

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 697.85

DOI 10.31471/1993-9981-2023-2(51)-5-15

ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРАВИЛА ПОРОГОВОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ У ТЕПЛОВОМУ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ

О. Г. Бондаренко

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України;
вул. К. Малевича, 11, м. Київ-150, 03650, Україна; e-mail: usndt@ukr.net*

Виконано аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій, що стосуються застосування правила порогової ідентифікації дефектів у методах неруйнівного контролю різноманітних виробів та промислових об'єктів. Показано, що в основі правила для різних методів контролю може лежати своє порогове значення інформативного сигналу від несутцільностей, яка розділяє виміряні значення отриманих від них сигналів на відповідність бездефектним та дефектним зонам виробу чи об'єкта контролю. Проаналізовано способи ідентифікації дефектів в активному та пасивному методах неруйнівного контролю виробів та об'єктів контролю, зокрема з застосуванням правила порогової ідентифікації дефектів в активному тепловому контролі промислових об'єктів.

Шляхом порівняння характеристик методів активної і пасивної тепловізійної термографії визначено основні інформативні параметри, що використовуються у названих методах неруйнівного теплового контролю при виявленні несутцільностей у виробках та об'єктах контролю за гістограмами аномалій температурного поля на їх зовнішніх поверхнях тепловізійним методом. Показано, що визначення дефектів виробів при активній термографії потребує фіксації двох додаткових інформативних параметрів, пов'язаних з часом оптимального спостереження за температурним перепадом при термографуванні поверхні виробу та вибору частоти запису гістограм для накопичення їх необхідної кількості перед досягненням оптимального часу.

Обґрунтовано правило порогової ідентифікації дефектів промислових димових труб, яке базується на визначеній множині отриманих амплітуд сигналів від гістограм аномалій температурного поля на вибраній ділянці димової труби та визначенні порогового значення сигналу шляхом поділу їх на два класи.

Ключові слова: тепловізійна термографія, інформативні параметри, несутцільність, порогова ідентифікація дефектів, димова труба.

The analysis of modern foreign and domestic research and publications related to the application of the rule of threshold identification of defects in the methods of non-destructive testing of various products and industrial objects was carried out. It is shown that the rule for different control methods can be based on its own threshold value of the informative signal from discontinuities, which divides the measured values of the signals obtained from them into correspondence with defect-free and defective zones of the product or object of control. The methods of defect identification in active and passive methods of non-destructive control of products and control objects are analyzed, in particular, with the application of the rule of threshold identification of defects in active thermal control of industrial objects. By comparing the characteristics of the methods of active and passive thermal imaging thermography, the main informative parameters used in the mentioned methods of non-destructive thermal control when detecting discontinuities in products and control objects based on the histograms of anomalies of the temperature field on their external surfaces by the thermal imaging method were determined. It is shown that the

determination of product defects during active thermography requires the fixation of two additional informative parameters related to the time of optimal observation of the temperature drop during thermography of the surface of the product and the selection of the frequency of recording histograms to accumulate the necessary number of them before reaching the optimal time. The rule for the threshold identification of defects in industrial chimneys is substantiated, which is based on a defined set of received signal amplitudes from the histograms of anomalies of the temperature field on the selected section of the chimney and determination of the threshold value of the signal by dividing them into two classes.

Keywords: thermal imaging thermography, informative parameters, discontinuity, threshold identification of defects, smoke pipe.

Вступ

У нинішній непростий час якість та надійність функціонування промислових об'єктів різноманітних галузей народного господарства можуть бути забезпечені за умови використання ефективних систем контролю у циклі «виготовлення – експлуатація – обслуговування – відновлення». На всіх етапах цього циклу контроль технічного стану промислових об'єктів має виконуватись методами і засобами неруйнівного контролю (дефектоскопії), технічного діагностування та періодичного моніторингу їх стану.

Серед традиційних методів неруйнівного контролю (НК) промислових об'єктів в останні десятиліття одним із перспективних, і таким, що інтенсивно розвивається, є метод неруйнівного теплового контролю (ТК). Будь-які об'єкти, експлуатація яких насамперед пов'язана зі зміною температурних режимів функціонування, можна діагностувати за допомогою ТК.

