

Асиметричні криптографічні алгоритми конструюються на підґрунті розкладання достатньо великого натурального числа на прості множники, дискретного логарифмування на кінцевому полі з достатньо великою характеристикою, додавання точок з раціональними координатами ЕК на кінцевому полі.

Алгоритми на ЕК потребують визначення коефіцієнтів самої кривої, здійснення операції на кінцевому полі характеристикою, бажано простим числом, знаходження базової точки раціональними координатами порядком простого числа, складних обчислень, пов'язаних із специфікою моделі алгоритму.

Наведено умову вибору коефіцієнтів за знаком значення дискримінанта кубічного рівняння для забезпечення ефективності застосування алгоритмів на ЕК. З використанням формул Вієта для коренів багаточленів наведено спосіб вибору коефіцієнтів. Зазначено інтервал вибору базової точки. Визначено формули дотичної до базової точки і пошуку координати точки перетину дотичної з ЕК. Отримана рекурентна формула додавання базової точки з іншими точками ЕК з раціональними координатами, яка є узагальненою формулою для додавання будь-яких точок ЕК з раціональними координатами.

**Ключові слова:** еліптична крива, асиметричний криптоалгоритм, дискримінант, кубічне рівняння, формули Вієта, базова точка, порядок базової точки.

**D. E. Akbarov, Sh. Umarov**

*Fergana branch of the Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Fergana, Republic of Uzbekistan*

#### THE CHOICE OF AN ELLIPTIC CURVE AND THE BASE POINT IN THE DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR ADDING ITS POINTS WITH RATIONAL COORDINATES ON A FINITE FIELD

In article the problems of solving the tasks of determination and calculation the parameters of an elliptic curve (EC) for the correct realization of asymmetric cryptoalgorithms are probed.

Asymmetric cryptographic algorithms are constructed on the basis of the decomposition of a sufficiently large natural number into prime factors, of discrete logarithm on a finite field with a sufficiently large characteristic, of addition of points with rational coordinates EC on a finite field.

The algorithms on the EC require the determination of the coefficients of the curve itself, the operation on the finite field by the characteristic, preferably by a prime number, the finding of a base point by rational coordinates by the order of a prime number, complex calculations related to the specific nature of the algorithm model.

A condition is given for the choice of the coefficients by the sign of the discriminant value of the cubic equation to ensure the efficiency of algorithms application on the EC. Being used by Vieta formulas, for roots of polynoms, it is given a method of a choice of coefficients. The interval of a choice of a basic point is specified.

The formulas of the tangent to the base point and the location of the point of intersection of the tangent with the EC are determined.

A recurrence formula is obtained for the addition of a base point with other points of EC with rational coordinates, which is a generalized formula for the addition of any points of EC with rational coordinates.

**Keywords:** elliptic curve, asymmetrical cryptoalgorithm, discriminant, cubic equation, Vieta formulas, basic point, order of a basic point.

*Надійшла до редакції  
23 березня 2018 року*

*Рецензовано  
16 квітня 2018 року*

УДК 621: 004.89

#### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ТЕРМОГРАМ

*Галаган Р. М., Момот А. С.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [rgalagan@ukr.net](mailto:rgalagan@ukr.net)*

*Розглянуто актуальне питання підвищення інформативності та достовірності теплового методу неруйнівного контролю. Наведені найбільш перспективні алгоритми цифрової обробки послідовностей термограм. Проведено моделювання процесу активного теплового контролю. Отримана штучна послідовність*

термограм об'єкту контролю із моделями дефектів з різними параметрами. Для обробки отриманих даних застосовувалися методи Фур'є та вейвлет аналізу, аналізу головних компонент, динамічної теплової томографії та нейронних мереж. Наведено теоретичні основи та алгоритми роботи кожного розглянутого методу. Проаналізовано переваги та недоліки застосування обраних методів для цифрової обробки термограм. Визначено залежність результатів обробки термограм методами Фур'є аналізу, вейвлет аналізу та аналізу головних компонент від рівня теплової дифузії та наявності нерівномірностей нагріву зразка. За методами динамічної теплової томографії та нейронних мереж побудовано томограми промодельованого об'єкту контролю. Встановлено та доведено переваги засобів нейромережевої обробки цифрових даних у тепловому неруйнівному контролі.

**Ключові слова:** Фур'є аналіз, вейвлет-аналіз, аналіз головних компонент, нейронні мережі, тепловий контроль, термограма.

### Вступ

Методи теплового неруйнівного контролю завдяки ряду переваг застосовуються для вирішення широкого спектру задач. Якість отриманих термограм, які відображають розподіл інтенсивності теплового поля об'єкту, залежить від багатьох факторів. Теплові зображення часто містять високі за рівнем шуми та завади, а характер теплових відбитків дефектів не завжди дозволяє зробити однозначні висновки щодо їх розміру, форми, положення, глибини залягання.

Оскільки термограми являють собою цифрові зображення, для їх аналізу використовуються методи цифрової обробки сигналів. Найбільш дослідженим методом для обробки термограм є імпульсна фазова томографія, що базується на застосуванні перетворення Фур'є до температурних профілів в точках термограми та подальший аналіз отриманих амплітудних та фазових спектрів [1]. Подальшим розвитком даного методу є застосування вейвлетів замість Фур'є перетворення, однак такий підхід є маловивченим. Перспективними також є статистичний метод аналізу головних компонент та методи теорії штучних нейронних мереж, однак їх ефективність на даний час доведена переважно на якісному рівні [2]. Окремо виділяють методи для вирішення вузького кола задач, наприклад, динамічну теплову томографію, запропоновану та розроблену В. П. Вавіловим та В. В. Ширяєвим [3]. Зважаючи на різноманітність існуючих підходів, актуальним є питання вибору найбільш оптимального методу для аналізу термограм не лише з точки зору ефективності та якості отриманих зображень, а і можливостей автоматизації процедури контролю, побудови карти дефектів та дефектометрії.

