

К. В. Огородник¹
О. О. Лазарєв¹
Ю. С. Кравченко¹

УЛЬТРАЗВУКОВІ АВТОГЕНЕРАТОРНІ ВИМІРЮВАЧІ ПАРАМЕТРІВ СЕРЕДОВИЩ

¹Вінницький національний технічний університет

На сьогодні контрольно-вимірювальну апаратуру на основі ультразвуку застосовують в різних галузях науки й техніки. Питання підвищення точності ультразвукових засобів контролю шляхом розробки нового класу ультразвукових резонансних методів вимірювання чи контролю величин на основі використання стоячої ультразвукової хвилі є актуальним. Метою роботи є покращення технічних параметрів ультразвукових вимірювачів за рахунок використання явища резонансу та стоячої хвилі. Основою резонансного методу контролю є дослідження параметрів та характеристик стоячих акустичних хвиль, які виникають в середовищі внаслідок інтерференції падаючої та відбитих акустичних хвиль.

Запропоновано математичну модель ультразвукового резонансного методу вимірювання параметрів рідких та газоподібних середовищ, яка може бути застосована для вимірювального контролю таких параметрів, як густина, температура, товщина об'єкта контролю тощо. Для перевірки адекватності запропонованої моделі поширення ультразвукової хвилі проведено її комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження. В якості досліджуваного середовища обрано повітря (температура 20 °С, швидкість звуку 343 м/с, атмосферний тиск 1 атм). Змодельовано відповідно до запропонованої математичної моделі часову діаграму сигналу на приймачі для відстані 34,3 мм, коли виконується умова резонансу, й для відстані 34,73 мм, коли виконується умова антирезонансу. Амплітуди сигналів відрізняються приблизно в 5 разів, що підтверджує чутливість моделі. Наведено залежність амплітуди сигналу на приймачі для частот сигналу 170...205 кГц за відстані передавач-приймач 35,85 мм та швидкості звуку 340,8 м/с. Результати моделювання мають високу збіжність з результатами експериментальних досліджень, що підтверджує адекватність математичної моделі. Це дозволяє на її основі запропонувати новий клас автогенераторних ультразвукових методів вимірювального контролю параметрів середовищ. Описані структурні схеми та принцип дії розроблених автогенераторних вимірювачів товщини, температури газу та густини об'єкта контролю.

Ключові слова: резонансний метод, ультразвук, стояча хвиля, вимірювач товщини, вимірювач густини, вимірювач температури газу.

Вступ

Контрольно-вимірювальну апаратуру на основі ультразвуку застосовують в різних галузях науки й техніки. Ультразвукові методи вимірювання використовують для контролю параметрів твердих речовин та рідин, а останнім часом і для визначення параметрів газів. Кількість наукових публікацій з цієї тематики постійно зростає, що свідчить про актуальність таких досліджень. В основі побудови ультразвукових приладів вимірювального контролю лежить чітка залежність параметрів та характеристик зондувального ультразвукового сигналу від параметрів та характеристик об'єкта дослідження [1].

Існує велика кількість ультразвукових методів вимірювального контролю, але загалом їх поділяють на дві групи: активні та пасивні методи. Перші передбачають випромінювання в напрямку об'єкта дослідження акустичних хвиль, їх прийом та аналіз. Найширше застосування серед них отримали методи відбиття (дзеркальний, ехо-імпульсний, дельта-метод тощо) та проходження (тіньовий, різницевий, велосиметричний тощо). Останніми роками також застосовуються методи вільних чи вимушених коливань, які базуються на збудженні коливань у об'єкті дослідження шляхом зовнішнього впливу і їх подальшому аналізі. Пасивні ж методи вимірювання полягають у

прийманні коливальні джерела яких є сам об'єкт дослідження [2].

Кожен з вказаних методів контролю має певні недоліки, основними з яких є низька точність внаслідок неоднорідності структури об'єкта дослідження, неточність у реєстрації положення початку імпульсного сигналу, зумовлену розмиттям фронту наростання сигналу, залежність чутливості, а, отже, і частоти імпульсного сигналу від розмірів об'єкта, складність обробки сигналу, пов'язану з використанням багатоканальної структури ультразвукового засобу контролю.

Отже, питання підвищення точності ультразвукових засобів контролю шляхом розробки нового класу ультразвукових резонансних методів вимірювання чи контролю величин на основі використання стоячої ультразвукової хвилі є актуальним.

