

Ю.П. Кондратенко, О.В. Коробко

**СПЕЦІАЛІЗОВАНА КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА
АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ
ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

Анотація. В статті здійснено аналіз існуючих систем контролю параметрів та ефективності термоакустичних процесів. В якості критерію ефективності обрано коефіцієнт корисної дії. Запропоновано структурні та програмно-апаратні засоби реалізації спеціалізованої комп'ютерної системи (СКС) для моніторингу та аналізу термоакустичних процесів (ТАП). Наведено результати роботи системи при дослідженні енергетичних показників термоакустичних процесів на прикладі термоакустичного двигуна (ТАД).

Ключові слова: спеціалізована комп'ютерна система, контроль, ефективність, енергетичні показники, термоакустичні процеси.

Вступ. Термоакустичні установки [1] є новітнім видом енергетичних систем, робочий процес яких базується на взаємоперетвореннях акустичної та теплової енергій. Головною особливістю термоакустичних систем є те, що на відміну від інших теплових машин, носієм механічної енергії, яку виробляють термоакустичні апарати (ТАА), і водночас «виконавчим механізмом» термодинамічного циклу, є потужні акустичні пульсації [2] робочого тіла (газу). Саме тому цим тепловим машинам присутня висока чутливість до властивостей робочого тіла (в'язкості, щільності, теплопровідності), а також до впливів зовнішнього середовища (температури, тиску тощо). Ефективна робота ТАА можлива тільки за умов підтримки (стабілізації) усталених значень внутрішніх параметрів різної природи: акустичних, гідродинамічних, теплофізичних, а тому доцільною є розробка та впровадження системи автоматичного контролю ефективності роботи ТАА.

Постановка задачі. Основним параметром, що характеризує ефективність роботи будь-яких систем є коефіцієнт корисної дії (ККД). Термоакустичні комплекси [3,4] представляють собою багато-

ступеневі системи, в яких підведена енергія P_{supl} (електрична, механічна або теплова) затрачується на генерацію акустичної хвилі (sound) P_{ak} , що в свою чергу виконує корисну роботу, створюючи температурний градієнт $T_H - T_C$ (рис. 1), який використовується в зовнішніх системах P_{out} .

При аналізі ефективності ТАА особливе значення має саме оцінювання ККД підсистеми генерації акустичної хвилі, адже саме від цієї складової залежить кількість корисної енергії, що може бути використана для роботи ТАП.

За видом підведеної енергії [5] P_{supl} термоакустичні системи можна розділити на три основних групи:

- електроакустичні (рис. 1,а): в якості джерел акустичних хвиль використовуються електричні генератори

$$P_{supl}(t) = P_{el}(t) = u(t)i(t), \quad (1)$$

де $u(t)$ – підведена напруга; $i(t)$ – підведений струм;

- термоакустичні (рис. 1,б): в даних системах використовується комбінована пара термоакустичних установок, одна з яких виступає в ролі генератора акустичних хвиль, а інша – в ролі навантаження

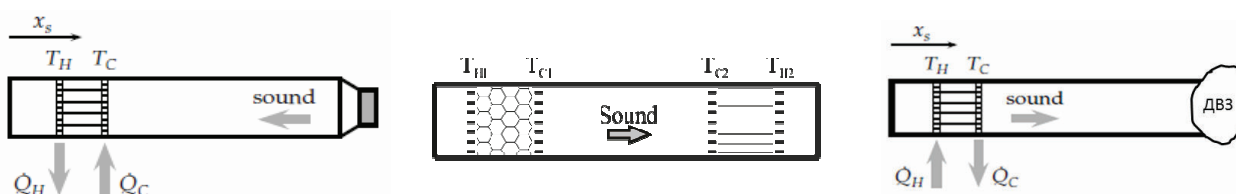
$$P_{supl}(t) = P_Q(t) = GC(T_{in} - T_{out}), \quad (2)$$

де G – питома витрата теплоносія; питома теплоємність теплоносія; T_{in}, T_{out} – вхідна та вихідна температури теплообмінної поверхні;

- механоакустичні (рис. 1,в): джерелом акустичних хвиль є пульсації, що генеруються зовнішніми пристроями (компресори, двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) тощо)

$$P_{supl}(t) = P_m(t) = p(t)U(t), \quad (3)$$

де $p(t)$ – тиск, спричинений пульсаціями; $U(t)$ – об'ємна швидкість.



