

**ПАСИВНІ БЕЗПРОВІДНІ СЕНСОРИ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ
ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ****О. М. Кузьменко**

Національний технічний університет України "КПІ"

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: kuzmenko-oksana@i.ua

Приведені схеми безпровідних пасивних сенсорів на поверхневих акустичних хвилях для дистанційного вимірювання температури та вологості, конструкції яких дозволяють підвищити точність процесу вимірювання порівняно з існуючими аналогами та усунути безпосередній вплив факторів навколишнього середовища на поверхні звукопроводів сенсорів. Описані принципи роботи сенсорів, побудованих за запропонованими схемами, та приведені їхні основні конструктивні параметри. Наведена залежність коефіцієнту відбиття сигналу від зустрічно-штирового перетворювача, навантаженого на зовнішній чутливий елемент. За допомогою приведеної еквівалентної схеми отримана залежність амплітуди відбитого сигналу від значення опору зовнішнього чутливого до вимірювальної фізичної величини елемента.

Ключові слова: ПАХ сенсор, температура, вологість, терморезистор, коефіцієнт відбиття.**ПАССИВНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ ДАТЧИКИ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ
ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ****О. Н. Кузьменко, Н. Ф. Жовнир**

Национальный технический университет Украины "КПИ"

просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: kuzmenko-oksana@i.ua

Представлена схема беспроводных пассивных датчиков на поверхностных акустических волнах для дистанционного измерения температуры и влажности, конструкции которых позволяют повысить точность процесса измерения по сравнению с существующими аналогами и устранить непосредственное влияние факторов окружающей среды на поверхности звукопроводов сенсоров. Описаны основные принципы работы сенсоров, построенных по предложенным схемам, и приведены их основные конструктивные параметры. Представлена зависимость коэффициента отражения сигнала от встречно-штирового преобразователя, нагруженного на внешний чувствительный элемент. С помощью приведенной эквивалентной схемы получена зависимость амплитуды отраженного сигнала от значения сопротивления внешнего чувствительного к измеряемой физической величине элемента.

Ключевые слова: ПАВ датчик, температура, влажность, терморезистор, коэффициент отражения.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На сьогодні, сенсори, з одного боку, є самостійними, конструктивно автономними засобами вимірювання, а з іншого боку – важливими невід’ємними складовими інформаційно-вимірювальних систем, систем автоматичного контролю, систем управління технологічними процесами тощо. За інформацією, отриманою 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 (висока температура, радіоактивність, висока вологість 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 пасивні безпровідні сенсори, побудовані на основі лінії затримки (ЛЗ) на поверхнево-акустичних хвилях (ПАХ) [1–9]. Такі сенсори не вимагають наявності джерел живлення та кабельних ліній зв’язку із при-

строями приймання та обробки вимірювальної інформації, а тому є стійкими до відмов в таких умовах експлуатації

Тому вдосконалення характеристик існуючих і розробка нових пасивних безпровідних сенсорів є ключовими напрямками дослідження та метою роботи, що спрямовані на покращення надійності контролю вимірювальних величин та безвідмовності і безпеки функціонування контрольованих об’єктів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Принцип роботи пасивних безпровідних сенсорів полягає у взаємодії вимірюваної фізичної величини із чутливою до її впливу поверхнею ЛЗ і формуванні модульованого затриманого сигналу, що є носієм інформації про вимірювану величину і який передається від сенсору до пристрою опитування та обробки вимірювальної інформації від сенсору по радіоканалу. [1–9]. Недоліком сенсорів [6–9] є необхідність безпосереднього контакту агресивного середовища із поверхнею ЛЗ, що зменшує тривалість експлуатації сенсору (через можливі забруднення та руйнації його поверхні) і призводить до втрати інформаційного сигналу. Цього недоліку позбавлені пасивні безпровідні сенсори на ПАХ із зовнішніми чутливими до вимірювальної фізичної величини елементами [1–5]. Приведені у [1–5] сенсори 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 залежить від значення вимірюваної фізичної величини коефіцієнту відбиття (а отже, й амплітуди відбитого імпульсу) від ЗШП, який з'єднаний із зовнішнім чутливим елементом. Таким чином, за параметрами відбитого сигналу від навантаженого на зовнішній елемент ЗШП можна отримати інформацію про значення вимірювальної фізичної величини. Проте, недоліком сенсорів, приведених у [4, 5], 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 недоліків сенсорів, представлених у [4, 5], вільний сенсор на ПАХ для вимірювання температури (рис. 1), що 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 вимірювальної величини 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 входним/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