На даний час найбільше поширення неруйнівний тепловий контроль отримав на практиці у зв'язку з використанням тепловізорів для реєстрації аномалій температурного поля (інфрачервоного випромінювання) на зовнішній поверхні об'єкта контролю двома тепловими методами: активним і пасивним.

Активний метод теплового контролю вимагає зміни теплового стану об'єкта за допомогою нагріваючих (охолоджуючих) пристроїв, й тому його використовують як традиційний метод дефектоскопії, що аналізує відгук на вплив теплового

навантаження. Найбільш часто цей метод застосовується для контролю виробів та об'єктів авіації, космонавтики, військово-промислового комплексу.

Пасивний метод теплового контролю найбільш перспективний у металургії, нафтохімічному комплексі, різноманітних видах транспорту, у будівництві та в енергетиці, особливо для дистанційного діагностування технічного стану важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів. На відміну від активного методу ТК, пасивний метод ТК в основному застосовують для контролю та діагностування технічного стану об'єктів, що знаходяться під навантаженням без додаткового нагрівання або охолодження, температурне поле яких змінюється під дією природних чинників.

Основним універсальним кількісним показником для активного і пасивного методів теплового контролю при визначенні технічного стану різноманітних виробів та промислових об'єктів є температура, для реєстрації якої на їх поверхнях найбільше розповсюдження отримала тепловізійна термографія [1]. Остання дозволяє отримати просторове та часове розподілення теплової енергії (температури) на поверхні виробів та об'єктів контролю при наявності у їх структурах різноманітних несучільностей, що, як правило, супроводжується побудовою теплових зображень (термограм).

Термографія, як засіб активного теплового контролю, отримала назву теплової дефектоскопії й широко

застосовується при виявленні несуцільностей типу розшарування, повітряних включень, непроклеїв, непроварів у різноманітних композиційних виробках, багат шарових структурах, теплозахисних оболонках тощо [2].

Термографія як засіб пасивного теплового контролю отримала назву теплової діагностики й широко застосовується у більшості розвинених країн світу для діагностування технічного стану різноманітних промислових об'єктів на основі отриманої інформації про наявні дефекти у їх структурах [1].

Мета роботи – охарактеризувати основні підходи до оцінки параметрів дефектів при їх виявленні у виробках та об'єктах контролю різними методами неруйнівного контролю на основі правила порогової ідентифікації дефектів; визначити основні інформативні параметри виявлених дефектів при застосуванні тепловізійної термографії в активному і пасивному теплових методах контролю; обґрунтувати правило порогової ідентифікації дефектів у пасивному тепловому контролі при діагностуванні технічного стану промислових об'єктів.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Процедуру застосування будь-якого методу неруйнівного контролю можна представити у вигляді двох основних операцій:

- виявлення у структурі матеріалу будь-якого виробу та об'єкту контролю можливих несуцільностей, які виникають в процесі їх виготовлення або експлуатації;

- визначення серед виявлених несуцільностей таких, які можна ідентифікувати в якості дефектів у відповідності до нормативних вимог.

Перша операція для дефектоскопіста у загальному випадку не є складною при виконанні операції контролю. Складнішою та зазвичай тривалішою є операція оцінки несуцільності за типом, формою і розміром

відбитого від неї інформативного сигналу та ідентифікації несуцільності в якості дефекту.

Відомо, що практично кожен метод дефектоскопії ґрунтується на використанні найбільш розповсюдженого способу, що можна назвати «правила порогової ідентифікації», для реалізації якого у неруйнівному контролі застосовуються елементи порогової логіки. Застосування правила порогової ідентифікації в неруйнівному контролі полягає в порівнянні поточного інформативного сигналу від несуцільності із деяким сигналом від несуцільності, прийнятим в якості порогового, який однозначно дозволяє визначити характер несуцільності: дефект чи не дефект.

Правило порогової ідентифікації широко застосовується у різних методиках неруйнівного контролю. Але в залежності від методу контролю правило порогової ідентифікації формулюється по різному.

Рішення про наявність або відсутність дефекту в зоні контролю виноситься ним за результатами порівняння амплітуд A_i відбитих від несуцільностей сигналів з амплітудою A_n деякого еталонного порогового сигналу, що відповідає амплітуді сигналу від еталонного дефекту стандартного зразка [3].

