

УДК 681.518.22

Ю.П. КОНДРАТЕНКО<sup>1,2</sup>, О.В. КОРОБКО<sup>2</sup><sup>1</sup> Чорноморський державний університет імені Петра Могили, Україна<sup>2</sup> Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

## ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ ЗАСОБИ ДЛЯ НЕПРЯМОГО ВИЗНАЧЕННЯ І КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ДВОТОЧКОВОГО МЕТОДУ

В статті розглянуто питання залежності ефективності роботи термоакустичних установок від параметрів акустичної хвилі. Представлена структура комп'ютерної системи для вирішення задач автоматизованого збору та аналізу електроакустичних показників роботи термоакустичних апаратів. Розглянуто методику визначення основних електроакустичних показників термоакустичної установки на прикладі термоакустичного рефрижератора з електромеханічним генератором. Запропонований алгоритм розрахунку акустичної потужності на основі методу двох датчиків дозволяє полегшити процес визначення акустичних параметрів та спростити в цілому процедуру моніторингу електроакустичних параметрів спеціалізованою комп'ютерною системою.

**Ключові слова:** термоакустичні апарати, комп'ютерна система, електроакустичні показники, метод двох датчиків.

### Вступ

Термоакустичні апарати (ТАА) є новим видом теплових машин [1], робота яких базується на взаємоперетвореннях акустичної та теплової енергій.

Існує два види термоакустичних апаратів [2]: двигуни (перетворюють теплову енергію в акустич-

ну) та теплові насоси або рефрижератори (перетворюють акустичну енергію в теплову).

В даній статті в якості дослідної установки розглядається термоакустичний рефрижератор [3], що працює на ефекті стоячої звукової хвилі [4, 5].

Принципова структура термоакустичного рефрижератора (ТАР) наведена на рис. 1.

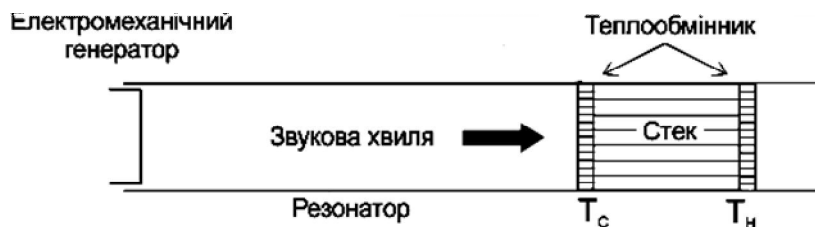


Рис. 1. Структурна схема термоакустичного рефрижератора на ефекті стоячої звукової хвилі

Головними складовими елементами ТАР є порожнинний резонатор, який заповнено робочим середовищем (повітря, гелій тощо), генератор звукових хвиль, висококомпактна теплообмінна поверхня (стек) для перетворення акустичної енергії в теплову та теплообмінники  $T_H$ ,  $T_C$  для вводу та виводу тепла з порожнини ТАР.

Завдяки взаємодії звукової хвилі з поверхньою каналів, що утворюють стек, на його протилежних краях утворюється різниця температур [4,5], яка залежить від потужності акустичної хвилі та ефективності теплообмінних поверхонь  $T_H$ ,  $T_C$  і може сягати сотень градусів.

До головних параметрів звукової хвилі, що визначають ефективність роботи термоакустичних пристроїв можна віднести частоту сигналу [6], форму фронту звукової хвилі та потужність ( $P_{ак}$ ) акустичної хвилі в резонаторі ТАА.

Зазначені характеристики безпосередньо залежать від властивостей електромеханічного генератора акустичних коливань та його потужності ( $P_{ел}$ ).

Отже, актуальною є задача створення системи для реєстрації та моніторингу основних показників як акустичної, так і електромеханічної складових ТАР. При цьому, слід зазначити, що велика кіль-

кість параметрів різної природи (акустичний тиск, електричний струм, температурні показники, тощо) зумовлюють необхідність впровадження спеціалізованих комп'ютерних систем [7] для вирішення задач реєстрації та обробки великих обсягів даних в режимі реального часу.

Метою статті є розробка комп'ютерної системи для визначення якісних показників акустичної та електромеханічної складових термоакустичних установок в процесі їх роботи.

