

УДК 621.452.3-25-047.58

doi: 10.32620/aktt.2021.4sup1.09

Н. І. БУРАУ, О. Я. ПАЗДРІЙ

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

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА ПОПАДАННЯ СТОРОННІХ ПРЕДМЕТІВ В ОБЕРТОВУ СИСТЕМУ

В роботі аналізуються віброакустичні сигнали, отримані шляхом фізичного моделювання обертової системи, наприклад, авіаційного газотурбінного двигуна, на стаціонарних та нестационарних режимах експлуатації. Як фізична модель обертової системи використовується повітряний стартер (нагнітач), який приводиться в обертання двигуном постійного струму. У складі вимірювальної системи використано динамічний мікрофон з підсилювачем, тахометр, двоканальний цифровий осцилограф, персональний комп'ютер з технологічним та спеціальним програмним забезпеченням. У процесі моделювання імітується попадання в обертову систему сторонніх предметів, яке виконано шляхом кидання паперових кульок під час обертання фізичної моделі в стаціонарному режимі експлуатації. Для обробки вимірених віброакустичних сигналів, які випромінюються системою при обертанні, запропоновано та обґрунтовано багаторівневу обробку на основі послідовного застосування методів частотно-часового аналізу, багатоспектрального аналізу та фрактального аналізу. Результати частотно-часового аналізу показали, що в моменти кидання кульок у віброакустичному сигналі збільшується інтенсивність складових на вищих частотах. Для фрагментів реалізації сигналу без кидання та з киданням кульок виконано багато спектральний аналіз та отримано оцінки модуля біспектру у вигляді контурних зображень. На третьому рівні обробки визначено клітинну розмірність (розмірність Мінковського) для контурних зображень оцінок модуля біспектру. Розмірність Мінковського є інтегральним кількісним показником геометрії ізоліній і відрізняється за значенням для виділених фрагментів віброакустичного сигналу, тому на завершальному рівні обробки її пропонується використовувати як діагностичну ознаку попадання стороннього предмету в обертову систему. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем функціональної діагностики складних обертових систем, підвищення чутливості, розширення функціональних можливостей та забезпечення багато класової діагностики при появі пошкоджень та порушенні штатних режимів функціонування.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун; віброакустичні сигнали; обробка сигналів; частотно-часовий аналіз; багатоспектральний аналіз; фрактальний аналіз; розмірність Мінковського.

### Вступ

Моніторинг поточного функціонального технічного стану (ТС) є одним з основних факторів забезпечення надійної безаварійної експлуатації складних обертових об'єктів авіаційної техніки, наприклад, газотурбінних двигунів (ГТД). Сучасні системи моніторингу складних об'єктів та їх конструктивних елементів за принципами побудови та функціонування реалізують концепцію структурного моніторингу [1-3]. Комплексний підхід до моніторингу та діагностики, покладений в основу таких систем, передбачає використання різних діагностичних методів, які є прийнятними для конкретного об'єкту моніторингу та у сукупності забезпечують багато класову діагностику об'єкта з високою вірогідністю. Як показують дослідження [4,5], комплексний підхід є ефективним і при реалізації моніторингу в межах одного діагностичного методу шляхом паралельного чи почергового застосування різних методів аналізу діагностичної інформації, зокрема, при

використанні методів вібраційної та віброакустичної діагностики ГТД. Застосування різних методів та алгоритмів аналізу до різних фрагментів вимірених вібраційних (віброакустичних) сигналів на стаціонарних та перехідних режимах експлуатації розширюють функціональні можливості діагностичного методу для забезпечення багато класової діагностики двигунів. Це обумовлює необхідність обґрунтування і вдосконалення методів та алгоритмів для багаторівневої обробки діагностичної інформації, які забезпечать виділення інформативних складових з шумоподібних вібраційних сигналів, визначення діагностичних ознак та ідентифікацію ТС обертового об'єкта під час експлуатації.