Метою роботи є покращення технічних параметрів ультразвукових вимірювачів за рахунок використання явища резонансу та стоячої хвилі.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі задачі:

- теоретичне обґрунтування роботи ультразвукового автогенераторного вимірювача;
- розробка та дослідження ультразвукового автогенераторного вимірювача товщини;
- розробка та дослідження ультразвукового автогенераторного вимірювача температури газу;
- розробка та дослідження ультразвукового автогенераторного вимірювача густини.

Теоретичне обґрунтування роботи ультразвукового автогенераторного вимірювача

Основою резонансного методу контролю є дослідження параметрів та характеристик стоячих акустичних хвиль, які виникають в середовищі внаслідок інтерференції падаючої та відбитих акустичних хвиль. В системі випромінювач-приймач виникає резонанс за умови [3]

$$L = n\lambda/2, \quad (1)$$

де L — відстань між приймачем та випромінювачем; n — ціле число, λ — довжина акустичної хвилі в середовищі, що досліджується.

Оскільки довжина хвилі залежить від частоти f та швидкості v звуку в цьому середовищі ($\lambda = v/f$), а швидкість v залежить від таких параметрів середовища, як пружність та густина, які, в свою чергу, залежать від складу середовища, температури, тиску тощо, то, подаючи сигнали різних частот та реєструючи частоту резонансу, можна визначати параметри середовища.

Амплітуда сигналу в площині приймача визначається за виразом

$$A(L, t) = A_{II}(L, t) + A_{B1}(L, t) + A_{B2}(L, t) + \dots + A_{Bk}(L, t), \quad (2)$$

де $A_{II}(L, t)$ — амплітуда падаючої акустичної хвилі; $A_{B1}(L, t)$, $A_{B2}(L, t)$, $A_{Bk}(L, t)$ — амплітуди, відповідно, першої, другої та k -ї відбитої хвилі. Амплітуда падаючої хвилі визначається за виразом

$$A_{II}(L, t) = A_0 \sin(2\pi ft). \quad (3)$$

Амплітуда відбитої хвилі визначається за виразом

$$A_{Bk}(L, t) = R^{2k} A_0 e^{-2\delta kL} \sin \left[2\pi f \left(\left(\frac{-2kL}{v} \right) + t \right) \right], \quad (4)$$

де R — коефіцієнт відбиття; δ — коефіцієнт затухання хвилі в середовищі.

Для перевірки адекватності запропонованої моделі поширення ультразвукової хвилі проведено її комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження. Як досліджуване середовище використано повітря (температура 20 °С, швидкість звуку 343 м/с, атмосферний тиск 1 атм). Оскільки ультразвук суттєво затухає в повітрі (коефіцієнт затухання близько 12 дБ/м на частоті 200 кГц) та внаслідок неповного відбиття (взято коефіцієнт відбиття 0,9) в моделюванні для спрощення обмежимося лише десятою відбитою хвилею. При цьому вираз математичної моделі для моделювання має вигляд

$$A(L, t) = \sum_{k=0}^{10} R^{2k} A_0 e^{-2\delta kL} \sin \left[2\pi f \left(\left(\frac{-2kL}{v} \right) + t \right) \right]. \quad (5)$$

На рис. 1 показано змодельовану відповідно до запропонованої математичної моделі часову діаграму сигналу на приймачі для відстані 34,3 мм, коли виконується умова резонансу (а), й для відстані 34,73 мм, коли виконується умова антирезонансу (б). З графіків на рис. 1 видно, що амплітуди сигналів відрізняються приблизно в 5 разів, що підтверджує чутливість моделі.

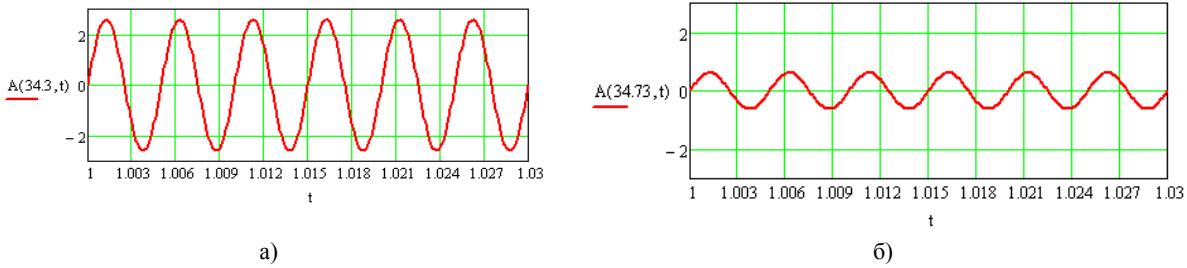


Рис. 1. Часові діаграми сигналу на приймачі за умови: а — резонансу; б — антирезонансу

