

УДК 681.518

О.І. Красильніков¹, В.С. Берегун², О.В. Гармаш², Т.А. Полобюк¹¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ² Національний технічний університет України «КПІ», Київ

СИСТЕМА ДЛЯ АКУСТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ВУЗЛІВ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Розроблена та реалізована у вигляді стенду система для акустичного діагностування вузлів теплоенергетичного обладнання в лабораторних умовах. Наведено характеристики апаратної частини та структуру програмного забезпечення системи, яке здійснює первинну обробку, вимірювання кореляційних та спектральних характеристик, законів розподілу, моментних та кумулянтних функцій діагностичних сигналів. Проведено дослідження метрологічних характеристик системи.

Ключові слова: діагностування, акселерометр, аналого-цифровий перетворювач, кумулянтні функції.

Вступ

Забезпечення експлуатаційної надійності, довговічності та безпеки теплоенергетичного обладнання – складна задача, пов'язана з організацією достовірного контролю роботи обладнання і забезпеченням оптимальних умов його експлуатації [1, 2]. Для розв'язку цієї задачі необхідна наявність спеціалізованих систем експлуатаційної діагностики, що дозволяють одержувати інформацію з основних конструктивних вузлів теплоенергетичного обладнання. Об'єктами технічного діагностування теплоенергетичного обладнання є наступні вузли [2], найбільш схильні до пошкоджень: газові турбіни, газопоршневі двигуни, електричні генератори, насоси, компресори, вентилятори, трубопроводи та ін.

В процесі експлуатації важливу роль відіграють системи функціонального діагностування, джерелом інформації в яких є сигнали, що виникають у вузлах і елементах теплоенергетичного обладнання в результаті їх природного функціонування. Великі можливості для функціональної діагностики вузлів теплоенергетичного обладнання мають пасивні акустичні методи, в яких діагностичними є акустичні флукуаційні та (або) ритмічні сигнали [3].

Акустичні флукуаційні сигнали є наслідком аеродинамічних, гідродинамічних і трибомеханічних процесів, що супроводжують роботу вузлів теплоенергетичного обладнання, і проявляються у вигляді акустичного шуму або широкосмугових вібрацій. Акустичні ритмічні сигнали є результатом взаємодії деталей у кінематичних парах газових турбін, газопоршневих двигунів, електричних машин, компресорів та ін., і проявляються, як правило, у вигляді вузькосмугових багаточастотних вібрацій.

Акустичні системи функціональної діагностики широко застосовуються для визначення технічного стану об'єктів теплоенергетики [1, 4–9]. Сучасні акустичні діагностичні системи здебільшого здійс-

нюють дослідження моментних функцій діагностичних сигналів не вище другого порядку, проводять спектральний [10–13] і кореляційний [12, 13] аналіз, що є достатнім для гауссівських сигналів. В окремих випадках [12] оцінюються коефіцієнти асиметрії та ексцесу, а також щільність імовірності з використанням системи розподілів Пірсона.

Для подальшого розвитку й розширення можливостей акустичних систем діагностування потрібне використання адекватних математичних моделей акустичних флукуаційних і ритмічних сигналів, які відображають фізику їх виникнення і в загальному випадку є негауссівськими, застосування нових діагностичних параметрів, що базуються на різних імовірнісних характеристиках цих сигналів, в першу чергу на кумулянтних функціях. В даній роботі розроблена система для акустичного діагностування вузлів теплоенергетичного обладнання в лабораторних умовах, що має ряд переваг над згаданими вище системами.

Структурна схема системи

Запропонована система для акустичного діагностування вузлів теплоенергетичного обладнання є системою збору, реєстрації та обробки акустичних сигналів. Ця система призначена для перетворення досліджуваного фізичного процесу в електричну напругу, подальшого його перетворення в цифровий сигнал, збереження на жорсткому диску комп'ютера та статистичної обробки для отримання інформативних характеристик досліджуваного процесу. Структурна схема системи наведена на рис. 1.

Збір сигналів здійснюється каскадно увімкненими перетворювачем, попереднім підсилювачем, нормуючим підсилювачем та фільтром. Реєстрація сигналу здійснюється за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Блок пам'яті призначений для збереження результатів реєстрації, обчислень та їх візуалізації.

