

# Використання фрактального аналізу частотно-часових спектрів віброакустичних сигналів для діагностики газотурбінних двигунів

Бурау Н. І.<sup>1</sup>, Ігнатович С. Р.<sup>2</sup>, Паздрій О. Я.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет

E-mail: [olgapazdri@gmail.com](mailto:olgapazdri@gmail.com)

Статтю присвячено вдосконаленню методів обробки віброакустичних сигналів для діагностики початкових тріщиноподібних пошкоджень в лопатках авіаційних газотурбінних двигунів під час експлуатації. Представлено результати фізичного моделювання бездефектного імітатора робочого колеса та при появі початкового пошкодження в одній з лопаток на стаціонарному та нестационарних режимах вібраційного збурення. Наведено результати частотно-часового аналізу вимірених віброакустичних сигналів на основі псевдорозподілу Вігнера-Вілля. Для підвищення діагностичної цінності частотно-часових спектрів запропоновано використання фрактального аналізу, зокрема визначення фрактальної клітинної розмірності (розмірності Мінковського) контурних зображень, якими представлено частотно-часові спектри віброакустичних сигналів у разі відсутності та наявності пошкодження. Встановлено, що розмірність Мінковського, як діагностична ознака, більш чутлива до появи пошкодження у разі її визначення не для повних зображень, а для частин зображень у різних частотних смугах.

*Ключові слова:* моніторинг технічного стану; газотурбінний двигун; тріщиноподібне пошкодження; віброакустичний сигнал; частотно-часовий аналіз; контурне зображення; фрактальний аналіз; фрактальна клітинна розмірність; розмірність Мінковського

DOI: [10.20535/RADAP.2018.74.73-83](https://doi.org/10.20535/RADAP.2018.74.73-83)

## Вступ

Одним з основних факторів забезпечення надійної безаварійної експлуатації складних просторових об'єктів авіаційної техніки, нафто- та газотранспортної систем, паливно-енергетичної галузі, інженерних споруд спеціального призначення є моніторинг їх поточного функціонального технічного стану (ТС). Сучасні системи моніторингу складних просторових об'єктів та їх конструктивних елементів за принципами побудови та функціонування реалізують концепцію структурного моніторингу технічного стану, відому як Structural Health Monitoring (SHM) [1, 2]. Головними характерними відмінностями систем SHM є їх багатоканальність, модульність, інтелектуалізація процесів керування, отримання та обробки діагностичної інформації, прийняття рішення про ТС об'єкта та прогнозування його зміни. Модульний принцип віддзеркалює набір використаних первинних вимірювальних перетворювачів, побудованих за різними фізичними принципами, для отримання інформації, достатньої для комплексної оцінки експлуатаційного навантаження та поточно-

го ТС однієї чи декількох структурних одиниць контрольованого об'єкта [3]. Принцип багатоканальності реалізується як в межах одного модуля (при реалізації одного фізичного принципу та методу контролю), так і за рахунок об'єднання декількох модулів для вирішення діагностичної задачі щодо однієї структурної одиниці об'єкта. В зазначених вище джерелах моніторинг визначається як єдиний інформаційний процес отримання, перетворення та аналізу доступної в процесі експлуатації об'єктів інформації для прийняття рішення щодо ТС об'єктів в цілому, чи елементів їх конструкцій. Серед етапів моніторингу одним з найбільш відповідальних є обробка діагностичної інформації. Методи обробки обираються в залежності від інформативності тих фізичних величин чи їх характеристик, що використовуються в якості діагностичної інформації.

## 1 Постановка задачі

Для складних динамічних об'єктів, експлуатація яких характеризується змінами режимів та умов

функціонування, наприклад, таких як авіаційні газотурбінні двигуни (ГТД), безпосереднє вимірювання прямих ознак стану їх елементів не є можливим, тому вимірюються пов'язані з ними параметри робочих процесів. Експлуатація ГТД супроводжується вимушеними та резонансними коливаннями його окремих агрегатів, вузлів та елементів. Саме тому більшість несправностей, які виникають в двигунах при їх експлуатації, або безпосередньо викликаються коливаннями, або ж знаходять в них своє відображення. Для контролю ТС обертових елементів двигунів застосовують методи вібраційної та віброакустичної діагностики [4, 5]. У якості діагностичної інформації використовується вібраційний та акустичний шум в діапазоні 0-10 кГц, що випромінюється ГТД під час експлуатації. Обробка віброакустичних сигналів для прийняття рішення про вібраційний стан ГТД в експлуатації проводиться шляхом нормування вібрацій та визначення відповідності параметрів виміряної вібрації на роторних гармоніках встановленим нормам. Для виділення роторних гармонік з широкосмугового вібраційного сигналу застосовується синхронна слідкуюча фільтрація, а для підвищення ефективності виділення окремих складових сигналу використовуються методи кореляційного аналізу, кліпування спектра та синхронної гребінчастої фільтрації, кепстрального аналізу [4-6]. Такий контроль дозволяє визначити поточний вібраційний стан двигуна та ідентифікувати грубі дефекти та пошкодження.

Початкові пошкодження обертових елементів ГТД (лопаток, дисків, валів роторів) практично не призводять до збільшення загального рівня випромінюваних сигналів, або їх окремих спектральних компонент. Але при їх появі та початковому розвитку змінюється структура сигналів, тобто змінюються співвідношення між окремими складовими, або з'являються нові складові [6, 7]. Вимірювані віброакустичні сигнали являють собою випадкові локально чи суттєво нестационарні процеси, що ускладнює їх аналіз традиційними методами [6, 7]. А низька енергетична ємність складових сигналів, які несуть інформацію про початкові пошкодження обертових елементів, обумовлює низьку чутливість таких характеристик ТС елементів ГТД, як рівень акустичного шуму чи спектральна щільність потужності в октавній, півоктавній та третинооктавній смугах частот. Тому для діагностики початкових пошкоджень обертових елементів ГТД необхідно застосувати методи обробки діагностичної інформації, які чутливі до малих змін корисної інформації в умовах високого рівня адитивних та мультиплікативних завад [6].

