

Комплексна методика оцінки точності термографічного виявлення будівельних дефектів

Г.О. Оборський, О.С. Левинський, В.О. Ганусовський, Д.Д. Ольман

Національний університет "Одеська політехніка", пр. Шевченка, 1, 65044, Одеса, Україна
levinsky.o.s@op.edu.ua

Анотація

У дослідженні сформульовано задачу оптимізації термографічної діагностики будівельних об'єктів на основі теплових методів неруйнівного контролю. Розглянуто особливості застосування термографії для багатошарових конструкцій, де теплопередача визначається структурою й теплотехнічними властивостями матеріалів. Проаналізовано чинники, що впливають на точність виявлення дефектів: характеристики поверхні, кут і дистанцію спостереження, зовнішні умови. Запропоновано використання еталонного зразка для локального калібрування інфрачервоної камери, що мінімізує вплив варіацій емісійної здатності та коригує температурні показники. Створено систему кількісної оцінки точності, яка враховує температурну похибку, функцію розподілу ймовірності та довірчі інтервали надійності. Розроблено класифікацію похибок термографічного контролю (об'єктних, режимних, апаратних і калібрувальних) та узагальнено їх у таблиці рішень для планування діагностичних процедур. Практична реалізація методики на основі гібридних фотоматриць забезпечує підвищення точності виявлення дефектів і зменшення хибних результатів.

Ключові слова: інфрачервона термографія; будівельні дефекти; теплова інерція; коефіцієнт випромінювання; ймовірнісна похибка.

Отримано: 03.11.2025

Відредаговано: 21.11.2025

Схвалено до друку: 26.11.2025

Вступ

Сучасне будівництво висуває підвищені вимоги до своєчасного виявлення дефектів і пошкоджень конструкцій [1]. У цьому контексті важливу роль відіграють неінвазивні методи контролю, зокрема тепловий неруйнівний контроль (Infrared Thermographic Non-Destructive Testing, IR-TNDT), що базується на аналізі температурного поля поверхні [1, 2]. Термографічна діагностика дозволяє виявляти приховані дефекти, порушення теплоізоляції та вологі зони, однак її точність обмежується складністю геометрії, багатошаровістю матеріалів і впливом зовнішніх чинників [2]. Відсутність уніфікованої методики, яка б поєднувала теплотехнічні моделі, класифікацію дефектів та алгоритми корекції похибок, зумовлює потребу у створенні комплексної системи оцінки точності термографічного контролю, здатної підвищити ефективність ремонтів і рівень техногенної безпеки. Протягом останніх десятиліть методи IR-TNDT активно розвиваються у напрямі підвищення роздільної здатності, вдосконалення алгоритмів виявлення дефектів, моделювання теплопереносу та застосування машинного навчання [1, 2]. Сучасні системи включають інфрачервоні камери високої чутливості, системи стабілізації, активні нагрівальні модулі та програмні комплекси для аналізу термо-

грам. Тип сенсора визначає спектральний діапазон і стабільність вимірювань [3, 4], а програмні модулі забезпечують фільтрацію сигналу, моделювання теплопередачі та автоматичну класифікацію дефектів [5–7]. Незважаючи на інтеграцію термографії з цифровими моделями об'єктів [7, 8] та її застосування в енергоаудиті й технічній інвентаризації [9], відсутність стандартизації ускладнює порівняння результатів [10]. Це підтверджує потребу у формалізованій методиці, що поєднує фізичне моделювання, цифрову обробку даних і кількісну оцінку точності в єдиній системі. Таким чином, метою дослідження є розробка методики оцінки точності термографічного виявлення дефектів у будівельних конструкціях з урахуванням теплопередачі, параметрів зйомки та зовнішніх чинників, із інтеграцією апаратно-програмних і статистичних засобів обробки даних, через послідовне виконання наступного набору завдань:

- класифікація типових дефектів і моделювання їх впливу на термограму;
- розробка методу оцінки дефектів на основі статистичного аналізу температурних розподілів;
- створення комбінованого підходу до обробки термограм (фільтрація, контрастування, сегментація);
- апробація методики на реальних об'єктах для порівняльної оцінки точності.

Очікується підвищення точності й достовірності діагностики, зменшення впливу зовнішніх чинників та вдосконалення метрологічного забезпечення IR-TNDT.

Настанову оцінювання ІЧ-діагностики, що пропонується, наведено нижче.