### Постановка задачі

Динамічне теплове поле описується функцією  $T(x, y, \tau)$ . При проведенні активного теплового неруйнівного контролю розглядається характер зміни миттєвих значень температури в часі в точках поверхні об'єкту контролю (ОК). Для отримання даних залежностей, об'єкт контролю протягом певного часу нагрівають джерелом теплового потоку. Процес нагріву та подальшого охолодження

ОК реєструється за допомогою тепловізора. Отримана послідовність термограм відображає зміну температурного поля на поверхні ОК в часі [4].

Розглядаючи температурну динаміку в окремих точках термограм (пікселях), що відповідають координатам поверхні ОК, можна побудувати температурний профіль – графік зміни температури в часі для даної ділянки. Як правило, в бездефектних областях характер зміни температури є постійним і вважається відомим. При цьому можна ввести деяке еталонне значення температури  $T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau)$ , яке приймається за бездефектне. В зоні дефекту регулярний характер теплового поля порушується та виникають локальні перепади температури  $T_d(x, y, \tau)$ , які призводять до зміни температурного профілю. Таким чином, можна обчислити значення різниці температур між дефектними та бездефектними областями:

$$\Delta T(x, y, \tau) = T_d(x, y, \tau) - T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau).$$

Час  $\tau_{opt}$ , при якому значення  $\Delta T(x, y, \tau)$  на даній ділянці ОК стає максимальним, називають оптимальним часом контролю:

$$\Delta T_{max}(x, y, \tau) = \Delta T_{max}(\tau_{opt}).$$

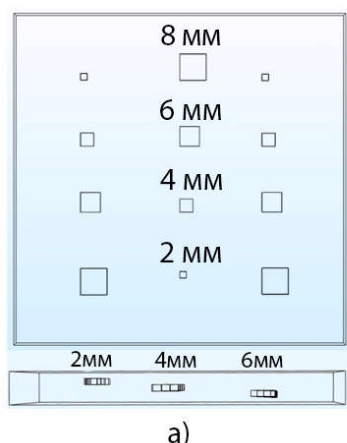
Аналізуючи форму, амплітудні і часові характеристики температурного профілю, а також частотні, фазові та характеристики потужності температурного сигналу при застосуванні перетворення Фур'є, роблять висновки про розміри, положення, глибину залягання дефектів. При цьому результати такого аналізу суттєво залежать від якості записаних термограм, їх кількості, наявності шумів, параметрів нагріву ОК, досвіду оператора тощо. У зв'язку з цим, для покращення достовірності контролю застосовуються спеціальні методи цифрової обробки термографічних зображень.

### Опис початкових даних

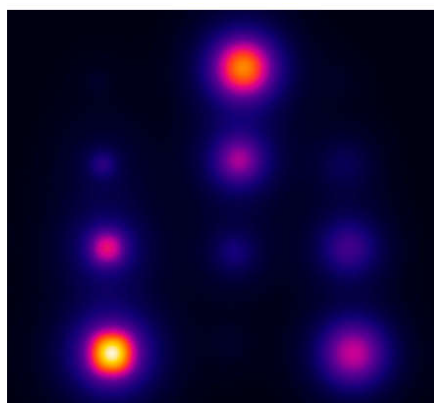
З метою дослідження провідних методів цифрової обробки послідовностей термограм за допомогою програмного пакету COMSOL Multiphysics було проведено моделювання процесу нагріву та охолодження ОК. При моделюванні розглядалася штучна математична модель сталюї пластини товщиною 10 мм зі сторонами довжиною 100 мм (рис. 1, а). В середині ОК розташовані штучні

дефекти, які являють собою повітряні порожнини квадратної форми розмірами 8 мм, 6 мм, 4 мм і 2 мм та товщиною 2 мм. Дефекти розташовані на глибині 2 мм, 4 мм та 6 мм від поверхні пластини. Нагрів проводився імпульсом тривалістю 0,1 с з густиною потужності теплового потоку  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, що був прикладений до верхньої грані пластини. Запис термограм відбувався протягом 3 секунд. В результаті було записано послідовність термограм розміром 20 зображень.

Термограма в оптимальний час контролю зображена на рис.1, б. Внаслідок впливу теплової дифузії, теплові відбитки дефектів на поверхні ОК мають нечіткі границі. Нечіткість зростає зі збільшенням глибини залягання дефектів та зменшенням їх розмірів. Високий рівень теплової дифузії робить неможливою оцінку форми та розміру дефектів. Даний факт значно ускладнює візуальну обробку термограм, а також створює значні труднощі при цифровому аналізі зображень більшістю



а)



б)

Рис. 1. Результати комп'ютерного моделювання: а) схема штучного зразка, б) термограма в оптимальний час контролю

Іншими словами, функція зміни піксельного значення температури на всьому діапазоні вимірювання переводиться у частотну область. В результаті отримують зображення модулю (амплітуди) та фази в Фур'є-просторі – модулограми та фазограми. Кількість модулограм та фазограм дорівнює кількості термограм у послідовності. Але через ефект алайзину інформативними є лише перша половина з них. Застосування перетворення Фур'є дозволяє виявити тонкі закономірності зміни піксельних температур в дефектній та бездефектній областях. Такий метод часто називають імпульсною фазовою термографією.

Зазвичай використовується одновимірне перетворення Фур'є у дискретній формі:

$$F_T = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N T_n e^{2\pi j(n-1)(f-1)/N},$$

де  $N$  – кількість відліків (кількість термограм в послідовності),  $T_n$  – дискретна функція (температурний профіль в точці),  $j$  – уявна одиниця,  $f$  –

існуючих методів.