Застосування того чи іншого методу аналізу діагностичної інформації залежить від багатьох факторів, серед яких варто відзначити такі, як: чутливість до малих змін корисної інформації в умовах високого рівня адитивних та мультиплікативних завад; здатність ідентифікувати локальну нестационарність у вимірюваному сигналі, яка зумовлена

появою та розвитком пошкодження; прийнятність для обробки суттєво нестаціонарних сигналів (на перехідних режимах експлуатації); однозначність інтерпретації результатів аналізу. Таким вимогам можуть задовольняти методи на основі статистичних та спектральних характеристик вищих порядків, частотно-часових перетворень, масштабно-часових перетворень, фрактального аналізу, які комбінуються для вирішення конкретних завдань багатокласової діагностики.

Методи частотно-часового аналізу та багато спектрального (біспектрального) аналізу для обробки віброакустичних сигналів запропоновано та обґрунтовано в [6-9] з метою раннього виявлення пошкоджень обертових елементів (у тому числі лопаток ГТД). Ефективність спектральних характеристик вищих порядків обумовлена їх властивістю пригнічувати шумові, зокрема, гаусівські складові вимірних сигналів, визначати статистично пов'язані ділянки спектру, виявляти комбінаційні чи модуляційні частоти. Частотно-часові перетворення сигналів дають можливість визначити, як складові спектри змінюються у часі. Масштабно-часові перетворення (вейвлет-перетворення) є ефективним методом аналізу нестаціонарних процесів, а вейвлетна фільтрація може використовуватись для попередньої обробки складних сигналів [10, 11]. Фрактальний аналіз [12, 13], застосований до результатів частотно-часових, багатоспектральних чи масштабно-часових перетворень сигналів, дозволяє отримати інтегральну кількісну оцінку досліджуваних фрагментів сигналів, яку можна використовувати як діагностичну ознаку для визначення ТС об'єкта.

Метою даної статті є обґрунтування та оцінка ефективності багаторівневої обробки віброакустичних сигналів, отриманих в результаті фізичного моделювання потрапляння сторонніх предметів в обертову систему.

## 1. Постановка задачі

Моніторинг технічного стану об'єктів під час експлуатації призначений для раннього виявлення пошкоджень та дефектів, попередження порушення штатних режимів експлуатації через неконтрольовані зовнішні впливи. Як відомо, несправності робочих коліс (компресорів і турбін) є причиною значного відсотку відмов ГТД, які призводять до дострокового зняття двигуна з експлуатації [13]. Вказані відмови в основному викликаються такими характерними сукупностями пошкоджень, як: забоїни, вм'ятини та погнутості лопаток компресора; тріщини та обриви лопаток компресора; забоїни, тріщини, корозія та прогари лопаток турбіни; руйнування валів через розвиток тріщин під впливом змінних та

скручуючих навантажень; розвиток тріщин у дисках, що призводить до їх руйнування і не локалізується в межах корпусу двигуна. Більшість несправностей деталей турбін і компресорів носять втомний характер. Втомні тріщини в лопатках та дисках виникають в результаті підвищених вібраційних навантажень та зменшення міцності матеріалу під впливом множини факторів.

До найбільш поширених факторів появи експлуатаційних пошкоджень відноситься попадання сторонніх предметів, які викликають локальні забоїни та вм'ятини, деформацію та руйнування лопаток [13]. Несприятливим є і попадання пилу та піску, що викликає інтенсивне ерозійне зношування лопаток. Такі порушення штатних експлуатаційних режимів в умовах високої вібраційної напруженості призводять до появи та розвитку тріщин в лопатках, в деяких випадках – до руйнування елементів та загорання двигуна в польоті, що створює передумови льотної події. Тому для безпечної експлуатації ГТД важливо під час моніторингу та багато класової діагностики виявляти як початкові пошкодження обертових елементів, так і порушення штатних режимів, які призводять до них.