1. Постанова задачі

Ефективність термографічної діагностики у будівельній сфері значною мірою залежить від коректного формулювання задачі та обґрунтованого врахування фізичних і конструктивних особливостей об'єкта дослідження. В умовах широкого вибору будівельних матеріалів і конфігурацій конструкцій постає необхідність адаптації принципів теплового неруйнівного контролю до конкретних умов експлуатації та структурної неоднорідності. Особливу складність становлять багатошарові конструкції, де процес теплопередачі має складний просторово-часовий характер і суттєво впливає на форму термограми [2]. Крім того, дефекти різної природи мають різні термічні прояви, що потребує їх систематизації для підвищення точності автоматизованого виявлення. Таким чином, найбільш актуальним для цього етапу дослідження є створення уніфікованої основи, яка дозволить поєднати фізичні моделі, аналітичні підходи та класифікаційні принципи для подальшої оптимізації процедур термографічного контролю (рис. 1). Як було зазначено вище,

в основі IR-TNDT лежить виявлення температурних аномалій, що виникають внаслідок неоднорідностей у внутрішній структурі об'єкта, зокрема дефектів, вологи або порушень теплоізоляції.

Основним джерелом інформації виступає показник інтенсивності інфрачервоного випромінювання, що цілком залежить від температури та емісійної здатності поверхні матеріалу. У будівельному контексті застосування IR-TNDT потребує адаптації методологічних підходів до умов високої структурної неоднорідності, змінного стану поверхонь та теплотехнічних властивостей матеріалів. Також необхідно врахувати режим зйомки, що визначає глибину діагностики та інтерпретаційні можливості. Пасивна термографічна діагностика дозволяє фіксувати природні температурні градієнти, тоді як активний режим передбачає контрольоване теплове збудження для виявлення прихованих дефектів. Важливими факторами залишаються також роздільна здатність камери, стабільність зображення та метрологічні характеристики приладу, що визначають мінімальний розмір аномалії, яку можна виявити методами IR-TNDT. Адаптація принципів IR-TNDT до будівельної сфери потребує уніфікованого підходу до оцінки емісійних характеристик, вибору режимів зондування та забезпечення відповідної точності в умовах змінного середовища.

Моделювання теплопередачі в багатошарових будівельних конструкціях є ключовим етапом

