

НОВІ МЕТОДИ ТЕПЛОВОЇ ТОМОГРАФІЇ, А ТАКОЖ ФІЛЬТРАЦІЇ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

© Мельник Сергій¹, Петріченко Геннадій², Тулузов Ігор³, 2016

¹ІРЕ ім. А. Я. Усікова НАН України, вул. Академіка Проскури, 12, Харків, Україна

²ТОВ НВФ "Харків-Прилад", вул. Киргизька, буд. 94/1, Харків, Україна

³Харківський регіональний центр інвестицій, пр. Науки 38, Харків, Україна

Запропоновано два нові методи теплової томографії, основані на оригінальних методиках нагрівання та алгоритмах розв'язання оберненої задачі теплопровідності в об'єкті контролю. Додатково запропоновано три методи оброблення тепловізійних зображень, що ґрунтуються на урахуванні динаміки термографічного зображення та дають змогу відфільтрувати артефакти, пов'язані із неоднорідністю коефіцієнта випромінювання поверхні, значно збільшують кількість віртуальних пікселів та якість зображення, дають змогу максимально повно використати апіорну інформацію для розв'язання некоректних обернених задач реконструкції. Наведено приклади застосування цих методів до задачі контролю каналів охолодження у лопатках турбін.

Ключові слова: інфрачервона камера, лопатка турбіни.

Предложены два новых метода тепловой томографии, основанных на оригинальных методиках нагрева и алгоритмах решения обратной задачи теплопроводности в объекте контроля. Дополнительно предложены три метода обработки тепловизионных изображений, которые основаны на учете динамики термографического изображения и позволяют отфильтровать артефакты, связанные с неоднородностью коэффициента излучения поверхности, значительно увеличивают количество виртуальных точек и качество изображения, позволяют максимально полно использовать априорную информацию при решении некорректных обратных задач реконструкции. Приведены примеры применения этих методов к задаче контроля каналов охлаждения в лопатках турбин.

Ключевые слова: инфракрасная камера, лопатки турбины.

Two new thermal imaging methods, based on the original methods of heating and algorithms for solving the inverse problem of heat conduction in the test object. In addition, proposed three methods of thermal imaging, which are based on the account of the dynamics of thermographic images and allows you to filter artifacts related to the heterogeneity of the surface emissivity, significantly increase the number of virtual pixels and image quality, allows maximum use of a priori information in the solution of ill-posed inverse problems of reconstruction. Examples of application of these methods to the problem of the cooling channels in turbine blades control.

The projection dynamic thermal tomography (PDTT) method is applicable for control of objects with irregular internal structure. It allows reliably detecting the foreign inclusion-type defects and controlling with high accuracy the geometric parameters of the internal structure of objects. This method is designed for using modern thermal imager with a standard set of parameters and does not require expensive additional equipment. Preliminary numerical analysis of capabilities of the proposed method for specific objects and the parameters of expected defects is possible, indicating the requirements to the parameters of thermal imager and heating. The PDTT method is superior in terms of information value to all alternative DTT methods and can also replace a number of more expensive control procedures using other methods (ultrasonic, x-ray, SHF).

The generally accepted parameters of evaluating the quality of cooling turbine blades are missing. A wide range of sizes and their cooling mechanisms significantly complicate the use of such parameters as absolute values. We propose to use a universal relative parameter. It corresponds to the virtual heat transfer coefficient at a predetermined depth of the metal layer. It illustrates the possible use of this parameter for various methods of thermal control. It is shown that an integrated approach to the construction of the control system and the integration of different modes of cooling can

significantly reduce the uncertainty of the quality of the cooling parameter. He is a local and could eventually be used to evaluate the residual life of the blade.

In case of random nature of heating the measured thermal emission flow depends not only on the real surface temperature, but also on its emissivity factor. Unlike the known DTT methods, the filtration of artifacts requires taking account of the dynamics of the whole process. Such processing is performed in each pixel of the thermal image and the dynamics of measurements in adjacent pixels is also taken into account. The accuracy of the filtration is determined both by the number of adjacent pixels taken into account and the completeness of the obtained measurement information.

The problems encountered when observing objects, whose dimensions do not exceed several pixels of the matrix of recorders. It is shown that the motion of the object relative to the matrix, and the use of multiple consecutive frames can significantly improve the fidelity of the shape and true size of the object. This measurement information can be represented as integrals along the trajectories on a three dimensional lattice of space-time pixels. The reconstructions of a heterogeneity function of pixels through the use of the controlled motion of the test object and methods of computer tomography. The possibility of determining the relative velocity of the object in each of the frames using the "blind" method. The algorithm of reconstruction of images with large non-uniform increment, as in passive, and when they are managed relative motion.

An algorithmic approach to solving inverse problems of reconstruction of the structure of the scattering medium can significantly improve its informativeness in cases where the lack of prior information and a high noise level does not allow to use standard approaches. Thus, unlike statistical processing methods, constructing a set of hypotheses is not required. The unknown parameters of the processing procedure can be obtained using the "blind method" in the reconstruction process. This automatically eliminates the possible redundancy of model. The choice of language to describe the array of input data and the search algorithm of the model optimal parameters is determined not by the features of the device and the object of observation, but by the expected view of the final presentation of the results. The described technique is universal and can be used for solving different tasks of reconstruction as a whole, and in any intermediate signal processing.