У даному дослідженні пропонується на основі фізичного моделювання обертової системи виконати багаторівневу обробку віброакустичних сигналів для виявлення попадання сторонніх предметів.

## 2. Фізичне моделювання та аналіз віброакустичних сигналів

### 2.1 Фізичне моделювання попадання сторонніх предметів в обертову систему

Фізичне моделювання віброакустичних процесів при попаданні сторонніх предметів в обертову систему проводилось шляхом експериментальних досліджень віброакустичних сигналів, які випромінювались фізичною моделлю обертової системи при стаціонарних та нестаціонарних вібраційних збуреннях. У якості фізичної моделі (ФМ) обертової системи використано повітряний стартер (нагнітач), який має 14 лопаток з титанового сплаву (рис. 1). Нагнітач приводився в обертання двигуном постійного струму з регулюванням обертів, максимальна частота обертання досягає 7000 об/хв.

Для проведення досліджень використано вимірювальну систему, до складу якої ввійшли: динамічний мікрофон серії МІС з підсилювачем, лінійність характеристики забезпечується в діапазоні частот від 10 Гц до 50 кГц; тахометр; двоканальний цифровий осцилограф ISD205A, на перший канал подається сигнал з підсилювача мікрофону, а на другий – з тахометра; ПК з відповідним програмним забезпеченням.



Рис. 1. Фізична модель обертової системи

Експериментальні дослідження проведено для швидкості обертання турбіни в стаціонарному режимі 3000об/хв, реалізації віброакустичних сигналів отримано з частотою дискретизації 16 кГц. Вмикання та вимикання привідного механізму відбувається так, що на часовому інтервалі спостереження імітуються режими розгону, стаціонарного вібраційного збурення зі сталою частотою обертання та вибігу.

Для імітації попадання сторонніх предметів в обертову систему використано вкидання паперових кульок діаметром 30 мм та вагою 2 г. Приклад реалізації виміряного віброакустичного сигналу наведено на рис. 2.

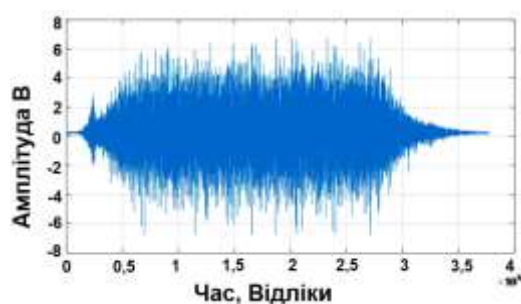


Рис. 2. Приклад реалізації віброакустичного сигналу, що випромінюється фізичною моделлю обертової системи

Відповідно до розробленої методики було проведено експериментальні дослідження ФМ без порушення штатного режиму (без зовнішнього впливу), та з вкиданням двох і трьох кульок. Вкидання кульок відбувалось на стаціонарному режимі обертання, кульки вкидалися послідовно по одній з інтервалом приблизно 1 с.

## 2.2 Аналіз віброакустичних сигналів

Для повних реалізацій віброакустичних сигналів, що випромінюються ФМ обертової системи,

виконано багаторівневий аналіз за такою методикою. Спочатку було отримано залежні від часу спектри сигналів на основі частотно-часового перетворення Вігнера-Вілля [11]. Для виділених на першому етапі фрагментів сигналів було застосовано багато спектральний аналіз і визначено оцінки модуля біспектру [11], які мають подання у вигляді конурних зображень. На третьому етапі обробки було визначено розмірність Мінковського [5, 13] для отриманих контурних зображень, значення якої наближається до 2 для більшої наповненості зображення, або до 1 - для меншої наповненості зображення.

На рис. 3 наведено результати частотно-часового перетворення віброакустичних сигналів при вкиданні послідовно двох кульок (рис.3,а) та трьох кульок (рис. 3,б).

