

Обробка зображень температурних полів машин для проведення їх термографічної діагностики

В.О. Стороженко, С.Б. Малик, В.Ш. Аведян

Харківський національний університет радіоелектроніки
м. Харків, Україна
fizika@kture.kharkov.ua

Анотація

Запропоновано алгоритм обробки зображень температурних полів машин, що містять однотипні вузли, для проведення їх термографічної діагностики. Алгоритм заснований на використанні статистичних підходів для розбуркування контрольованих об'єктів (вузлів). Як інформативні ознаки використовуються такі параметри теплових зображень як форма гістограм, вміст фону і положення гістограми на осі температур. Ведемо поняття віртуального еталону і розроблені критерії порівняння температурних зображень вузлів, що контролюються, з еталоном. Сформульовано вирішувальне правило для розбуркування об'єктів контролю, що базується на використанні інтегрального критерію подоби.

Вступ

Термографія – один з загальновідомих методів технічної діагностики [1,2]. В основі методу лежить той факт, що при функціонуванні будь-якої машини (механізму, агрегату тощо) на її поверхні виникає температурне поле, що несе інформацію про режими роботи її вузлів.

Це температурне поле можна зареєструвати безконтактним шляхом використовуючи спеціальні пристрої – тепловізори, що перетворюють теплове зображення у видиме (термограму). Приклад такої термограми – термограма силового циліндра газомотокомпресорного агрегату 10ГКН – наведений на рис. 1 у порівнянні з його видимим зображенням.

Аналізуючи отримані термограми можна оцінити відповідність температурного режиму кожного вузла машини (агрегату) певному еталонному значенню та у випадку наявності відхилень (звичай, це місія перегріву, тобто підвищеної температури) виявити дефектні вузли і насамкінець – здійснити діагностику машини в цілому.

1 Проблеми термографічної діагностики

Для проведення розбуркування вузлів (шляхом порівняння їх температурних полів з еталонним) необхідно, по-перше, створити (або мати у наявності) еталонний зразок, або фізичний, або віртуальний, побудований на основі моделі теплових процесів, що відбуваються в об'єкті контролю. В більшості випадків створення еталону є проблематичним через складність об'єкту контролю та необхідність врахування комплексу параметрів, що характеризують умови функціонування контрольованого об'єкту.

По-друге, необхідно обрати відповідний критерій (інформативну ознаку) порівняння цих температурних полів.

Загальноприйняте безпосереднє порівняння первинних функцій $T(x,y)$, що описують розподіл температури на поверхнях об'єктів контролю, та $T_{ref}(x,y)$ - еталонного розподілу, шляхом знаходження функції перепаду температур

$$\Delta T(x,y) = T(x,y) - T_{ref}(x,y) \quad (1)$$

не є достатнім бо не враховує наявність певних шумів і завад, що суттєво знижує достовірність такої діагностики.

Так, наприклад, навіть високі температурні перепади на невеликих ділянках поверхні необов'язково свідчитимуть про наявність дефекту, а можуть бути лише наслідком наявності завад, спричинених незадовільним станом поверхні. Так само невеликі перепади температур на більших ділянках поверхні також можуть свідчити не лише про дефектність контрольованого об'єкта (вузла), але й бути наслідком особливостей функціонування даного об'єкта (вузла).

Таким чином, функція $T(x,y)$ потребує спеціальної обробки.



Рисунок 1: Видиме зображення (зліва) та термограма (справа) силового циліндра газомоторного компресора типу 10ГКН

І, насамкінець, є необхідність формування певного вирішувального правила, що вказувало б на те, яке саме відхилення обраної інформативної ознаки від її еталонного значення свідчить про дефектність вузла, що контролюється.

2 Алгоритм обробки термограм об'єктів, що містять однотипні вузли

Шляхи вирішення проблем, що описані вище, були отримані на прикладі термографічної діагностики газомоторних компресорів типу 10ГКН. Особливістю цих агрегатів є наявність достатньої (для статистичної обробки) кількості однотипних вузлів. Зокрема:

- клапанів компресорних циліндрів – 20 шт.;
- силових циліндрів – 10 шт.;
- шатунних підшипників – 5 шт.

Крім того, розширення статистичної вибірки було досягнуто проведенням термографічного обстеження не одного, а 6 агрегатів одного типу.