Для обробки віброакустичних сигналів, що випромінюються ГТД на стаціонарних та нестационарних режимах експлуатації в [6] запропоновано використання методів на основі статистичних та спектральних характеристик вищих порядків,

частотно-часових перетворень, масштабно-часових перетворень. Зазначені методи теоретично обґрунтовано в книзі [3] для обробки сигналів різної фізичної природи, які використовуються для моніторингу складних об'єктів в експлуатації. В роботі [8] методи частотно-часового аналізу та багатоспектрального (зокрема, біспектрального) аналізу використовуються для обробки віброакустичних сигналів з метою раннього виявлення пошкоджень, які обумовлюють появу низько енергетичних складових у вимірюваному сигналі. В статтях [9-12] наведено результати дослідження ефективності застосування частотно-часового аналізу та біспектрального аналізу для діагностики початкових пошкоджень обертових елементів складних об'єктів, у тому числі лопаток ГТД. Спектральні характеристики вищих порядків (біспектри, три спектри) мають властивості пригнічувати шумові, зокрема, гаусівські складові виміряних сигналів, дозволяють визначити статистично пов'язані ділянки спектра, виявити наявність комбінаційних чи модуляційних частот [3, 6, 8, 11, 12]. Частотно-часові перетворення сигналів дають можливість не тільки отримати інформацію про наявність в сигналі тих чи інших частотних складових, але й визначити, як ці складові змінюються у часі [3, 6, 8-10]. Масштабно-часові перетворення (наприклад, вейвлет-перетворення) є ефективними методами аналізу нестационарних процесів та, на відміну від інших, характеризуються багатороздільною здатністю [3, 5, 6, 11]. Таким чином, зазначені методи аналізу дозволяють ідентифікувати локальну нестационарність у вимірюваному сигналі, яка зумовлена появою та розвитком пошкодження роторного елемента ГТД, а також є прийнятними для обробки суттєво нестационарних сигналів на перехідних режимах експлуатації ГТД.

Результати досліджень, наведені у зазначених літературних джерелах, показали ефективність застосування частотно-часового, багатоспектрального та масштабно-часового аналізу для діагностування початкових пошкоджень роторних елементів ГТД. Але часто результати обробки складних нестационарних віброакустичних процесів є багатоконтактними та складними для інтерпретації і прийняття рішення. Зокрема, результатами частотно-часових перетворень різних порядків є тривимірні зображення, або двовимірні контурні зображення, які визначають залежність спектральних (біспектральних) оцінок вибірки сигналу, що аналізується, від частоти (або нормованої частоти) та часу [6]. Контурні зображення є повнокольоровими та подаються ізольованими у деякій кількості рівнів інтенсивності визначених оцінок. Для виділення діагностичних ознак початкових пошкоджень необхідно проводити детальний порівняльний аналіз геометрії ізольованих значень інтенсивності отриманих оцінок у різних частотних смугах та часових інтервалах, координат екстремумів та їх площ. Такий аналіз є досить

трудомістким, його важко формалізувати та автоматизувати для прийняття рішення про поточний ТС об'єкта. Тому для підвищення діагностичної цінності та інформативності результатів частотно-часового аналізу необхідно застосувати додатковий рівень обробки отриманих частотно-часових оцінок для отримання інтегральної кількісної оцінки частотно-часового спектра, за якою можна розрізнити ТС ГТД за відсутності та наявності пошкодження елементів.

Додатковий рівень обробки можна реалізувати на основі методів фрактального аналізу. Відповідно до [13, 14], фрактальний аналіз ґрунтується на використанні нерегулярних самоподібних структур — фракталів, а фрактальна геометрія є ефективним інструментом опису різноманітних структур, зокрема ідеалізованих математичних абстракцій, часових рядів та зображень у різних технічних застосуваннях, а також природних об'єктів. Саме тому в останнє десятиліття не тільки закордоном, а й в Україні фрактальний аналіз став одним з перспективних методів обробки сигналів, який дозволяє отримувати їх прості кількісні характеристики (фрактальна розмірність, показник Херста, кореляційна розмірність, розмір вкладення, тощо). Так, в статті [15] фрактальний аналіз використовується для аналізу часових рядів виділення сейсмічної енергії, в статтях [16, 17] автори пропонують використання фрактальної розмірності для аналізу аерокосмічних зображень. Різноманітним алгоритмам фрактального аналізу зображень присвячена стаття [18]. Наведені у зазначених публікаціях результати показують, що обчислення фрактальних розмірностей дозволяє ефективно аналізувати і класифікувати як складні шумоподібні часові послідовності, так і зображення зі складною структурою.

Тому метою статті є аналіз ефективності застосування фрактальних методів обробки частотно-часових спектрів складних віброакустичних сигналів для підвищення їх діагностичної цінності при діагностиці авіаційних ГТД.

## 2 Фізичне моделювання та частотно-часовий аналіз віброакустичних сигналів

Розглянемо задачу віброакустичної діагностики пошкодження роторного елементу (лопатки) авіаційного ГТД в стаціонарному та нестаціонарних режимах експлуатації. Діагностику пошкодження проведемо на основі фізичного моделювання та аналізу випромінюваних віброакустичних сигналів.

Фізичне моделювання віброакустичних процесів та їх аналіз проводились шляхом експериментальних досліджень вимушених коливань фізичної

моделі робочого колеса при стаціонарних та нестаціонарних вібраційних збуреннях. У якості фізичної моделі (імітатора) робочого колеса використано контрольований зразок з алюмінієвого сплаву Д16, який має 8 лопаток [6]. Для фізичного моделювання використано два технічних стани імітатора робочого колеса: бездефектний стан; пошкодження однієї з лопаток у вигляді надрізу на боковій кромці лопатки в середній частині лопатки по хорді (відносний розмір пошкодження 0,1). Власні частоти лопаток імітатора, визначені в результаті спектральної обробки їх вільних коливань, знаходяться в межах від 91 Гц до 101 Гц, відношення власних частот лопатки з пошкодженням та без пошкодження дорівнює 0,987. Зразок було закріплено на валу механізму, що приводився в обертання двигуном, частота обертання валу в стаціонарному режимі складає 2800 об/хв, що відповідає частоті вібраційного збурення  $f_p = 46,7$  Гц. Детальний опис експериментальної установки та методики досліджень, одну з реалізацій шуму установки та графік спектральної щільності потужності вимірюваного шуму експериментальної установки в стаціонарному режимі наведено в [6].

Для вимірювання віброакустичних сигналів, що випромінюються лопатками зразка при обертанні, використано мікрофон МД-52Б, з'єднаний з ПЕОМ. Часовий інтервал вимірюваних сигналів складає 10 с. Вмикання та вимикання привідного механізму проводиться так, що на зазначеному часовому інтервалі імітуються режими розгону, перехідного процесу стаціонарного вібраційного збурення зі сталою частотою обертання та вибігу. Випромінюваний віброакустичний шум вимірювався на фоні шуму експериментальної установки з частотою дискретизації  $f_{\text{III}} = 5$  кГц так, що кожна вибірка містить  $N = 5 \cdot 10^4$  точок.

На рис. 1 наведено одну з реалізацій вимірюваного сигналу для бездефектного зразка, та окремі частини сигналу, що відповідають режиму розгону з лінійною зміною частоти обертання ротору (частина 1), перехідному режиму в лопатках після їхнього вібраційного збурення (частина 2), стаціонарному режиму обертання з постійною частотою (частина 3) та режиму вибігу після вимикання експериментальної установки (частина 4). За віссю ординат відкладено значення амплітуди вимірюваного віброакустичного сигналу в умовних одиницях напруги  $[B \times k_{\text{пер}}]$ , де коефіцієнт перетворення вимірювального каналу  $k_{\text{пер}} = 7,06$ . Подібні реалізації було отримано і для випадку пошкодження однієї лопатки імітатора робочого колеса. Розділення вимірюваного сигналу на окремі вибірки різної довжини дозволило провести обробку діагностичної інформації окремо для кожного режиму вібраційного збурення та порівняти отримані результати для бездефектного та дефектного станів імітатора.