Як видно з оптимальної термограми, дефекти розміром 2 мм майже неможливо виявити без штучного підвищення контрастності зображення. А дефект даного розміру на глибині 6 мм не виявляється навіть після контрастування. Це підтверджує необхідність застосування спеціальних засобів цифрової обробки термограм для підвищення чутливості теплового контролю. Для дослідження таких методів використовувався пакет MATLAB, що містить широкий набір інструментів для обробки сигналів [5].

### Фур'є-аналіз

Одним із класичних методів обробки послідовностей термограм є застосування одновимірного перетворення Фур'є до функції зміни температури у часі  $T_{ij}(t)$ , яка відображає температурний профіль в точці ОК.

частота,  $n$  – номер відліку.

Далі знаходять модуль і фазу:

$$\begin{aligned} \text{Magnitude} &= \sqrt{[\text{Re}(T)]^2 + [\text{Im}(T)]^2}; \\ \text{Phase} &= \arctan \left[ \frac{\text{Im}(T)}{\text{Re}(T)} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\text{Re}(T)$  та  $\text{Im}(T)$  являють собою реальну та уявну частину перетворення Фур'є, застосованого до функції  $T_{i,j}(t)$ .

Завдяки високій чутливості, що в більшості випадків дозволяє отримувати високі значення співвідношення сигнал/шум, Фур'є аналіз традиційно вважається одним із найкращих методів для обробки термограм. В роботі [6] показано, що найкращим чином виявляються підповерхневі дефекти. Проте, зазначається, що результат перетворення Фур'є суттєво залежить від кількості термограм у послідовності, а також від інтервалів між ними. Дефекти, що знаходяться на великій глибині, краще виявляються низькочастотними хвилями, оскільки збільшення частоти призводить

до збільшення теплової дифузії. Підповерхневі дефекти оптимальніше досліджувати за допомогою високочастотних хвиль. Тому імпульсна фазова термографія потребує накопичення інформації протягом довгого часу з малим інтервалом між термограмами. Зазвичай, при обробці методом Фур'є аналізу мають справу з декількома сотнями термограм, що забезпечує більш високу інформативність. У випадку, коли кількість термограм у послідовності мала, а інтервал між ними порівняно великий, аналіз отриманих зображень ускладнюється, з'являються артефакти.

Авторами роботи [7] розглянуті особливості застосування імпульсної фазової термографії. Основним недоліком у дослідженнях даного методу є неоднозначність результатів перетворення Фур'є, оскільки від дефектів на різних глибинах залягання можуть виникати різні за знаком значення зсувів фаз, що ускладнює побудову калібрувальних залежностей для дефектометрії. Окрім того, існує певна складність інтерпретації отриманих даних, оскільки однорідні у фізичному сенсі дефекти можуть давати різні значення зміни фази. Метод дозволяє отримати найбільшу чутливість до структурних дефектів, що у випадку наявності шумів або нерівномірності нагріву може призвести до появи на зображенні сторонніх елементів та хибних дефектів.

#### Вейвлет-аналіз

Враховуючи обмеження, які має перетворення Фур'є, виникла необхідність у пошуку нового способу обробки сигналів. Рішення було знайдене у вигляді застосування вейвлетів. За своїм фізичним змістом вейвлет-перетворення відрізняється від перетворення Фур'є видом базисної функції. Якщо при Фур'є-перетворенні сигнал розкладається в ряд за синусом або косинусом, то вейвлет-аналіз передбачає застосування широкого набору інших базисних функцій. В тепловому контролі найбільш вдалим є вейлети Гауссівської групи або вейлети Морле, оскільки вони схожі за формою на температурний профіль [8].

По суті, вейвлет-перетворення можна розглядати як кросс-кореляцію сигналу з набором хвильових функцій (вейвлетів) різної ширини. Дискретна форма Вейвлет перетворення часової послідовності  $T(i)$  має вигляд:

$$C(a,b) = \frac{1}{w(a)} \sum_{i=1}^N g\left(\frac{i-b}{a}\right) T(i),$$

де  $a$  – параметр масштабу,  $b$  – параметр зсуву,  $w(a)$  – деяка вагова функція, необхідна для візуалізації перетворення,  $g$  – дійсна вейвлет-функція.

Зазвичай,  $w(a) = \sqrt{a}$ . В якості вейвлет-функції в тепловому контролі застосовують функції Морле або функції типу «мексиканського капелюха», тоді перетворення в дискретній формі описується виразом:

$$C(a,b) = \frac{1}{w(a)} \sum_{i=1}^N T(i) \left[ 1 - \left( \frac{i-b}{a} \right)^2 \right] \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{i-b}{a} \right)^2 \right].$$

Вейвлет-образи мають ті ж самі особливості, що і Фур'є образи. Результат вейвлет-перетворення також містить дійсну і уявну частину, тому для отримання зображень модулів і амплітуд використовуються формули (1). Використовуючи фазу вейвлет-перетворення, можна виявити положення дефектів. А змінюючи фактор масштабу  $a$ , оцінюють глибину залягання.

В загальному випадку, масштаб пов'язаний з частотою сигналу. В тепловому контролі масштаб  $a$  можна пов'язати з довжиною температурного сигналу. Фактор зсуву  $b$  можна вибрати, виходячи з оцінки оптимального часу контролю. В сучасних програмних пакетах цифрової обробки сигналів, зокрема, MATLAB, фактор  $b$  при застосуванні вейвлет-перетворення підбирається автоматично внутрішніми алгоритмами, що спрощує задачу. В іншому випадку, параметри  $a$  і  $b$  необхідно підбирати на основі аналітичного визначення параметрів контролю, таких як час теплової дифузії або оптимальний час контролю, що в деяких випадках викликає труднощі.