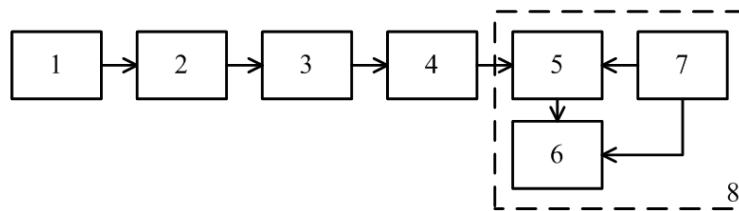


Рис. 1. Структурна схема системи збору, реєстрації та обробки акустичних сигналів:
1 – перетворювач, 2 – попередній підсилювач, 3 – підсилювач, 4 – фільтр, 5 – АЦП,
6 – блок пам'яті, 7 – блок керування, 8 – комп'ютер

Система працює наступним чином. Акустичний сигнал за допомогою перетворювача перетворюється в електричний сигнал, який підсилюється попереднім підсилювачем, призначеним для первинного підсилення та узгодження перетворювача з подальшою частиною схеми. Далі сигнал проходить через нормуючий підсилювач, який забезпечує необхідний динамічний діапазон. Підсилений сигнал подається на фільтр, де формується необхідний частотний діапазон сигналу. З виходу фільтра сигнал подається на АЦП, який перетворює його в цифрову форму. Цифрований сигнал зберігається в блоці пам'яті на комп'ютері. Реєстрація та обробка сигналів здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Система реалізована у вигляді лабораторного стенду (рис. 2).



Рис. 2. Зовнішній вигляд лабораторного стенду для збору, реєстрації та обробки акустичних сигналів

Апаратна частина системи

Дамо загальну характеристику основних приладів стенду у разі роботи з віброакустичними сигналами.

Як *перетворювачі* використовуються п'єзоелектричні вібровимірювальні перетворювачі (акселерометри) ДН-3-М1, ДН-4-М1 виробництва ТОВ «Віброприбор» та КД 35 і КД 39 фірми RFT. Три перетворювачі, встановлені на сталевому кубі, утворюють трикомпонентний перетворювач, призначе-

ний для вимірювання віброприскорень вздовж трьох координатних осей.

Попередній підсилювач призначений для підсилення електричного сигналу з виходу акселерометрів і є триканальним підсилювачем заряду, що виготовлений ТОВ «ПРОМЕЛ ЕНЕРГОАВТОМАТИКА» на основі схеми одноканального підсилювача заряду LP-03, розробленої фірмою «Л Кард».

Як *підсилювач і фільтр* використано селективний підсилювач РУ2-11, який призначено для дослідження, налаштування та випробувань систем і приладів, що використовуються у вимірювальній техніці, зв'язку, автоматиці, приладобудуванні та ін.

Як *АЦП* використано плату L-1250 виробництва фірми «Л Кард», яка забезпечує ввід, вивід та обробку аналогової і цифрової інформації та є закінченою системою з власним процесором. Плата L-1250 підключається до комп'ютера через шину ISA та керується спеціалізованим програмним забезпеченням, встановленим на комп'ютері.

Як *джерела тестових сигналів* використовуються генератор шуму низькочастотний Г2-57 і генератор сигналів низькочастотний Г3-110.

Основні технічні показники системи:

- частотний діапазон вхідних сигналів – до 12 кГц (для акселерометрів ДН-4-М1);
- частота дискретизації АЦП – до 250 кГц;
- кількість каналів – 32/16 (зі спільною землею / диференційних);
- діапазони вхідних напруг АЦП – $\pm 1,024$; $\pm 2,56$; $\pm 5,12$ В;
- розрядність – 12 біт.

Динамічний діапазон системи.

Для розрахунку динамічного діапазону досліджено власні шуми системи, для чого замість акселерометра використано його еквівалент ємністю $C=1$ нФ, що дозволило створювати задану величину електричного заряду $q = CU$. Після закорочування входу еквівалента здійснювалась реєстрація власних шумів системи. За допомогою програм, розроблених в пакеті MatLab, для різних діапазонів вхідних напруг АЦП отримано оцінки характеристик власних шумів: математичного сподівання m , середнього квадратичного відхилення σ , коефіцієнтів асиметрії γ_3 та ексцесу γ_4 (табл. 1). Об'єм вибірки при цьому склав $2 \cdot 10^6$ відліків.

Динамічний діапазон системи розраховано за формулою

$$D = 20 \lg U_{\max}^* / U_{\min}^*$$

де величина U_{\min}^* визначається власними шумами системи, а U_{\max}^* – її нелінійними спотвореннями.