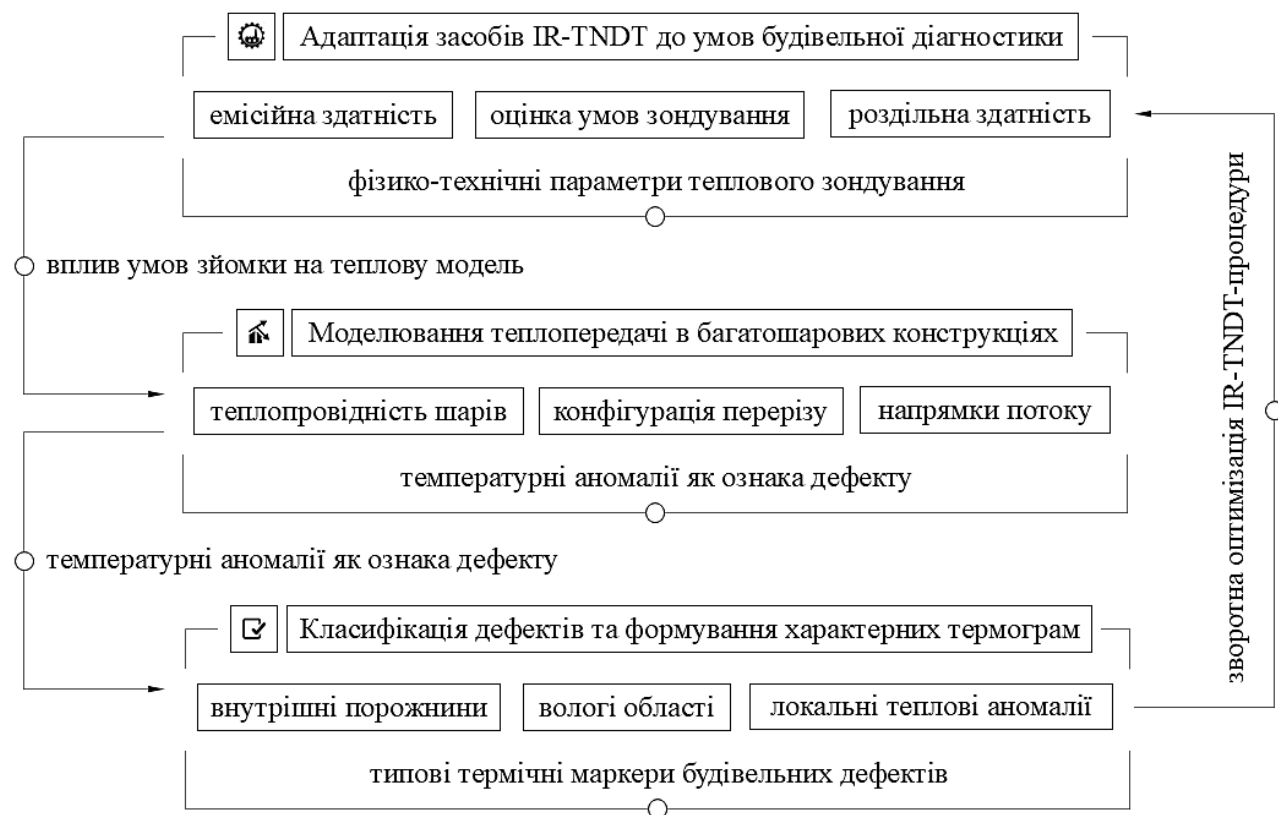


Рис. 1. Структурна схема оптимізації термографічної діагностики будівельних конструкцій

формалізації термографічного аналізу, оскільки визначає форму й динаміку термограми, що відображає внутрішній стан об'єкта. У загальному випадку, передача тепла в елементі будівельної конструкції описується диференціальним рівнянням теплопровідності для функції температура $T_n(x, t)$ у шарі $n \in [1; N]$ залежно від координати x і часу t на основі показників густини, теплоємності та теплопровідності відповідного шару, що формалізуються через набір змінних $\{\rho_n, c_n, \lambda_n\}$. На межі між шарами встановлюються умови неперервності температури та теплового потоку:

$$T_n(x_n, t) = T_{n+1}(x_{n+1}, t), \lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial t} \bigg|_n = \lambda_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}}{\partial t} \bigg|_{n+1}. \quad (1)$$

Така модель дозволяє враховувати неоднорідності по теплотехнічних характеристиках матеріалів і визначити їхню просторову конфігурацію [4, 5]. Показники товщини шару, теплопровідності та теплоємності впливають на час релаксації температурного поля та максимальну глибину, з якої можна отримати інформативний тепловий сигнал. При цьому геометрія конструктивного перерізу суттєво змінює розподіл потоків та викликає локальний перегрів, що має бути правильно інтерпретовано. Для адаптації відповідної математичної моделі також важливо враховувати граничні умови залежно від способу нагрівання. В активному режимі діагностики застосовується також імпульсне або модуляційне теплове навантаження, що вимагає розв'язання нестационарної задачі з часовим аналізом реакції системи. Побудова аналітичної або чисельної моделі теплопередачі є необхідною умовою для інтерпретації термограм, оцінки глибини виявлення дефектів та оптимізації режимів зйомки під конкретну будівельну конфігурацію.

Успішне застосування засобів термографічної діагностики будівельних конструкцій вимагає формування системного підходу до класифікації дефектів на основі їхніх теплових проявів. Багаторівнева класифікація дозволяє врахувати як фізичну природу дефекту, так і його просторові характеристики, глибину розміщення та інтенсивність впливу на теплове поле. Згідно з сучасними підходами, до основних категорій дефектів належать [1]:

- внутрішні порожнини, такі як каверни, пустоти і розшарування елементу будівельної конструкції;
- області підвищеного зволоження та підвищеної теплопровідності, пов'язані з капілярними ефектами, конденсацією вологи і протіканням;
- дефекти контактного з'єднання між шарами, такі як втрата адгезії та ослаблення теплоізоляційного шару;
- механічні пошкодження, такі як тріщини, деформації та розриви в теплоізоляції.

Термограми мають характерний температурний профіль, що залежить від типу, розміру та гли-

бини дефекту. Порожнини створюють симетричні зони охолодження або уповільнену реакцію на нагрів, тоді як зволожені ділянки формують асиметричні плями з підвищеною теплопровідністю. Для кожного типу дефекту пропонується еталонний температурний профіль, який використовується в автоматизованій класифікації. Ефективна інтерпретація термограм потребує узгодження моделей теплопередачі зі структурою дефектів, що дозволяє створити базу термографічних ознак для навчання алгоритмів і підвищення точності виявлення аномалій у складних конструкціях.

2. Методологія підвищення точності діагностики

Хоча сучасні термографічні системи мають високу чутливість, точність результатів значною мірою залежить від зовнішніх факторів, не пов'язаних зі структурою об'єкта. Їх неврахування спричиняє похибки та хибні інтерпретації термограм. На точність впливають оптичні властивості поверхні: коефіцієнт випромінювання, текстура, забруднення й вологість, що змінюють інфрачервоний сигнал [5, 8], а також положення тепловізора відносно об'єкта [4]. Важливими є й зовнішні умови: сонячне випромінювання, вітер, вологість, які спотворюють температурний баланс [3, 8]. Для зменшення впливу цих чинників запропоновано метод локального калібрування за еталонним зразком, що підвищує надійність термографічного контролю (рис. 2). Емісійні характеристики поверхні будівельних конструкцій є одним з основних факторів, що визначають точність термографічного зондування. Зокрема, коефіцієнт випромінювання ϵ , текстурованість та вологість поверхні впливають на формування інфрачервоного сигналу незалежно від фактичної температури об'єкта [9].