В роботі [9] розглядається застосування вейвлет перетворення для обробки результатів теплового контролю композиційних матеріалів. Важливою особливістю є те, що вейвлет-перетворення декорелює функцію часу, що є одновимірним сигналом, в функцію зсуву і масштабу, що є двовимірним сигналом. Таким чином, значно зростає об'єм необхідних обчислень, що ускладнює процедуру обробки. Основною проблемою наявних досліджень даного методу є те, що вейвлети мають найбільшу ефективність для виявлення на фоні завад короткотривалих імпульсних сигналів, наприклад, радіоімпульсів. Водночас, функція температурного сигналу має згладжений характер, а процес зміни температури є порівняно тривалим у часі завдяки особливостям теплової дифузії. Відсутні дослідження щодо можливостей побудови теплових томограм за результатами обробки даним методом. Загалом, питання застосування вейвлетів у тепловому контролі є погано вивченим та дискусійним.

#### Динамічна тепла томографія

Основним інформативним параметром теплового контролю є сигнал  $T(x,y,t)$ , що відображає різницю температур дефектної і бездефектної ділянки ОК в кожен момент часу вимірювання. Як відомо, при активному тепловому контролі дефект характеризується оптимальним часом спостереження  $\tau_{opt}$ , якому відповідає максимальне значення диференціального температурного сигналу  $\Delta T_{max}$ . Встановлено, що при збільшенні глибини залягання дефектів  $l$  оптимальний час контролю  $\tau_{opt}$  зростає. Розмір дефектів суттєво впливає на величину сигналу  $\Delta T_{max}$ , та майже не впливає на значення

$\tau_{opt}$ . Таким чином, можна побудувати лінійні калібрувальні залежності оптимального часу контролю  $\tau_{opt}$  від глибини залягання  $l$  для дефектів конкретних розмірів. Такі залежності є лінійними функціями, що дозволяє легко оцінити глибину залягання дефектів за відомим оптимальним часом  $\tau_{opt}$ . Метод, що використовує дані принципи, отримав назву динамічної теплової томографії (ДТТ), та описаний в роботі [10].

Метод ДТТ передбачає побудову двох зображень на основі початкової послідовності термограм. Перше зображення відображає внутрішні дефекти в момент їх оптимального виявлення незалежно від моменту спостереження та називається максіграмою. Кожна точка максіграми є максимальним значенням  $\Delta T_{max}$  для даного конкретного пікселя на всьому інтервалі вимірювання. Фіксуємо час, а фактично – номер термограми у послідовності, якому відповідає поява  $\Delta T_{max}$  в даній точці, можна отримати набір піксельних значень для побудови другого зображення – таймограми. Таймограма відображає розподіл оптимальних моментів спостереження  $\tau_{opt}$  в точках термограми на всьому інтервалі вимірювання. Отже, вся початкова послідовність термограм замінюється лише двома зображеннями, які містять в собі інформацію про властивості даної послідовності. Зменшення розмірності початкових даних є беззаперечною перевагою методу ДТТ.

Використовуючи дані, які містяться в максіграмах та таймограмах, а також враховуючи калібрувальні залежності оптимального часу контролю від глибини залягання дефектів, можна побудувати зображення внутрішньої структури ОК – теплову томограму. Як правило, для цього ОК розбивають на прошарки по товщині. Мінімальна товщина прошарку залежить від інтервалу між сусідніми термограмами у початковій послідовності, оскільки саме цей параметр визначає дискретність часу  $\tau_{opt}$ , який пов'язаний з глибиною залягання дефектів калібрувальними залежностями.

Відомі модифікації ДТТ, що покликані покращити якість обробки послідовностей термограм та пристосувати метод для задач теплової дефектометрії [11]. Існуючі дослідження ДТТ доводять ефективність методу для аналізу термограм із низьким рівнем шумів, рівномірним нагрівом та відсутністю шкідливих взаємовпливів теплових полів дефектів, які розташовані на близькій відстані. Якість максіграм та таймограм зразків із високим рівнем завад на даний час не продемонстрована. Існуючі алгоритми методу ДТТ вимагають наявності апріорної інформації про теплофізичні характеристики ОК, що не завжди є можливим. Через низьку завадостійкість, залежність від вибору еталонної точки, необхідність дотримання високої частоти кадрів при записі термограм та інші обмеження, метод застосовується лише у вузькому спеціалізованому колі задач, що не робить його універсальним засобом цифрової обробки

термограм.

### Метод аналізу головних компонент

Одним із найбільш ефективних методів для обробки багатовимірних даних є метод аналізу головних компонент (principal component analysis), заснований на перетворенні Карунена-Лоева. Метод широко застосовується в статистиці для зменшення простору ознак без суттєвої втрати інформації. В загальному випадку, за допомогою даного методу можна зменшити розмірність даних  $D$  та кількість вимірювань  $N$ , які представлені матрицею вхідних даних  $X$  розмірністю, відповідно,  $D \times M$ . Зазвичай, не всі змінні в матриці даних є незалежними, багато з них в тій чи іншій мірі пов'язані між собою. Вводячи  $K$  нових ортогональних осей, на які проєктуються початкові вхідні дані, можна зменшити розмірність матриці  $X$  до  $M \times K$  [12].