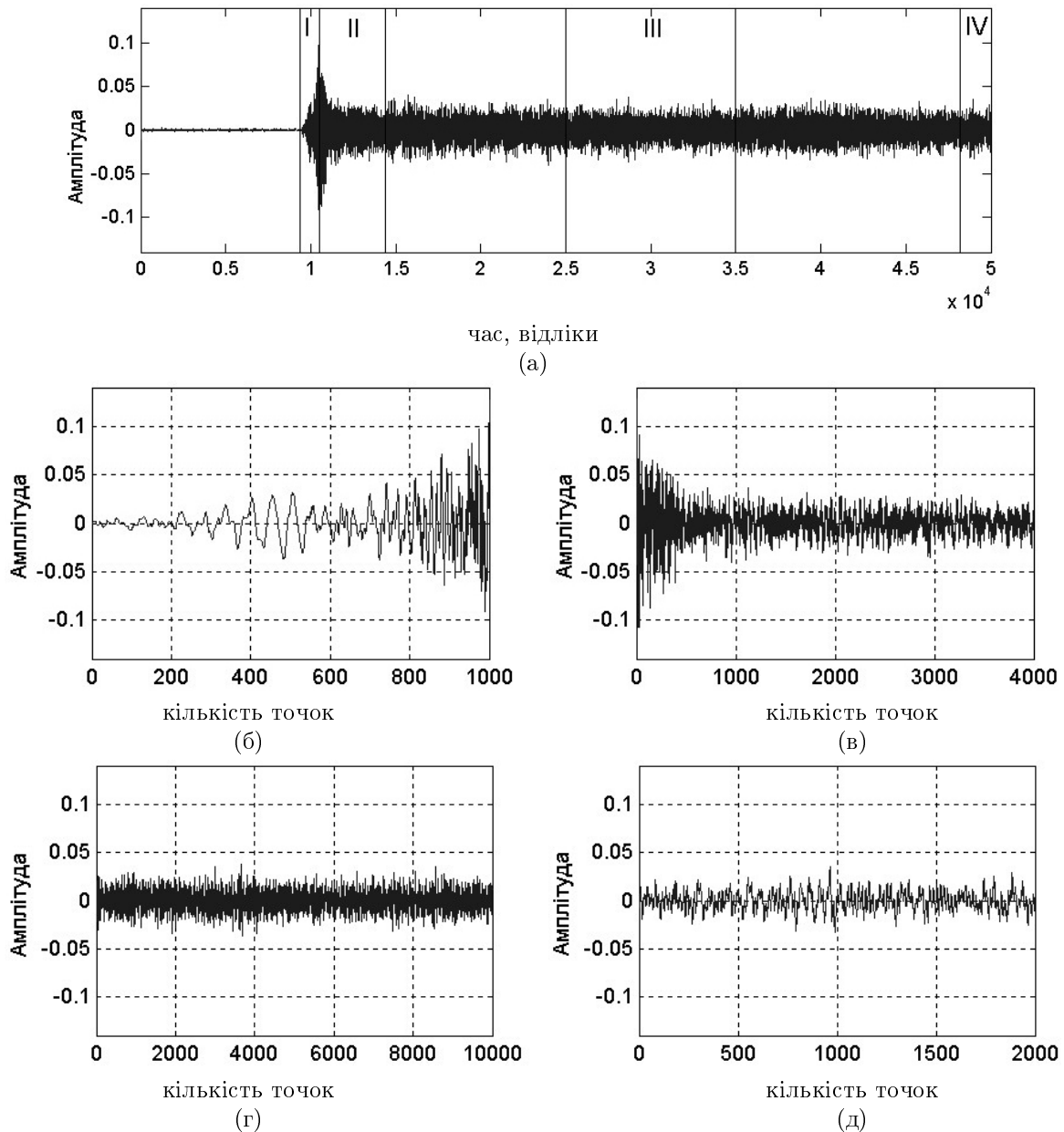


Рис. 1. Реалізація акустичного сигналу, що випромінюється бездефектним імітатором робочого колеса (а) та його окремі частини: б) частина 1 – режим розгону; в) частина 2 – перехідний режим; г) частина 3 – стаціонарний режим; д) частина 4 – режим вибігу

Для обробки отриманих сигналів було використано методи частотно-часового аналізу, які ґрунтуються на розподілі Вігнера-Вілля [6, 8-10]. Для даного розподілу використовується залежна від часу автокореляційна функція (АКФ) сигналу  $x(t)$ , тому розподіл Вігнера-Вілля є залежним від часу спектром, який визначається шляхом перетворення Фур'є залежної від часу АКФ:

$$W_x^-(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (1)$$

де  $*$  – знак комплексного спряження.

На практиці частіше застосовується так званий псевдорозподіл Вігнера-Вілля, коли в підінтеграль-

ний вираз (1) вноситься обмежена у часі функція вікна  $h(\tau)$ :

$$W_x^{\text{П-В-В}}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (2)$$

У якості  $h(\tau)$  можуть використовуватись відомі віконні функції (Хеммінга, Ханнінга, Кайзера) або проста прямокутна віконна функція [6, 10]. Виділення частини сигналу для подальшого аналізу за допомогою функції вікна відповідає частотному згладжуванню.

Обробку вимірних сигналів проведено з використанням псевдорозподілу (2) для прямокутної