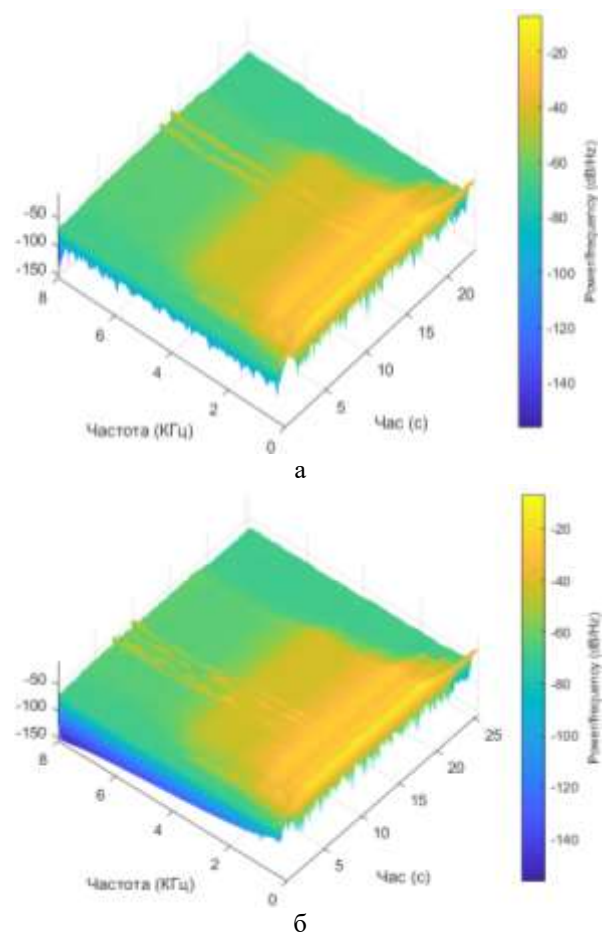


Рис. 3. Результати частотно-часового аналізу віброакустичних сигналів: а) послідовне вкидання двох кульок; б) послідовне вкидання трьох кульок

Як видно з результатів на рис. 3,а, вкидання двох кульок в обертову систему відбулося в моменти часу  $t_1=12$ с та  $t_2=13$ с проведеного експерименту. Попадання двох кульок викликало у виміряному віброакустичному сигналі збільшення інтенсивності складових сигналу, особливо в діапазоні вищих час-

тот ( $f > 2\text{кГц}$ ), саме в ті моменти часу, коли відбувалось вкидання кульок. При послідовному вкиданні трьох кульок в моменти часу  $t_1=7,5\text{с}$ ,  $t_2=8,2\text{с}$  та  $t_3=9\text{с}$  третя кулька двічі відбилась від лопаток обертової системи, як наслідок на рис. 3,б крім зазначених є додатковий момент часу ( $t_4=10\text{с}$ ), де з'являються спектральні складові більшої інтенсивності в діапазоні вищих частот.

Для другого рівня обробки були з повних сигналів були виділені фрагменти реалізацій до вкидання кульок і в моменти вкидання кульок, кожен фрагмент довжиною 10000 точок. Для виділених фрагментів проведено визначення модуля біспектру. Приклад результатів оцінки модуля біспектру у вигляді повнокольорових контурних зображень для експерименту з вкиданням двох кульок наведено на рис. 4,а для фрагменту сигналу до вкидання і на рис. 4,б – при вкиданні однієї кульки (з двох).