Зниження значення ϵ призводить до недооцінки температурних показників, що вимагає відповідної корекції. Для оцінки випромінюваної потужності використовується співвідношення $E = \epsilon \cdot \sigma T^4$, де функція E визначає щільність потоку випромінювання, σ — стала Стефана-Больцмана, а T — абсолютна температура поверхні. Вологість поверхні створює локальні аномалії через випаровування й зміну теплопровідності, а шорсткість чи забруднення спричиняють анізотропне відбиття, що погіршує якість термограми. Урахування цих чинників є ключовим для побудови коректної моделі та забезпечення надійності результатів.

Геометрія спостереження визначає умови реєстрації інфрачервоного сигналу й суттєво впливає на точність термографічного аналізу. Відхилення кута спостереження від нормалі до поверхні призводить до зниження інтенсивності сигналу через косинусний закон $I(\theta) = I_0 \cdot \cos(\theta)$, де функція $I(\theta)$ визначає експериментальні значення інтенсивності для кута θ , а I_0 — інтенсивність при пер-

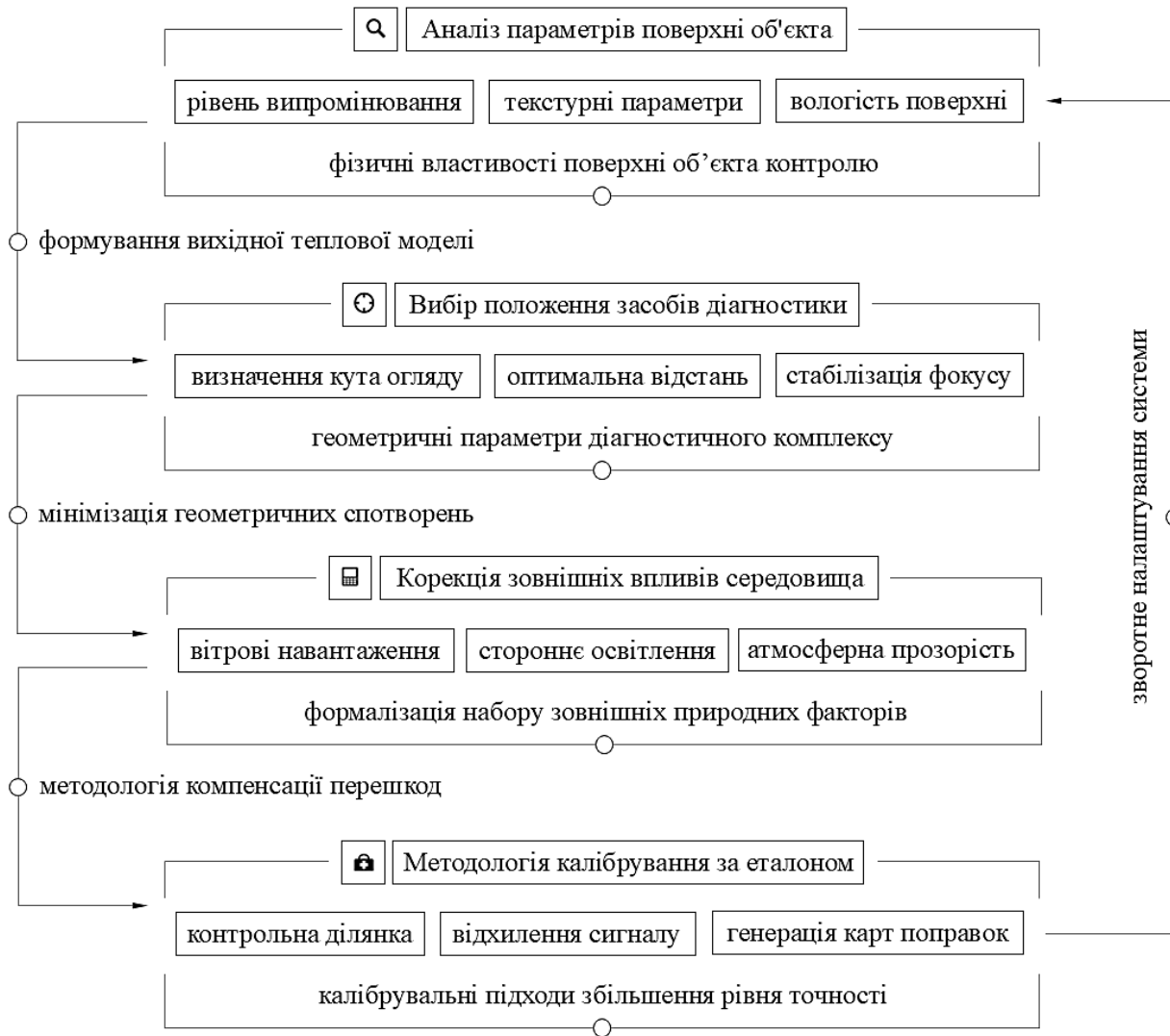


Рис. 2. Схема оптимізації точності теплового зондування при будівельній діагностиці