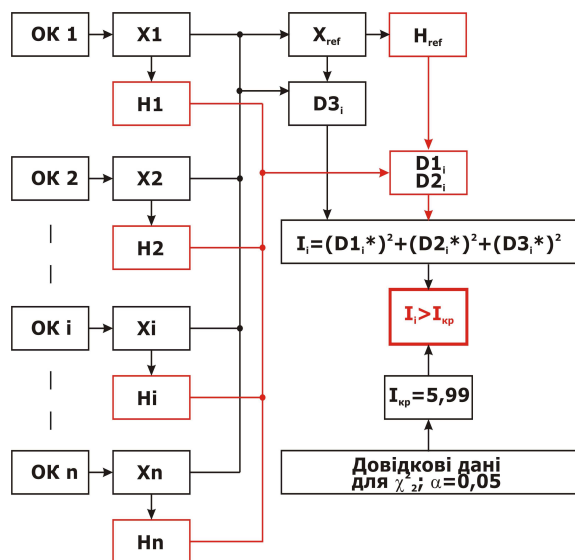


Рисунок 2: Блок-схема проведення термографічного обстеження об'єктів, що містять однотипні вузли, та обробки його результатів

Алгоритм проведення термографічного обстеження і подальшої обробки термограм вузлів таких і подібних агрегатів, що містять однотипні вузли, полягає в наступному (рис. 2).

1. За допомогою тепловізора отримують термограми (X_i) кожного об'єкту (вузла OK_i), що контролюється.

На рис. 3 наведено термограми (у 3D вигляді) дефектного та бездефектного нагнітальних клапанів компресорного циліндра. З рисунку видно, що, незважаючи на однакові значення максимальної температури нагріву наведених клапанів, параметри розподілу температурного поля, що утворюється при функціонуванні цих клапанів, є різними.

Таким чином, максимальна температура не є фактором, що однозначно визначає якість вузла, що контролюється.

2. Для кожного типу вузлів формується віртуальний еталон у вигляді усередненої термограми X_{ref} усіх проконтрольованих вузлів:

$$X_{ref} = \sum_{i=1}^n X_i(x, y) / n \quad (2)$$

3. Для кожної термограми X_i , так само як і для еталонної термограми X_{ref} , будуються їх нормовані гістограми H_i :

$$H_i = \frac{n(j)}{N \cdot \Delta T(j)}, \quad (3)$$

де $n(j)$ - кількість пікселів, що потрапляють в j -й інтервал температур; N - розмір зображення (загальна кількість пікселів); $\Delta T(j)$ - ширина j -го інтервалу температур.

Використання саме гістограм поряд з тепловими зображеннями обумовлене тим, що гістограми є менш чутливими до впливу шумів і завад, а також мають більш високу інформативність [3].

Наприклад, з наведених на рис. 4 гістограм, отриманих шляхом обробки теплових зображень з рис. 3, видно, що гістограма дефектного клапану має вищі стовбці, що відповідають більш високим температурам. Проте відхилення в області низьких температур (недостатнє нагрівання) також може свідчити про несправність контрольованого вузла. Крім того, гістограми можуть бути зміщені одна відносно одної, крім того має значення наявність (або відсутність) виражених піків, що характеризують вміст фону на тепловому зображенні.

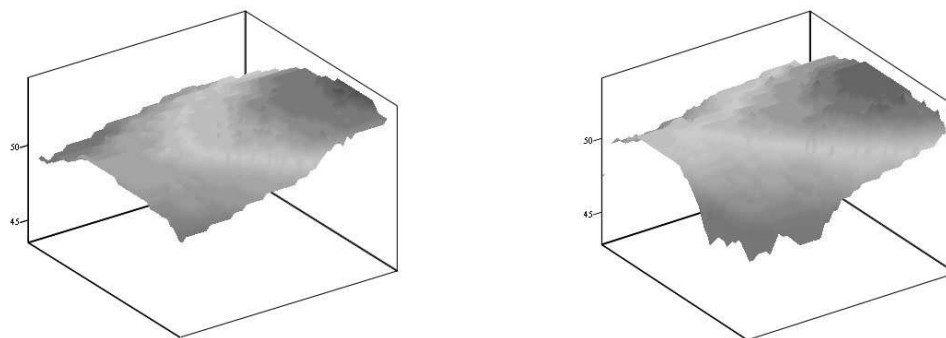


Рисунок 3: 3D зображення температурних полів дефектного (справа) і бездефектного (зліва) нагнітальних клапанів компресорного циліндра ГМК 10ГКН

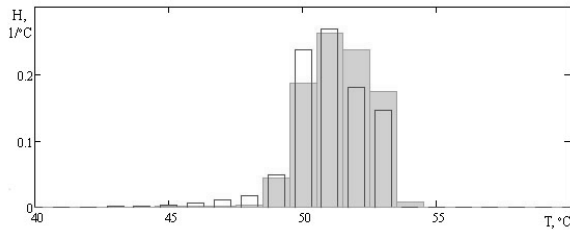


Рисунок 4: Гістограми термограм з рис. 3. Гістограма з білими стовбцями відповідає бездефектному клапану, із заповненими – дефектному

4. Згідно викладених у п. 3 міркувань, порівняння термограм і їхніх гістограм проводиться за трьома критеріями [4]:

- модифікований критерій порівняння форми гістограм

$$D1 = \sum_{j=1}^N \min \left(\begin{array}{l} |H(j) - H_{ref}(j-1)|, \\ |H(j) - H_{ref}(j)|, \\ |H(j) - H_{ref}(j+1)| \end{array} \right); \quad (4)$$