Key words: *infrared camera, turbine blade.*

Вступ. У задачах теплового контролю промислових об'єктів засобами термографії (зокрема, за допомогою тепловізорів) обмежуються, як правило, вимірюванням температури поверхні об'єкта. Але у багатьох випадках є потреба у детальнішому визначенні підповерхневих дефектів або ж у контролі внутрішніх поверхонь об'єкта, до яких немає прямого доступу. Такі задачі називають задачами томографії. У багатьох методах контролю, таких як рентгенівський, ультразвуковий, магнітно-резонансний та інших, вони давно й успішно розв'язані. Але щодо теплового методу, у якому хвилі теплового випромінювання не проникають під поверхню, їх розв'язання ще дуже далеко від ідеалу. Дотепер практично застосовується тільки метод імпульсної томографії [1] та деякі його узагальнення. У цьому методі вимірюється часовий зсув максимуму температурного відгуку від дельта-імпульсу тепла, що діє на поверхню об'єкта. В іншому варіанті (дії гармонічним тепловим потоком) вимірюється фазовий зсув між коливаннями теплового потоку та вимірної температури у кожній з точок поверхні. Ця методика

дає змогу уникнути артефактів, пов'язаних із неоднорідністю коефіцієнта випромінювання поверхні, але вона не враховує ефекту розтікання тепла вздовж поверхні. Тобто розв'язує задачу томографії у одновимірному наближенні. В результаті роздільна здатність таких методів не перевищує 1,2 за критерієм відношення відстані двох точкових неоднорідностей до глибини їх залягання (за меншої відстані вони відтворюються у кінцевому рішенні як одна точка). Тому задача одержання точнішої реконструкції внутрішньої структури об'єкта у термографії актуальна. Щоб розв'язати її, ми запропонували два нові методи теплової томографії та три допоміжні алгоритми, які дають змогу уникнути артефактів та регуляризувати розв'язання оберненої некоректної задачі.

1. Нові методи теплової томографії. У кожному з двох запропонованих методів ми розв'язуємо тривимірну обернену задачу теплопровідності у підповерхневому шарі об'єкта, що контролюється. Але у першому з них ми використовуємо модель однорідного

шару об'єкта змінної товщини, із заданими граничними умовами на обох поверхнях. Розподіл товщини шару ми реконструюємо, розв'язуючи задачу томографії. А в другому навпаки – вважаємо товщину шару постійною та розраховуємо розподіл граничних умов на внутрішній поверхні шару. Об'єднання результатів розв'язків задачі теплової томографії обома методами дає можливість підвищити роздільну здатність порівняно із методом імпульсної теплової томографії майже на порядок.

1.1. Метод проєкційної динамічної теплової томографії (ПДТТ). У цьому методі використовують будь-який засіб нагрівання об'єкта, що створює нестационарні теплові потоки у різних напрямках [2]. Наприклад, за допомогою нагрітої основи (метод “теплової хвилі”, рис. 1). Завдяки цьому на поверхні об'єкта формується не менше від двох динамічних теплових проєкцій – температурних розподілів, що вимірюються тепловізором. Після цього спеціальний алгоритм (розв'язання зворотної задачі) відтворює тривимірний (томографічний) образ внутрішньої структури об'єкта.

Найвища інформативність досягається за взаємоперпендикулярних потоків, за аналогією із іншими метода-

ми проєкційної томографії (рентгенівська, ЯМР). Метод ПДТТ не потребує ніякого специфічного характеру нагрівання, але принципово важливо забезпечити його нестационарність. Дані контролю адитивні та можуть доповнювати раніше отримані дані. Зокрема, після попереднього (грубого) виявлення дефектів можливе створення інтенсивніших локальних теплових потоків поблизу них. Ми провели експерименти і на комп'ютерних моделях тестових об'єктів, і на моделі лопатки турбіни.

За результатами тестування визначено, що мінімальне відношення діаметра тестового дефекту до глибини залягання краще за 0,4, а точність визначення діаметра дефекту вища за 10 % за рівня адитивного шуму 5 % (рис. 2). Додатково визначено, що у результатах реконструкції немає “тіньових ефектів” та що вони стійкі до адитивного теплового шуму не вище за 400 мК (рис. 3).

Загалом можна зазначити, що метод ПДТТ дає змогу виявляти внутрішні дефекти із розмірами, у кілька разів меншими за глибину їх залягання, що на порядок перевищує показники альтернативних методів теплової томографії [3] (рис. 4).

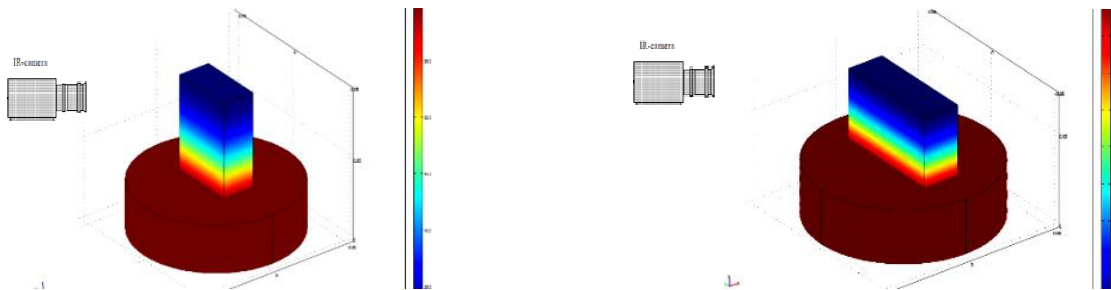


Рис. 1. Схема одержання теплових проєкцій внутрішньої структури об'єкта у двох перпендикулярних напрямках

Fig. 1. The scheme for obtaining the thermal projection of the internal structure of the object for two perpendicular directions

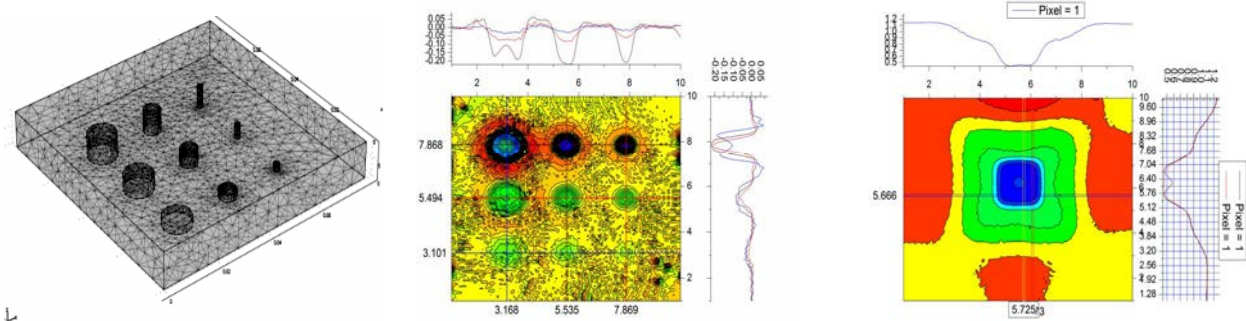


Рис. 2. Комп'ютерна модель тестових об'єктів та результат реконструкції їхньої внутрішньої структури методом ПДТТ