пендикулярному спостереженні об'єкта [2, 4]. Зі збільшенням дистанції погіршується просторове розділення об'єктів і зростає вплив атмосферного поглинання, особливо в довгохвильовому діапазоні. Формально, просторове розрізнення обмежується згідно з кутовою роздільною здатністю $\Delta x = D \cdot \alpha$, де D є дистанцією до об'єкта контролю, α – кутова роздільна здатність приладу. Оптимізація положення тепловізора полягає у мінімізації геометричних спотворень і втрат сигналу, що досягається шляхом стабілізації кута огляду та дистанції згідно з характеристиками відповідної сцени та роздільної здатності системи.

Зовнішнє середовище впливає на стабільність термограми та може суттєво знижувати достовірність виявлення дефектів [8, 9]. Зокрема, вітрове навантаження посилює тепловіддачу через конвекцію, змінюючи температурний профіль поверхні. Це враховується через модифікацію граничної умови теплопередачі $q_{conv} = h_{conv} \cdot (T_{surf} - T_{air})$, де h_{conv} є коефіцієнтом конвективного теплообміну, T_{surf} –

температура поверхні, T_{air} – температура повітря. Пряме або розсіяне сонячне освітлення викликає паразитні температурні градієнти, що маскують дефекти. Атмосферна волога, пил, туман і аерозолі призводять до поглинання та розсіювання інфрачервоного випромінювання. Для компенсації таких ефектів застосовується погодна нормалізація даних, фонове калібрування та обмеження часу проведення обстежень до стабільних метеоумов. У складних випадках доцільне використання активної термографії зі скороченим часом інтеграції сигналу.

Локальне калібрування за допомогою еталонного зразка дозволяє компенсувати варіації емісійної здатності матеріалів та вплив зовнішніх чинників у реальному часі [4, 7]. Еталонна область із відомими термічними властивостями розміщується в межах поля зору камери та використовується як опорна точка корекції температурних показників

$T_{corr} = T_{exp} + (T_{data}^{ref} - T_{exp}^{ref})$, де T_{corr} – скориговане

значення, T_{exp} – виміряна температура об'єкта, T_{data}^{ref} – атестаційне температурне значення еталона, T_{exp}^{ref} – виміряна температура еталона. Такий підхід усуває систематичні похибки, пов'язані з умовами зйомки, та підвищує надійність діагностики. Використання кількох еталонних міток із різною емісійністю забезпечує лінеаризацію температурної шкали й адаптацію до складної геометрії об'єктів. Урахування оптичних, геометричних і зовнішніх факторів разом із локальним калібруванням підвищує точність і стабільність термографічного аналізу, формуючи основу для кількісної оцінки точності та статистичної інтерпретації результатів.

3. Розробка комплексної системи кількісної оцінки точності

Ефективна термографічна діагностика потребує не лише якісного, а й кількісного оцінювання точності результатів. Запропонована система базується на статистичному аналізі температурних даних і включає: побудову інтервальної оцінки похибки, моделювання функції розподілу ймовірності та класифікацію результатів, істинно позитивні (True Positive, TP) кількості N_{TP} , хибно позитивні (False Positive, FP) кількості N_{FP} , істинно негативні (True Negative, TN) кількості N_{TN} і хибно негативні (False Negative, FN) кількості N_{FN} , з визначенням довірчого інтервалу точності. Це забезпечує об'єктивну оцінку ефективності системи й формує критерії прийняття рішень щодо технічного стану об'єкта. Для побудови надійної метрологічної моделі застосовується інтервальний підхід, що базується на аналізі вибірових статистичних параметрів температурного поля [6]. Позначивши набір $n \in [1; N]$ температурних показників як T_n , середнє значення температури T та показник дисперсії σ^2 , що характеризує варіацію температурних значень у межах однорідної зони:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^N T_n, \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^N (T_n - \bar{T})^2. \quad (2)$$