Якщо амплітуда відбитого сигналу від реальних несуцільностей об'єкта контролю не перевищує порогового сигналу від дефекту еталонного дефекту стандартного зразка, то вважається, що в зоні контролю об'єкта дефект відсутній, тобто різниця ΔA між амплітудами менше або дорівнює нулю:

$$\Delta A = (A_i - A_n) \leq 0.$$

Якщо різниця амплітуд $\Delta A = (A_i - A_n) > 0$, то приймається рішення про визначення даної несуцільності в якості дефекту в зоні контролю об'єкта.

Еталонні дефекти – це механічно виготовлені штучні дефекти простої форми у стандартних зразках (СЗ), які модулюють

реальні дефекти визначеного виду. Тому штучні дефекти в стандартних зразках прийнято називати моделями дефектів. В ультразвуковому контролі основними моделями дефектів прийняті: отвори з пласким дном, сегментні відбивачі сигналів, бокові циліндричні відбивачі, зарубки. Саме відбитий сигнал від одного із штучних дефектів стандартних зразків використовує дефектоскопіст в якості порогового значення при визначенні несущільності в якості дефекту об'єкта контролю за правилом порогової ідентифікації дефектів.

Для активного тепловізійного методу контролю виробів деякі розробники також пропонують стандартні зразки за аналогією ультразвукового методу контролю [4]. Але специфіка процесів формування сигналу від дефекту при тепловому методі контролю не дозволяє застосовувати стандартні зразки, запозичуючи їх безпосередньо із акустичного або будь-якого іншого методу контролю. При виготовленні зразків для теплового контролю деякі автори застосовують принципи побудови цих стандартних зразків, наприклад, набір моделей дефектів в зразку у вигляді отворів та пазів, що зроблені на різну глибину. За прототип СЗ для теплового методу контролю автори пропонують взяти конструкцію зразка, наведену у роботі [5].

Особливістю цієї конструкції є наявність в моделі одночасно двох видів дефектів – порушення суцільності та різнотовщинності, параметри яких h та D варіюються в обумовлених межах. Як стверджують автори роботи [4], призначенням запропонованого СЗ є щоденна повірка та налаштування тепловізора перед проведенням операції теплового неруйнівного контролю. В даному СЗ діапазон геометричних параметрів дефектів (для отворів – діаметр D , для різнотовщинності – $\Delta h/h$) вибрано таким, що деяка частина дефектів на термограмі не виявляється, що дозволяє перевірити поріг чутливості теплового

методу. Цей поріг і фіксується в паспорті СЗ та використовується для тестування та налагодження тепловізора перед початком проведення контролю виробів даного типу.

Очевидно, що конкретний СЗ можна використовувати в якості налагоджувального зразку тільки для одного конкретного виду виробу – із відповідного матеріалу та з визначеною товщиною його стінки.

Разом з тим СЗ в активному тепловому контролі необхідні для вирішення іншої важливої задачі – визначення порогової чутливості методу для різноманітних виробів з наступним прийняттям рішення про доцільність застосування теплового методу контролю. З цією метою пропонується фізичний варіант СЗ доповнити його комп'ютерною моделлю, яка розробляється на основі теплофізичних розрахунків температурних перепадів на поверхні об'єкта контролю, що викликані дефектами, тобто сигналами від дефектів [4]. Тому в цьому випадку фактично мова йде про віртуальний СЗ, який володіє обумовленою універсальністю.

За допомогою віртуального СЗ можна знайти рішення наступних задач [4]: оцінити застосовність теплового методу для дефектоскопії конкретного виробу; визначити оптимальний режим контролю й відповідний йому поріг чутливості; сформулювати вимоги до виготовлення фізичного контрольного (налагоджувального) зразка для даного виду виробу при впровадженні теплової дефектоскопії у виробництво.

Відомі також дані про застосування в активному тепловому контролі правила порогової ідентифікації дефектів виробів шляхом використання карти дефектів, яка являє собою бінарне зображення, коли одиничний піксель тепловізора приписується дефектним зонам виробу, а нульовий – бездефектним. Карта дефектів будується для кожної області на поверхні виробу після введення відповідного порогового

бінаризації (порогу прийняття рішення). Найчастіше для побудови порогу прийняття рішення в неруйнівному контролі застосовується критерій Неймана-Пірсона. Найпростіший алгоритм побудови карти дефектів виражається такою умовою:

$$T(iJ) = 1, \text{ якщо } T(iJ) \geq T_{thz}, \\ \text{інакше } T(iJ) = 0,$$

де $T(iJ)$ - використовуваний інформативний параметр; T_{thz} - поріг прийняття рішень.