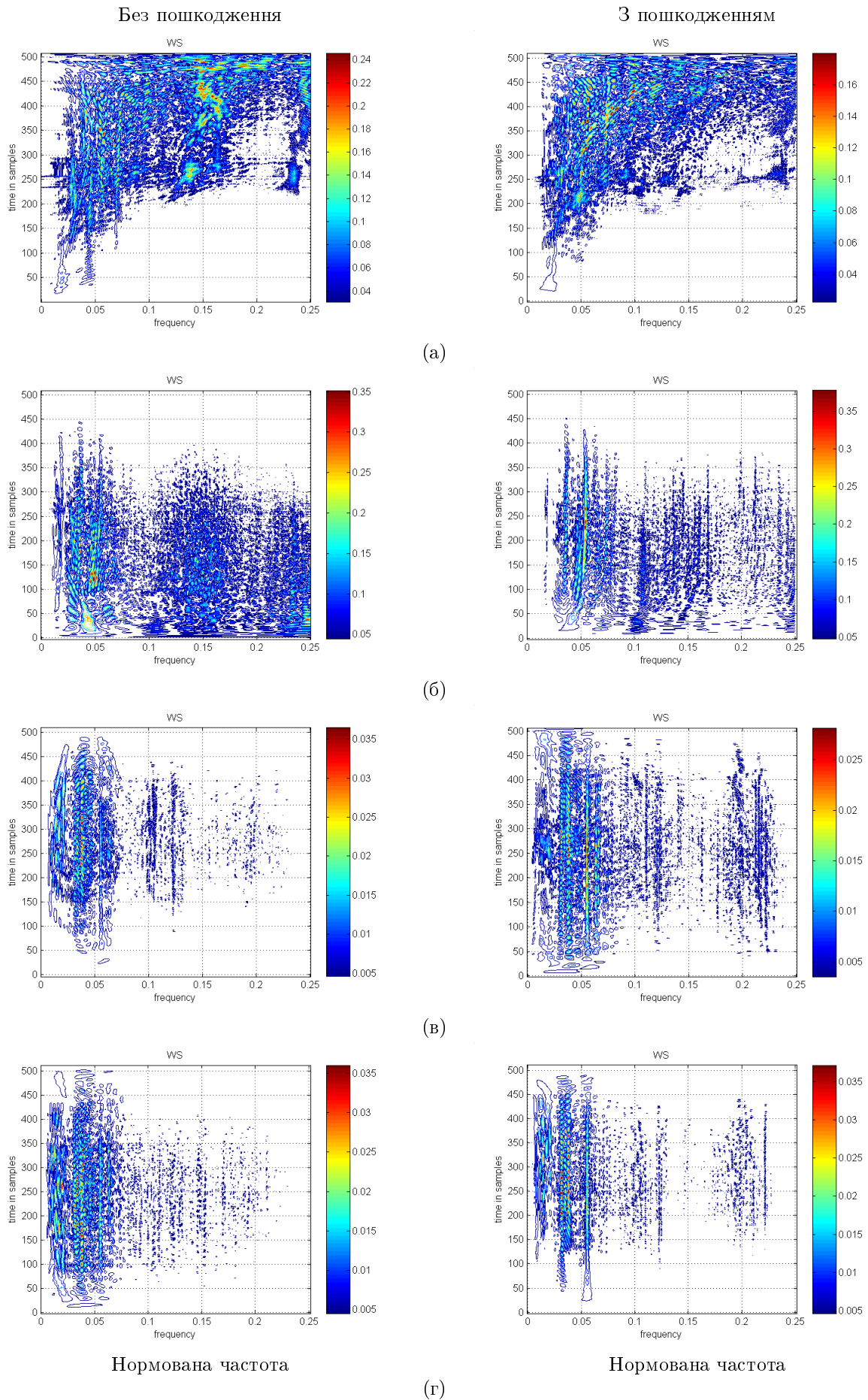


Рис. 2. Результати частотно-часового аналізу віброакустичних сигналів, що випромінюються імітатором робочого колеса на режимах: а) розгону; б) перехідному; в) стаціонарному; г) вибігу

віконної функції, для кожної з частин 1-4 віброакустичних сигналів використано вибірки довжиною 512 точок. Для обробки використано програмне забезпечення, розроблене в середовищі MathLab. Результати обробки, наведені на рис. 2, мають подання у вигляді двовимірних частотно-часових контурних зображень, якими позначаються спектральні енергетичні оцінки в залежності від часу у відліках та нормованої частоти ( $f/f_d$ ). Кожне контурне зображення представлено ізолініями у 10 рівнях інтенсивності, причому внутрішні ізолінії мають більш високу інтенсивність отриманих частотно-часових спектрів. З наведених контурних зображень видно, що інтенсивність спектральних енергетичних оцінок не є постійною в межах кількості відліків, що аналізуються. Це означає, що процеси, які аналізуються, є нестационарними незалежно від типу вібраційного збурення. Вплив нестационарного вібраційного збурення є найбільш помітним в результатах обробки для режиму розгону (розміщення екстремальних значень інтенсивності близьке до діагонального), меншою мірою – для режиму вибігу.

Як можна побачити з наведених на рис. 2 контурних зображень, для кожного з режимів вібраційного збурення є відмінності в результатах частотно-часового аналізу, які обумовлені наявністю пошкодження однієї з лопаток. Найбільш характерними з них є: змінювання інтенсивності екстремумів контурних зображень; змінювання геометрії ліній однакових рівнів інтенсивності; поява чи зникнення складових спектральних оцінок, що мають екстремальні значення; змінювання протяжності спектральних оцінок з максимальними значеннями за часовою віссю (відліками). Але за отриманими результатами важко визначити якусь одну чи декілька ознак, за якими можна приймати рішення про стан контрольованого об'єкта. Тому для полегшення інтерпретації отриманих результатів частотно-часового аналізу, підвищення їх діагностичної цінності та інформативності застосуємо до них додаткову обробку на основі методів фрактального аналізу.

### 3 Алгоритм розрахунку розмірності Мінковського для двовимірних зображень

Як зазначено в [13, 14], математичні фрактали відрізняються від гладких аналітичних функцій та традиційних геометричних об'єктів відсутністю гладкості чи наявністю розривів. Прості фрактали можна сконструювати шляхом відтворення деякого геометричного елемента (відлізка, ломаної, трикутника, зірочки, кола, поверхні, тощо) на різних масштабах. Так можна отримати різні сімейства геометричних чи конструктивних фракталів, які мають властивості самоподібності та масштабної ін-

варіантності і можуть досить компактно описувати різноманітні об'єкти і процеси. В [13] фрактали розглядаються як множина точок, які вкладені у простір. Параметр, що характеризує міру заповнення фрактальною множиною деякого простору (простору вкладення), називається фрактальною розмірністю. Наближено фрактальну розмірність можна вважати характеристикою геометричної складності просторового об'єкта.

Для визначення і трактування фрактальної розмірності існує декілька методів та підходів, математичні основи яких досить детально наведено в [19]. Однією з фрактальних розмірностей для аналізу зображень, які найбільш просто визначаються і набули поширення на практиці, є фрактальна клітинна розмірність (box-counting dimension) або розмірність Мінковського (PM) [13, 14, 18, 19]. Обчислення PM проводиться та такою процедурою:

- об'єкт  $A$  (геометричний елемент, зображення) покривається квадратною сіткою з деяким відомим розміром комірки (довжиною сторони)  $\varepsilon$ ;
- підраховується кількість комірок  $N(A, \varepsilon)$ , які містять фрагмент досліджуваного об'єкта  $A$ , зберігається пара значень  $\varepsilon$  та  $N(A, \varepsilon)$ ;
- сітка деталізується, тобто розмір комірки  $\varepsilon$  зменшується, тоді кількість підрахованих комірок  $N(A, \varepsilon)$  з фрагментами об'єкта збільшується, в результаті зберігається нова пара значень  $\varepsilon$  та  $N(A, \varepsilon)$ ;
- процедура деталізації повторюється багаторазово, за отриманими результатами будується графік у подвійних логарифмічних координатах;
- якщо зображення, що аналізується, має властивості масштабної інваріантності (скейлінгу), то отриманий для послідовності точок графік є лінійним (з вірогідністю апроксимації за Пірсоном  $R^2 \geq 0,9$ ), в протилежному випадку для отриманого графіку проводиться лінійна апроксимація, значення PM визначається як кутовий коефіцієнт (тангенс кута нахилу) побудованої лінії регресії. Математичний вираз для PM має вигляд:

$$D_M = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(A, \varepsilon)}{\ln \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)}. \quad (3)$$

Для визначення PM необхідно спочатку провести бінаризацію повнокольорового контурного зображення. Визначення границі відповідно до виразу (3) в алгоритмі імітується ітераціями, в яких відбувається зменшення розміру комірок. Значення PM буде наближатись до 2 у випадку більшої наповненості зображення, а при меншій наповненості – буде зменшуватись, наближаючись до 1.

## 4 Результати розрахунку розмірності Мінковського для частотно-часових контурних зображень

### 4.1 Розмірність Мінковського для повних зображень

Відповідно до описаної вище процедури було виконано розрахунок РМ для наведених на рис. 2 контурних зображень результатів частотно-часового аналізу віброакустичних сигналів, які випромінюються імітатором робочого колеса при відсутності та наявності тріщини в одній з лопаток на різних режимах вібраційного збурення. Для розрахунку використано повні зображення однакового розміру (445x410 пікселів). На рис. 3 наведено графіки залежностей  $\ln N(\varepsilon)$  від  $\ln(\varepsilon)$  для кожної пари зображень, що характеризують різні стани імітатора, на відповідних режимах вібраційного збурення. Як видно з наведених графіків, отримані залежності наближені до лінійних та мають відмінності для

випадків відсутності та наявності тріщини. У табл. 1 наведено розраховані для кожної лінійної апроксимації значення кутових коефіцієнтів, які є значеннями розмірності Мінковського  $D_M$  кожного контурного зображення. Додатково наведено значення показника  $V$ , який характеризує швидкість змінювання РМ при переході об'єкта від бездефектного стану до дефектного і визначається у відсотках за виразом:  $V = \frac{|D_{M0} - D_{M*}|}{D_{M0}} \cdot 100\%$ , де  $D_{M0}$  — значення РМ для результатів частотно-часового аналізу віброакустичних сигналів бездефектного імітатора робочого колеса;  $D_{M*}$  — значення РМ для результатів частотно-часового аналізу віброакустичних сигналів за наявності тріщини в одній з лопаток.

Табл. 1 Результати розрахунку розмірності Мінковського для повних зображень

Розрах. знач.	Режими вібраційного збурення			
	Розгін	Перех.	Стац.	Вибіг
$D_{M0}$	1,8411	1,7878	1,6548	1,6991
$D_{M*}$	1,7567	1,7563	1,7823	1,6551
$V, \%$	4,6	1,8	7,7	2,6

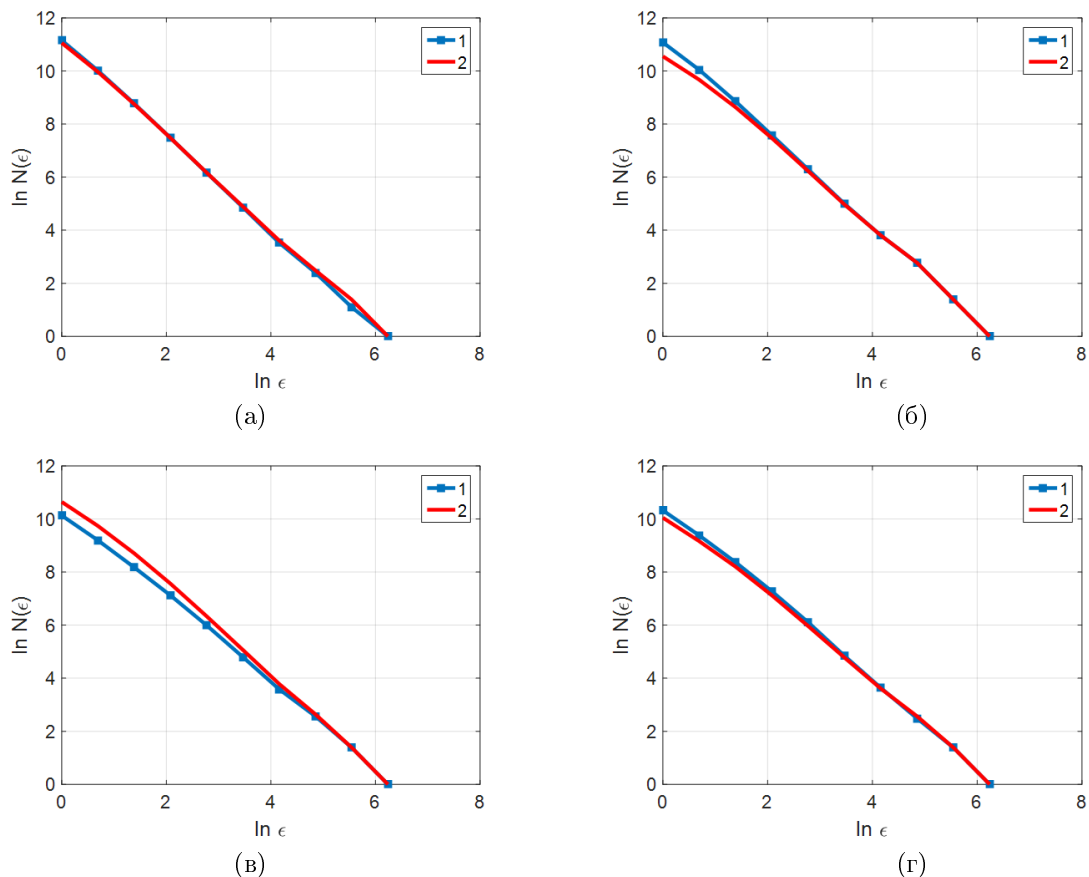


Рис. 3. Графіки залежностей  $\ln N(\varepsilon)$  від  $\ln(\varepsilon)$  для кожної пари зображень, що характеризують різні стани імітатора (1 – без пошкодження; 2 – з пошкодженням), на режимах: а) розгону; б) перехідному; в) стаціонарному; г) вибігу



## 4.2 Розмірність Мінковського для частин зображень у різних частотних смугах

Візуальний аналіз представлених на рис. 2 частотно-часових оцінок показує, що щільність отриманих результатів у різних частотних смугах відрізняється для імітатора робочого колеса без пошкодження та з однією пошкодженою лопаткою. Тобто різною є наповненість окремих частин кожного зображення ізолініями у встановленому для кожного режиму вібраційного збурення інтервалі інтенсивності отриманих оцінок. Це може призвести до відмінностей у значенні РМ окремих частин зображень, тому доцільним є визначення та порівняння РМ для частин зображень у різних частотних смугах.

