП 2. Частина енергії ПАХ, відбившись від групи відбивачів 6 повертається на перетворювач 2 і за рахунок прямого п'єзоэффекту перетворюється в електричний сигнал, що випромінюється в простір антеною 3. Таким чином відбувається формування опорного сигналу, час затримки якого визначається відстанню від ЗШП 2 до групи відбивачів 6 та швидкістю поширення ПАХ по поверхні матеріалу звукопроводу. Частина енергії ПАХ, відбившись від ЗШП 4, повертається на перетворювач 2 і за рахунок прямого п'єзоэффекту перетворюється в електричний сигнал, що випромінюється в простір антеною 3. Таким чином формується вимірювальний сигнал.

Коефіцієнт відбиття (а отже і амплітуда відбитого імпульсу) від ЗШП 4, навантаженого на терморезистор 5, залежить від значення його провідності, що, в свою чергу, залежить від значення вимірювальної температури і визначається відповідно до співвідношення [8]:

$$|\Gamma_{R_n}| = \frac{G_a(\omega_0)}{G_a(\omega_0) + Y_n + j\omega_0 C_T}, \quad (1)$$

де $G_a(\omega_0)G_a(\omega_0)$ – активна складова провідності ЗШП 4 на центральній частоті; $C_T = NC_s W$ – статична ємність ЗШП 4 (C_s – погонна ємність пари електродів, W – апертура ЗШП, N – кількість пар електродів); ω_0 – центральна частота; Y_n – провідність навантаження ЗШП.

Таким чином, по параметрам відбитого від ЗШП 4 сигналу можна отримати інформацію про значення вимірювальної температури.

Після надходження на пристрій опитування та обробки інформації опорного та вимірювального сигналів здійснюється обробка вимірювальної інформації (наприклад, кореляційний аналіз та визначення амплітуд опорного і вимірювального сигналів). Таким чином, формування двох сигналів виключає вплив відстані між пристроєм опитування та сенсором і їхнім взаємним розташуванням, оскільки згасання опорного і вимірювального сигналів внаслідок поширення від пристрою опитування до сенсору є однаковим. При цьому для ефективної селекції опорного та вимірювального сигналів час затримки приходу опорного та вимірювального сигналів повинні бути різними.

Наприклад, приймемо конструктивні параметри:

- фазова швидкість ПАХ $V = 3992$ м/с (як звукопровід використано УХ – зріз ніобат літію);
- центральна частота $f = 434$ МГц (довжина ПАХ $\lambda = 9,2 \cdot 10^{-6}$ м);

- відстань між ЗШП 2 та ЗШП 4 – 0,004 м;
- відстань між ЗШП 2 та групою відбивачів 6 – 0,002 м, що забезпечує затримку приходу контрольного сигналу відносно опорного в 1 мкс;
- в якості зовнішнього чутливого елемента використовуємо терморезистор ММТ-12, номінальний опір якого становить 1 кОм, коефіцієнт температурної чутливості $B = 4300 \text{ K}^{-1}$ і температурна залежність опору якого визначається відповідно до співвідношення [9]:

$$R = R_{\infty} e^{B/T}, \quad (2)$$

де $B = 4300 \text{ K}^{-1}$ - коефіцієнт температурної чутливості, K^{-1} ; R_{∞} - опір терморезистора при високих температурах, Ом; T - поточна температура, K .

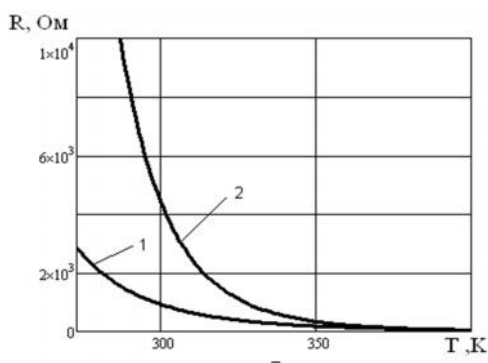


Рис. 2. Температурні залежності опорів терморезисторів ММТ-12 (1) та КМТ-12 (2)

Відповідно до співвідношення (2) опір терморезистора при 100°C становить 55 Ом, отже зміна температури від 25°C до 100°C призводить до зміни опору

терморезистора від 1000 Ом до 55 Ом (Рис. 2).