Розглянемо алгоритм методу аналізу головних компонент (МАГК) при його застосуванні для обробки послідовностей термограм. Нехай маємо набір початкових даних, що складається з  $n=20$  термограм. Кожна термограма складається з  $m=240$  рядків пікселів та  $k=320$  стовпчиків пікселів. Необхідно представити вхідний набір даних у вигляді однієї матриці  $X$  розмірністю  $n \times d$ ,  $d=m \cdot k$ , в даному випадку  $20 \times 76800$ . Для цього піксельні значення кожної термограми записуються у вигляді вектора-рядка довжиною  $m \cdot k$ . Таким чином, кожна термограма послідовності з двовимірної матриці піксельних значень трансформується в одновимірний вектор. Число таких векторів буде дорівнювати числу термограм у послідовності  $n$ . При послідовному записі всіх векторів в одну спільну матрицю отримаємо бажаний формат вхідних даних  $X(d \times n)$ . Далі виконуються наступні операції:

- 1) Значення векторів-рядків нормуються та приводяться до нульового середнього:

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij};$$

$$x_{ij} = x_{ij} - \mu_i.$$

- 2) Значення рядків приводяться до 1-ї дисперсії:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \mu_i)^2};$$

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sigma_i}.$$

- 3) Обчислюється коваріаційна матриця  $C_v = X X^T$ .
- 4) Обчислюються власні вектори  $W^T$  коваріаційної матриці  $C_v$ .
- 5) Кожний рядок отриманої коваріаційної матриці називається головною компонентою. Зазвичай, залишають певну кількість  $p$  перших го-

ловних компонент, оскільки інші не містять корисної інформації. Наприклад, за правилом Парето залишають перші 20% головних компонент.

- б) Для отримання зображення, проєктують початкову матрицю  $X$  на матрицю власних векторів  $W^T \times X$ .

В результаті обчислень, отримують нову матрицю  $Y$  розмірністю  $p \times d$ .

В дослідженні [13] доведено підвищення співвідношення сигнал/шум при виявленні відкритих тріщин у разі застосування МАГК для обробки даних теплового контролю. Отримані результати свідчать про покращення візуального сприйняття термограм. Водночас, не було забезпечене повне розділення інформації про дефекти та завади, викликані нерівномірністю нагріву та іншими факторами. На даний час не існує однозначних алгоритмів максимізації співвідношення сигнал/шум, що вимагає додаткових досліджень для кожної конкретної задачі контролю.

Теоретично, МАГК дозволяє сформувати базу даних, яка буде містити власні вектори, що відповідатимуть певному типу дефектів. Таким чином, можна вирішувати задачу класифікації дефектів або дефектометрії. Дослідження у даному напрямі на сьогодні не проводилися. Варто відмітити, що при класифікації МАГК розділяє простір ознак з метою найкращої апроксимації вхідного набору даних, а не отримання оптимальної границі класів. Тому при зміні умов контролю, наявності випадкових нерівномірностей нагріву або інших завод ефективність методу різко спадає.

### Штучні нейронні мережі

Останніми десятиліттями в області цифрової обробки інформації значного розвитку набув метод штучних нейронних мереж (НМ). Основною перевагою НМ є їх здатність навчатися, що дозволяє мережі автоматично вивчати приховані закономірності у вхідних наборах даних. В тепловому контролі лінійно розділити множину ознак для класифікації дефектів традиційними статистичними методами в багатьох випадках неможливо. НМ працюють зі складними нелінійними залежностями, вирішуючи багатопараметрові задачі, що робить їх ефективним засобом для роботи в якості класифікаторів образів [14].

Схема класичної нейронної мережі складається з декількох прошарків штучних нейронів. Кожен нейрон одного прошарку пов'язаний з усіма нейронами наступного прошарку синаптичними вагами  $w_{ij}$ . Нейрони вхідного прошарку  $[i_1, i_2, \dots, i_n]$ , призначені для отримання і передачі в мережу вхідного вектору  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ , де  $n$  – кількість елементів вектору (відліків в сигналі). Нейрони прихованих прошарків призначені для виконання перетворень вхідних даних. Кожен штучний нейрон отримує зважену суму вхідних

даних зі зміщенням:

$$A = \sum X(j) * W(i, j) + b(i),$$

де  $X(j)=[x_1, x_2, \dots, x_j]$  – вектор даних з виходу нейронів попереднього прошарку,  $j$  – кількість нейронів у попередньому прошарку,  $i$  – індекс поточного нейрона,  $b(i)$  – зміщення поточного нейрона. Далі до обчисленого значення  $A$  застосовується функція активації (як правило, логістична, тангенціальна або сигмоїда). Таким чином, рівняння штучного нейрона зі зміщенням в загальному можна записати у вигляді

$$y = f(wx + b)$$

Вихідне значення поточного нейрона передається на наступний прошарок. Значення нейронів вихідного прошарку  $[o_1, o_2, \dots, o_n]$  є вихідними даними, або відповіддю НМ. Вибір числа прихованих прошарків, числа нейронів в них, вибір функцій активації здійснюється в основному емпірично.

В тепловому контролі НМ можуть застосовуватися для вирішення широкого класу задач. Під час навчання мережі для роботи з послідовностями термограм, на її вхід подаються вектори, що містять теплові профілі в точках (пікселях) термограми. При цьому, подаються зразки дефектних і бездефектних областей, яким у відповідність ставлять номер класу (наприклад, 0 – бездефектний, 1 – дефектний). Навчена нейронна мережа виявляє приховані залежності та зміни температурних сигналів, що характерні певному класу дефектів або бездефектним ділянкам. Таким чином, НМ можна застосовувати для побудови карт дефектів, класифікації дефектів та дефектометрії.

В роботі [15] нейронна мережа застосовується для побудови карт дефектів та класифікації дефектів за глибиною залягання. Переваги застосування НМ показані лише на якісному рівні. Відсутні дослідження ефективності НМ в задачах визначення глибини або товщини дефектів, впливу архітектури мережі або якості навчальної вибірки на результат роботи тощо.