На другому етапі обробки вихідні зображення були розділені послідовно по вертикалі на п'ять частин однакового розміру (88x410 пікселів). Кожна частина зображення є результатом частотно-часового аналізу віброакустичного сигналу у певному інтервалі значень нормованої частоти  $f/f_d$ : інтервал 1 відповідає значенням  $f/f_d$  від 0 до 0,05; інтервал 2 — від 0,05 до 0,1; інтервал 3 — від 0,1 до 0,15; інтервал 4 — від 0,15 до 0,2; інтервал 5 — від 0,2 до 0,25. Розрахунок РМ за наведеною вище процедурою проводився для кожної частини усіх наведених на рис. 2 зображень, тобто для різних станів імітатора робочого колеса на різних режимах вібраційного збурення. Розраховані залежності  $\ln N(\varepsilon)$  від  $\ln(\varepsilon)$  для кожної пари зображень, що характеризують різні стани імітатора, наближені до лінійних (графіки не наводяться через їх велику кількість). Результати розрахунку РМ та показника  $V$  наведено у табл. 2.

## 5 Обговорення результатів

Результати розрахунку РМ для повних зображень (табл. 1) показали, що за отриманими значеннями РМ можна розрізнити стан імітатора робочого колеса на кожному з режимів вібраційного збурення. В загальному випадку отримані результати підтверджують можливість використання РМ частотно-часових оцінок віброакустичних сигналів, що випромінюються ГТД під час експлуатації, як діагностичні ознаки тріщиноподібного пошкодження лопатки. Найбільша відмінність РМ, яка обумовлена наявністю пошкодження, має місце на стаціонарному режимі вібраційного збурення, швидкість змінювання показника  $D_M$  при переході об'єкта від бездефектного стану до дефектного досягає майже 8%. На режимі розгону швидкість змінювання  $D_M$  перевищує 4%, а на перехідному режимі та режимі вибігу — не перевищує відповідно 2% та 3%. В останніх випадках результати свідчать про низьку чутливість показника  $D_M$  до початкового тріщиноподібного пошкодження лопатки, якщо для розрахунку розмірності використовувати повні контурні зображення результатів частотно-часового аналізу.

Діагностичну цінність РМ можна підвищити, якщо розрахунок її проводити не за повними зображеннями, а за їх окремими частинами, які відображають результати частотно-часового аналізу віброакустичного сигналу у певному інтервалі значень нормованої частоти  $f/f_d$ . Як видно з результатів, наведених у табл. 2, на кожному режимі вібраційного збурення є один чи декілька інтервалів значення нормованої частоти, в яких швидкість змінювання  $D_M$  суттєво збільшується:

- на режимі розгону в інтервалі 3 (частота  $f/f_d$  від 0,1 до 0,15) швидкість змінювання  $D_M$  перевищує 11%;

Табл. 2 Результати розрахунку розмірності Мінковського для частин зображень у різних частотних смугах

Режими вібраційного збурення	Розраховані значення	Номер та значення інтервалу $f/f_d$				
		1	2	3	4	5
		0-0,05	0,05-0,1	0,1-0,15	0,15-0,2	0,2-0,25
Розгін	$D_{M0}$	1,5185	1,5207	1,6776	1,6524	1,6399
	$D_{M*}$	1,4943	1,5155	1,4878	1,6477	1,6486
	$V, \%$	1,6	0,3	11,3	0,3	0,5
Перехідний	$D_{M0}$	1,5078	1,5237	1,5309	1,5281	1,4992
	$D_{M*}$	1,4003	1,5244	1,5063	1,4911	1,4935
	$V, \%$	7,2	0,1	1,6	2,4	0,4
Стаціонарний	$D_{M0}$	1,5185	1,4767	1,4067	1,2984	1,0496
	$D_{M*}$	1,5903	1,5659	1,481	1,4571	1,4248
	$V, \%$	4,7	6,0	5,3	12,2	35,6
Вибіг	$D_{M0}$	1,5685	1,5288	1,4419	1,3851	0,9229
	$D_{M*}$	1,5124	1,4927	1,3316	1,2626	1,2299
	$V, \%$	3,6	2,4	7,7	8,9	33,3



- на перехідному режимі в інтервалі 1 (частота  $f/f_d$  від 0 до 0,05) швидкість змінювання  $D_M$  перевищує 7 %;
- на стаціонарному режимі найбільші значення швидкості змінювання  $D_M$  спостерігаються в інтервалі 4 (частота  $f/f_d$  від 0,15 до 0,2) — понад 12 %, в інтервалі 5 (частота  $f/f_d$  від 0,2 до 0,25) — понад 35 %;
- на режимі вибігу найбільші значення швидкості змінювання  $D_M$  спостерігаються в інтервалі 3 (частота  $f/f_d$  від 0,1 до 0,15) — перевищує 7 %, в інтервалі 4 (частота  $f/f_d$  від 0,15 до 0,2) — майже 9 %, в інтервалі 5 (частота  $f/f_d$  від 0,2 до 0,25) — понад 33 %.

Такі відмінності у значеннях РМ в окремих частотних смугах обумовлені різною наповненістю однакових частин зображень частотно-часових оцінок у випадках відсутності та наявності пошкодження лопатки імітатора робочого колеса. Саме ж значення РМ для окремих частин зображень є кількісним показником геометрії ізоліній частотно-часових спектрів в окремих частотних смугах і може бути використаним як діагностична ознака пошкодження лопатки.

## Висновки

Для діагностики початкових тріщиноподібних пошкоджень лопаток ГТД запропоновано дворівневу обробку віброакустичних сигналів, які випромінюються двигуном під час експлуатації. У якості методів обробки інформації обґрунтовано застосування на першому рівні частотно-часового перетворення сигналів, а на другому рівні — визначення фрактальної розмірності для отриманих частотно-часових оцінок.

На основі проведеного фізичного моделювання робочого колеса з лопатками та частотно-часового аналізу вимірних віброакустичних сигналів на нестационарних (розгін, перехідний, вибіг) та стаціонарному режимах вібраційного збурення, встановлено, що початкове тріщиноподібне пошкодження однієї з лопаток призводить до змінювання інтенсивності та геометрії контурних зображень, якими подається результат частотно-часового перетворення (псевдорозподілу Вігнера-Вілля). Застосування фрактального аналізу до отриманих на першому етапі частотно-часових оцінок дозволило визначити кількісну оцінку частотно-часових спектрів — розмірність Мінковського, за значенням якої можна розрізнити стан робочого колеса. Це дає можливість використовувати розмірність Мінковського як діагностичну ознаку для прийняття рішення про поточний ТС ГТД. Показано, що для забезпечення високої діагностичної цінності ознаки доцільно визначати її значення не за повними контурними

зображеннями, а за їх окремими частинами, які відображають частотно-часові оцінки віброакустичного сигналу у певному інтервалі значень нормованої частоти аналізу.