Для невеликої вибірки похибку вимірювання температури оцінюють за довірчим інтервалом розподілу Стюдента, що визначає межі істинного значення з заданою ймовірністю. Температуру розглядають як випадкову величину, схильну до флуктуацій через структурні й зовнішні фактори. Побудова функції розподілу температурної похибки дозволяє кількісно описати невизначеність і оцінити ймовірність хибних рішень під час виявлення дефектів. Якщо позначити температурну похибку як випадкову величину δT , що розраховується через різницю виміряного значення та істинного значення температури, тоді щільність ймовірності δT визначається як:

$$f(\delta T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(\delta T)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

Побудова цієї функції виконується емпірично на основі вибірки значень температурної похибки в репрезентативних зонах із відомими характеристиками. У випадках, коли розподіл не відповідає нормальному, можливе застосування альтернативних моделей: логнормального, експоненційного або змішаного розподілу. Для перевірки гіпотези про характер розподілу похибки застосовуються критерії відповідності, такі як критерій Колмогорова-Смирнова, критерій Андерсона-Дарлінга або критерій Пірсона [6]. Функція розподілу $f(\delta T)$ використовується для визначення порогів рішень і формування довірчих інтервалів точності виявлення дефектів. На основі класифікації результатів формується матриця прийняття рішень (Confusion Matrix, CM), що дозволяє кількісно оцінити точність, чутливість і специфічність системи.

$$\left[\begin{aligned} Accuracy &= \frac{N_{TP} + N_{TN}}{N_{\Sigma}}; Recall = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}} \\ Specificity &= \frac{N_{TN}}{N_{TN} + N_{FP}}; Precision = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FP}} \end{aligned} \right], \quad (4)$$

де N_{Σ} – повний набір статистичної вибірки, що підлягає аналізу. У термографічній діагностиці категоризація виконується за порогом температурного контрасту, що розділяє дефектні та справні області на основі статистичного критерію. Істинний стан перевіряють порівнянням з еталоном або незалежною інспекцією. Аналіз співвідношень між N_{TP} , N_{TN} , N_{FP} і N_{FN} дозволяє оцінити ефективність методу й оптимізувати поріг для зменшення хибних рішень. Для врахування невизначеності застосовується інтервальний аналіз – довірчий інтервал ймовірності правильного виявлення будують за біноміальним розподілом із нормальним наближенням або методом Клаппера-Пірсона. Розроблена система інтегрує статистичні методи з критеріями прийняття рішень у IR-TNDT, забезпечуючи об'єктивну оцінку надійності термограм. Інтервальні похибки, розподіл ймовірностей і класифікація результатів підвищують точність діагностики, дозволяють застосовувати методику до складних об'єктів і автоматизувати контроль якості в цифрових системах моніторингу.

4. Оцінка невизначеності вимірювань у термографічній діагностиці

У термографічній діагностиці будівельних конструкцій невизначеність вимірювань пов'язана з варіаціями температурного сигналу, зміною емісійної здатності поверхні, зовнішніми впливами та апаратними характеристиками тепловізора. Для її

кількісної оцінки використано підхід, узгоджений із рекомендаціями GUM (ISO/IEC Guide 98-3), за яким температурні значення розглядаються як випадкові величини, що мають вибіркове середнє та стандартне відхилення. Випадкова складова невизначеності оцінюється через стандартну невизначеність:

$$u(T) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (T_n - \bar{T})^2}{N \cdot (N - 1)}}, \tag{5}$$

а розширена невизначеність визначається як:

$$U = k \cdot u(T), \tag{6}$$

де *k* – коефіцієнт охоплення, що відповідає довірчій ймовірності 95%.

Для невеликих вибірок має бути застосовано довірчий інтервал Стюдента, що дозволяє оцінити межі істинного значення температури. Систематична складова невизначеності при цьому компенсується шляхом локального калібрування за еталонним зразком, що знижує похибки, спричинені емісійністю та нестабільністю зовнішніх умов. Отримані значення невизначеності використовуються як порогові критерії при класифікації термографічних аномалій, що забезпечує об’єктивність прийняття рішень і мінімізує частку хибнопозитивних та хибнонегативних висновків.

5. Класифікація похибок у будівельній термографічній діагностиці

Попри розвиток технічних засобів і алгоритмів, результати термографічної діагностики залишаються вразливими до різних похибок. Для під-

вищення достовірності аналізу необхідна системна класифікація похибок за походженням, механізмом формування та впливом на термограми. Запропоновано багаторівневу структуру з чотирма категоріями: об’єктні (матеріал, структура), режимні (пасивний/активний), апаратні (сенсори, калібрування, шум) і типові сценарії, подані у вигляді діагностичної таблиці. Такий підхід формалізує природу спотворень, дозволяє оцінити їх вплив на точність і адаптувати алгоритми обробки до конкретних умов.