### Порівняльний аналіз методів цифрової обробки термограм

Застосуємо розглянуті методи обробки термограм до послідовності, отриманої в результаті комп'ютерного моделювання. На основі результатів застосування методів Фур'є аналізу (рис. 2, а) та вейвлет аналізу (рис. 2, б) неможливо побудувати бінарну карту дефектів, оскільки для цього необхідно застосовувати фільтрацію за пороговим рівнем. При виконанні даної операції буде втрачена інформація про дефекти, що мають низьке співвідношення сигнал/шум, проте виявляються візуально на зображеннях. Таким чином, результати обробки будуть штучно спотворені, що призведе до некоректної оцінки ефективності вищезгаданих методів. Тому результати застосування Фур'є та вейвлет перетворення розглядаються окремо. Вар-



то відмітити підвищення співвідношення сигнал/шум у порівнянні з оптимальною термограмою в результаті обробки обома методами.

Розглянемо карти дефектів, отримані в результаті застосування методів динамічної теплової томографії. При використанні методу ДТТ (рис. 3, а) через низьку чутливість та наявність шумів було втрачено інформацію про три дефекти. Форма та розмір виявлених дефектів суттєво спотворені. На зображенні присутні сторонні завади. Метод аналізу головних компонент дозволяє побудувати більш точну карту (рис. 3, б). Однак, втрачено інформацію про один дефект, форма інших – викривлена. Найкращий результат демонструє застосування НМ (рис. 3, в). Для обробки застосовувалася нейронна мережа зворотного поширення похибки, яка містила 3 нейрони в прихованому прошарку. Виявлено всі штучні дефекти, їх розміри та форма найбільш подібні до реальних.

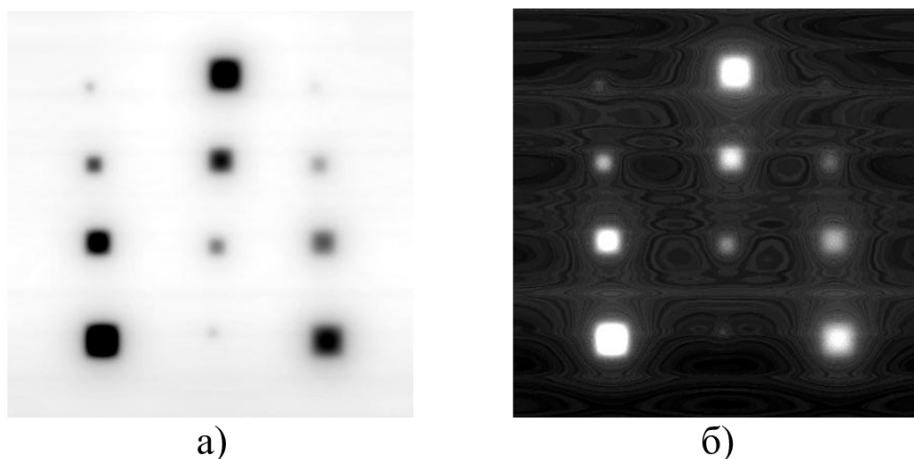


Рис. 2. Обробка послідовності термограм: а) фазограма Фур'є, б) модулограма вейвлет-перетворення

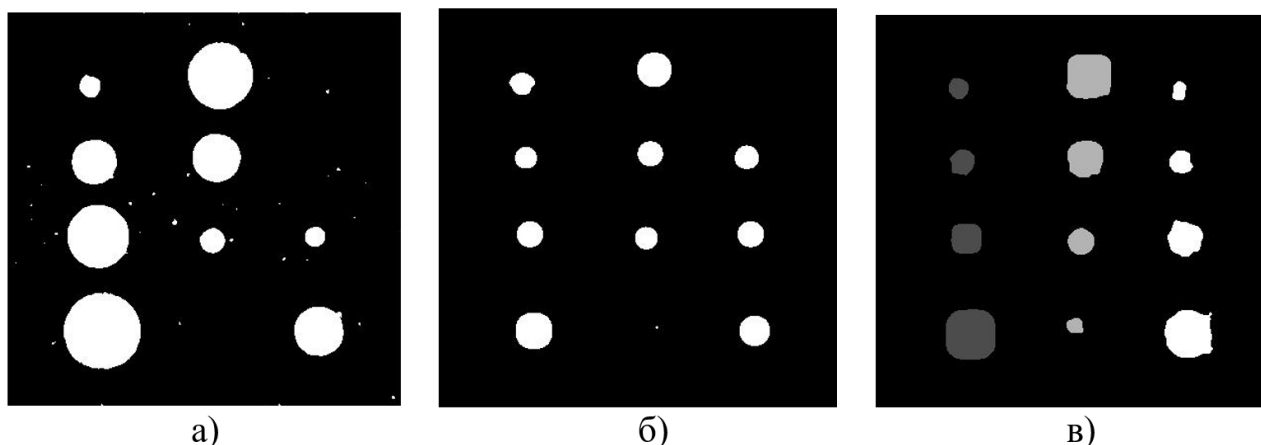


Рис. 3. Карти дефектів: а) за методом ДТТ, б) за МАГК, в) за результатами роботи НМ

Зображення містить шуми та артефакти, відображено не всі існуючі дефекти. Натомість, тепла томограма, побудована за результатами роботи НМ (рис. 4, б), відрізняється відсутністю завад,

Дефекти автоматично класифікуються за глибиною залягання та позначаються відповідним відтінком сірого на карті (більшим глибинам залягання відповідають більш світлі області).

В таблиці 1 наведена інформація про відносну похибку визначення розмірів дефектів розглянутими методами, що розраховувалась із врахуванням загальних площ дефектних та бездефектних зон. Найбільш точні результати отримані за допомогою нейронної мережі. Отже, за сукупністю критеріїв, застосування нейромережових технологій є одним із найбільш перспективних засобів обробки термограм з метою побудови карти дефектів.

Використання методів ДТТ та нейронних мереж дозволяє побудувати зображення внутрішньої структури ОК. Теплова томограма, отримана за методом ДТТ, показана на рис. 4, а.

точним відтворенням форми дефектів та глибини їх залягання.