### 1. Структура системи непрямого визначення електроакустичних параметрів ТАР

Термоакустичний рефрижератор з електромеханічним генератором являє собою комплексну систему, в якій звукова хвиля в резонаторі утворюється завдяки підведеному до генератора коливальній електричній струму, а корисна робота є результатом перетворення акустичної енергії в теплову за допомогою стеку. Тому ТАР можна умовно розділити на дві складові: електрично-акустичну ( $P_{ел} \Rightarrow P_{ак}$ ) та акустично-теплову ( $P_{ак} \Rightarrow P_{теп}$ ).

Комп'ютерна система призначена для моніторингу електроакустичних параметрів та обчислень величини коефіцієнта корисної дії (ККД)  $\eta_{e/a}$  електроакустичної частини ТАР за значеннями підведеної до ТАР електричної потужності  $P_{ел}$  та потужності  $P_{ак}$ , встановленої в резонаторі звукової хвилі:

$$\eta_{e/a} = \frac{P_{ел}}{P_{ак}}, \tag{1}$$

$$P_{ел} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt, \tag{2}$$

$$P_{ак} = IS, \tag{3}$$

де  $u(t), i(t)$  – миттєві значення напруги та струму на вході електромеханічного резонатора;  $I$  – інтенсивність звукової хвилі;  $S$  – площа поперечного перетину резонатора.

На рис. 2 наведено принципову схему комп'ютерної системи для визначення електроакустичних параметрів дослідного ТАР.

Головними елементами системи є персональний комп'ютер (ПК), акустичний підсилювач ММФ LV103 потужністю 100 Вт, датчики струму (ДС) ACS756 та напруги (ДН), датчики тиску (ДТ1, ДТ2) MPXV7007DP ( $\Delta P = \pm 7$  КПа  $\Rightarrow$  170 дБ) та мікроконтролер (МК) Atmel Xmega A3, що служить для збору аналогових сигналів з датчиків системи та їх передачі до ПК.

Мікроконтролери Xmega A3 мають два аналогово-цифрових перетворювача, які характеризуються 12-бітною роздільною здатністю і частотою перетворення до 2 млн перетворень в секунду, що забезпечує високу швидкість та можливість застосування запропонованої комп'ютерної системи в будь-яких термоакустичних установках, адже діапазон робочих частот ТАА не перевищує десятків кГц.

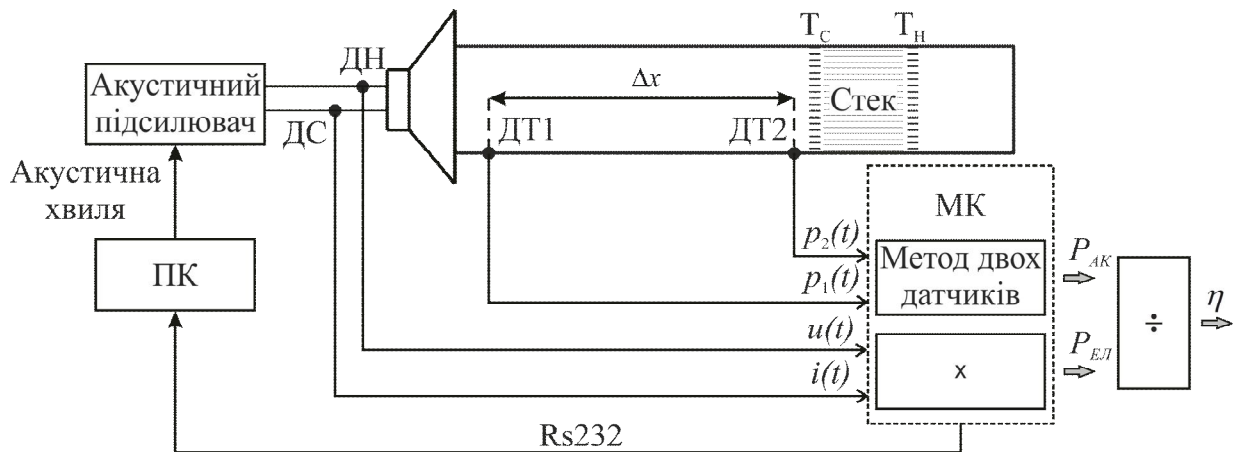


Рис. 2. Схема комп'ютерної системи визначення електроакустичних параметрів ТАА

Розроблене для ПК на платформі Windows Presentation Foundations програмне забезпечення дозволяє зберігати отриману з контролера інформацію в архівну базу даних, а також формувати необхідний звуковий сигнал, що передається на вхід акустичного підсилювача.