Fig. 2. Computer model of test objects and the reconstruction of their internal structure by PDDT

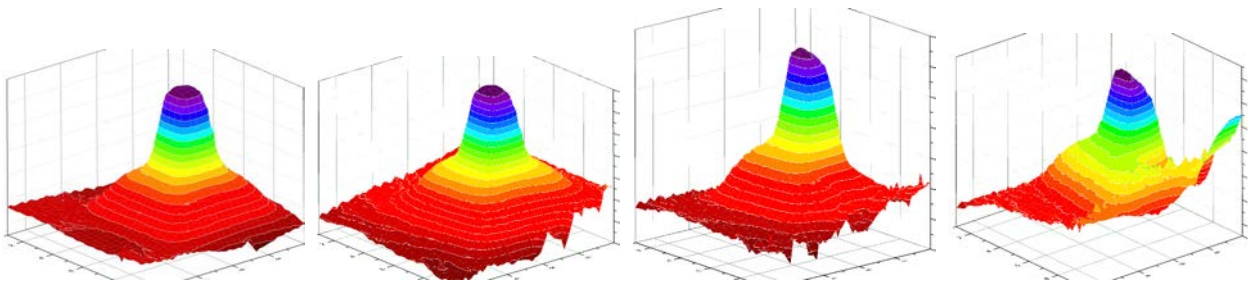


Рис. 3. Результат реконструкції дефекту складної форми за амплітуди адитивного шуму 0.05; 0.1; 0.2 й 0.4 К. Температура динамічного нагрівання зовнішньої поверхні не перевищує 150 °С

Fig. 3. The result of reconstruction of the complex form defect. Additive noise amplitude is 0.05; 0.1; 0.2 and 0.4 K. Temperature dynamic heating the outer surface does not exceed 150 °C

Рис. 4. Метод ПДТТ (пунктир внизу на рисунку) має на порядок кращу роздільну здатність порівняно із іншими методами теплової томографії та перевищує показники ультразвукової томографії за малих розмірів дефектів

Fig. 4. Method PDDT (red dotted line in the figure) has much better resolution compared to other methods of thermal imaging. It is higher than ultrasound imaging defects at small sizes

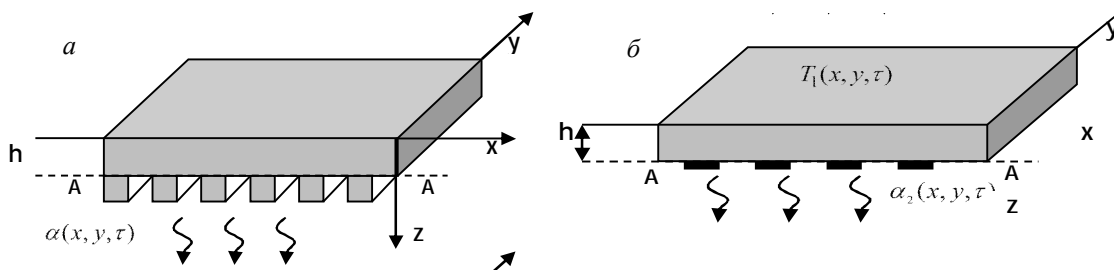
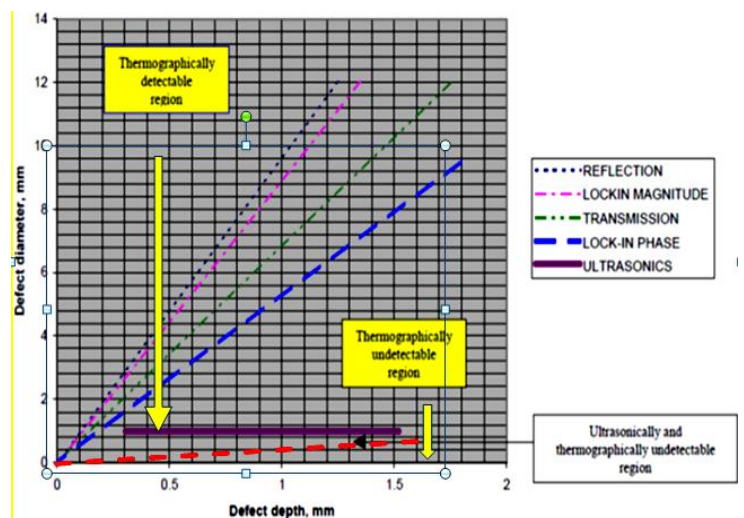


Рис. 5. Теплофізична модель половини лопатки з охолоджувальними каналами (а); еквівалентна модель однорідного підповерхневого шару металу (б)

Fig. 5. Thermal model of the blade with cooling channels (a); the equivalent model of homogeneous subsurface layer of metal (b)

1.2. Метод еквівалентного коефіцієнта тепловіддачі. Сутність методу еквівалентного коефіцієнта тепловіддачі полягає у тому, що метод просторових теплових передатних функцій [4] дає змогу зв'язати фур'є-образи $\tilde{T}_1, \tilde{T}_2, \tilde{q}_1, \tilde{q}_2$ температури та теплового потоку на поверхні об'єкта ($T_1(x, y, t); q_1(x, y, t)$) та на заданій глибині h ($T_2(x, y, t); q_2(x, y, t)$).