#### Обговорення результатів

Методи Фур'є аналізу та вейвлет-перетворення завдяки високій чутливості дозволяють отримати усі структури, які присутні на термограмах початкової послідовності. В умовах нерівномірного нагріву, взаємовпливу теплових полів дефектів та наявності інших завад дані методи є малоефективними, оскільки їх застосування призводить до появи на зображеннях паразитних структур і артефактів. Для обох методів необхідна наявність великої кількості термограм у початковій послідовності.

Метод динамічної теплової томографії доводить свою ефективність для вирішення обмеженого кола задач. Однозначною перевагою методу є зменшення розмірності початкових даних всього

до двох зображень. Основним недоліком методу є суттєва залежність результату від вибору еталонної точки. Ефективність ДТТ значно знижується при наявності нерівномірного нагріву ОК, що може призвести до втрати інформації про дефекти з малим співвідношенням сигнал/шум.

Метод аналізу головних компонент дозволяє підвищити співвідношення сигнал/шум, покращити візуальне сприйняття термограм та побудувати бінарну карту дефектів. Головною перевагою є зменшення розмірності вхідних даних. Однак метод не забезпечує повне розділення інформації про дефекти та завади, викликані нерівномірністю нагріву та іншими факторами.

Таблиця 1. Відносна похибка визначення розмірів дефектів

Параметри	ДТТ	МАГК	НМ
Відносна похибка, %	60	23	22,5

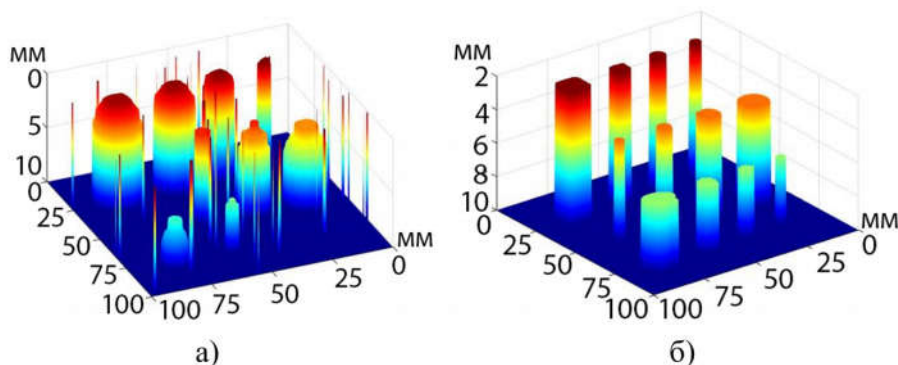


Рис. 4. Теплова томограма: а) за методом ДТТ, б) за відповіддю НМ

Методи теорії штучних нейронних мереж мають високу ефективність при аналізі термограм із високими рівнями завад. НМ забезпечують найкраще відтворення форми та розмірів дефектів порівняно з розглянутими методами. При цьому карта дефектів будуватиметься в автоматичному режимі. Основним недоліком є необхідність формування об'ємної бази навчальних даних, відсутність єдиного підходу до вибору параметрів навчання мережі та оптимізації її параметрів, таких як число нейронів та прошарків. Процес навчання вимагає значних часових та обчислювальних витрат. Висока адаптивність та широкі можливості автоматизації роблять штучні НМ одним із найефективніших засобів для цифрової обробки термограм.

### Висновки

Застосування методів цифрової обробки термограм в ряді випадків дозволяє покращити якість початкових зображень, збільшити співвідношення сигнал/шум, побудувати бінарні карти дефектів. Найбільші труднощі викликає наявність високих рівнів завад на початкових зображеннях, що значно знижує ефективність усіх розглянутих методів. Тому пошук шляхів підвищення завадостійкості є перспективним напрямом у питанні подальшого

розвитку всіх методів.

Непередбачуваність та неоднозначність результатів імпульсної фазової томографії робить даний метод найменш адаптивним. Водночас, метод має найбільшу чутливість до структурних дефектів, тому актуальним є питання розробки алгоритмів розділення інформації про дефекти та завади на отриманих фазограмах.

Застосування вейвлет-перетворення для аналізу термограм вимагає додаткових досліджень, оскільки характер функцій температурних сигналів ставить під сумнів ефективність даного методу в задачах теплового контролю. Особливий інтерес викликає можливість проведення дефектометрії даним методом.

Перспективним є метод аналізу головних компонент. Основним напрямом подальших досліджень є аналіз можливостей застосування методу для класифікації дефектів за типом або глибиною залегання.

Метод динамічної теплової томографії демонструє якісні результати за умов відсутності значних шумів на початкових зображеннях. Актуальним є питання зменшення залежності ефективності методу від вибору еталонної точки.

Найбільш широкі можливості розвитку де-



монструють нейромережеві технології. Важливими питаннями є оптимізація архітектури мережі для вирішення конкретних задач, вивчення впливу навчальної вибірки на результати роботи, аналіз ефективності роботи мережі у задачах дефектометрії за різних умов контролю та якості початкових даних.

Загальним перспективним напрямом для подальших досліджень є вивчення можливостей застосування розглянутих методів у складі автоматизованих систем теплового контролю. Особливу увагу рекомендується приділяти засобам штучного інтелекту з метою максимального зменшення ролі оператора у процесах діагностики та прийняття рішень і, як наслідок, підвищення достовірності контролю.