На рис. 2а наведена залежність амплітуди сигналу на приймачі для частот сигналу 170...205 кГц за відстані передавач-приймач 35,85 мм та швидкості звуку 340,8 м/с. Квадратами показані результати експериментальних досліджень (вимірювання виконувалися лише для точок максимумів та мінімум амплітуди сигналу). Результати моделювання мають високу збіжність з результатами експериментальних досліджень, що підтверджує адекватність математичної моделі. Для вищої збіжності в математичній моделі необхідно враховувати амплітудно-частотні характеристики ультразвукових передавача і приймача.

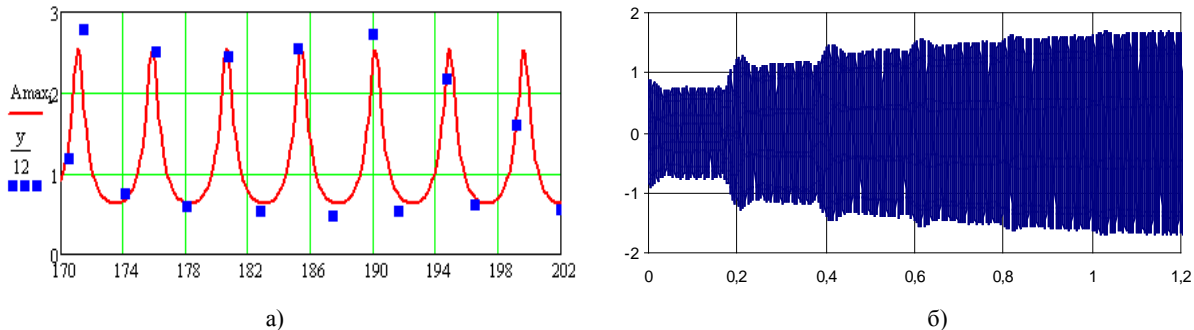


Рис. 2: а — залежність амплітуди сигналу на приймачі для частот сигналу 170...205 кГц; б — експериментальна залежність наростання амплітуди сигналу на приймачі на частоті 171,428 кГц

Час надходження відбитої хвилі залежить від швидкості ультразвуку у середовищі, а, отже, від таких параметрів середовища, як густина, пружність, вологість тощо. Запропоновано ультразвуковий метод вимірювального контролю параметрів середовища, який полягає у визначенні моментів надходження на приймач чергової відбитої хвилі. Результати експериментальних досліджень залежності наростання амплітуди сигналу на приймачі для частоти 171,428 кГц показано на рис. 2б. З графіка видно, що спостерігається стрибкоподібне наростання амплітуди в моменти надходження чергової відбитої хвилі, що підтверджує можливість практичного застосування запропонованої математичної моделі.



Рис. 3. Експериментальна установка для дослідження ультразвукового автогенераторного вимірювача

На рис. 3 показана установка, використана для експериментальних досліджень, що складається з двох ультразвукових випромінювачів на 200 кГц та плати автогенератора.

Розробка та дослідження ультразвукового автогенераторного вимірювача товщини

У розробленому ультразвуковому автогенераторному вимірювачі товщини, в якому завдяки введенню нових елементів і зв'язків між ними досягається можливість вимірювання малих змін товщини, досягнуто підвищення чутливості, точності і завадостійкості контролю процесу вимірювання.

На рис. 4 показана структурна схема товщиноміру.