Побудована таким способом карта дефектів, згідно стратегії Неймана-Пірсона, буде характеризувати дефектні та бездефектні зони виробу при активному тепловому контролі.

Правило порогової ідентифікації застосовується також у світовій практиці при проведенні моніторингу та діагностуванні технічного стану різноманітних систем машин з використанням теплових зображень, отриманих пасивним тепловізійним методом [6]. Шляхом порівняння отриманих аномалій температурних полів елементів машин з еталонними зображеннями відомих дефектів або з моделями пошкоджень машин здійснюється порогова ідентифікація дефектів та визначається стан системи машин.

Пасивний тепловізійний метод в основному застосовується для дистанційного діагностування технічного стану важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів, серед яких одним із найпоширеніших є димові труби різноманітних підприємств. У той же час специфікою пасивного контролю таких об'єктів є те, що з димових труб складно, а практично неможливо створити стандартні (еталонні) зразки з відомими дефектами в їх елементах. Тому навіть на сьогоднішній день роботи з діагностування технічного стану димових труб пов'язані з розробкою моделей термограм аномалій температурних полів на їх зовнішніх поверхнях,

викликаних наявними несутцільностями в їх структурі. Роботи в цьому напрямку проводяться з використанням двох типів моделей [7]:

- розробки теоретичних моделей температурних полів дефектів димової труби;

- отримання експериментальним шляхом моделей температурних полів штучних дефектів в структурі димової труби.

Застосування таких моделей в процесі діагностування технічного стану димових труб є неефективним внаслідок значних затрат часу на їх створення та неможливість врахування багатьох зовнішніх факторів, пов'язаних з експлуатацією димових труб. Тому для оцінки рівня дефектності димових труб та діагностування їх технічного стану також необхідно обґрунтувати правило порогової ідентифікації, за допомогою якого буде надана можливість серед множини окремих зображень аномалій температурних полів на зовнішній поверхні димової труби визначити в структурі її елементів несутцільності, що можуть бути віднесені до класу дефектів.

Формування цілей статті

Цілями статті є визначення основних інформативних параметрів активної і пасивної термографії шляхом проведення порівняльного аналізу основних характеристик активної і пасивної тепловізійної термографії у тепловому неруйнівному контролі та обґрунтування правила порогової ідентифікації дефектів на прикладі дистанційного діагностування технічного стану промислових димових труб пасивним тепловізійним методом.

Висвітлення основного матеріалу статті

Аналіз основних характеристик активної і пасивної тепловізійних термографій засвідчує, що вони відрізняються між собою способами формування теплового поля на поверхні об'єкта контролю та кількістю інформативних параметрів.

Основними спільними інформативними параметрами активної і пасивної термографії є гістограми розподілення амплітудного температурного профілю аномалії над несучільністю виробу та об'єкта контролю і морфологія температурної зони аномалії над несучільністю на їх зовнішній поверхні. В активній термографії фіксація гістограми розподілення амплітудного температурного профілю аномалії відбувається в динаміці і за короткий проміжок часу по мірі зміни значень температурного поля, а у пасивному тепловому контролі – в статичі при стаціонарному або квазістаціонарному температурному полі.

Тому в процесі проведення теплового контролю виробів та об'єктів контролю методом тепловізійної активної термографії в порівнянні з пасивною тепловізійною термографією використовуються два додаткові інформативні параметри – момент часу τ_m оптимального спостереження за температурним перепадом на зовнішній поверхні виробу або об'єкта контролю при тепловізійному термографуванні поверхні та частота f запису гістограм для накопичення їх необхідної кількості перед досягненням оптимального часу спостереження τ_m . Частота f може бути обрана із умови виду:

$$f \geq \frac{5 \dots 10}{\tau_m}.$$

Відповідно й морфологія температурної зони (її розміри) аномалій над несучільністю на зовнішній поверхні виробу чи об'єкта контролю в активній термографії буде ґрунтуватись на однозначному зв'язку між межами несучільності та швидкістю поверхневого температурного перепаду, а в пасивній термографії - на однозначному зв'язку лише з межею (розміром) несучільності.