а) електроакустичні

б) термоакустичні

в) механоакустичні

Рисунок 1 - Типи термоакустичних систем за видом підведеної енергії

Енергію акустичної хвилі в резонаторі ТАА можна оцінити за допомогою виразу [6,7]

$$P_{ak} = SI = Sp(t)v(t), \quad (4)$$

де S – площа поперечного перерізу резонатора; I – інтенсивність звукової хвилі; $p(t), v(t)$ – акустичний тиск та коливальна швидкість акустичної хвилі.

Базуючись на рівняннях (1)-(4) ККД первинного контуру термоакустичної установки можна підрахувати як

$$\eta_{a/s} = P_{ak}/P_{supl}. \quad (5)$$

Основні з опублікованих результатів досліджень в сфері систем автоматизованого моніторингу та аналізу ТАП отримано на основі використання електроакустичних систем.

Зокрема, в роботах [8,9] наведено структуру та алгоритми роботи комп'ютеризованих систем аналізу енергетичних та акустичних показників термоакустичних рефрижераторів (ТАР) з електромеханічним гучномовцем. Методика оцінки акустичної потужності в даних системах базується на вимірюванні тиску $p(t)$ за допомогою датчиків тиску та оцінки коливальної швидкості $v(t)$ в резонаторі ТАР за вимірюваннями прискорення $a(t)$ мембрани гучномовця із використанням акселерометру. Це звужує сферу використання подібних комп'ютеризованих систем лише для автоматизації електроакустичних установок.

Традиційним способом визначення параметрів звукової хвилі в термоакустичних та механоакустичних системах є прямий метод [10] одночасного вимірювання $p(t)$ і $v(t)$ за допомогою датчику тиску і лазерного доплерівського вимірювача швидкості [6,7]. Даний підхід дозволяє визначати значення акустичного тиску і коливальної швидкості з високою точністю, проте потребує коштовного обладнання та наявності прозорої ланки (зони) резонатору для проходження лазерних променів. Дані недоліки обмежують можливості застосування прямого методу лише в дослідних установках та роблять недоцільним його впровадження при реалізації автоматизованих та автоматичних систем контролю ТАА.

Запропонована авторами спеціалізована комп'ютерна система для аналізу енергетичних параметрів реалізує метод двох датчиків [4,7,11] тиску для оцінювання параметрів акустичної хвилі в резона-

торі ТАА. Даний підхід дозволяє оминати недоліки та обмеження зазначених вище підходів та створити універсальну систему автоматичного контролю ефективності термоакустичних процесів.

Метою даної статті є структурно-програмна реалізація спеціалізованої комп'ютерної системи автоматичного контролю параметрів термоакустичних процесів та аналіз результатів її експериментальних випробувань при оцінюванні енергетичних параметрів термоакустичного двигуна.

Структура та основні компоненти СКС. На рис. 2 наведена структура та основні компоненти спеціалізованої комп'ютерної системи [12] для визначення енергетичних параметрів термоакустичних апаратів.

Головними елементами системи є персональний комп'ютер (ПК), датчики тиску ДД (p_1, p_2, \dots, p_n), температури ДТ (T_1, T_2, \dots, T_n) та витрат ДВ (G_1, \dots, G_n), програмований логічний контролер (ПЛК) для збору температурних показників та значень витрат, а також мікроконтролер (МК) STM32F4, що служить для збору швидкоплинних показників з датчиків тиску ДД системи та їх передачі до ПК.