Таким чином запропонована структура комп'ютерної системи дозволяє проводити реєстрацію та моніторинг електроакустичних параметрів термоакустичних установок в режимі реального часу.

Визначення електричної складової  $P_{\text{ел}}$  ККД ТАР (1) в запропонованій системі реалізовано за допомогою сигналів датчиків напруги (ДН) та струму (ДС) на вході електромеханічного генератора. Розрахунок акустичної потужності  $P_{\text{ак}}$  в резонаторі ТАР реалізовано з використанням розглянутого нижче двоточкового методу вимірювань на основі застосування двох датчиків тиску [8].

## 2. Метод двох датчиків для непрямої ресстрації параметрів акустичного сигналу

Головними характеристиками, що описують звукову хвилю [9], є акустичний тиск  $p$  та коливальна швидкість  $v$  часток середовища, в якому розповсюджується звук.

Саме ці параметри визначають інтенсивність (4) звукової хвилі, що представляє собою [10] усереднений за часом потік акустичної енергії в резонаторі ТАА, а отже чисельно дорівнює енергії, яку переносить хвиля протягом секунди через одиничну площадку в просторі

$$I = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\tilde{p}\tilde{v}), \quad (4)$$

де  $I$  – інтенсивність звукової хвилі;  $v$  – коливальна швидкість часток газу;  $\tilde{p}$  – комплексно спряжене значення  $p$ .

Величина інтенсивності звукової хвилі має безпосередній вплив на ефективність термоакустичних процесів.

Так, зниження інтенсивності при розповсюдженні хвилі в резонаторі ТАА пов'язано з в'язкісними втратами при взаємодії акустичної хвилі зі стінками акустичних каналів, а наявність достатнього температурного градієнту (5) в стеку може збільшити інтенсивність звукової хвилі,

$$\nabla T_m = \Delta T_m / L_s, \quad (5)$$

де  $\nabla T_m$  – значення градієнту температур;  $L_s$  – довжина стеку;  $\Delta T_m = T_H - T_C$  – різниця температур на краях стеку.

Традиційним способом визначення інтенсивності звукової хвилі є прямий метод [11] одночасного вимірювання  $p$  і  $v$  за допомогою датчику тиску і лазерного доплерівського вимірювача швидкості. Даний підхід дозволяє визначати значення акустичного тиску і коливальної швидкості з високою точністю, проте потребує коштовного обладнання та наявності прозорої ланки резонатору для проходження лазерних променів. Дані недоліки обмежують можливості застосування прямого методу та

роблять недоцільним його впровадження в автоматизовані системи контролю ТАА.

Альтернативою описаному способу є метод двох датчиків [8,12], згідно з яким значення  $p$  і  $v$  розраховуються за допомогою показників двох датчиків тиску, що розташовані на відстані  $\Delta x$  один від одного (рис. 3, [12]).

В загальному випадку гармонічну акустичну хвилю можна записати в вигляді комплексного числа

$$p(x)e^{j\omega t} = p_+e^{-jkx} + p_-e^{jkx}, \quad (6)$$

де  $k$  – комплексне хвильове число;  $\omega$  – частота сигналу;  $x$  – повздовжня координата;  $p_+$ ,  $p_-$  – пряма та зворотна складові акустичної хвилі.

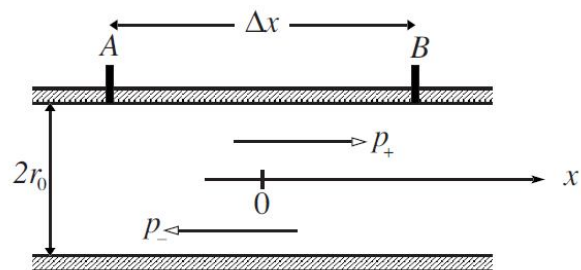


Рис. 3. Циліндричний канал радіуса  $r_0$  з двома датчиками тиску А і В

Повздовжня складова коливальної швидкості часток, виходячи з рівняння енергії [4,5], виражається залежністю

$$v(x) = \frac{jF}{\omega\rho} \frac{dp(x)}{dx}, \quad (7)$$

$$F = 1 - \frac{1-j}{r_0/\delta_v}, \quad (8)$$

де  $\rho$  – середня щільність газу;  $r_0$  – радіус акустичного каналу;  $\delta_v$  – в'язкісна товщина прикордонного шару.