Розглянуто два види вхідних сигналів – гармонічний з постійною амплітудою і шумовий (гауссівський). Задамо

$$U_{\min}^* = 2\sigma; U_{\max}^* = U_{\max} - |m| -$$

для гармонічного сигналу та

$$U_{\max}^* = (U_{\max} - |m|) / 4 -$$

для шумового сигналу, де U_{\max} – максимальне значення вхідних напруг АЦП (1,024; 2,56 або 5,12 В).

В табл. 2 наведено розраховані з використанням табл. 1 значення динамічного діапазону системи для різних діапазонів вхідних напруг АЦП.

Таблиця 1

Статистичні характеристики власних шумів системи

Параметр	Діапазон вхідних напруг, В		
	±1,024	±2,56	±5,12
m, В	-0,0030	-0,0029	-0,0026
σ, В	0,0004	0,0007	0,0007
γ ₃	0,0021	-0,2425	-1,7599
γ ₄	-0,0232	-0,6729	9,7886

Таблиця 2

Динамічний діапазон системи

Вид сигналу	Діапазон вхідних напруг, В		
	±1,024	±2,56	±5,12
гармонічний	61,5 дБ	65,8 дБ	71,6 дБ
гауссівський	49,4 дБ	53,8 дБ	59,5 дБ

З даних табл. 2 випливає, що динамічний діапазон системи для шумових сигналів на 12 дБ менший за динамічний діапазон для гармонічних сигналів.

Програмне забезпечення системи

Загальну структурну схему програмного забезпечення наведено на рис. 3.

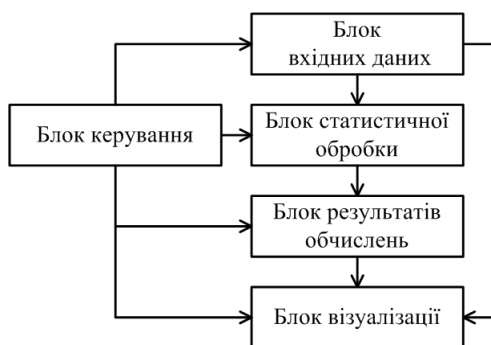


Рис. 3. Загальна структура програмного забезпечення

Блок вхідних даних складається з двох незалежних блоків – блоку моделювання та блоку зчитування зовнішніх даних. Блок моделювання призначено для формування сигналу під час виконання програми, блок зчитування зовнішніх даних призначено для сервісної роботи з файлами даних.

Блок статистичної обробки є основним і виконує розрахунок оцінок імовірнісних характеристик досліджуваних сигналів. Блок результатів обчислень зберігає всі отримані внаслідок обчислень імовірнісні характеристики сигналів. Блок візуаліза-

ції призначено для виводу на екран комп'ютера числових характеристик і побудови графіків реалізацій та розрахованих функцій. Блок керування призначено для вводу параметрів, необхідних для роботи кожного з розглянутих вище блоків.

Розглянемо порядок роботи блоку статистичної обробки акустичних сигналів.

Вхідні дані, зчитані з файлу, піддаються первинній обробці, яка полягає в обчисленні математичного сподівання, дисперсії і тестуванні досліджуваного сигналу на стаціонарність. Якщо сигнал нестаціонарний, тоді набір вхідних даних необхідно розширити додатковими реалізаціями та проводити обробку усередненням вимірюваних характеристик за ансамблем реалізацій. Блок первинної обробки в залежності від вирішуваної задачі може бути відсутнім.

Далі здійснюється статистичне оцінювання діагностичних параметрів та характеристик акустичних сигналів з використанням блоків оцінювання числових характеристик, законів розподілу, кореляційних характеристик, спектральних характеристик.

В блоці оцінювання числових характеристик розраховуються оцінки початкових та центральних моментних функцій, кумулянтних функцій та кумулянтних коефіцієнтів до шостого порядку. В блоці оцінювання законів розподілу здійснюється побудова гістограми, оцінки щільності імовірності з використанням суміші розподілів і відрізків ортогональних рядів. В блоці оцінювання кореляційних характеристик здійснюється побудова оцінок кореляційної та взаємної кореляційної функцій. В блоці оці-

новання спектральних характеристик здійснюється побудова оцінок амплітудних спектрів та спектральних щільностей. В блоці результатів обчислень визначаються діагностичні параметри і характеристики, які є найбільш чутливими до різних станів об'єкту діагностування.