- критерій відмінності за вмістом фону –

$$D2 = |\Pr(H) - \Pr(H_{ref})|; \quad (5)$$

- статистичний критерій Крамера-Уелча –

$$D3 = \frac{\sqrt{nm}(\mu(X) - \mu(X_{ref}))}{\sqrt{n\sigma^2(X) + m\sigma^2(X_{ref})}}, \quad (6)$$

де $H(i)$ – i -й елемент гістограми аналізованої термограми, $H_{ref}(i)$ – i -й елемент гістограми еталонної термограми, N – кількість інтервалів температур, $\Pr(H)$, $\Pr(H_{ref})$ – співвідношення максимального піку отриманої гістограми аналізованого й еталонного зображень до загальної кількості точок, $\mu(X)$, $\mu(X_{ref})$ – математичні очікування аналізованого й еталонного зображень, $\sigma(X)$, $\sigma(X_{ref})$ – середньоквадратичні відхилення аналізованого й еталонного зображень, n, m – розміри зображень (загальна кількість пікселів).

Порівняння отриманих термограм за обраними критеріями (при використанні в якості вирішувального правила «двох сигм» [5]) показало, що кожний з цих критеріїв окремо не забезпечує достатньої вірогідності діагностики. Так, при застосуванні тільки критерію $D1$ визнано дефектним лише 1 вузол із 128, що розглядалися. За критеріями $D2$ та $D3$ було виявлено аномалії в 5-ти різних вузлах за кожним з цих критеріїв.

5. Для вирішення вищевказаної проблеми обрані критерії поєднуються в один, інтегральний критерій. Цей інтегральний критерій подоби формулюється як:

$$I = (D1^*)^2 + (D2^*)^2 + (D3^*)^2, \quad (7)$$

де $D1^*$, $D2^*$, $D3^*$ – це критерії (4-6) в стандартизованому вигляді.

6. Як вирішувальне правило пропонується нерівність:

$$I > I_{кр}, \quad (8)$$

де $I_{кр}$ – критичне значення інтегрального критерію подоби (7).

Вузли, що задовольняють нерівності (8) визнаються дефектними.

7. Виходячи з того, що інтегральний критерій подібності (7) має розподіл χ^2_2 із двома ступенями свободи [6], то критичне значення інтегрального критерію $I_{кр}$ береться з довідкових таблиць для розподілу χ^2 .

Наприклад, на рівні значущості $\alpha = 0,05$ за даними [5] критичне значення інтегрального критерію подібності дорівнює

$$I_{кр}(\alpha = 0,05) = 5,99. \quad (9)$$

3 Апробація запропонованого алгоритму на реальних об'єктах

Для оцінки вірогідності запропонованого методу була проведена його апробація шляхом обробки результатів контролю реальних вузлів газомоторних компресорів: 128 клапанів та 23 шатунних підшипників. Непряма оцінка помилок першого роду дала результат 7,8% та 8,6% відповідно, що не виходить за межі довірчого інтервалу заданого рівня значущості $\alpha = 0,05$ і може вважатися прийнятним.

Безпосереднє підтвердження працездатності розробленого алгоритму отримано на одному з 6 обстежених агрегатів шляхом його розбору – забраковані по наведеному алгоритму вузли (два шатунних підшипники) дійсно виявились дефектними.

Висновки

Застосування методів обробки зображень для аналізу температурних полів дозволяє за результатами термографічних обстежень здійснювати технічну діагностику машин і агрегатів.

Розроблений на принципах статистичних підходів алгоритм обробки термограм підтвердив свою працездатність на обраному типі агрегатів (машин).

Запропонований підхід може бути застосований і для інших типів машин за умови наявності в них достатньої кількості однотипних вузлів.

Література

- [1] Xavier P. V. Maldague. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing / Xavier P. V. Maldague – John Wiley & Sons, Inc., 2001. – p. 684.
- [2] Стороженко В.А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле: [Монография] / В.А. Стороженко, В.А. Маслова. – Х.: Смит, 2004. – 160с.
- [3] Малик С.Б. Статистический подход к выбору критерия дефектности узлов силовых агрегатов по результатам термографирования // Прикладная радиоэлектроника – 2008 – Том 7 – №4 – С. 224-226.
- [4] Стороженко В.А. Информационные признаки и решающие правила для обработки результатов термографического контроля / В.А. Стороженко, С.Б. Малик, А.В. Мякий // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ, 2009. – №22. – С. 3-6.
- [5] Statistical Design and Analysis of Experiments With Applications to Engineering and Science. [Second Edition] / Robert L. Mason, Richard F. Gunst, James L. Hess - A John Wiley & Sons Publication, 2003. – 746 p.
- [6] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике [для научных работников и инженеров] / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука, 1978. – 832 с.