Отримані результати є новими і можуть бути використані для вдосконалення існуючих та розробки нових методів моніторингу технічного стану авіаційних газотурбінних двигунів під час експлуатації.

## Перелік посилань

1. Adams D. Health Monitoring of Structural Materials and Components. Methods with Applications. — John Wiley & Sons Ltd., 2007. — 475 p.
2. Nagarajaiah S. Structural monitoring and identification of civil infrastructure in the United States / S. Nagarajaiah, K. Erazo // Structural Monitoring and Maintenance. — 2016. — Vol. 3, No. 1. — P. 51–69.
3. Staszewski W. Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing / W. Staszewski, C. Boller, G. Tomlinson. — John Wiley & Sons Ltd., 2004. — 288 p.
4. Арсланов Р.В. Контроль параметров вибрации газотурбинных двигателей в реальном масштабе времени // Р.В. Арсланов. — УФА : УГАТУ, 2011. — 158с.
5. Чигрин В.С. Віброакустика і вібродіагностика газотурбінних двигунів / В.С. Чигрин, С.І. Суховій. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2012. — 264 с.
6. Бурау Н.І. Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики авіаційних двигунів / Н.І. Бурау, Л.Л. Яцко, О.М. Павловський, Ю.В. Сопілکا. — К. : НАУ, 2012. — 152 с.
7. Бурау Н.І. Нестационарні коливання нелінійних (кусково-лінійних) систем / Н.І. Бурау. — Кіровоград : ПОЛІМЕД-Сервіс, 2009. — 104 с.
8. Radkowski S. Use of vibroacoustical signal in detecting early stages of failures / S. Radkowski // Eksploatacja i niezawodnosc. — 2007. — No 3. — pp. 11-18.
9. Сопілکا Ю.В. Використання частотно-часових перетворень Вігнера вищих порядків у задачах віброакустичної діагностики / Ю.В. Сопілکا // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — №6. — С. 110-117.
10. Паньків Ю.В. Дослідження вібраційних процесів у відцентрових насосних агрегатах з метою контролю динаміки розвитку дефектів їх робочих коліс та міжступінчатих ущільнень / Ю.В. Паньків // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2013. — № 4(49). — С. 75-80.
11. Bouraou N. Vibroacoustical diagnosis of the crack-like damages of aircraft engine blades at the steady-state and non-steady-state modes / N. Bouraou, Iu. Sopilka // Vibrations in Physical Systems. — 2010. — Vol.24. — P. 69-74.
12. Сопілکا Ю.В. Застосування біспектрального аналізу віброакустичних сигналів для діагностування тріщин в лопатках авіаційних двигунів / Ю.В. Сопілکا // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2015. — №6. — С.73-79.
13. Feder J. Fractals / J. Feder. — New York : Plenum Press, 1988. — 254 с.

14. Чумак О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных / О.В. Чумак. — М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. — 164 с.
15. Захаров В.С. Динамические и фрактальные характеристики временных рядов выделения сейсмической энергии / В.С. Захаров // *Нелинейный мир*. — 2010. — Т.8, №4. — С. 234-242.
16. Пащенко Р.Э. Локализация областей наблюдения на аэрокосмических изображениях использованием посточного вычисления фрактальных размерностей и их межстрочной обработкой / Р.Э. Пащенко, В.С. Куд, А.В. Шаповалов // *Системы обработки информации*. — 2008. — Вып. 3 (70). — С. 114-119.
17. Исследование почвенных особенностей с помощью фрактальных методов обработки аэрокосмических изображений / В.К. Иванов, Р.Э. Пащенко, С.Е. Яцевич, Е.И. Яцевич, Л.А. Егорова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2013. — Т. 10, № 2. — С.98-104.
18. Ампилова Н.Б. Алгоритмы фрактального анализа изображений / Н.Б. Ампилова, И.П. Соловьев // *Компьютерные инструменты в образовании*. — 2012. — №2. — С.19-24.
19. Кононюк А. Е. Дискретно-непрерывная математика. Книга 6. Поверхности / А.Е. Кононюк. — К.: Освіта України, 2016. — 618 с.
- [9] Sopilka Yu.V. (2005) Vykorystannia chastotno-chasovykh peretvoren Vihnera vyshchyykh poriadkiv u zadachakh vibroakustychnoi diahnostryky [Use of higher order Wiener time-frequency transformation for vibroacoustical diagnosis problems]. *Naukovi visti NTUU KPI*, No 6, pp.110-117.
- [10] Pan'kiv Iu.V. (2013) Investigation of vibration processes in centrifugal pumping units in order to control the dynamics of the defects of their working wheels and intermediate seals. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovysch*, No 4(49), pp.75-80.
- [11] Bouraou N.I. and Sopilka Iu.V. (2010) Vibroacoustical diagnosis of the crack-like damages of aircraft engine blades at the steady-state and non-steady-state modes. *Vibrations in Physical Systems*, Vol.24, pp. 69-74.
- [12] Sopilka Yu.V. (2015) Application of bispectral analysis of vibroacoustic signals for diagnosis blades cracks in aircraft engines. *Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, Iss. 6, pp. 73-79. DOI: 10.20535/1810-0546.2015.6.56652
- [13] Feder J. (1988) *Fractals*. Plenum Press, New York, 254 p.
- [14] Chumak O. V. (2011) *Entropii i fraktaly v analize dannykh* [Entropies and fractals in data analysis]. Moskow-Izhevsk, 164 p.
- [15] Zakharov V.S. (2010) Dynamic and Fractal Characteristics of Time Series of Released Seismic Energy, *Nelineinyi mir*, Vol. 8, No 4, pp. 234-242.
- [16] Pashchenko R.E., Kuc V.S. and Shapovalov A.V. (2008) Localization regions of supervision on the aerospace images with the use of line calculation fractals dimension and their between line treatment, *Systemy obrobky informatsii*, Iss. 3 (70), pp. 114-119.