### Література

- Jiangang S. Analysis of data processing methods for pulsed thermal imaging characterisation of delaminations // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2013. Vol. 10. pp. 9–25.
- Ibarra-Castanedo C., Galmiche F., Pilla M. Thermographic nondestructive evaluation: overview of recent progress // *Thermosense XXV* (Orlando, 1 April 2003). Orlando, Florida, 2003. pp. 33–43.
- Вавилов В. П. Динамическая тепловая томография (обзор) // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2006. №3. С. 26 – 36.
- Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. Москва: ИД Спектр, 2013. 544 с.
- Ingle V.K., Proakis J. G. *Digital Signal Processing using MATLAB*. Stamford: Cengage Learning, 2011. 624 p.
- Вавилов В. П. Метод и экспериментальная реализация импульсного теплового контроля плазменных покрытий // *Известия Томского политехнического университета*. 2010. С. 5 – 9.
- Maldague X., Galmiche F., Ziadi A. Advances in pulsed phase thermography // *Infrared Physics & Technology*. 2002. Vol.43. pp. 175–181.
- Ширяев В. В., Вэньця Г., Цзинь Л. Применение вейвлетов в активном тепловом контроле // VI Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (г. Томск, 27-30 мая 2015 г.). Томск: Изд-во ТПУ, 2015. С. 149–154.
- Вавилов В. П., Ширяев В. В., Хорев В. С. Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет-анализа // *Дефектоскопия*. 2011. №4. С. 70 – 79.
- Swiderski W. The characterization of defects in multi-layered composite materials by thermal tomography method // *ACTA PHYSICA POLONICA A*. 2009. vol. 115. pp. 800–804.
- Тепловая (инфракрасная) томография: терминология, основные процедуры и применение для неразрушающего контроля композиционных материалов / В. П. Вавилов, Д. А. Нестерук, В. В. Ширяев, А. И. Иванов, W. Swiderski // *Дефектоскопия*. 2010. № 3. С. 3 – 15.
- Вавилов В. П., Ширяев В. В., Нестерук Д. А. Применение Фурье-анализа и метода анализа главных компонент для обработки данных динамического теплового контроля // *Известия ТПУ*. 2008. №2. С. 279 – 285.
- Hermosilla-Lara S., Joubert P., Placko D. Enhancement of open-cracks detection using a principal component analysis/wavelet technique in photothermal nondestructive testing // *Abstr. Intern. Conf. Quant. Infrared Thermography QIRT'02*. Dubrovnik, 2002. pp. 12–14.
- Kuang X., Sui X., Chen Q. Single infrared image stripe noise removal using deep convolutional networks // *IEEE Photonics Journal*. 2017. Vol.9. pp. 57–67.
- Vavilov V. P., Nesteruk D. A. Active thermal inspection of composite materials with the use of neural networks // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2011. Vol.2011. pp. 655–662.

УДК 621:004.89

**Р. М. Галаган, А. С. Момот**

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ТЕРМОГРАММ

Рассмотрен актуальный вопрос повышения информативности и достоверности теплового метода неразрушающего контроля. Проведено моделирование процесса активного теплового контроля. Получена искусственная последовательность термограмм объекта контроля с моделями дефектов с различными параметрами. Для обработки полученных данных применялись методы Фурье и вейвлет анализа, анализа главных компонент, динамической тепловой томографии и нейронных сетей. Приведены теоретические основы и алгоритмы работы каждого рассматриваемого метода. Проанализированы преимущества и недостатки применения выбранных методов для цифровой обработки термограмм. Определена сильная зависимость результатов обработки термограмм методами Фурье анализа, вейвлет анализа, анализа главных компонент от уровня тепловой диффузии и наличия неравномерностей нагрева образца. С помощью методов динамической тепловой томографии и нейронных сетей построены томограммы промоделированного объекта контроля. Установлено и доказано преимущества средств нейросетевой обработки цифровых данных в тепловом нераз-

рушающем контроле.

**Ключевые слова:** Фурье анализ, вейвлет-анализ, анализ главных компонент, нейронные сети, тепловой контроль, термограмма.

**R. M. Galagan, A. S. Momot**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Kyiv, Ukraine*

#### ANALYSIS OF METHODS FOR DIGITAL PROCESSING OF THERMOGRAMS

The relevant question of increasing the informative content and reliability of the thermal non-destructive testing is considered in this article. The simulation of active thermal testing process is carried out in this research. Artificial thermogram sequence of testing object with defect models with different parameters was received. Fourier methods and wavelet analysis, principal components analysis, dynamic thermal tomography and neural networks were used to process the obtained data. The theoretical bases and algorithms of work of each considered method are given. The advantages and disadvantages of using selected methods for digital thermogram processing are analyzed in this article.

The method of wavelet transformation have a high sensitivity and allows to get a clear image of all structures that are present in the thermograms of the initial sequence. This method is ineffective in the conditions of uneven heating, the mutual influence of thermal fields of defects or the presence of other obstacles. The calculation of the wavelet transform coefficients requires significant time and computational costs.

The principal components analysis method allows to increase the signal-to-noise ratio, improve the visual perception of thermograms, and construct a binary defect map. The main advantage is the dimension reduction of the input data. The method does not provide complete separation of information about defects and noises caused by uneven heating and other factors.

The method of dynamic thermal tomography is effective in solving a limited range of tasks. The unique advantage of the method is the reducing of dimension of the initial data to only two images. The main disadvantage of the method is the strong dependence of the result on the choice of the reference point.

Methods of artificial neural networks theory have high efficiency in the analysis of thermograms with high levels of noise. Neural networks provide the best reproduction of the shape and size of the defects in comparison with the considered methods. There are no need for preliminary and subsequent processing of input data and network response in the general case. The main disadvantages are the need to form a big database of training data and the lack of a unified approach to choosing network learning parameters and its optimization, such as the number of neurons and layers. The training process requires significant time and computing costs. The advantages of the neural network processing of digital data in thermal non-destructive testing have been established and proved in this article.

**Keywords:** Fourier analysis, wavelet analysis, principal components analysis, neural networks, thermal testing, thermogram.

*Надійшла до редакції  
16 травня 2018 року*

*Рецензовано  
31 травня 2018 року*