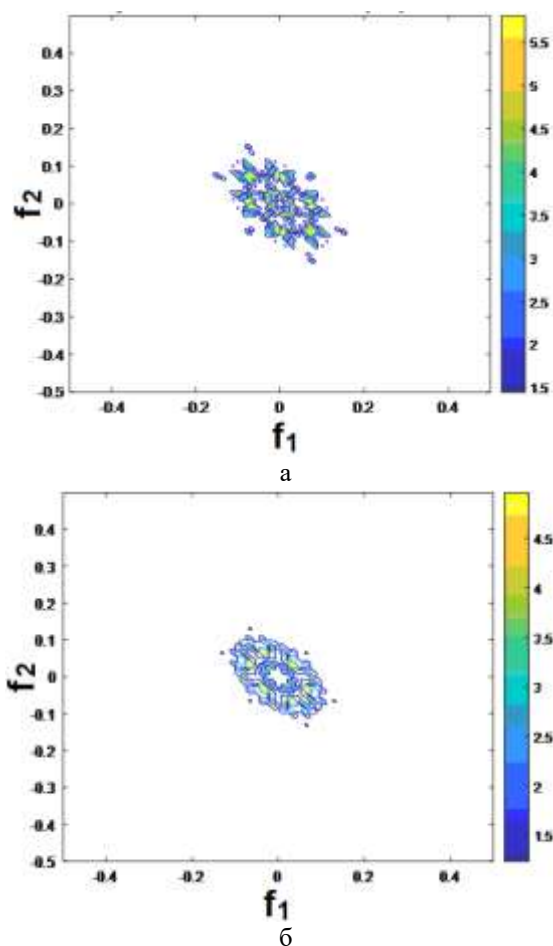


Рис. 4. Оцінка модуля біспектру фрагментів сигналу до вкидання (а) і в момент вкидання (б) кульки

Як видно, оцінки модуля біспектру для вібрних фрагментів відрізняються, але за такими зображеннями важко виділити діагностичну ознаку, щоб класифікувати стан обертової системи. Тому для отриманих зображень було визначено розмірність Мінковського  $D_M$ , яка для окремих частин зображень

є інтегральним кількісним показником геометрії ізоліній. В результаті виконаного аналізу отримано такі значення розмірності Мінковського: для зображення модуля біспектру фрагменту сигналу без попадання сторонніх предметів  $D_M=1,07$ ; для зображення модуля біспектру фрагменту сигналу з попаданням стороннього предмету (для кожної кульки) в середньому  $D_M=1,13$ . Таким чином, значення  $D_M$  можна використати як діагностичну ознаку попадання стороннього предмету в обертову систему.

## Висновки

В результаті проведених досліджень фізичної моделі обертової системи отримано реалізації віброакустичних сигналів для штатного режиму експлуатації та у разі потрапляння в обертову систему сторонніх предметів. Для діагностики таких випадків запропоновано багаторівневу обробку сигналів на основі частотно-часового перетворення, біспектрального та фрак тального аналізу. Показано, що діагностичною ознакою може слугувати розмірність Мінковського, визначена для оцінок модуля біспектра фрагментів сигналів. Отримані результати є новими і можуть бути використані для вдосконалення систем функціональної діагностики ГТД.

## Література

1. Staszewski, W. *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing [Text]* / W. Staszewski, C. Boller, G. Tomlinson. – John Wiley & Sons Ltd., 2004. – 288 p.
2. Adams, D. *Health Monitoring of Structural Materials and Components. Methods with Applications [Text]* / D. Adams. – John Wiley & Sons Ltd., 2007. – 475 p.
3. Adamowicz M. *Advanced gas turbines health monitoring systems [Text]* / M. Adamowicz, G. Żywica // *Diagnostyka*. – 2018. – Vol. 19, Iss. 2. – P. 77-87.
4. Pavlovskiy, O. *Multilevel vibration control system of aviation gas-turbine engines [Text]* / O. Pavlovskiy, N. Bouraou, L. Iatsko // *Vibrations in Physical Systems*. – 2012. – Vol. 25. – P. 323-328.
5. Pazdrii, O. *Vibroacoustic Condition Monitoring of the Complex Rotation System Based on Multilevel Signal Processing [Text]* / O. Pazdrii, N. Bouraou // *Vibrations in Physical Systems*. – 2020. – Vol. 31, No. 2. – Article Id: 2020224. – 7 p.
6. Radkowski, S. *Use of vibroacoustical signal in detecting early stages of failures [Text]* / S. Radkowski // *Eksploatacja i niezawodnosc*. – 2007. – No. 3. – P. 11-18.
7. Сопілка, Ю. В. *Використання частотно-часових перетворень Вігнера вищих порядків у задачах віброакустичної діагностики [Текст]* / Ю. В. Сопілка // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2005. – № 6. – С. 110-117.