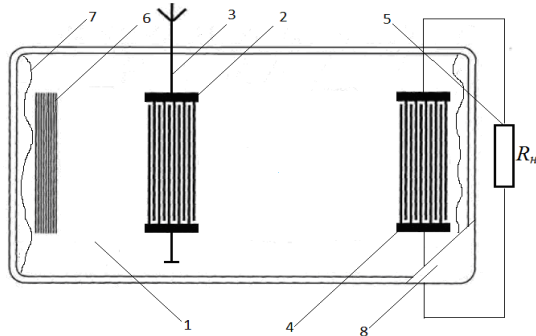


Рисунок 1 – Сенсор фізичної величини на ПАХ

Сигнал радіозапиту від пристрою опитування та обробки інформації поступає на вхід антени 3 сенсору. ЗШП 2 за рахунок зворотного п'єзо ефекту 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'єзо ефекту 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'єзо ефекту 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 [10]:

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

де $G_a(\omega_0)$ – активна складова провідності ЗШП 4 на центральній частоті; $C_T = N \cdot C_S \cdot W$ – 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.

Приймаємо такі конструктивні параметри:

- фазова швидкість ПАХ $V = 3992$ м/с (як звукопровід використано УХ – зріз ніобату літія);
- центральна частота $f = 434$ МГц (довжина ПАХ $\lambda_{\text{ПАХ}} = 9,2 \cdot 10^{-6}$ 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;
- як зовнішній чутливий до вимірювальної фізичної величини елемент 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 [11]:

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

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

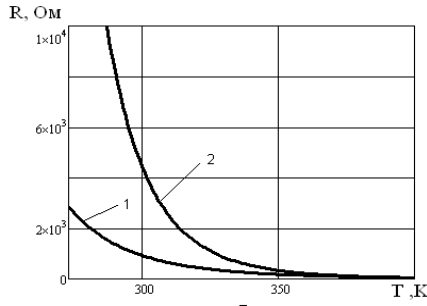


Рисунок 2 – Температурні залежності опорів терморезисторів ММТ–12 (1) і КМТ–12 (2)

Відповідно до співвідношення (2) опір терморезистора при 100 °С становить 55 Ом, отже зміна температури від 25 до 100° С призводить до зміни опору терморезистора від 1000 до 55 Ом. Така зміна опору зумовлює зміну коефіцієнту 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.

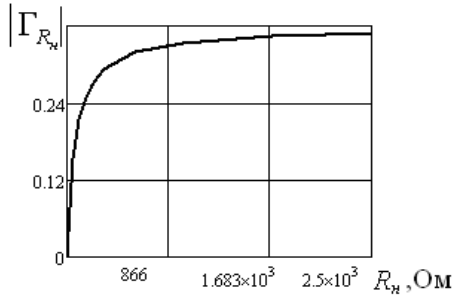


Рисунок 3 – Залежність модуля коефіцієнту відбиття $|\Gamma_{R_n}|$ від опору навантаження R_n вихідного ЗШП

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 сенсору:

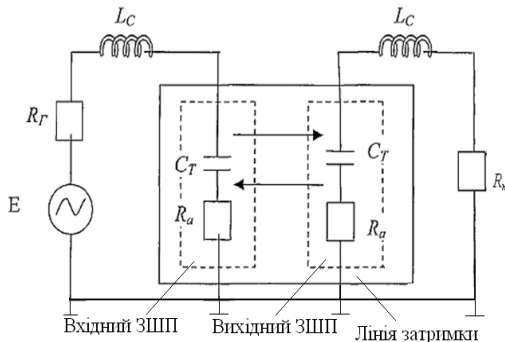


Рисунок 4 – Еквівалентна схема сенсору із підключеними антеною (представленою джерелом напруги E із внутрішнім опором R_g) та опором навантаження R_n до вхідного та вихідного ЗШП відповідно