## References

- [1] Adams D.E. (2007) *Health Monitoring of Structural Materials and Components*. DOI: 10.1002/9780470511589
- [2] Nagarajaiah S. and Erazo K. (2016) Structural monitoring and identification of civil infrastructure in the United States. *Structural Monitoring and Maintenance*, Vol. 3, Iss. 1, pp. 51-69. DOI: 10.12989/smm.2016.3.1.051
- [3] Staszewski W., Boller C. and Tomlinson G. (2003) *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*. DOI: 10.1002/0470092866
- [4] Arslanov R.V. (2011) *Kontrol' parametrov vibratsii gazoturbinykh dvigatelei v real'nom masshtabe vremeni* [Vibration parameters testing of the gas-turbine engines at the real time terms]. UFA, UGATU, 158 p.
- [5] Chyhryn V.S. and Sukhovii S.I. (2012) *Vibroakustyka i vibrodiahnostyka hazoturbinykh dvyhuniv* [Vibroacoustics and vibrodiagnostics of gas-turbine engines]. Kharkiv, KhAI, 264 p.
- [6] Burau N.I., Yatsko L.L., Pavlovskiy O.M. and Sopilka Yu.V. (2012) *Metody tsyfrovoy obrobky syhnaliv dlia vibratsiinoi diahnostryky aviatsiynykh dvyhuniv* [Digital signal processing methods for the vibration diagnosis of aircraft engines], Kyiv, NAU, 152 p.
- [7] Burau N.I. (2009) *Nestatsionarni kolyvannia neliniynykh (kuskovo-liniynykh) system* [Non-stationary oscillations of non-linear (piece-wise linear) systems], Kirovohrad, POLIMED-Servis, 104 p.
- [8] Radkowski S. (2007) Use of vibroacoustical signal in detecting early stages of failures. *Eksploatacja i niezawodnosc*, No 3, pp. 11-18.
- [17] Ivanov V.K., Paschenko R.E., Yatsevich S.Ye., Yatsevich Ye. I. and Yegorova L.A. (2013) Study of soil characteristics using fractal methods of aerospace image processing. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, Vol. 10, No 2, pp. 98-104.
- [18] Ampilova N.B. and Solov'ev I.P. (2012) *Algoritmy fraktal'nogo analiza izobrazhenii* [Algorithms of fractal analysis of images]. *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii*, No 2, pp. 19-24.
- [19] Kononyuk A. E. (2016) *Diskretno-nepreryvnaya matematika. Kniga 6. Poverkhnosti* [Discrete-continuous mathematics. Volume 6. Surfaces]. Kiev, Osvita Ukrainy, 618 p.

## Использование фрактального анализа частотно-временных спектров виброакустических сигналов для диагностики газотурбинных двигателей

Бурау Н. И., Игнатович С. Р., Паздрий О. Я.

Статья посвящена усовершенствованию методов обработки виброакустических сигналов для диагностики начальных трещиноподобных повреждений в лопатках авиационных газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации. В качестве диагностической информации используется низкочастотный вибрационный и акустический шум в диапазоне 0-10 кГц, который излучается двигателем в процессе эксплуатации. Начальные трещиноподобные повреждения лопаток не вызывают увеличение общего уровня виброакустических сигналов или их отдельных составляющих. При появлении

и начальном развитии повреждений изменяется структура сигналов, появляются новые составляющие, характеризующиеся низкой энергетической емкостью. Для выделения таких составляющих используются методы частотно-временного, полиспектрального, масштабнo-временного анализа. Однако результаты такого анализа часто являются достаточно сложными для интерпретации, сравнения и принятия решения о техническом состоянии объекта. Для повышения диагностической ценности частотно-часовых спектров предлагается дополнительный уровень обработки диагностической информации, основанный на методах фрактального анализа. В статье представлены результаты физического моделирования и частотно-временного анализа виброакустических сигналов. Для этого проведены экспериментальные исследования вынужденных колебаний физической модели (имитатора) рабочего колеса при стационарных и нестационарных вибрационных воздействиях. Исследованы два технических состояния имитатора: бездефектное и при наличии начального трещиноподобного повреждения в одной лопатке. Для обработки виброакустических сигналов, излучаемых вращающимся имитатором на разных режимах возбуждения, использовался частотно-временной анализ на основе псевдораспределения Вигнера-Вилля. Результаты анализа представлены в виде двумерных контурных изображений, характеризующих зависимость спектральных оценок от нормированной частоты и времени. На втором уровне, для каждого изображений определялась фрактальная клеточная размерность (размерность Минковского) – интегральный численный показатель, характеризующий геометрию контурного изображения и позволяющий различить состояния имитатора на разных режимах вибрационного возбуждения. Предложено использовать размерность Минковского в качестве диагностического признака трещины в лопатке рабочего колеса. Установлено, что размерность Минковского более чувствительна к появлению повреждения, в случае ее определения не для полных изображений, а для отдельных частей изображений в разных частотных диапазонах.

*Ключевые слова:* мониторинг технического состояния; газотурбинный двигатель; трещиноподобное повреждение; виброакустический сигнал; частотно-временной анализ; контурное изображение; фрактальный анализ; фрактальная клеточная размерность; размерность Минковского

## Using fractal analysis of the time-frequency spectra of vibroacoustical signals for diagnostic of gas-turbine engines

*Bouraou N. I., Ignatovich S. R., Pazdrii O. Ya.*

The article is devoted to the improvement of signal processing methods of complex vibroacoustical signals for the diagnosis of initial crack-like damage in the blades of aircraft gas-turbine engines during operation. The low-frequency vibrational and acoustic noise in the range 0-10 kHz is used as diagnostic information, which is emitted by the engine during operation. Initial crack-like damage in the blade does not cause an increase in the overall level of vibroacoustical signals or their components. When the occurrence and initial propagation of damages change the signal structure, new components appear that are characterized by low energy capacity. The following signal processing methods are used in order to abstraction such components: time-frequency analysis, polyspectral (high-order spectral) analysis, scale-time analysis. However, the results of such signal processing are often quite complex for interpreting, comparing and deciding about the technical condition of the testing object. We propose an additional level of processing of diagnostic information, based on the methods of fractal analysis in order to increase the diagnostic value of the time-frequency spectra. The results of physical modeling and frequency-time analysis of vibroacoustical signals are presented. For this purpose, experimental studies of the forced vibrations of the physical model (turbine imitator) of the turbine are carried out under steady-state and non-steady-state vibration excitations. Two technical conditions of the turbine imitator are investigated: defect-free and the presence of an initial crack-like damage in one blade. We use the a time-frequency analysis based on Wigner-Wille pseudo-distribution to signal processing of vibroacoustical signals, which are emitted by a rotating turbine imitator during different excitation modes. The results of the time-frequency analysis are presented in the form of two-dimensional contour images characterizing the dependence of spectral estimates on the normalized frequency and time. At the second signal processing level, we determine fractal box-counting dimension (Minkowski dimension). Minkowski dimension is an integral numerical index that characterizes the geometry of the contour image, and allows to discriminate the turbine imitator conditions during operation at the different modes of vibrational excitation. We propose to use the Minkowski dimension as a diagnostic feature of a crack of the turbine blade. It is established that the Minkowski dimension is more sensitive to the occurrence of damage, in the case of its determination, not for full images, but for separate parts of images in different frequency ranges.

*Key words:* condition monitoring; gas-turbine engine; crack-like damage; vibroacoustic signal; time-frequency analysis; contour image; fractal analysis; box-counting dimension; Minkowski dimension