Для визначення несучільностей в якості дефектів за їх температурними аномаліями необхідно, щоб:

- теплофізичні характеристики матеріалів у місцях виникнення несучільностей відрізнялись від теплофізичних характеристик основного матеріалу виробу або ОК;
- несучільності виробу або ОК створювали максимальне збудження для тих теплових полів, за допомогою яких виникають температурні аномалії на їх зовнішніх поверхнях.

Відомо, що гістограми розподілення амплітудних температурних профілів аномалій та морфологій їх температурних зон над несучільностями на зовнішній поверхні виробів та ОК при активному та пасивному термографічному контролі є функціями великої кількості різноманітних факторів, які можна розділити на внутрішні і зовнішні. Внутрішні фактори визначаються теплофізичними властивостями виробу або ОК та геометричними параметрами несучільностей.

Зовнішніми факторами є характеристики процесу теплообміну на зовнішній поверхні виробу чи об'єкта контролю, потужність джерела нагрівання та швидкість переміщення потоку тепла вздовж об'єкта контролю. При нестационарному температурному полі в активній термографії наведені внутрішні фактори визначають часові параметри процесу теплопередачі та особливості часового розвитку температурної аномалії на зовнішній поверхні виробу чи ОК. При активній термографії величина τ_m залежить від тепло- та температуропровідності виробу або об'єкта контролю та глибини залягання несучільності. У цьому випадку активна термографія ефективна при виявленні газонаповнених несучільностей великої площі в середині ОК, основна площина якого розміщена перпендикулярно тепловому потоку.

Таблиця 1 – Основні порівняльні характеристики методів тепловізійної термографії в тепловому неруйнівному контролі

№ п/п	Характеристики методів тепловізійної термографії	Активна термографія	Пасивна термографія
1	2	3	4
1	Сфера застосування методів тепловізійної термографії	Теплова дефектоскопія несущільностей в об'єкті контролю	Теплове діагностування технічного стану об'єкта контролю
2	Метод теплового неруйнівного контролю	Активний	Пасивний
3	Спосіб формування теплового поля об'єкта контролю	Об'єкт зазнає впливу стороннього джерела тепла (нестационарний режим)	Об'єкт не зазнає впливу стороннього джерела тепла (стационарний режим)
4	Характер взаємодії теплового поля з об'єктом контролю	Конвекційний або/та радіаційний	Конвекційний
5	Інформативна ознака несущільностей в структурі об'єкта контролю	Аномалії температурного поля на зовнішній поверхні об'єкта контролю	Аномалії температурного поля на зовнішній поверхні об'єкта контролю
6	Інформативні параметри тепловізійної термографії	1. Декілька гістограм динамічного розподілу амплітудного температурного профілю аномалії над несущільністю на зовнішній поверхні виробу чи об'єкта контролю в процесі термографування	1. Одинична гістограма статичного розподілу амплітудного температурного профілю аномалії над несущільністю на зовнішній поверхні виробу чи об'єкта контролю в момент термографування
		2. Морфологія температурних зон аномалій на зовнішній поверхні об'єкта контролю (розміри ґрунтуються на однозначному зв'язку між межами несущільностей та швидкістю поверхневого температурного перепаду)	2. Морфологія температурної зони аномалії на зовнішній поверхні об'єкта контролю (розміри ґрунтуються на однозначному зв'язку тільки з межею несущільності)
		3. Момент часу τ_m оптимального спостереження температурного перепаду при термографуванні поверхні об'єкту	- « -
		4. Частота f запису гістограм для накопичення їх необхідної кількості перед досягненням оптимального часу спостережень τ_m	- « -

Момент настання максимального перепаду та глибина залягання несущільності зазвичай пов'язані лінійною залежністю, при цьому кут нахилу відповідної прямої залежить від теплофізичних властивостей виробу та несущільності. Чим більша теплопровідність виробу, тим менша величина τ_m . В залежності від типу матеріалу та глибини залягання несущільності величина τ_m в активній термографії коливається від сотих до десятків секунд.