Для систематизації джерел невизначеності у термографічному обстеженні запропоновано однорівневу класифікацію похибок, що охоплює основні фізичні, технічні та алгоритмічні чинники. Це надає можливість виділити три ключові категорії (табл. 1):

- об’єктні похибки, спричинені властивостями матеріалу, геометрією поверхні та наявністю вологи, які змінюють коефіцієнт випромінювання, теплопровідність і теплову інерцію;
- режимні похибки, зумовлені умовами зйомки: нерівномірним прогрівом, некоректним режимом нагріву або затримкою теплової реакції;
- апаратні похибки, пов’язані з шумом детектора, неточним калібруванням і обмеженою роздільною здатністю сенсора.

Такий підхід дає змогу узагальнено описати джерела спотворень, оцінити їхній внесок у загальну похибку та розробити стратегії її компенсації.

Попри розвиток тепловізійної техніки, результати термографічної діагностики залишаються чутливими до різних джерел похибок. Для підвищення достовірності аналізу запропоновано класифікацію похибок, що охоплює фізичні властивості об’єкта, умови зйомки та апаратні особливості,

Таблиця 1
Багаторівнева класифікація похибок та сценарії їх виникнення [4]

Рівень похибки	Сценарій виникнення похибки	Типовий вплив на результат
Рівень 1 Властивості об’єкта	Зміна коефіцієнта випромінювання на поверхні	Спотворення температурного профілю термограми
	Складна геометрія поверхні з кутовими переходами	Нелінійність у формуванні теплового зображення
	Локальна вологість матеріалу об’єкта контролю	Помилкове визначення зон зволоження або дефекту
Рівень 2 Режим зйомки	Недостатній тепловий контраст у пасивному режимі	Зниження рівня надійності виявлення дефектів
	Надмірний або нерівномірний нагрів у активному режимі	Хибне формування температурного контуру
	Інерційна реакція матеріалу на зовнішній вплив	Розмитість або запізнення дефектного сигналу
Рівень 3 Апаратна платформа	Шум сенсора, викликаний технічними характеристиками	Зниження показника співвідношення сигнал/шум
	Недостатня точність калібрування детектора	Систематичне зміщення вимірюваних температур
	Недостатня просторово-часова роздільна здатність	Зменшення рівня деталізації при дрібномасштабному аналізі

а також забезпечує підвищення метрологічної надійності діагностики.

Узагальнення джерел похибок у вигляді багаторівневої класифікації формує цілісне уявлення про механізми виникнення спотворень та їхній кумулятивний вплив на точність термографічної діагностики. Поєднання об'єктних, режимних і апаратних факторів у єдиній системі дозволяє не лише визначити критичні джерела невизначеності, а й обґрунтувати оптимальні стратегії їх компенсації.

Висновки

1. Обґрунтовано вплив геометрії спостереження та зовнішніх факторів; запропоновано моделі корекції спотворень.

2. Розроблено метод локального калібрування за еталонними зразками для підвищення метрологічної надійності.

3. Створено систему кількісної оцінки точності з інтервальною статистикою, моделюванням похибки та довірчими інтервалами.

Comprehensive methodology for assessing the accuracy of thermographic detection of building defects

H. Oborskyi, O. Levynskyi, V. Hanusovskyi, D. Olman

Odesa Polytechnic National University, Shevchenko Str., 1, 65044, Odesa, Ukraine
levinsky.o.s@op.edu.ua

Abstract

Within the study, the task of optimizing the procedure of thermographic diagnostics of building objects, based on thermal non-destructive testing methods, has been stated. The specificity of applying thermal methods in the context of building materials is considered, particularly for multilayered constructions, where heat transfer processes depend on the configuration, structure, and thermophysical characteristics of each layer. The methods for improving the accuracy of thermographic defect detection has been analysed, accounting for the key factors: surface parameters, choice of observation angle and distance, and external influences. The use of a reference sample for local calibration of the infrared camera is proposed, which makes it possible to significantly reduce the influence of variability in the emissivity of materials and to correct temperature readings. A system for quantitative assessment of the accuracy of thermographic diagnostics has been developed. The system includes interval evaluation of the temperature error, construction of a probability distribution function, classification of results, and determination of confidence intervals for assessing the reliability of defect detection. A multilevel classification of errors in thermographic inspection of building structures is provided, which covers: errors caused by object properties, errors related to the selected imaging mode, as well as instrumental errors of the photodetector system and calibration inaccuracies. The practical implementation of the comprehensive methodology is described, based on the use of infrared photodetectors and hybrid focal plane arrays, which provide high spatial resolution and flexibility when adjusting the temperature. A comparison of results before and after applying the error compensation method has been performed, which demonstrated the improved accuracy of defect detection, reduction of false positive and false negative results, and increased reliability of the analysis.