Розглянуті блоки програмного забезпечення об'єднані в єдину програму. Для зручності роботи з програмою розроблено графічний інтерфейс користувача, який являє собою вікно з елементами керування, осями та текстовими полями для виводу результатів, створене в середовищі розробки додатків GUIDE пакету MatLab [14]. В результаті запуску програми у вікні з'являються графіки реалізацій, оцінок щільності імовірності, кореляційної функції та спектральної щільності, а також значення оцінок числових характеристик досліджуваного сигналу.

Висновки

Розроблено структурну схему системи збору, реєстрації та обробки акустичних сигналів для діагностування вузлів теплоенергетичного обладнання, що реалізована у вигляді лабораторного стенду. Розглянуто апаратну частину та структуру програмного забезпечення системи. Відмінною особливістю системи є використання трикомпонентних акустичних перетворювачів, вимірювання кумулянтних функцій та кумулянтних коефіцієнтів, що в сукупності забезпечує підвищення чутливості системи. Досліджено статистичні характеристики власних шумів системи. Встановлено, що динамічний діапазон системи становить не менше ніж 49 дБ при дослідженні шумових сигналів і не менше ніж 61 дБ при дослідженні гармонічних сигналів.

Список літератури

1. *Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Клюев и др.; под. общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.*

2. *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики / В.П. Бабака, С.В. Бабака та ін.;*

за ред. В.П. Бабака. – К.: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2015. – 512 с.

3. *Красильников А.И. Модели шумовых сигналов в системах диагностики теплоэнергетического оборудования / А.И. Красильников. – К.: ИТТ НАН Украины, 2014. – 112 с.*

4. *Незрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.*

5. *Каневский И.Н. Незрушающие методы контроля / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.*

6. *Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса / В.М. Баранов, А.И. Гриценко и др. – М.: Наука, 1998. – 304 с.*

7. *Незрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.*

8. *Дробот Ю.Б. Акустическое контактное течение / Ю.Б. Дробот, В.А. Грешников, В.Н. Бачегов. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.*

9. *Марченко Б.Г. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин / Б.Г. Марченко, М.В. Мислович. – К.: Наук. думка, 1992. – 196 с.*

10. *Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР / В.И. Скалозубов, Д.В. Билей, Т.В. Габлая и др.; под ред. В.И. Скалозубова. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2008. – 512 с.*

11. *Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергетических агрегатов / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Б.Ф. Зайцев. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 444 с.*

12. *Гишко Ю.І. Елементи теорії та питання практичного застосування систем вібродиагностування рухомих вузлів електричних машин / Ю.І. Гишко, М.В. Мислович // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 2. – С. 45–56.*

13. *Яворський І.М. Віброакустична система ВАС-1 для ранньої вібраційної діагностики обертових механізмів / І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, І.Б. Кравець, І.Й. Мацько, І.Г. Стецько, П.П. Луфферчик // Наука та інновації. – 2013. – Т. 9, № 3. – С. 19–26.*

14. *Ануфриев И.Е. Самоучитель MatLab 5.3/6.x / И.Е. Ануфриев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 736 с.*

Надійшла до редколегії 14.03.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.В. Мислович, Інститут електродинаміки НАН України, Київ.

СИСТЕМА ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УЗЛОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.И. Красильников, В.С. Берегун, О.В. Гармаш, Т.А. Полобиук

Разработана и реализована в виде стенда система для акустического диагностирования узлов теплоэнергетического оборудования в лабораторных условиях. Приведена характеристика аппаратной части и структура программного обеспечения системы, которое осуществляет первичную обработку, измерение корреляционных и спектральных характеристик, законов распределения, моментных и кумулянтных функций диагностических сигналов. Проведено исследование метрологических характеристик системы.

Ключевые слова: диагностирование, акселерометр, аналого-цифровой преобразователь, кумулянтные функции.

SYSTEM FOR ACOUSTIC DIAGNOSING OF THE HEAT POWER EQUIPMENT UNITS

A.I. Krasil'nikov, V.S. Beregun, O.V. Garmash, T.A. Polobiuk

The article deals with the description of the system for acoustic diagnosing of the heat power equipment units in the laboratory, realized as a stand. The specification of the hardware and structure of the software of the system which carries out pre-processing, measurement of correlation and spectral characteristics, laws of distribution, cumulant functions of diagnostic signals is given. Research of metrological characteristics of the system is carried out.

Keywords: diagnosing, accelerometer, analog-to-digital converter, cumulant functions.