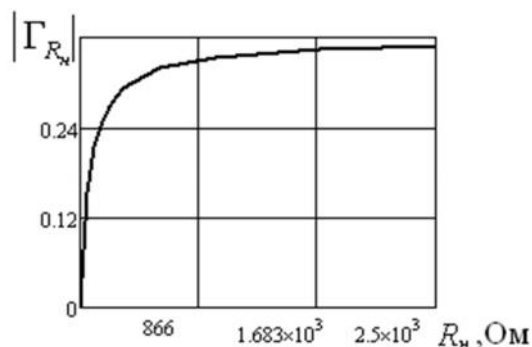


Рис. 3. Залежність модуля коефіцієнта відбиття від опору навантаження ЗШП

Така зміна опору зумовлює зміну коефіцієнта відбиття (1) від навантаженого на терморезистор ЗШП 4, що призводить до зміни амплітуди відбитого імпульсу на 18 дБ порівняно із амплітудою імпульсу, відбитого від групи відбивачів. (рис.3).

На основі залежності (1), можна визначити і залежність від опору навантаження амплітуди сигналу, відбитого від навантаженого на R_n вихідного ЗШП. Для цього приведемо необхідну для наступних розрахунків еквівалентну схему сенсора:

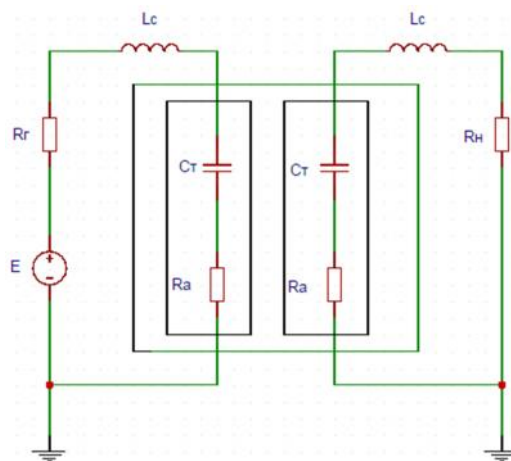


Рис. 4. Еквівалентна схема сенсора із підключеними антеною

(представленою джерелом напруги E із внутрішнім опором R_G) та опором навантаження R_H

Відповідно до представленої вище схеми, падіння напруги на опорі випромінювання вхідного ЗШП визначає амплітуду ПАХ, що поширюється в лінії затримки, і визначається відповідно до:

$$U_{Ra} = E \cdot R_a / (R_G + R_a + 1/i\omega C_T + i\omega L_C) \quad (3)$$

Через подвоєний час затримки, що визначається відстанню між перетворювачами та швидкістю поширення ПАХ по поверхні звукопроводу, еквівалентна схема сенсору матиме вигляд відповідно до рис.5:

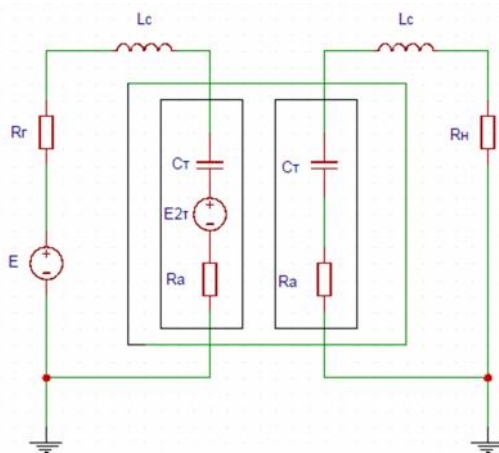


Рис. 5. Еквівалентна схема сенсору через подвоєний час затримки

Тепер джерелом сигналу є вхідний ЗШП, що генерує сигнал напругою:

$$U_{2t_затп} = U_{Ra} \cdot k \cdot \Gamma_{R_n} \cdot e^{-i2\omega t_затп}, \quad (4)$$

де $k=1/2$ – коефіцієнт, що враховує втрати, пов'язані із поширенням поверхневої акустичної

хвилі в обидва напрямки від перетворювача (відповідає затуханню 6 дБ).