8. Сопілка, Ю. В. Застосування біспектрально-го аналізу віброакустичних сигналів для діагностування тріщин в лопатках авіаційних двигунів [Текст] / Ю. В. Сопілка // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2015. – № 6. – С. 73-79.

9. Паньків, Ю. В. Дослідження вібраційних процесів у відцентрових насосних агрегатах з метою контролю динаміки розвитку дефектів їх робочих коліс та міжступінчатих ущільнень [Текст] / Ю. В. Паньків // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 4 (49). – С. 75-80.

10. Klepka, A. Wavelet Based Signal Demodulation Technique for Bearing Fault Detection [Text] / A. Klepka // Mechanics and Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 15, No. 4. – P. 63-71.

11. Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики авіаційних двигунів [Текст] : монографія / Н. І. Бурау, Л. Л. Яцко, О. М. Павловський [и др.]. – К. : НАУ, 2012. – 152 с.

12. Чумак, О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных [Текст] / О. В. Чумак. – М.-Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. – 164 с.

13. Бурау, Н. І. Використання фрактального аналізу частотно-часових спектрів віброакустичних сигналів для діагностики газотурбінних двигунів [Текст] / Н. І. Бурау, С. Р. Ігнатович, О. Я. Паздрій // Вісник НТУУ КПІ. Сер.: Радіотехніка радіоапаратобудування. – 2018. – № 74. – С.73-83.

## References

1. Staszewski, W., Boller, C., Tomlinson, G. Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing. John Wiley & Sons Ltd., 2004. 288 p.

2. Adams, D. Health Monitoring of Structural Materials and Components. Methods with Applications. John Wiley & Sons Ltd., 2007. 475 p.

3. Adamowicz, M., Żywica, G. Advanced gas turbines health monitoring systems, *Diagnostyka*, 2018, vol. 19, iss. 2, pp. 77-87.

4. Pavlovskiy, O., Bouraou, N., Iatsko, L. Multilevel vibration control system of aviation gas-turbine engines. *Vibrations in Physical Systems*, 2012, no. 25, pp. 323-328.

5. Pazardrii, O., Bouraou, N. Vibroacoustic Condition Monitoring of the Complex Rotation System Based

on Multilevel Signal Processing. *Vibrations in Physical Systems*, 2020, vol. 31, no. 2, article id: 2020224. 7 p.

6. Radkowski, S. Use of vibroacoustical signal in detecting early stages of failures. *Eksploatacja i niezawodnosc*, 2007, no. 3, pp. 11-18.

7. Sopilka, Iu. V. Vy`kory`stannya chastotno-chasovy`x peretvoren` Vignera vy`shhy`x poryadkiv u zadachax vibroakusty`chnoyi diagnosty`ky` [Use of higher order Wigner time-frequency transformation for vibroacoustical diagnosis problems]. *Naukovi visti NTUU "KPI"*, 2005, no. 6, pp. 110-117.

8. Sopilka, Iu. V. Zastosuvannya bispektral`nogo analizu vibroakusty`chny`x sy`gnaliv dlya diagnostuvannya trishhy`n v lopatkax aviacijny`x dvy`guniv [Use of the bispectral analysis of vibroacoustical signals for diagnosis of cracks of aircraft engines blades]. *Naukovi visti NTUU "KPI"*, 2015, no. 6, pp. 73-79.