$$\left| \begin{matrix} \tilde{T}_2(w_x, w_y, w) \\ \frac{1}{kI} \tilde{q}_2(w_x, w_y, w) \end{matrix} \right| = \begin{bmatrix} \cos(kh) & -\sin(kh) \\ \sin(kh) & \cos(kh) \end{bmatrix} \cdot \left| \begin{matrix} \tilde{T}_1(w_x, w_y, w) \\ \frac{1}{kI} \tilde{q}_1(w_x, w_y, w) \end{matrix} \right|,$$

де $k^2 = -i \cdot \frac{w}{a} - w_x^2 - w_y^2$ (1)

У результаті цього, збільшуючи параметр h , можемо пошарово розраховувати значення еквівалентного

коефіцієнта тепловіддачі на різних глибинах за формулою:

$$a_2(x, y, t) = \frac{F^{-1}[\tilde{q}_2(w_x, w_y, w)]}{F^{-1}[\tilde{T}_2(w_x, w_y, w)]} \quad (2)$$

Приклад такого розрахунку показано на моделі верхньої частини лопатки турбіни з охолоджувальними каналами (рис. 5).

Алгоритм розрахунку еквівалентного коефіцієнта тепловіддачі можна адаптувати до різних методик проведення теплового контролю, зокрема до таких:

Метод “продування”. Під час процедури “продування” холодним повітрям попередньо нагрітої лопатки вважатимемо, що $q_1(x, y, t) = 0$. Тоді температурний розподіл на зовнішній поверхні лопатки $T_1(x, y, t)$ дає змогу визначити і температурний розподіл, і тепловий потік у перерізі А-А (рис. 5, а). Виконуючи зворотне перетворення Фур’є $f(x, y, t) = F^{-1}[\tilde{f}(w_x, w_y, w)]$, можемо визначити шукану функцію як

$$a_2(x, y, t) = \frac{F^{-1}[kI \cdot \sin(kh) \cdot \tilde{T}_1(w_x, w_y, w)]}{F^{-1}[\cos(kh) \cdot \tilde{T}_1(w_x, w_y, w)]} \quad (3)$$

Вважаючи kh малим параметром та розкладаючи $\sin(kh)$ та $\cos(kh)$ у ступеневі ряди, у першому наближенні отримуємо тривіальний результат:

$$a_2(x, y, t) = \frac{crh \frac{\partial}{\partial t} T_1 - I h \nabla^2 T_1}{T_1(x, y, t)} \quad (4)$$

Фактично, це рівняння теплового балансу для елементарної приповерхневої комірки товщини h . У разі використання безрозмірних змінних $x' = x/h$, $t' = at/h^2$ та $a' = (ah)/I$ диференційний оператор для знаходження ефективного значення безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі на глибині h має вигляд:

$$a_2'(x, y, t) = \frac{q_2(x, y, t)}{T_2(x, y, t)} \cdot \frac{h}{I} \approx \frac{\mathcal{L}T_1 - \frac{1}{6}\mathcal{L}T_1 + \frac{1}{120}\mathcal{L}T_1 - \dots}{T_1 - \frac{1}{2}\mathcal{L}T_1 + \frac{1}{24}\mathcal{L}T_1 - \frac{1}{720}\mathcal{L}T_1 + \dots} \quad (5)$$

де оператор $\mathcal{L} \equiv \frac{\partial}{\partial t'} - \nabla'^2$ записано для безрозмірних змінних. Зазначимо, що, використовуючи темп охолодження поверхні $h = \frac{1}{T_1} \frac{\partial}{\partial t} T_1$ для оцінювання якості охолодження [5], ми нехтуємо і товщиною пластини, і ефектом розтікання тепла по ній. Вже перша поправка до параметра h , одержана без урахування розтікання тепла, дає новий критерій:

$a_2' = (h h^2/a)/(1 - h h^2/a)$. Його використання уможливило фокусування термографічних даних контролю на задану глибину (тобто одержання томографічних зображень внутрішньої структури об’єкта).

Теплова імпульсна томографія. У випадку нагрівання поверхні лопатки однорідним та гармонічним потоком $Q_1(t) = Q_1 \cdot \exp(iwt)$ з частотою w [6] еквівалентний коефіцієнт тепловіддачі на глибині h можна розрахувати за формулою:

$$a_2'(x, y) \approx \frac{Q_1 \left(1 - \frac{1}{2} + \dots\right) + (1 - a_1') \mathcal{L}T_1 - \left(\frac{1}{6} - \frac{a_1'}{24}\right) \mathcal{L}^2 T_1 + \dots}{Q_1 + (1 + a_1') T_1 - \left(\frac{1}{2} + \frac{a_1'}{6}\right) \mathcal{L}T_1 + \left(\frac{1}{24} + \frac{a_1'}{120}\right) \mathcal{L}^2 T_1 \dots} \quad (6)$$

де $\mathcal{L} \equiv iw' - \nabla'^2$, $w' = w \frac{h^2}{a}$ – безвимірний коефіцієнт теплового потоку, a_1' – безвимірний коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні. Доцільність вибору одного із наближень для розрахунку $a_2'(x, y)$ визначається з урахуванням таких факторів, як рівень шумів, чутливість тепловізора, наявність апріорної інформації про характер неоднорідностей та дефектів тощо.

2. Нові методи оброблення результатів термографії. Результативність застосування і описаних вище нових методів теплової томографії, і альтернативних сильно залежить від рівня шумів, що роблять обернену задачу теплопровідності некоректною. Для боротьби із цим фактором ми розробили допоміжні методи оброблення первинного тепловізійного зображення. Їх використання дає змогу набагато повніше використати наявну корисну інформацію, на відміну від стандартних методик згладжування та спектральної фільтрації, які “обрізають” її більшу частину. У цій роботі ми коротко опишемо сутність трьох з таких методів.