Keywords: infrared thermography; building defects; thermal inertia; emissivity coefficient; probabilistic error.

Список літератури

1. Kaya R., Caglayan S. Potential Benefits of Thermal Insulation in Public Buildings: Case of a University Building. *Buildings*, 2023, vol. 13(10), 2586. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13102586>
2. Tomita K., Chew M.Y.L. A Review of Infrared Thermography for Delamination Detection on Infrastructures and Buildings. *Sensors*, 2022, vol. 22(2), 423. doi: <https://doi.org/10.3390/s22020423>
3. Martin M. et al. Infrared thermography in the built environment: A multi-scale review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 165(3), 112540. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112540>
4. Pan D., Mo T., Jiang Z., Duan Y., Maldague X., Gui W. Interference Factors and Compensation Methods when Using Infrared Thermography for Temperature Measurement: A Review. *Electrical Engineering and Systems Science, Signal Processing*, 2025. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.17525>
5. Milovanović B., Pečur I. Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete. *Journal of Imaging*, 2016, vol. 2(2), 11. doi: <https://doi.org/10.3390/jimaging2020011>

6. Rodríguez-Martín M., Fueyo J.G., González-Aguilera D. et al. Predictive Models for the Characterization of Internal Defects in Additive Materials from Active Thermography Sequences Supported by Machine Learning Methods. *Sensors*, 2020, vol. 20(14), 3982. doi: <https://doi.org/10.3390/s20143982>
7. Fang Q., Ibarra-Castanedo C., Garrido I., Duan Y., Maldague X. Automatic Detection and Identification of Defects by Deep Learning Algorithms from Pulsed Thermography Data. *Sensors*, 2023, vol. 23(9), 4444. doi: <https://doi.org/10.3390/s23094444>
8. Golosov N., Cervone G. Integrating Thermal Infrared Imaging and Weather Data for Short-Term Prediction of Building Envelope Thermal Appearance. *Remote Sensing*, 2024, vol. 16(21), 3981. doi: <https://doi.org/10.3390/rs16213981>
9. Lucchi E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, part 3, pp. 3077–3090. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031>
10. Biswal G., Yakimov M., Tokranov V. et al. Bias-Tunable Quantum Well Infrared Photodetector. *Nanomaterials*, 2024, vol. 14(6), 548. doi: <https://doi.org/10.3390/nano14060548>

References

1. Kaya R., Caglayan S. Potential Benefits of Thermal Insulation in Public Buildings: Case of a University Building. *Buildings*, 2023, vol. 13(10), 2586. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13102586>
2. Tomita K., Chew M.Y.L. A Review of Infrared Thermography for Delamination Detection on Infrastructures and Buildings. *Sensors*, 2022, vol. 22(2), 423. doi: <https://doi.org/10.3390/s22020423>
3. Martin M. et al. Infrared thermography in the built environment: A multi-scale review. *Re-*

- newable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 165(3), 112540. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112540>
4. Pan D., Mo T., Jiang Z., Duan Y., Maldague X., Gui W. Interference Factors and Compensation Methods when Using Infrared Thermography for Temperature Measurement: A Review. *Electrical Engineering and Systems Science, Signal Processing*, 2025. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.17525>
5. Milovanović B., Pečur I. Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete. *Journal of Imaging*, 2016, vol. 2(2), 11. doi: <https://doi.org/10.3390/jimaging2020011>
6. Rodríguez-Martín M., Fueyo J.G., González-Aguilera D. et al. Predictive Models for the Characterization of Internal Defects in Additive Materials from Active Thermography Sequences Supported by Machine Learning Methods. *Sensors*, 2020, vol. 20(14), 3982. doi: <https://doi.org/10.3390/s20143982>
7. Fang Q., Ibarra-Castanedo C., Garrido I., Duan Y., Maldague X. Automatic Detection and Identification of Defects by Deep Learning Algorithms from Pulsed Thermography Data. *Sensors*, 2023, vol. 23(9), 4444. doi: <https://doi.org/10.3390/s23094444>
8. Golosov N., Cervone G. Integrating Thermal Infrared Imaging and Weather Data for Short-Term Prediction of Building Envelope Thermal Appearance. *Remote Sensing*, 2024, vol. 16(21), 3981. doi: <https://doi.org/10.3390/rs16213981>
9. Lucchi E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, part 3, pp. 3077–3090. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031>
10. Biswal G., Yakimov M., Tokranov V. et al. Bias-Tunable Quantum Well Infrared Photodetector. *Nanomaterials*, 2024, vol. 14(6), 548. doi: <https://doi.org/10.3390/nano14060548>