Пристрій працює так. З поданням живлення в систему перший електроакустичний перетворювач 1 та другий електроакустичний перетворювач 3 (випромінювач-приймач), які під'єднані в коло по-

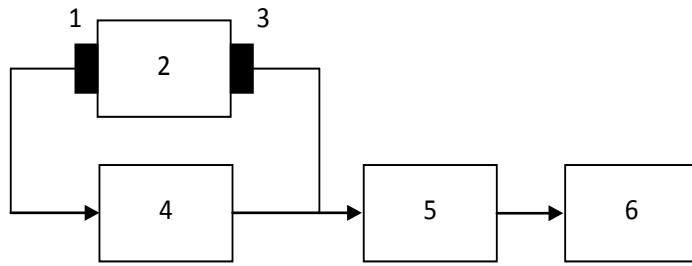


Рис. 4. Структурна схема ультразвукового автогенераторного вимірювача товщини

у разі фіксованої товщини об'єкта контролю 2 визначається за виразом

$$f_p = \frac{nV_{us}}{2L}, \quad (6)$$

де V_{us} — швидкість ультразвуку в об'єкті контролю 2.

Звідки знаходиться товщина об'єкта

$$L = \frac{nV_{us}}{2f_p}. \quad (7)$$

Для кожного значення f_p з формули (7) існує множина відповідних значень товщини (рис. 5) залежно від значення n , хоч на практиці виходячи з амплітудно-частотних характеристик системи передавач-приймач ця множина скорочується до одного-двох значень товщини. Але в межах товщин $L_x \dots L_x + \lambda$ (в межах довжини однієї хвилі) існує однозначна залежність резонансної частоти f_p та товщини L .

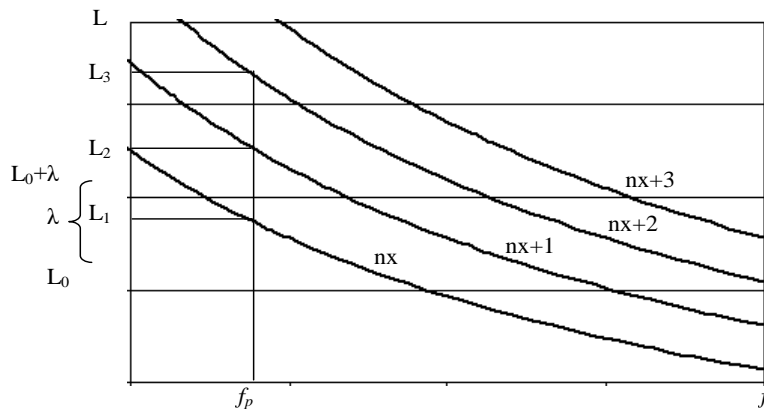


Рис. 5. Залежності товщини від резонансної частоти для різних значень n

За вимірним значенням резонансної частоти f_p , у мікропроцесорному блоці обробки сигналу 5 розраховується множина значень L для відповідних значень $n = 1 \dots k$, де k — ціле число, що залежить від діапазону вимірювань. Далі вибирається значення L , яке потрапляє у заданий діапазон вимірювання $L_0 \dots L_0 + \lambda$, яке і буде істинним значенням шуканої товщини. Це значення і виводиться на екран індикатора 6.

Використання запропонованого ультразвукового автогенераторного вимірювача товщини має суттєві переваги, оскільки в ньому не використовуються імпульсні сигнали, він є менш інерційним і більше завадозахищеним за рахунок використання власної частоти п'єзоелементів.

Розробка та дослідження ультразвукового автогенераторного вимірювача температури газу

В цій частині роботи вирішується завдання створення ультразвукового автогенераторного вимірювача температури газу, в якому завдяки введенню нових елементів і зв'язків між ними досягається можливість вимірювання малих змін температури, що підвищує чутливість та точність контролю процесу вимірювання.

Структурна схема цього вимірювача аналогічна схемі вимірювача товщини (рис. 4). В системі випромінювач-приймач виникає резонанс за умови (1). Частота ж резонансу за фіксованої товщини об'єкта контролю 2 визначається виразом (6).

Швидкість звукових коливань в газі визначається за виразом

$$V_{us} = \sqrt{\chi RT}, \quad (8)$$

де χ — показник адиабати газу, R — газова стала, T — абсолютна температура.

Підставляючи (8) в (6), отримаємо вираз для визначення температури:

$$T = \frac{4L^2 f_p}{n^2 \chi R}. \quad (9)$$

Для кожного значення f_p з формули (9) існує множина відповідних значень температури залежно від значення n (рис. 6), яке на практиці, виходячи з амплітудно-частотних характеристик системи передавач-приймач, скорочується до одного-двох значень. Але в межах діапазону температур $T_x \dots T_x K$, де K — коефіцієнт перекриття $K = (n+1/n)^2$ існує однозначна залежність резонансної частоти f_p та температури T . Наприклад, у разі використання ультразвукових випромінювачів з центральною частотою 40 кГц та діапазоном генерації 35...45 кГц з відстанню між ними 9 мм, діапазон вимірювання температури повітря складає від 246 К до 408 К для $n = 2$ та від 110 К до 181 К для $n = 3$.