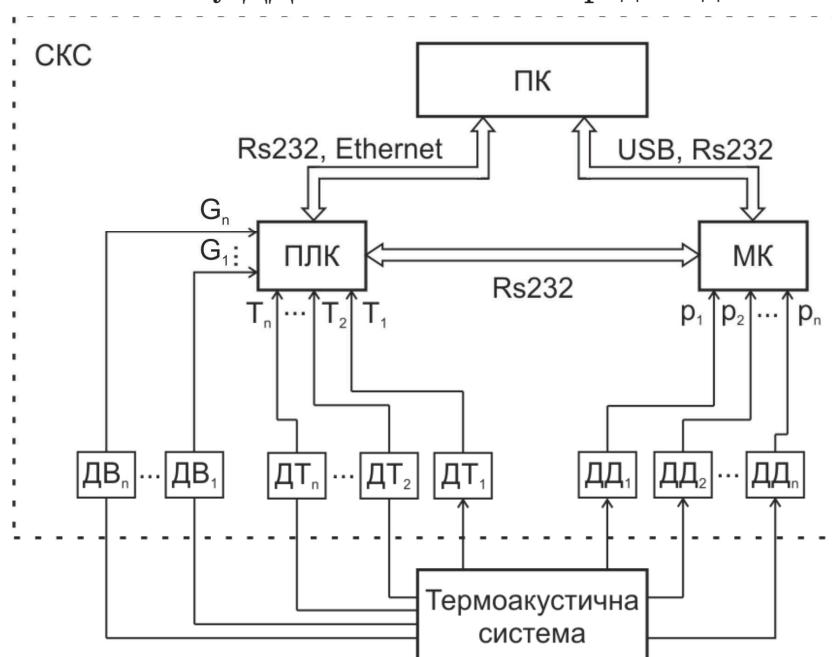


Рисунок 2 - Структура спеціалізованої комп'ютерної системи для контролю параметрів термоакустичних процесів

Мікроконтролери STM32F4 мають три аналогово-цифрових перетворювача, які характеризуються 12-бітною роздільною здатністю і частотою перетворення до 2,4 млн. перетворень в секунду кожен, що

забезпечує високу швидкодію та можливість застосування запропонованої комп'ютерної системи в будь-яких термоакустичних установках, адже діапазон робочих частот ТАА не перевищує десятків кГц.

ПЛК виконує збір даних, щодо поточного стану ТАА з периферійного обладнання та їх пересилку до ПК по мережі Ethernet.

Для забезпечення максимальної гнучкості розроблена система дозволяє здійснювати комунікацію між всіма компонентами за допомогою RS232, а також для забезпечення можливості пересилки великих обсягів даних в ПЛК реалізована підтримка Ethernet, а МК може обмінюватися даними з ПК через USB.

Розроблене для ПК програмне забезпечення [12] дозволяє зберігати отриману з контролера інформацію в архівну базу даних, здійснювати необхідні алгоритми цифрової обробки вимірних сигналів [13], а також виводити всю наявну інформацію на екран користувача.

Таким чином запропонована структура комп'ютерної системи дозволяє проводити реєстрацію та поточний моніторинг параметрів термоакустичних установок [14].

Експериментальні дослідження ефективності роботи ТАД. Випробування запропонованої авторами СКС проводилися з використанням дослідного зразка термоакустичного двигуна [1,3], з резонатором довжиною 1010 мм та діаметром 46 мм, що заповнено повітрям при атмосферному тиску.

Даний пристрій переробляє теплову потужність P_Q в акустичну P_{ak} , тому його ККД (5) можна оцінити як відношення створеної акустичної потужності до підведеної теплової. В якості джерела теплової енергії в дослідній установці (рис. 3) використовується ніхромовий нагрівач, а отже підведену потужність можна обчислювати на основі споживаної нагрівачем електричної енергії P_{el} (1), що надходить від блока живлення (БЖ) і вимірюється за допомогою датчика струму (ДС) ACS712ELCTR-05B-T та дільника напруги (ДН). Тоді ККД ТАД можна обчислити як

$$\eta_{ТАД} = \frac{P_{ak}}{P_{el}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Для підрахунку акустичної потужності P_{ak} використовується інформація з двох датчиків тиску MPXV7007DP (ДД1, ДД2 на рис. 3), які рознесено на відстань $\Delta x = 160$ мм. Відстань від краю двигуна

до першого датчика тиску дорівнює 745 мм, а до другого – 905 мм. Контроль температурних показників системи здійснювався із використанням термопар T_H , T_C .