Використовуючи рівняння (6) і (7), значення тиску  $p(0)$  та швидкості  $v(0)$  в точці 0 (рис. 3) можуть бути визначені за наступними виразами

$$p(0) = p_+ + p_-, \quad (9)$$

$$v(0) = \frac{jF}{\omega\rho} \left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=0} = \frac{kF}{\omega\rho} (p_+ - p_-), \quad (10)$$

$$k = k_0 \left\{ 1 + \frac{1-j}{2} \frac{\delta_v}{r_0} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{\sqrt{\sigma}} \right) \right\}, \quad (11)$$

де  $k_0 = \omega/a$  – хвильове число у вільному просторі;  $a$  – адиабатична швидкість звуку;  $\gamma$  – показник адиабати;  $\sigma$  – число Прандтля.

Для того, щоб зв'язати  $p(0)$  і  $v(0)$  з показниками датчиків тиску

$$p_A = p(-\Delta x / 2)$$

та

$$p_B = p(\Delta x / 2)$$

підставимо  $x = \pm \Delta x$  в (6) та отримаємо вирази для суми (12) та різниці (13) прямої  $p_+$  і зворотної  $p_-$  складових акустичної хвилі

$$p_+ + p_- = \frac{p_A + p_B}{2 \cos(k\Delta x / 2)}, \quad (12)$$

$$p_+ - p_- = \frac{p_A - p_B}{2j \sin(k\Delta x / 2)}. \quad (13)$$

Поєднавши рівняння (9) та (12), а також рівняння (10) та (13), отримуємо вирази для обчислення  $p(0)$  і  $v(0)$  за показниками датчиків тиску А і В (рис. 3).

Підставивши отримані залежності в рівняння (4) сформуємо вираз для обчислення інтенсивності акустичної хвилі

$$I = \frac{1}{8\omega\rho} \left[ \operatorname{Im}(H) \left( |p_A|^2 - |p_B|^2 \right) + 2 \operatorname{Re}(H) |p_A| |p_B| \sin \theta \right], \quad (14)$$

$$H = \frac{kF}{\cos(\tilde{k}\Delta x / 2) \sin(k\Delta x / 2)}, \quad (15)$$

де  $\operatorname{Im}(H)$ ,  $\operatorname{Re}(H)$  – уявна та дійсна складові комплексної величини;  $\theta$  – різниця фаз між сигналами  $p_A$  та  $p_B$ ;  $\tilde{k}$  – комплексно спряжене значення  $k$ .

Енергія звукової хвилі  $P_{ак}$  в резонаторі ТАР, базуючись на отриманому значенні інтенсивності (14), може бути обчислена за допомогою виразу (3).

## Висновки

В статті обговорюється питання залежності ефективності роботи термоакустичних установок з електромеханічним генератором від параметрів електроакустичної складової термоакустичної системи.

Авторами запропоновано структуру та елементну базу комп'ютерної системи реєстрації та моніторингу параметрів ТАА, що дозволяє в режимі реального часу проводити розрахунок ККД електроакустичної складової ТАР.

Запропонований алгоритм розрахунку акустичної потужності на основі методу двох датчиків дозволяє полегшити процес визначення акустичних параметрів та спростити в цілому процедуру моніторингу електроакустичних параметрів спеціалізованою комп'ютерною системою.