Тоді, напруга, що виділяється на опорі випромінювання антени R_G через подвоєний час затримки, визначає амплітуду інформаційного сигналу в місці розміщення сенсору та дорівнює:

$$U_{R_G} = U_{2t_затп} \cdot R_G / (R_G + R_a + 1/i\omega C_T + i\omega L_C) \quad (5)$$

Використовуючи співвідношення (4) та (5) визначимо відношення U_{R_G} до напруги джерела E , що задає амплітуду зондуємого сигналу в початковий момент часу, і є нормованою амплітудою інформаційного сигналу:

$$A_{норм} = \frac{R_a \cdot R_G}{(R_G + R_a + 1/i\omega \cdot C_T + i\omega \cdot L_C)^2} \times k \cdot \Gamma_{R_n} \quad (6)$$

Враховуючи, що опір антени R_G дорівнює, як правило, 50 Ом, а значення індуктивності L вибирається із умови компенсації статичної ємності C_t , вираз (6) набуває вигляду:

$$A_{норм} = \frac{R_a \cdot 50 \cdot k \cdot |\Gamma_{R_n}|}{(50 + R_a)^2} \quad (7)$$

Таким чином, використовуючи співвідношення (1) та (7) можна визначити залежність від опору навантаження вихідного ЗШП (а тому і від значення вимірюваної температури) амплітуди вимірювального сигналу, що

генеруватиметься в простір антеною та надходить на пристрій опитування і обробки інформації.

При порівнянні в пристрої опитування та обробки інформації амплітуди вимірювального сигналу, відбитого від ЗШП 4, та амплітуди опорного сигналу, відбитого від групи відбивачів 7, вимірюється температура, що діє на терморезистор. Отже, використання сенсору на ПАХ для вимірювання температури, схема якого представлена на Рис. 1, дозволяє усунути вплив вимірювальної температури на поверхню звукопроводу завдяки наявності зовнішнього чутливого елемента та сприяє підвищенню точності процесу вимірювання завдяки наявності групи відбивачів.

Радіосенсор вологості на ПАХ

Усунення впливу вимірювальної фізичної величини на поверхню звукопроводу сенсору на ПАХ є важливою задачею при конструюванні сенсорів не лише температурних, а і сенсорів вологості. Так, функціонування сенсорів вологості на ПАХ [3], в якому на поверхні звукопроводу, покритого вологопоглинальною мембраною, розташовані два ЗШП ПАХ, вимагає безпосереднього контакту звукопроводу із вимірюваною вологістю, що негативно впливає на точність вимірювання та на функціонування пристрою (термін безвідмовної роботи, надійність тощо). Такий недолік може бути усуненим з використанням схеми сенсору вологості на ПАХ із

зовнішнім чутливим до вимірювальної вологості елементом (Рис. 6) [7],

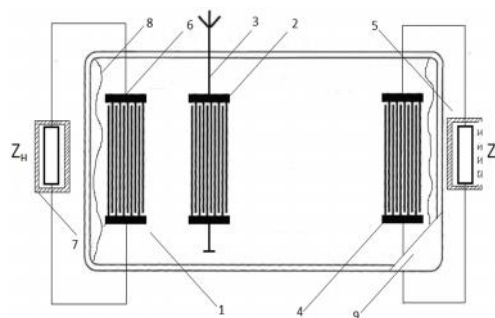


Рис. 6 Сенсор вологості на ПАХ

Сенсор вологості на ПАХ (Рис. 6) містить п'єзоелектричний звукопровід 1, на поверхні якого розташований ЗШП 2, з'єднаний з антеною 3, ЗШП 4, що з'єднаний із зовнішнім чутливим до вимірюваної вологості елементом - терморезистором 5, та ЗШП 6, що з'єднаний із розміщеним у герметичному корпусі терморезистором 7. Для зменшення рівня помилкових сигналів та забезпечення режиму біжучої хвилі, на торцях звукопроводу нанесені поглиначі ПАХ 8. Сенсор, окрім терморезистора 5, розміщено у герметичному корпусі 9.