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:

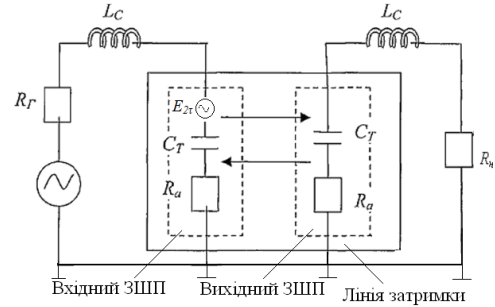


Рисунок 5 – Еквівалентна схема сенсору через подвоєний час затримки

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

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

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:

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

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

Враховуючи, що опір антени R_g дорівнює, як правило, 50 Ом, а значення індуктивності L вибирається з 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 (у тому і від значення вимірюваної температури) амплітуди вимірювального сигналу, що генеруватиметься в простір антеною та надходитиме на пристрій опитування й обробки інформації.

При порівнянні в пристрої опитування та обробки інформації амплітуди вимірювального сигналу, відбитого від ЗШП 4, та амплітуди опорного сигна-

лу, відбитого від групи відбивачів 7, вимірюється температура, що діє на терморезистор. Отже, використання сенсору на ПАХ для вимірювання температури, схема якого приведена 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.

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 [9], в якому на поверхні звукопроводу, покритого вологопоглинаючою 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 із використанням схеми сенсору вологості на ПАХ із зовнішнім чутливим до вимірювальної вологості елементом (рис. 6).

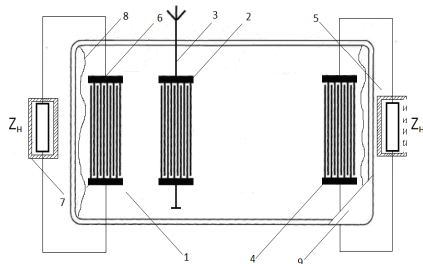


Рисунок 6 – Сенсор вологості на ПАХ

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 й 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 і 7 спричинює відмінність їхніх опорів, а тому і відмінність модулів кое-

фіцієнтів відбиття сигналів від ЗШП 4 і 6. За зміною 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 до 45° С призводить до зміни опорів терморезистора від 50 до 170 Ом. Така зміна опорів 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 і пристроєм опитування й обробки інформації.

ВИСНОВКИ. В результаті використання приведених схем сенсорів для дистанційного вимірювання вологості та температури 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. Патент № UA88694, Україна, МПК (2014.01), G01D 5/00. Сенсор фізичної величини на поверхневих акустичних хвилях / Жовнір М.Ф., Кузьменко О.М., Писаренко Л.Д. опубл.25.03.14.
2. Кузьменко О.М., Сіренко Д. Сенсор фізичної величини на поверхневих акустичних хвилях // Збірник тез XI Всеукраїнської наукової конференції студентів і молодих вчених «Молодь: освіта, наука, духовність». – К.: Університет «Україна», 2014. – С. 241–242.
3. Кузьменко О.М, Жовнір М.Ф. Сенсор на поверхневих акустичних хвилях для дистанційного вимірювання температури // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 3/2013 (80). – С. 113–117.
4. Патент RU 2296950C2, РФ, МПК7, G01D5/00. Датчик дистанционного контроля физической величины на поверхностных акустических волнах / Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Гуляев Ю.В., Карапетьян Г.Я.; опубл. 27.04.2009.
5. 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.
6. Черненко Д.В., Кузьменко О.М., Жовнір М.Ф. Вимірювальні перетворювачі тиску на основі збудження електричного поля поверхневих акустичних хвиль // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 1/2013 (78). – С. 62–66.
7. Патент № 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 / Черненко Д.В., Жовнір М.Ф.; заявник Черненко Д.В., Жовнір М.Ф.; опубл. 25.01.2013; Бюл. № 2.