Саме за такий час здійснюється теплова дефектоскопія активним тепловим методом матеріалів виробів та об'єктів, результатом якого будуть гістограми динамічного розподілу профілю аномалій нестационарного температурного поля на зовнішній поверхні виробу чи ОК в момент термографування, що відповідають наявності в них виявлених несущільностей.

Застосування пасивної тепловізійної термографії у неруйнівному контролі виробів та ОК здійснюється шляхом знімання гістограм статичного розподілу амплітудного температурного профілю аномалій над несущільністю на їх зовнішніх поверхнях. Для визначення розмірів гістограм аномалій температурного поля за координатами x, y на зовнішній поверхні об'єкта контролю при його термографуванні дистанційним пасивним тепловізійним методом (на прикладі димової труби) запропоновано спосіб, суть якого наведена в роботі [8].

Обґрунтуємо одне із можливих правил порогової ідентифікації дефектів на прикладі дистанційного діагностування технічного стану димових промислових труб.

Припустимо, що при виконанні процедури тепловізійного термографування зовнішньої поверхні димової труби тепловізором була зафіксована множина інформативних ознак несущільностей в конструктивних елементах труби. Під

множиною інформативних ознак будемо розуміти сукупність аномалій температурного поля на зовнішній поверхні труби, яка розглядається як єдине ціле. Елементи такої множини - ознаки аномалій температурного поля, з яких складається множина. Інформативним параметром кожної аномалії є сформована тепловізором гістограма амплітудного розподілу температурного поля над відповідною несущільністю. В кінцевому результаті ми отримаємо множину амплітуд гістограм розподілення температурного поля над несущільностями труби.

Якщо таку множину гістограм температурного поля за допомогою комп'ютеру або інших засобів електроніки перетворити в електричні сигнали, то отримуємо множину електричних сигналів різної амплітуди. Позначимо отриману множину електричних сигналів літерою A , а кількість електричних сигналів окремих гістограм температурних полів як елементів множини A позначимо літерами a_1, a_2, \dots, a_n .

В загальному випадку наведена множина електричних сигналів може бути описана наступною математичною залежністю:

$$A = f\{a_1, a_2, \dots, a_n\}. \quad (1)$$

Амплітуди a_1, a_2, \dots, a_n у виразі (1) відповідають значенням електричних сигналів від несущільностей, упорядкованих згідно збільшенню амплітуд. Модель упорядкованої за значенням амплітуд множини електричних сигналів згідно виразу (1) подана на рис. 1.

Наведена модель широко використовується для розв'язання задач класифікації. На рис. 1 позначення A множини сигналів являє собою цільову змінну, що може набувати (A_1, \dots, A_k) , де A_i – стан цільової функції, а позначення a_1, \dots, a_n – множина незалежних вхідних змінних амплітуд електричних сигналів гістограм температурного поля, які можуть впливати на цільову. Основним

припущенням моделі є те, що всі вхідні змінні незалежні між собою.

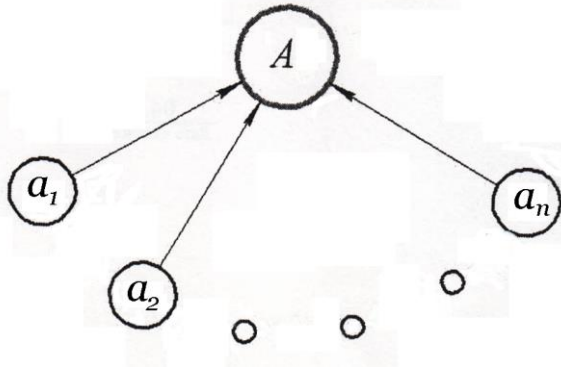


Рисунок 1 – Модель упорядкованої за значенням амплітуди множини електричних сигналів

Враховуючи наведене, основні характерні особливості наведеної множини можна визначити наступним чином:

1) інформативними ознаками несущільностей димової труби є множина аномалій температурного поля на її зовнішній поверхні, тобто своєрідних теплових «відбитків» несущільностей;

2) аномалії температурного поля на зовнішній поверхні труби формуються випадково і незалежно одна від одної та відображають характер неупорядкованої множини несущільностей в структурі її конструкції;

3) інформативними параметрами несущільностей є множина незалежних амплітуд гістограм температурного поля над ними в процесі тепловізійної зйомки зовнішньої поверхні димової труби;

4) при перетворенні гістограм температурного поля в електричні сигнали формується множина незалежних та різних за амплітудою дискретних детермінованих інформативних параметрів несущільностей, зв'язок між якими відсутній;

5) амплітуди електричних сигналів змінюються в часі по мірі збільшення несущільностей в процесі експлуатації димової труби, що, в свою чергу, впливає на значення амплітуди A , множини.