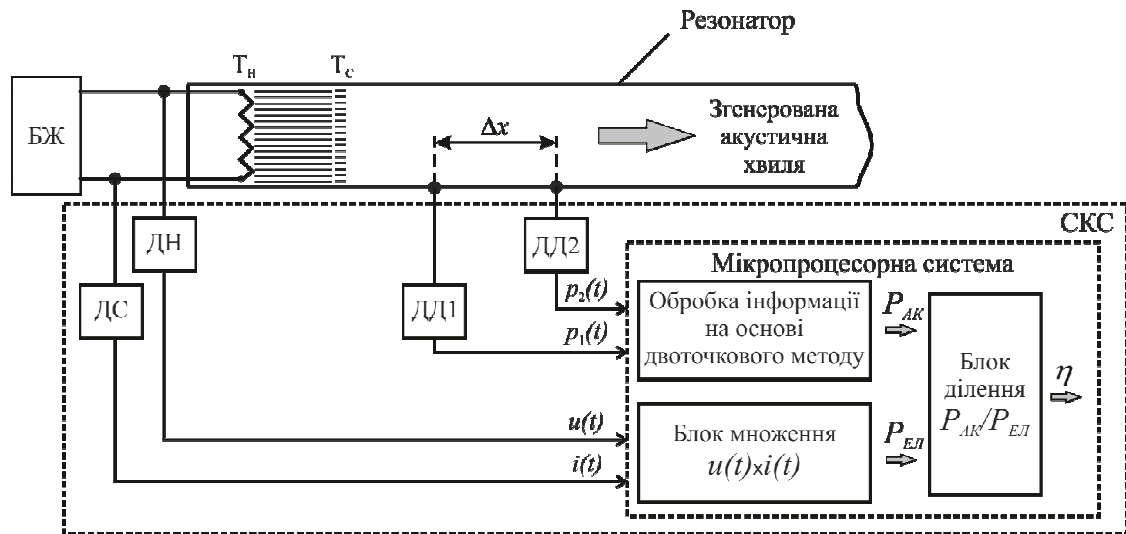
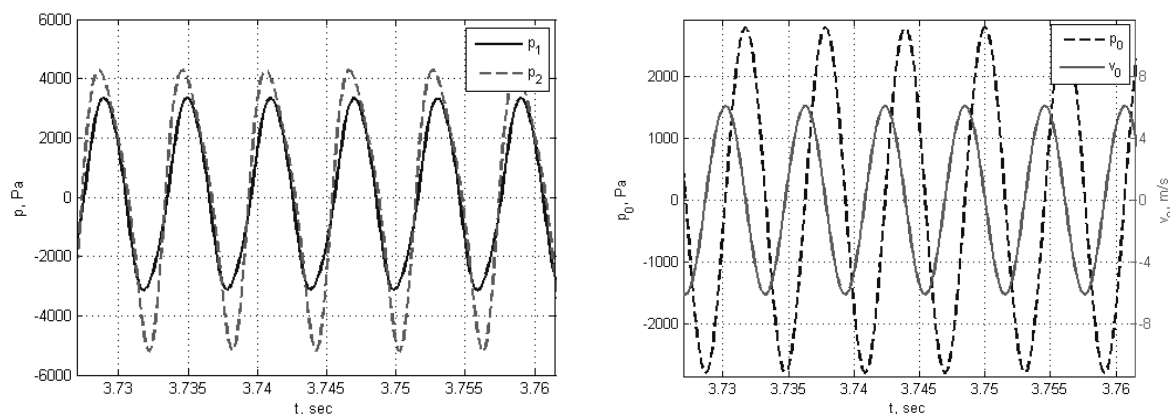


Рисунок 3 - Схема СКС для контролю ефективності ТАД

На рис. 4 наведено результати експериментальних випробувань дослідного ТАД за допомогою методу двох датчиків [11]. На рис. 4,а представлені показники двох датчиків тиску, а на рис. 4,б – розраховані за допомогою даного методу параметри акустичної хвилі. Слід зазначити, що метод двох датчиків дозволяє провести розрахунок тиску $p_0(t)$ та коливальної швидкості $v_0(t)$ в точці, що знаходиться посередині ($\Delta x/2$) між точками виміру тиску (ДД1 та ДД2 на рис. 3). Слід зазначити, що розраховані за методом двох датчиків значення коливальної швидкості $v_0(t)$ та акустичної потужності $P_{ак}$ співпадають з даними, отриманими прямим шляхом з використанням термоанемометру DISA.

В табл. 1 представлено підсумкові результати тестування ТАД при різних значеннях підведеної потужності $P_{ел}$. З наведених результатів можна зробити висновок, що дослідний ТАД має мінімально необхідну величину підведеної потужності (пускову потужність) $P_{ел}(t) \approx 53$ Вт, а найбільший ККД $\eta = 8.53\%$ досягається при підведеній потужності $P_{ел}(t) \approx 165$ Вт.