Відповідно до співвідношення (1), модуль коефіцієнту відбиття (а отже і амплітуда відбитого імпульсу) від ЗШП 4, навантаженого на терморезистор 5, залежить від значення провідності терморезистора 5, що, в свою чергу, залежить від значення температури, що діє на нього.

Аналогічно визначається залежність від температури модуля коефіцієнта відбиття сигналу від ЗШП 6, навантаженого на терморезистор 7.

Оскільки терморезистор 5 розміщений у негерметичному корпусі, зміна вологості навколишнього середовища призведе до більшого охолодження терморезистора 5 порівняно із розміщеним у герметичному корпусі терморезистором 7. Різниця в температурах терморезисторів 5 та 7 спричинює відмінність їхніх опорів, а тому і відмінність модулів коефіцієнтів відбиття сигналів від ЗШП 4 та 6. По зміні амплітуди сигналу, відбитого від терморезистора, розміщеного у негерметичному корпусі, відносно амплітуди сигналу, відбитого від розміщеного у герметичному корпусі терморезистора, отримують інформацію про значення вимірюваної вологості.

При прийнятті конструктивних параметрів, описаних вище, зміна температури від 10°C до 45°C призводить до зміни опору терморезистора від 50 до 170 Ом. Така зміна опору зумовлює зміну модуля коефіцієнта відбиття від навантаженого на терморезистор ЗШП 4 та амплітуди відбитого імпульсу на 10 дБ відповідно до (1) порівняно із амплітудою імпульсу, відбитого від ЗШП 6.

Таким чином, порівнюючи величини обох сигналів, з використанням психометричних таблиць можна отримати інформацію про значення вимірюваної вологості, при цьому покази пристрою не залежатимуть від згасання вимірювального сигналу внаслідок проходження відстані між сенсором та

пристроєм опитування і обробки інформації.

Висновки

В результаті використання приведених схем радіосенсорів для дистанційного вимірювання температури та вологості можна підвищити точність процесу вимірювання за рахунок формування опорного сигналу та усунути вплив негативних факторів навколишнього середовища на поверхню звукопроводу завдяки використанню зовнішнього чутливого до вимірювальної фізичної величини елемента.

Література

1. Черненко Д. В., Кузьменко О. М. Жовнір М. Ф. Вимірювальні перетворювачі тиску на основі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль / Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. – 2013. – Вип. 1. – С. 62–66.
2. Пат. № UA77113U, Україна, МПК (2013.1) H03H 9/00, G01L 7/08 (2006.1), H04Q 5/22 (2006.1). Сенсор на поверхневих акустичних хвилях для вимірювання тиску / Д. В. Черненко, М. Ф. Жовнір. Опубл. 25.01.2013, бюл. № 2
3. Caliendoy C., Veronay E. and Anisimkin V. I. Surface acoustic wave humidity sensors: a comparison between different types of sensitive membrane /

- Smart Mater. Struct. – 1997 – № 6. - P.707–715.
4. Катаев В.Ф., Багдасарян А.С., Карапетьян Г.Я., Днепровский В.Г. Датчики на поверхностных акустических волнах для дистанционного контроля температуры / Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008, – №5 – С. 31–32.
5. Кузьменко О.М., Жовнір М.Ф. Сенсор на поверхневих акустичних хвилях для дистанційного вимірювання температури / Вісник КрНУ ім.М.Остроградського. – 2013. – Вип. 3. – С.113-117.
6. Пат. № UA88694, Україна, МПК(2014.01) G01D 5/00. Сенсор фізичної величини на поверхневих акустичних хвилях / М. Ф. Жовнір, О. М. Кузьменко, Л. Д. Писаренко, опубл. 25.03.2014, бюл.6.
7. Пат. № UA 94022, Україна, МПК(2006.01), G01S 13/26. Сенсор вологості на поверхневих акустичних хвилях / М. Ф. Жовнір, О. М. Кузьменко, Л. Д. Писаренко, опубл. 27.10.2014, бюл. 20.
8. Морган Д. . Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. – М.: Радио и связь. – 1990. – 416 с.
9. Резисторы. Справочник / В.В. Дубровский, Д.М. Иванов, Н.Я. Прагусевич и др. – М.: Радио и связь, 1991 – 528 с.