8. Патент RU 2427943C1, РФ, МПК7, H01L 41/08. Пассивный датчик на поверхностных акустических волнах / Калинин В.А., Плесский В.П., Шубарев В.А., Мельников В.А.

9. 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. – PP. 707–715.

10. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. – М.: Радио и связь, 1990. – 416 с.

11. Резисторы: Справ очник / В.В. Дубровский, Д.М. Иванов, Н.Я. Пратусевич и др. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.

WIRELESS PASSIVE SURFACE ACOUSTIC WAVE SENSORS FOR REMOTE TEMPERATURE AND HUMIDITY MEASUREMENT

O. Kuzmenko

National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”
prosp. Peremogy 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: kuzmenko-oksana@i.ua

The schemas of wireless passive surface acoustic wave sensors (SAW) for remote temperature and humidity measurements are shown. Presented sensor constructions allow increasing measurement accuracy so to avoid a direct influence of environmental factors on sensors surfaces comparatively with existing analogues. Operation principles of the sensors designed according to presented schemas are described. The main constructive parameters of such sensors are given. The dependence of the reflective coefficient of output signal of the transducers loaded on an external sensitive element on impedance of an external element is shown. With the help of presented sensor equivalent schema, the dependence of amplitude of reflective signal on impedance of the external element sensitive to physical quantity measured was obtained.

Key words: SAW sensor, temperature, humidity, thermistor, reflective coefficient.

REFERENCES

1. Zhovnir, M.F., Kuzmenko O.N., and Pusarenko L.D. (2014), “Sensor on surface acoustic waves for physical quantity”, Pat. № UA88694 Ukraine, MPK G01D 5/00, published 25.03.14.

2. Kuzmenko, O.N., Sirenko, D.N. (2014), “Sensor on surface acoustic waves for physical quantity”, *Youth, education, science, spirituality. Conference proceedings of the 11 th International conference of students and young scientists*, Kyiv, University “Ukraine”, pp. 241–242.

3. Kuzmenko, O.N. (2013), “Sensor on surface acoustic waves for remote temperature measurement”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 3 (80), pp. 113–117.

4. Bahdasaryan, A.S., Bahdasaryan, S.A., Karapetyan, H.Ya., and Hulyaev, Yu.V. (2009), “Sensor on surface acoustic waves for remote control of physical quantity”, Pat. № RU 2296950C2, Russia, MPK7, G01D5/00, published 27.04.2009.

5. Kataev, V.F., Bahdasaryan, A.S., Karapetyan, H.Ya., and Dneprovskii, V.H. (2008), “Sensor on surface acoustic waves for remote control of temperature”, *Technology and construction of electronic devices*, vol. 5, pp. 31–32.

6. Chernenko, D.V., Zhovnir, M.F. and Kuzmenko, O.N. (2013), “Instrument pressure transducers on the base of excitation of surface acoustic waves electric field”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 1 (78), pp. 62–65.

7. Chernenko, D.V., Zhovnir, M.F. (2006), “Sensor on surface acoustic waves for pressure measurement”, Pat. № UA77113U, Ukraine, MPK (2013.1) H03H 9/00, G01L 7/08 (2006.1), H04Q 5/22, published. 25.01.2013.

8. Kalinin, V.A., Plesskui, V.P., Shubarev, V.A., and Melnikov, V.A. (2008), “Passive sensor on surface acoustic waves”, Pat. RU 2427943C1, Russia, MPK7, H01L 41/08.

9. Caliendoy, C., Veronay, E., and Anisimkin, V.I. (1997), “Surface acoustic wave humidity sensors: a comparison between different types of sensitive membrane”, *Smart Mater. Struct.*, no. 6, pp. 707–715.

10. Morgan, D. (1990), *Ustroistva obrabotki signalov na poverkhnostnikh akusticheskikh volnakh* [Surface – wave devices for signal processing], Radio i Sviaz, Moscow, Russia.

11. Dubrovskii, V.V., Ivanov, D.M., and Pratusovich, N.Ya. (1991), *Spravochnik* [Reference book], Radio i Sviaz, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 24.07.2014.