Таким чином, при тепловізійному термографуванні зовнішньої поверхні димової труби саме електричні сигнали є тими інформативними сигналами, що відображають процес утворення несущільностей в конструктивних елементах труби в процесі її експлуатації. Форма інформативних сигналів у вигляді окремих імпульсів є зручною для передачі, обробки та використання їх при діагностуванні технічного стану та моніторингу димових труб в процесі їх експлуатації. Саме тому за формою та амплітудою детермінованих інформативних сигналів від аномалій температурних полів на зовнішній поверхні труби здійснюється процедура діагностування її технічного стану пасивним тепловізійним методом.

Множину (1) при пасивному тепловізійному методі діагностування стану димових труб можна назвати полімодальною, оскільки вона містить в своєму складі інформативні сигнали різних амплітуд від несущільностей труби, які можуть відноситись до дефектних та якісних ділянок поверхні. Достовірність віднесення їх до однієї з двох сукупностей буде залежати від встановлення порогового значення, тобто від визначення правила порогової ідентифікації дефектів.

При пасивному тепловізійному методі діагностування димових труб оптимальне визначення дефектів буде залежати від визначення параметрів гіперплощини, що розділяє контрольовані ділянки труби на дефектні та бездефектні.

Для визначення параметрів гіперплощини необхідно створити впорядковану вибірку інформативних сигналів від несущільностей труби, яка повинна містити в собі достатню кількість сигналів від мінімальних до максимальних амплітуд. Оскільки використовуються одновимірні інформативні сигнали, то вони мають одновимірну функцію нормального розподілу.

Виходячи з цього, при виборі величини порогового значення інформативних сигналів для пасивного тепловізійного методу діагностування технічного стану димових труб, з достатнім ступенем формалізації можна скористатись однозв'язним алгоритмом з гістограмним методом класифікації дефектів.

Для інформативних сигналів a_1, a_2, \dots, a_n множини (1) упорядкованих за зростанням їх амплітуд, приймемо величину порогового значення:

$$q_i = a_{(i+1)} - a_i. \quad (2)$$

Тоді однозв'язним алгоритмом полімодальні інформативні сигнали множини (2) будуть розділені на два класи:

$$a_1, a_2, \dots, a_i; a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n. \quad (3)$$

Гіперплощина такого ділення буде характеризуватись ознакою $q_i = \max$.

Модель розділення впорядкованої множини інформативних сигналів на два класи наведена на рис. 2.

Місце розміщення максимального порогового значення $q_i = \max$ при достатній кількості інформативних сигналів у множині (1) збігається з місцем розміщення мінімуму щільності розподілу сигналів a_p .

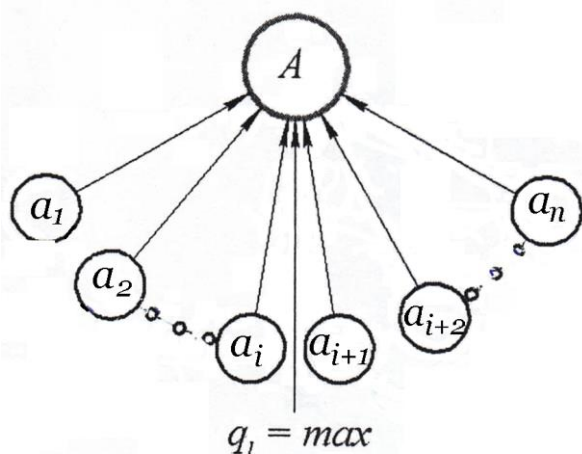


Рисунок 2 – Модель розділу впорядкованої множини інформативних сигналів на два класи

Саме тому значення сигналу a_p , що відповідає $q_i = \max$, і є межею розділення двох сукупностей інформативних сигналів множини (1), які належать якісним та дефектним ділянкам димової труби.