2.1. Метод динамічної фільтрації неоднорідностей коефіцієнта випромінювання. Сутність цього методу полягає у побудові образу вибраного пікселя термограми для великої (кілька десятків) кількості послідовних кадрів тепловізійного фільму [2]. Теплофізичний аналіз і цих даних, і даних у сусідніх пікселях-кадрах дає змогу відобразити ці дані як точку на двовимірній координатній площині. В ідеалізованому випадку (коли коефіцієнт випромінювання поверхні у цій точці не залежить від температури та за відсутності теплових шумів матриці тепловізора) всі точки лягають на пряму лінію (рис. 6). Лінія проходить

через початок координат тільки у тому випадку, коли дійсний коефіцієнт випромінювання не відрізняється від середнього для кадру $\nabla\epsilon = 0$ (рис. 6, б). Для всіх інших пікселів термограми можемо виміряти два параметри, що характеризують динаміку сигналу – нахил прямою та її зсув відносно початку координат (рис. 6, а). На основі цих двох параметрів розраховують і дійсний коефіцієнт випромінювання у цьому пікселі, і його дійсну температуру в кожному з кадрів. Точність такої фільтрації залежить як від кількості кадрів, що використовують для побудови лінії, так і від рівня теплових шумів, що вносять хаотичність в одержаний графік. Коли інтегральний коефіцієнт випромінювання залежить від температури, лінія на графіку вже не є прямою, але залишається безперервною та гладкою, що не заважає використанню алгоритму.

2.2. Метод підвищення розрізняльної здатності термографії за рахунок динамічної реконструкції “зсуву” послідовних кадрів. Цей алгоритм відтворює “змазане” тепловізійне зображення малих об’єктів за наявності вимірювальних даних з сильним рівнем дискретизації і за просторово-часовими координатами, і за амплітудою сигналу [7]. Використання декількох послідовних кадрів фільму та динамічного алгоритму дає змогу не тільки ліквідувати “змазаність”, але й у відповідну кількість разів підвищити ефективну роздільну здатність термофільму. Розглянемо спочатку (для простоти) випадок одновимірному сканування. Нехай:

- $U_0(x)$ – форма первинного аналогового сигналу з тепловізора;

- $U_0(x; t)$ – аналоговий безперервний сигнал, що надходить на одновимірну лінійку пікселів датчика;
- u – швидкість руху об’єкта, постійна в інтервалі кадрів, що розглядаються;
- $r(t_k-t)$ – вагова функція внеску різних моментів часу в інтегральний сигнал k -го кадру;
- $m(x_i-x)$ – функція внеску різних точок в інтегральний сигнал i -го пікселя;
- dU – крок дискретизації амплітуди сигналу; dt – час одного кадру; dx – розмір одного пікселя.

Тоді $U(x; t) = U_0(x-ut)$ та для k -го кадру та i -го пікселя дискретного масиву даних одержимо:

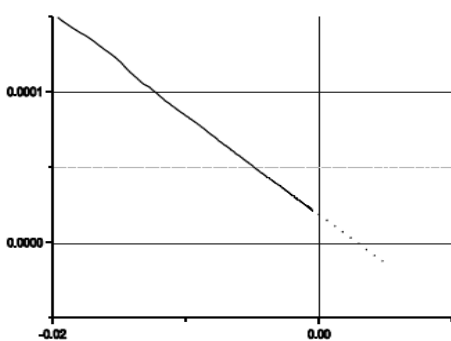
$$U_{i,k} \equiv \text{int} \left[\frac{1}{dU} \int \int U_0(x-ut) m(x-x_i) r(t-t_k) dx dt \right]. \quad (7)$$

У результаті відносного руху зображення кожна точка невідомої функції $U_0(x)$ перетинатиме прямокутник $[dt \cdot dx]$ по деякому відрізку. Тоді значення $U_{i,k}$ розраховують як

$$\begin{aligned} U_{i,k} &= \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x) G_{i,k}(x-x_i) + k u dt dx = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x) G_{i,k}(x-x^*) dx = U(x^*); \end{aligned} \quad (8)$$

де $x_i = (i-1)dx$ та

$$G_{i,k}(x) = \begin{cases} \int_{x_i}^{x_i+ndt} m(x') r\left(\frac{x'-x}{n}\right) dx' & \text{if } x_i - kndt \leq x \leq x_i \\ \int_x^{x+ndt} m(x') r\left(\frac{x'-x}{n}\right) dx' & \text{if } x_i \leq x \leq x_i + dx - kndt \\ \int_x^{x_i+dx} m(x') r\left(\frac{x'-x}{n}\right) dx' & \text{if } x_i + dx - kndt \leq x \leq x_i + dx \end{cases} \quad (9)$$



а



б

Рис. 6. Приклад застосування методу динамічної фільтрації для пікселя із відхиленням коефіцієнта випромінювання від середнього для кадру (а) та без нього (б)

Fig. 6. An example of the application of dynamic filtering method to the pixel with a deviation of the emission coefficient (a) and without (b)

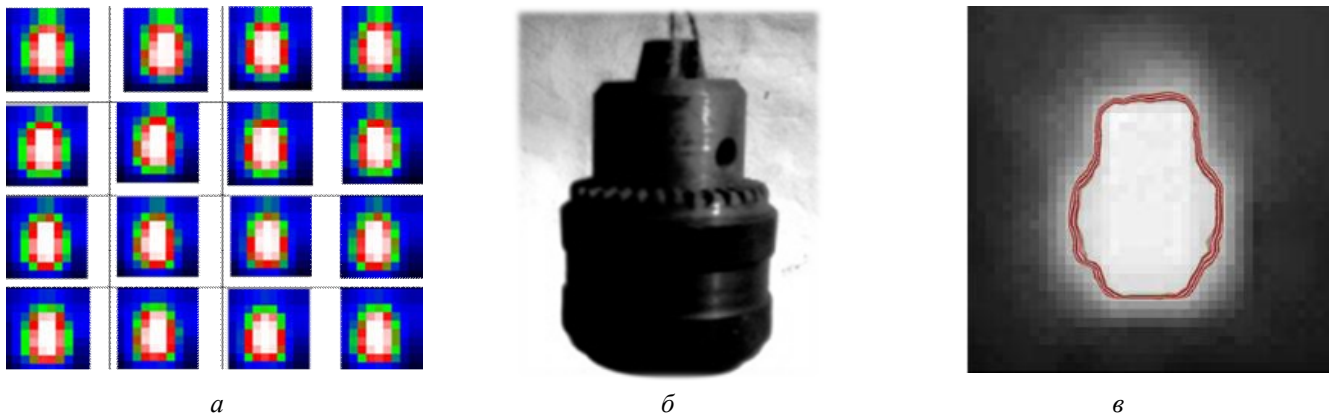


Рис. 7. Приклад реконструкції “змазаного” тепловізійного зображення: а – не оброблені зсунуті кадри (розміри об’єкта приблизно 3 ‘5 пікселів); б – фото об’єкта; в – реконструйоване тепловізійне зображення об’єкта