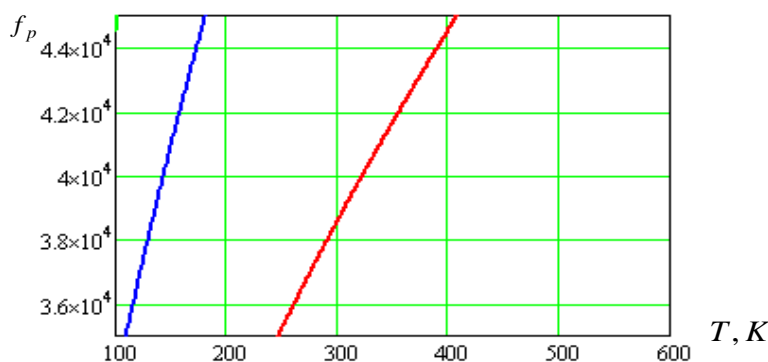


Рис. 6. Залежності резонансної частоти від температури для різних значень n

За виміряними значеннями резонансної частоти f_p , у мікропроцесорному блоці обробки сигналу 5 розраховується множина значень T для відповідних значень $n = 1 \dots k$, де k — ціле число, що залежить від діапазону вимірювань. Далі вибирається значення T , яке потрапляє у заданий діапазон вимірювання, яке і буде істинним значенням шуканої температури. Обчисливши температуру, мікропроцесорний блок, за табличним значенням показника адиабати, розраховує уточнене значення температури. Це значення виводиться на індикатор 6.

Запропонований ультразвуковий автогенераторний вимірювач температури газу має суттєві переваги, оскільки в процесі вимірювання використовується ділянка вимірювальної характеристики з вищою крутістю, він є менш інерційним і більше захищений, через що підвищується точність та чутливість вимірювань.

Розробка та дослідження ультразвукового автогенераторного вимірювача густини

В цій частині роботи вирішується завдання створення ультразвукового автогенераторного вимірювача густини, в якому через введення нових елементів і зв'язків між ними досягається можливість вимірювання малих змін густини, що підвищує чутливість та точність контролю процесу вимірювання.

Загалом структурна схема ультразвукового автогенераторного вимірювача густини відповідає схемі на рис. 4.

В системі випромінювач-приймач виникає резонанс за умови (1). Частота резонансу за фіксованої товщини досліджуваного середовища 2 визначається за виразом (6).

Враховуючи це, отримаємо:

$$V_{us} = \lambda f_p = \frac{Z}{\rho} \Rightarrow \lambda = \frac{Z}{f_p \rho} \Rightarrow \rho = \frac{nZ}{2f_p L}, \quad (10)$$

де Z — акустичний опір середовища.

Для кожного значення f_p з формули (10) існує множина відповідних значень густини (рис. 7) залежно від значення n , хоч на практиці, виходячи з амплітудно-частотних характеристик системи передавач-приймач, ця множина скорочується до одного-двох значень густини. Але в межах густин $\rho_x \dots \rho_x + \lambda$ (в межах довжини однієї хвилі) існує однозначна залежність резонансної частоти f_p та густини ρ .