а) акустичний тиск

б) розраховані тиск та швидкість

Рисунок 4 - Експериментальні дослідження ефективності роботи ТАД

Слід зазначити, що отримані значення ККД є типовими для даного типу установок [15] за наявних параметрів. Подальшого підвищення ефективності ТАД можна досягти структурними змінами двигуна, підвищенням робочого тиску в резонаторі та заміною робочого тіла ТАД з повітря на гелій.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень ТАД
засобами запропонованої СКС

№	I, А	U, В	P_{el} , Вт	p_0 , Па	v_0 , м/с	P_{ak} , Вт	η , %
1	2,3	23,1	53,13	543	0,85	0,39	0,73
2	3	31,1	93,3	1768	3,2	4,8	5,14
3	4	41,5	166	2795	5,93	14,16	8,53
4	5	52,5	262,5	4128	7,27	22,4	8,53

Висновки. Авторами проведено аналіз існуючих систем контролю параметрів та оцінювання ефективності термоакустичних установок на основі енергетичних показників. Показано, що існуючі системи мають ряд недоліків (вузька спрямованість, коштовне обладнання та структурні вимоги), що обмежує можливості їх застосування на реальних об'єктах.

Запропоновані авторами структурні (рис. 2) та програмно-апаратні рішення дозволяють створити спеціалізовані комп'ютерну систему комплексної оцінки показників ефективності термоакустичних апаратів, що позбавлена зазначених недоліків.

Проведені експериментальні дослідження (рис. 3, 4) свідчать про доцільність та ефективність застосування запропонованої комп'ютерної системи в термоакустичних комплексах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rott N. Thermoacoustics // *Adv. Appl. Mech.* – №20 (135). – 1980.
2. Стретт Дж. В. Теория звука. Том. 2 // Государственное издательство технико-теоретической литературы. – М., 1958. – 475 с.
3. Tomonaga T. *Fundamental Thermoacoustics* // Uchida Rokakuno Publishing, Токуо. – 1998.
4. Кондратенко Ю.П. Програмно-апаратні засоби для непрямого визначення і контролю параметрів електроакустичних сигналів на основі двоточкового методу / Ю.П. Кондратенко, О.В. Коробко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* – Вип. 6 (58), 2012, сс. 114-118.
5. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. – М.: Высш. шк., 1988. – 479 с.
6. Yazaki T. Measurement of sound generation in thermoacoustic oscillations / Yazaki T., Tomonaga A. // *Proc. R. Soc. London.* – 1998. – Ser. A 454. – pp. 2113-2122.
7. Biwa T. Experimental verification of a two-sensor acoustic intensity measurement in lossy ducts / T. Biwa, Y. Tashiro, H. Nomura, Y. Ueda // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2008. – 124 (3). – pp. 1584-1590.
8. Li Y. Adaptive tuning of an electrodynamically driven thermoacoustic cooler / Y. Li, B. L. Minner, G. T.-C. Chiu, L. Mongeau, J. E. Braun // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2002. – 111(3). – pp. 1251-1258.
9. Ryan T. S. Design and control of a standing-wave thermoacoustic refrigerator // University of Pittsburgh, 2006. – 101 p.
10. Bailliet H. Acoustic power flow measurement in a thermoacoustic resonator by means of laser Doppler anemometry (L.D.A.) and microphonic measurement / H. Bailliet, P. Lotton, M. Bruneau, V. Gusev and others // *Applied Acoustics.* – 2000. – 60. – pp. 1-11.
11. Fusco A. M. Two-sensor power measurements in lossy ducts / A. M. Fusco, W. C. Ward, G. W. Swift // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1992. – pp. 2229-2235.
12. Kondratenko Y. Multisensor data acquisition system for thermoacoustic processes analysis / Y. Kondratenko, V. Korobko, O. Korobko // *Proceedings of the 6th IEEE international conference IDAACS'2011, Prague.* – 2011. – №1. – pp. 54-58.
13. Кондратенко Ю.П. Синтез нелінійних математичних моделей системи «генератор коливань – резонатор ТАА» / Ю.П. Кондратенко, О.В. Коробко // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.* – Випуск 3 (80). – Дніпропетровськ, 2012. – сс. 40-48.
14. Kondratenko Y. Frequency Tuning Algorithm for Loudspeaker Driven Thermoacoustic Refrigerator Optimization / Y. Kondratenko, O. Korobko, O. Kozlov // *Lecture Notes in Business Information Processing.* – Vol. 115, 2012, pp. 270-279.
15. Mehta S.M. Design of standing wave type thermoacoustic prime mover for 300 hz operating frequency / S.M.Mehta, K.P.Desai, H.B.Naik, M.D. Atrey // *Proceedings of the 16th International Crycooler Conference, USA.* – 2011. – pp. 343-352.