Fig. 7. Example reconstruction “blurred” thermal image: а – not treated shifted frames (dimensions about 3 ‘5 pixels); б – photo of the object; в – thermal reconstructed image of the object

Якщо енергетична чутливість пікселя матриці однорідна по площині та за часом кадра, цей інтеграл дає значення, що пропорційне до довжини відрізка. Тоді функція $G(x)$ має форму трапеції, але у загальному випадку вона розраховується на підставі функцій $m(x^{1-i-x}; r(t_k-t))$ та залежить від швидкості u . Вираз, що одержано, є згортокою функцій. Тому шукану функцію $U_0(x)$ можна відновити за допомогою алгоритму оберненої згортки. Вираховуючи функцію $f(w_k)$, що залежить від просторової частоти, маємо можливість (та потрібну інформацію) для визначення і швидкості u_k , і u_{k+1} .

$$\frac{IFP_x[G_k(x; u_k)]}{IFP_x[G_{k+1}(x; u_{k+1})]} = \frac{IFP_{x^*}[U_k(x^*)]}{IFP_{x^*}[U_{k+1}(x^*)]} = f(w_x). \quad (10)$$

З урахуванням особливостей реконструкції зображення, переходу до двовимірної моделі, результатів додаткових тестових вимірів, а також за рахунок оптимізації режиму знімання можемо сформулювати алгоритм підвищення роздільної здатності зображень із сильною просторово-часовою дискретизацією:

- Визначення функції неоднорідності просторово-часового пікселя за допомогою тестового об’єкта. Одна з таких можливостей – спостереження за рухом тестового “точкового” об’єкта, що рухається із різними швидкостями.

$$U_{i;k(test)}(x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} d(x) G_{i;k}(x - x_i) dx = G_{i;k}(x_i). \quad (11)$$

- Визначення відносної швидкості руху об’єкта в кожному з кадрів та діапазону кадрів, в яких форму об’єкта можна вважати постійною.

- Розрахунок функції $G(x; y; u)$ для кожного значення швидкості.
- Реконструкція $U_0(x)$ за допомогою алгоритму оберненої згортки (використовуючи методи теорії “складності”, зокрема).
- Вибір оптимального значення параметрів реконструкції (підвищення роздільної здатності, точності задання швидкості, результатів вимірювань тощо) за критерієм компактності одержаного у результаті реконструкції зображення (алгоритмічна складність функції $U_0(x)$).

Приклад застосування запропонованого алгоритму наведено на рис. 7. На ньому показано 16 вихідних тепловізійних зображень об’єкта, кожне з котрих зсунуте на чверть пікселя (по вертикалі чи горизонталі) від попереднього. Також на рисунку показано сам об’єкт та результат реконструкції тепловізійного зображення за запропонованим алгоритмом. Кількість віртуальних пікселів відновленої термограми у 16 разів більша за початкову.

2.3. Підвищення розрізняльної здатності теплової томографії методами “теорії складності”.

Реконструкція внутрішньої структури у задачах теплової томографії пов’язана із розв’язанням зворотної некоректної задачі. Для регуляризації її розв’язання розроблено багато математичних методів, таких як метод “нев’язки” академіка Тихонова [8], метод оптимальної спектральної фільтрації та інші. До їхніх недоліків можна зарахувати сильну залежність точності розв’язку від суб’єктивних факторів (вибір виду згладжувального функціонала, наприклад). Також

для їх застосування треба мати специфічну апріорну інформацію про особливості об'єкта контролю та спектральні характеристики шуму. Раніше ми показали [9], що методи "теорії складності", а саме – принцип мінімізації алгоритмічної складності опису результатів вимірювань з урахуванням апріорної інформації узагальнюють інші методи регуляризації. Застосування цього узагальненого критерію у деяких випадках може на порядок збільшити точність розв'язання некоректної задачі. У цій роботі обмежимось наведенням прикладу застосування цього критерію для розв'язання тестової задачі теплової томографії [10]. А саме – розрізнення двох точкових витоків тепла на заданій глибині (рис. 8). За мінімальним значенням відношення відстані між витокami, які ще розрізняються, до глибини можна робити висновки про

якість методу реконструкції. Можна побачити, що тільки за рахунок повнішого використання апріорної інформації (про точковий характер дефектів) можна підвищити роздільну здатність теплової томографії у три рази.

3. Контроль системи каналів охолодження лопаток турбін на основі запропонованих методів та алгоритмів. Нові методи теплової томографії застосовано для контролю каналів охолодження у лопатках турбін. Далі наведемо деякі з попередніх результатів цього застосування. На рис. 9 подано фото такої лопатки (а) та приклад термограми (б) під час проходження по ній теплової "хвилі". Можна побачити, що візуально внутрішня структура каналів охолодження ніяк не проявляється.