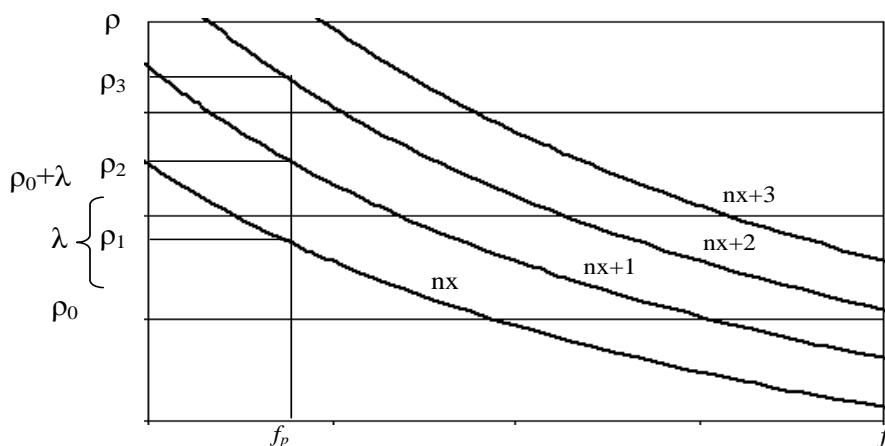


Рис. 7. Залежності густини від резонансної частоти для різних значень n

За вимірним значенням резонансної частоти f_p , у мікропроцесорному блоці обробки сигналу 5 розраховується множина значень ρ для відповідних значень $n = 1 \dots k$, де k — ціле число, що залежить від діапазону вимірювань. Далі вибирається значення ρ , яке потрапляє у заданий діапазон вимірювання $\rho_0 \dots \rho_0 + \lambda$, яке і буде істинним значенням шуканої густини.

Використання такого ультразвукового вимірювача густини має суттєві переваги, оскільки в процесі вимірювання використовується ділянка вимірювальної характеристики з вищою крутістю, завдяки чому підвищується точність та чутливість вимірювань.

Висновки

Запропоновано математичну модель ультразвукового резонансного методу вимірювання параметрів рідких та газоподібних середовищ, яка може бути застосована для вимірювального контролю таких параметрів, як густина, температура, товщина об'єкта контролю тощо.

Наведено результати моделювання та експериментальні дані, висока збіжність яких свідчить про адекватність запропонованої моделі та дозволяє на її основі запропонувати новий клас автогенераторних ультразвукових методів вимірювального контролю параметрів середовищ.

Описано структурну схему та принцип дії розроблених автогенераторних вимірювачів товщини, температури газу та густини об'єкта контролю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Albert S. Birks, and Robert E. Green, Jr., Technical Editors ; Paul McIntire, Editor. *Ultrasonic testing*, 2nd ed. Columbus, OH : American Society for Nondestructive Testing, 1991. ISBN 0-931403-04-9.
- [2] Charles Hellier (2003). "Chapter 7 — Ultrasonic Testing," *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw-Hill. ISBN 0-07-028121-1.
- [3] N. A. Filinyuk, K. V. Ogorodnik, L. B. Lishchinskaya, S. E. Shveykina, and A. A. Lazarev, "The Way of Measurement of the Two-Port Network Stability Invariant Factors," 2006 16th *International Crimean Microwave and Telecommunication Technology, Sevastopol, Crimea*, 2006, pp. 791-792. <https://doi.org/10.1109/CRMICO.2006.256202>.
- [4] I. N. Ermolov, and Yu.V. Lange, *Nondestructive testing: A guide in 7 vol*, V.V. Klyuev, Ed., vol. 3. *Ultrasonic inspection*. Moscow: Mechanical Engineering, 2004, 864 p.
- [5] A. F. Zatsepin, and V. E. Shcherbinina, *Acoustic measurements*. Moscow, Russia: Publishing House Yurayt, 2017, 209 p.
- [6] J. Y. Bilinsky, K. V. Ogorodnik, O. A. Lazarev, and A.V. Syrovatsky, "Development and research of the mathematical model of the resonance ultrasonic measurement control method," in *The 4th International Scientific Conference "Measurement, Control and diagnostics in technical systems" (VKDTS-2017)*, October 31 — November 2, 2017. Vinnitsa, Ukraine, 2017. pp. 159-160.

Рекомендована кафедрою електроніки та наносистем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.05.2019

Огородник Костянтин Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроніки та наносистем, e-mail: kostokord@gmail.com ;

Лазарєв Олександр Олександрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроніки та наносистем, e-mail: alexander.lazarev.vntu@gmail.com ;

Кравченко Юрій Степанович — канд. фіз.-мат. наук, доцент, професор кафедри електроніки та наносистем, e-mail: kravchenko_yu@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