## Література

1. Юдаев, Б.Н. *Техническая термодинамика. Теплопередача. [Текст] / Б.Н. Юдаев.* – М.: Высш. шк., 1988. – 479 с.
2. Wheatley, J.C. *The natural heat engines [Text] / J.C. Wheatley, G.W. Swift, A. Migliori // Los Alamos Science.* – 1986. – №2 (14). – P. 34 – 39.
3. Spoelstra, S. *Thermoacoustic heat pumps for energy savings [Text] / S. Spoelstra, M.E.H. Tijani // Grensoverschrijdende akoestiek, Nederlands Akoestisch Genootschap, The Netherlands.* – 2005. – 23 p.
4. Rott, N. *Thermoacoustics [Text] / N. Rott // Adv. Appl. Mech.* – №20 (135). – 1980. – P. 67 – 73.
5. Tomonaga T. *Fundamental Thermoacoustics / T. Tomonaga.* – Токуо: Uchida Rokakuno Publishing, 1998. – 234 p.
6. Кондратенко, Ю.П. *Аналіз впливу частоти звукового сигналу на ефективність термоакустичних процесів [Текст] / Ю.П. Кондратенко, О.В. Коробко // Автоматика – 2011: Матеріали конференції, Львів, 2011.* – С. 390 – 391.
7. Kondratenko, Y. *Multisensor data acquisition system for thermoacoustic processes analysis [Text] / Y. Kondratenko, V. Korobko, O. Korobko // Proceedings of the 6th IEEE international conference IDAACS'2011, Prague, 2011.* – № 1. – P. 54 – 58.
8. Fusco, A.M. *Two-sensor power measurements in lossy ducts [Text] / A.M. Fusco, W.C. Ward, G.W. Swift // J. Acoust. Soc. Am.* – 1992. – P. 22.29 – 22.35.
9. Стретт, Дж.В. *Теория звука. Т. 2 [Текст] / Дж.В. Стретт.* – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1958. – 475 с.
10. Зарембо, Л.К. *Введение в нелинейную акустику [Текст] / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников.* – М.: Техника, 1966. – 520 с.
11. Yazaki, T. *Measurement of sound generation in thermoacoustic oscillations [Text] / T. Yazaki, A. Tomonaga // Proc. R. Soc. London.* – 1998. – Ser. A 454. – P. 21.13 – 21.22.
12. Biwa, T. *Experimental verification of a two-sensor acoustic intensity measurement in lossy ducts [Text] / T. Biwa, Y. Tashiro, H. Nomura, Y. Ueda // J. Acoust. Soc. Am.* – 2008. – 124 (3). – P. 15.84 – 15.90.

Надійшла до редакції 19.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Павлов, директор Інституту автоматизації та електротехніки, зав. кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова.

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОСВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДВУХТОЧЕЧНОГО МЕТОДА**

*Ю.П. Кондратенко, А.В. Коробко*

В статье рассмотрены вопросы зависимости эффективности работы термоакустических установок от параметров акустической волны. Представлена структура компьютерной системы для решения задач автоматизированного сбора и анализа электроакустических показателей работы термоакустических аппаратов. Рассмотрена методика определения основных электроакустических показателей термоакустических установок на примере термоакустического рефрижератора с электромеханическим генератором. Предложенный алгоритм расчета акустической мощности на основе метода двух датчиков позволяет облегчить процесс определения акустических параметров и в целом упростить процедуру мониторинга электроакустических параметров специализированной компьютерной системой.

**Ключевые слова:** термоакустические аппараты, компьютерная система, электроакустические показатели, метод двух датчиков.

**HARDWARE AND SOFTWARE TOOLS FOR INDIRECT DETERMINATION AND CONTROL OF ELECTROACOUSTIC SIGNALS PARAMETERS BASED ON THE TWO-POINT METHOD**

*Y.P. Kondratenko, O.V. Korobko*

The questions of the thermoacoustic systems efficiency dependency on the acoustic wave parameters are considered. The structure of the computer system for automated electroacoustic performance analysis of thermoacoustic devices is given. The method of the basic electroacoustic parameters determination on the example of thermoacoustic refrigerator with a electromechanical generator is described. The offered algorithm of calculation of acoustic capacity based on a method of two sensors allows to facilitate process of determination of acoustic parameters and as a whole to simplify procedure of monitoring of electroacoustical parameters by specialized computer system.

**Keywords:** thermoacoustic devices, computer systems, electroacoustic parameters, two sensors method.

**Кондратенко Юрій Пантелійович** – д-р техн. наук, проф. кафедри комп'ютеризованих систем управління НУК ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна; проф. кафедри інтелектуальних інформаційних систем ЧДУ ім. П. Могилі, Миколаїв, Україна, email: [y\\_kondratenko@rambler.ru](mailto:y_kondratenko@rambler.ru).

**Коробко Олексій Володимирович** – аспірант кафедри комп'ютеризованих систем управління НУК ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, email: [oleksii.korobko@nuos.edu.ua](mailto:oleksii.korobko@nuos.edu.ua).