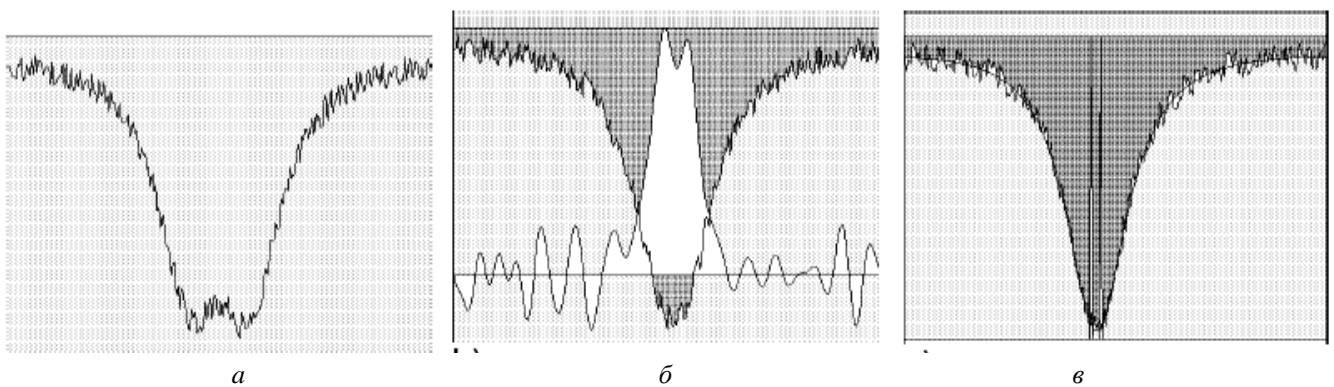


Рис. 8. Граничне значення критерію чутливості "відстань / глибина" для двох точкових дефектів за рівня адитивного шуму 5 %: а – без реконструкції – 1,7; б – метод Тихонова – 0,6; в – теорія "складності" – 0,2

Fig. 8. Threshold criterion sensitivity thermal imaging "distance / depth" for the two point defects at the level of additive noise 5 %: а – without reconstruction – 1,7; б – tikhonov method – 0,6; в – the theory of "complexity" – 0,2

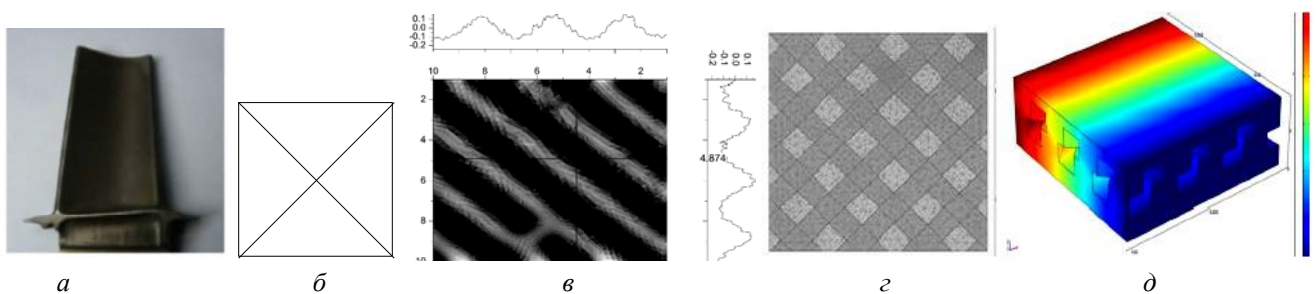


Рис. 9. Проходження "теплової хвилі" крізь лопатку на реальному об'єкті та на комп'ютерній моделі

Fig. 9. Passing the "heat wave" through the blade on the real object and the computer model

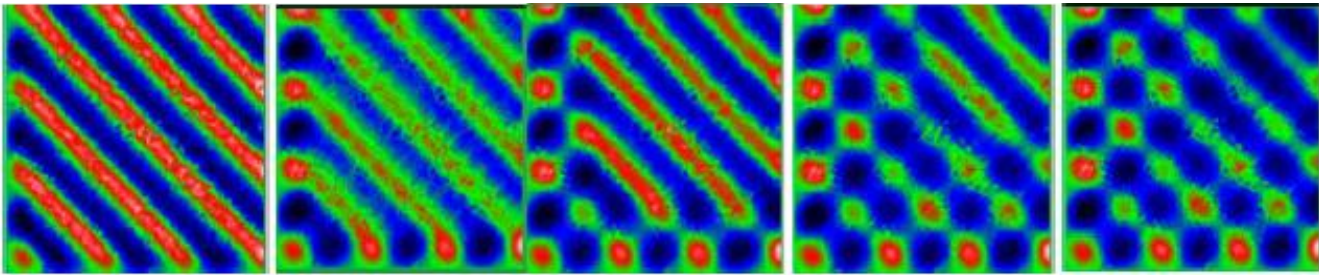


Рис. 10. Зміна параметра реконструкції дає змогу віртуально “фокусувати” томографічне зображення на різних глибинах (від 1 мм – зліва до 2 мм – справа)

Fig. 10. Changing reconstruction parameter allows virtually focusing a tomographic image at different depths (from 1 mm – left to the 2 mm – right)

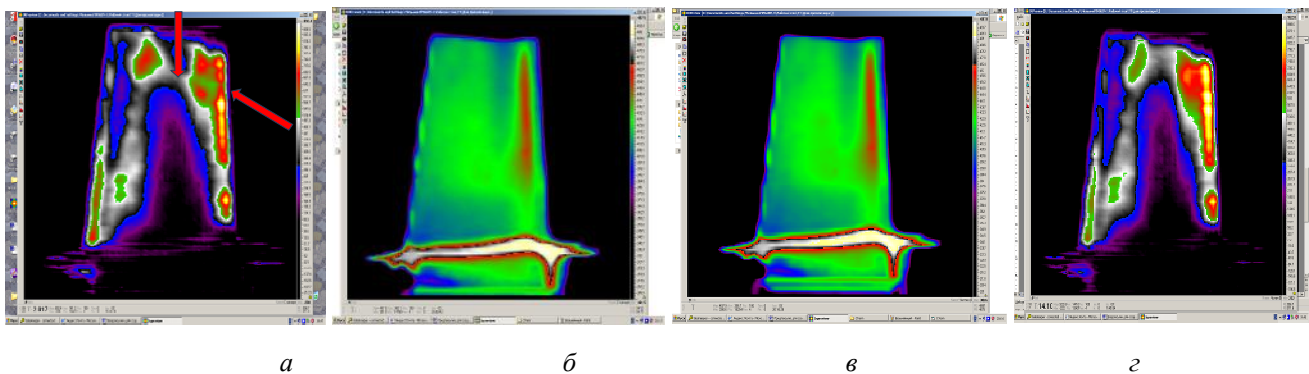


Рис. 11. Термограми лопатки, що контролюється за методом “продування” до (а) та після закупорки (б); результати реконструкції еквівалентного коефіцієнта тепловіддачі лопатки на глибині 1 мм до (в) та після закупорки (д). Виявлено місце закупорки та його вплив на сусідні ділянки охолодження (червоні стрілки)