K. V. Ogorodnyk¹
O. O. Lazarev¹
Yu. S. Kravchenko¹

Ultrasonic Self-oscillating Media Parameters Meters

¹Vinnytsia National Technical University

Today, ultrasound-based instrumentation equipment is used in various fields of science and technology. The issues of improving the accuracy of ultrasonic control devices by developing a new class of ultrasonic resonant methods for measuring or controlling quantities based on the use of a standing ultrasonic wave is relevant. The aim of the work is to improve the technical parameters of ultrasonic meters by using the phenomenon of resonance and standing wave. The basis of the resonant control method is the study of the parameters and characteristics of standing acoustic waves arising in the medium due to the interference of the incident and reflected acoustic waves. The paper proposes a mathematical model of the ultrasonic resonance method for measuring parameters of liquid and gaseous media, which can be used for measuring control of parameters such as density, temperature, thickness of the test object and the like. To test the adequacy of the proposed model of ultrasonic wave propagation, its computer simulation and experimental studies were carried out. Air was chosen as the test medium (temperature 20 °C, sound velocity 343 m/s, atmospheric pressure 1 atm). The time diagram of the signal at the receiver for a distance of 34,3 mm, when the resonance condition is satisfied, and for a distance of 34,73 mm, when the antiresonance condition is satisfied, is modeled according to the proposed mathematical model. The amplitudes of the signals differ about 5 times, which confirms the sensitivity of the model. The dependence of the amplitude of the signal at the receiver is given for signal frequencies of 170...205 kHz with a transmitter-receiver distance of 35,85 mm and a speed of sound of 340,8 m/s. The simulation results are highly consistent with the results of experimental studies, confirms the adequacy of the mathematical model. This allows, on its basis, to propose a new class of self-generating ultrasonic methods for measuring control of medium parameters. The block diagram and the principle of operation of the developed autogenerating meters for measuring the thickness, temperature of gas and density of the test object are described.

Keywords: resonance method, ultrasound, standing wave, thickness meter, density meter, gas temperature meter.

Ogorodnyk Konstantyn V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electronics and Nanosystems, e-mail: kostokord@gmail.com ;

Lazarev Oleksandr O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electronics and Nanosystems, e-mail: alexander.lazarev.vntu@gmail.com ;

Kravchenko Yurii S. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electronics and Nanosystems, e-mail: kravchenko_yu@ukr.net

К. В. Огородник¹
А. А. Лазарев¹
Ю. С. Кравченко¹

Ультразвуковые автогенераторные измерители параметров сред

¹Вінницький національний технічний університет

Сегодня контрольно-измерительную аппаратуру на основе ультразвука применяют в различных областях науки и техники. Вопрос повышения точности ультразвуковых средств контроля путем разработки нового класса ультразвуковых резонансных методов измерения или контроля величин на основе использования стоячей ультразвуковой волны является актуальным. Целью работы является улучшение технических параметров ультразвуковых измерителей за счет использования явления резонанса и стоячей волны. Основой резонансного метода контроля является исследование параметров и характеристик стоячих акустических волн, возникающих в среде вследствие интерференции падающей и отраженных акустических волн.

Предложена математическая модель ультразвукового резонансного метода измерения параметров жидких и газообразных сред, которая может быть применена для измерительного контроля таких параметров, как плотность, температура, толщина объекта контроля и тому подобное. Для проверки адекватности предложенной модели распространения ультразвуковой волны проведено ее компьютерное моделирование и экспериментальные исследования. В качестве исследуемой среды избран воздух (температура 20 °С, скорость звука 343 м/с, атмосферное давление 1 атм). Смоделирована в соответствии с предложенной математической моделью временная диаграмма сигнала на приемнике для расстояния 34,3 мм, когда выполняется условие резонанса, и для расстояния 34,73 мм, когда выполняется условие антирезонанса. Амплитуды сигналов отличаются примерно в 5 раз, что подтверждает чувствительность модели. Приведены зависимости амплитуды сигнала на приемнике для частот сигнала 170...205 кГц с расстоянием передатчик-приемник 35,85 мм и скоростью звука 340,8 м/с. Результаты моделирования имеют высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований, что подтверждает адекватность математической модели. Это позволяет на ее основе предложить новый класс автогенераторных ультразвуковых методов измерительного контроля параметров сред. Описаны структурные схемы и принцип действия разработанных автогенераторных измерителей толщины, температуры газа и плотности объекта контроля.

Ключевые слова: резонансный метод, ультразвук, стоячая волна, измеритель толщины, измеритель плотности, измеритель температуры газа.

Огородник Константин Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроники и наносистем, e-mail: kostokord@gmail.com ;

Лазарев Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроники и наносистем, e-mail: alexander.lazarev.vntu@gmail.com ;

Кравченко Юрий Степанович — канд. физ.-мат. наук., доцент, профессор кафедры электроники и наносистем, e-mail: kravchenko_yu@ukr.net