Виходячи з цього, порогове значення інформативних сигналів, тобто правило порогової ідентифікації дефектів, можна визначити за виразом:

$$a_{\text{пор}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{i} \sum_{p=1}^i a_p + \frac{1}{n-1} \sum_{p=i+1}^n a_p \right). \quad (4)$$

Наведене правило порогової ідентифікації дефектів для діагностування технічного стану димових труб пасивним тепловізійним методом можна застосовувати при полімодальності гістограм аномалій температурного поля на зовнішній поверхні димової труби.

Запропонований підхід до обґрунтування правила порогової ідентифікації дефектів при діагностуванні технічного стану димових труб вимагає проведення експериментальних досліджень з визначення кількісних розмірів вибірки множини гістограм аномалій температурного поля над несучільностями труби, визначення розмірів її діагностуємої ділянки, розробки методології оцінки рівня дефектності труби шляхом класифікації дефектів на основі правила порогової ідентифікації. Це дозволить, у разі потреби, розробити методичну документацію з технології застосування пасивного тепловізійного методу при діагностуванні технічного стану димових труб.

Висновки

1. Подано аналіз сутності та наведено приклади застосування правила порогової ідентифікації дефектів у методах неруйнівного контролю при оцінці якості виробів та об'єктів контролю.

2. Виконано порівняльний аналіз основних характеристик активної та пасивної термографій в тепловому неруйнівному контролі та визначено їх

основні інформативні параметри при контролі виробів та об'єктів тепловізійним методом.

3. Обґрунтовано підхід до побудови правила порогової ідентифікації дефектів при діагностуванні технічного стану промислових димових труб із застосуванням пасивного тепловізійного методу.

Список використаних джерел

1. Маслова В., Стороженко В. (2004). Термографія в діагностиці і неруйнівному контролі. Харків: Компанія «СМІТ».
2. Білокур І. (2004). Основи дефектоскопії. Київ: «Азимут-Україна».
3. Krautkramer J., Krautkramer H. (1986). Warkstoffprüfung mit Ultraschall. Berlin.
4. Стороженко В., Хорло М., Мешков С., Маслова В. (2005). Підходи до створення стандартних зразків для теплового неруйнівного контролю. Технічна діагностика та неруйнівний контроль. 1. 21-25.
5. Xavier P., Maldague V. (2001). Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. Join. Welle Sons, Inc. p. 684.
6. International standard ISO/FDIS 18434-2:2019(E). Condition monitoring and diagnostics of machines systems. – Thermography. – Part 2: Image interpretation and diagnostics.
7. Бондаренко О, Глуховський В. (2019). Аналіз способів діагностування технічного стану димових труб пасивним тепловізійним методом. Збірник доповідей 9-ої Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». Київ: 199-205.
8. Бондаренко О, Глуховський В. (2022). Спосіб термографування зовнішньої поверхні димових труб дистанційним пасивним тепловізійним методом. Технічна діагностика та неруйнівний контроль. 3. 19-21.

References

1. Maslova V., Storozhenko V. (2004). Thermography in diagnostics and non-invasive control. Kharkiv: SMITH Company. [in Ukrainian]
2. Bilokur I. (2004). Basics of flaw detection. Kiev: "Azimuth-Ukraine". [in Ukrainian]
3. Krautkramer J., Krautkramer H. (1986). Warkstoffprüfung mit Ultraschall. Berlin.
4. Storozhenko V., Khorlo M., Meshkov S., Maslova V. (2005). Approach the creation of standard signs for thermal non-destructive control. Technical diagnostics and non-invasive control. 1. 21-25. [in Ukrainian]
5. Xavier P., Maldague V. (2001). Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. Join. Welle Sons, Inc. p. 684.
6. International standard ISO/FDIS 18434-2:2019(E). Condition monitoring and diagnostics of machines systems. Thermography. Part 2: Image interpretation and diagnostics.
7. Bondarenko O, Glukhovsky V. (2019). Analysis of methods for diagnosing the technical mill of smoke pipes using the passive thermal imaging method. Collection of proceedings of the 9th National Scientific and Technical Conference "Non-invasive control and technical diagnostics". Kiev: 199-205. [in Ukrainian]
8. Bondarenko O, Glukhovsky V. (2022). Method of thermographing the external surface of smoke pipes using a remote passive thermal imaging method. Technical diagnostics and non-invasive control. 3. 19-21. [in Ukrainian]