Fig. 11. The thermograms of the blade, which is controlled by the method of “purge” before (a) and after (b) the blockage. The results of the reconstruction of the thermal conductivity at a depth of 1 mm. before (c) and after (d) occlusion. Revealed the blockage and its impact on neighboring areas (red arrows)

Для тестування методів теплової томографії ми зробили комп’ютерну модель зони охолодження лопатки із двома шарами каналів у ній (рис. 9, в–д). Виконавши моделювання теплової “хвилі” (рис. 9, д), та застосувавши метод ПДГТ (рівень адитивного шуму 5 %), вдалося виявити структуру верхнього шару каналів та місце закупорки одного з них (рис. 9, д). Зміна одного з параметрів реконструкції за цим методом дає змогу віртуально “сфокусувати” реконструйоване зображення на заданій глибині (рис. 10). Вдається визначити “дефект під дефектом” (тобто нижній шар перпендикулярно розташованих каналів під верхнім шаром). Альтернативні методи теплової томографії, про які ми згадували вище, не мають цієї можливості.

Метод еквівалентного коефіцієнта тепловіддачі також дає змогу контролювати якість охолодження лопатки на різних глибинах. На відміну від поперед-

нього, він не виявляє так явно структуру каналів, але дає змогу одержати інформацію про розподіл теплофізичних характеристик охолодження, що може бути навіть важливішим під час розрахунків “напрацювання на відмову”. На рис. 11 показано результати контролю за цим методом лопатки до та після штучної закупорки одного з каналів охолодження. На необроблених термограмах візуально цей дефект не проявляється. Виявлено місце закупорки та його вплив на сусідні ділянки охолодження. Диференційний метод контролю дає змогу одержати необхідну інформацію про відхилення параметрів охолодження лопатки від еталона. На основі цих методів та допоміжних алгоритмів обробки термограм, згаданих вище, розроблено комплексну систему контролю каналів охолодження лопаток. За рахунок використання нових методів та алгоритмів вона має набагато більший потенціал, аніж її прототип [11].

Висновки. Запропоновані нові методи теплової томографії та оброблення термограм можуть значно розширити сфери використання методів теплового контролю, підвищити його надійність та інформативність. Вони істотно наближають результати теплової томографії до якості результатів, одержаних іншими томографічними методами. Водночас за універсальністю теплових методів вони не мають конкурентів. Подальший розвиток цього напрямку вбачаємо у застосуванні комплексного методу теплової томографії, що узагальнює наведені у роботі, розширенні їх на об'єкти контролю у мікро- та нанотермографії, створенні універсальних систем для комплексного проведення теплового обстеження та одержання тривимірних образів внутрішньої структури високої якості. Запропоновані методи можуть бути адаптовані до теплового контролю об'єктів у багатьох галузях промисловості, зокрема – лопаток вітрових електростанцій без їх демонтажу та зупинки [12].

1. Vavilov V., Nesteruk D., Shirayev V., Ivanov A. *Some novel approaches to thermal tomography of CFRP composites, 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, July 27–30, 2010, Québec (Canada)*. 2. Melnyk S. I., Melnyk S. S. and Tuluzov I. G. *Method of projection dynamic thermal tomography (PDTT) // QIRT-2012-308*. 3. Wong B. S., Tui C. G., Bai W., Tan P. H., Low B. S. and Tan K. S. *Thermographic evaluation of defects in composite materials, Insight*. – Aug. 1999. – Vol. 41. – No. 8. 4. Мельник С. І. *Теоретичні та прикладні питання створення теплової дефек-*

тометрії та томографії на основі методу теплових передаточних функцій: дис... канд. техн. наук: 05.11.13 / Харківський гос. технічний ун-т радіоелектроніки. – Х., 1996. – 176 с. 5. Епифанов С. В., Олейник А. В., Перетертов В. Г., Чумаков А. Г. *Исследование регулярного режима в охлаждаемой лопатке турбины // Авиационно-космическая техника и технология: науч.-техн. журн. – 2008. – № 8(55). – С. 121–124*. 6. Vavilov V., Grinzato E., Bizon P., etc. *Some New Ideas in Dinamic Thermal Tomography // QIRT-96 Book of abstracts of Eurotherm Seminar, Stuttgart, Germany. – 1996. – P. D11p–D12p*. 7. Melnyk S. I. and Melnyk S. S. *Reconstruction of images with large non-uniform increments // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – Vol. 75, Issue 8. – P. 719–732*. 8. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. *Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 283 с.* 9. Мельник С. И. *Теоретико-информационный подход к анализу измерительных данных и оценке их неопределенности / С. И. Мельник // Системы обработки информации: сб. науч. пр. – Х.: XV ПС, 2009. – Вып. 5 (79). – С. 89–92*. 10. Melnyk S. *Thermal tomography on the basis of an information method // QIRT 2004-028, C.6.1.–C.6.6*. 11. Мельник С. И., Чумаков А. Г., Баженов Б. Н. *Тепловой контроль локальных дефектов охлаждающих каналов лопаток турбин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 4 (40). – С. 55–57*. 12. Melnyk S. I., Tuluzov I. G. and Melnyk A. S. *Method of remote dynamic thermographic testing of wind turbine blades // QIRT-2014-037*.