9. Pan`kiv, Iu. V. Doslidzhennya vibracijny`x procesiv u vidcentrovy`x nasosny`x agregatax z metoyu kontrolyu dy`namiky` rozvy`tku defektiv yix robochy`x kolis ta mizhstupinchaty`x ushil`nen` [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*, 2013, no. 4 (49), pp. 75-80.

10. Klepka, A. Wavelet Based Signal Demodulation Technique for Bearing Fault Detection, *Mechanics and Mechanical Engineering*, 2011, vol. 15, no. 4, pp. 63-71.

11. Bouraou, N. O., Yatsko, L. L., Pavlovskiy, O. M., Sopilka, Y. V. *Metody tsyvrovoyi obrobky syhnaliv dlya vibratsiynoyi diahnostryky aviatsiynnykh dvyhuniv* [Methods of digital signal processing for vibration diagnostics of aviation engines]. Kiev, National Aviation University Publ., 2012. 152 p.

12. Chumak, O. V. *Entropii i fraktaly v analize dannykh* [Entropies and fractals in data analysis]. Moscow-Izhevsk, NITS "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika", Institute of Computer Science Publ., 2011. 164 p.

13. Bouraou, N. I., Ignatovych, C. P., Pazardrii, O. Y. Vykorystannya fraktalnoho analizu chastotno-chasovykh spektriv vibroakustychnykh syhnaliv dlya diahnostryky hazoturbinnnykh dvyhuniv [Using fractal analysis of frequency-time spectra of vibroacoustic signals for diagnostics of gas turbine engines], *Visnik NTUU KPI. Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*, 2018, no. 74, pp. 73-83.

Поступила в редакцию 02.07.2021, рассмотрена на редколлегии 16.08.2021

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА ПОПАДАНИЯ ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ ВО ВРАЩАЮЩУЮСЯ СИСТЕМУ

Н. И. Бурау, О. Я. Паздрій

В работе анализируются виброакустические сигналы, полученные путем физического моделирования вращающейся системы, например, авиационного газотурбинного двигателя, на стационарных и нестационарных режимах эксплуатации. В качестве физической модели вращающейся системы используется воздушный стартер (нагнетатель), который приводится во вращение двигателем постоянного тока. В составе

измерительной системы использованы динамический микрофон с усилителем, тахометр, двухканальный цифровой осциллограф, персональный компьютер с технологическим и специальным программным обеспечением. В процессе моделирования имитируется попадание во вращающуюся систему посторонних предметов путем вбрасывания бумажных шариков при вращении физической модели в стационарном режиме эксплуатации. Для обработки измеренных виброакустических сигналов, излучаемых системой при вращении, предложено и обосновано многоуровневую обработку на основе последовательного применения методов частотно-временного анализа, полиспектрального анализа и фрактального анализа. Результаты частотно-временного анализа показали, что в моменты вброса шариков в виброакустическом сигнале увеличивается интенсивность составляющих на высоких частотах. Для фрагментов реализации сигнала без вброса и с вбросом шариков выполнено полиспектральный анализ и получены оценки модуля биспектра в виде контурных изображений. На третьем уровне обработки определяется клеточная размерность (размерность Минковского) контурных изображений оценок модуля биспектра. Размерность Минковского является интегральным количественным показателем геометрии изолиний и отличается по значению для выделенных фрагментов виброакустического сигнала, поэтому на завершающем уровне обработки предлагается о использовать ее как диагностический признак попадания постороннего предмета во вращающуюся систему. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования систем функциональной диагностики сложных вращающихся систем, повышения чувствительности, расширения функциональных возможностей и обеспечения многоклассовой диагностики при появлении повреждений и нарушении штатных режимов функционирования.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель; виброакустические сигналы; обработка сигналов; частотно-временной анализ; полиспектральный анализ; фрактальный анализ; размерность Минковского.

## PHYSICAL MODELING AND DIAGNOSIS OF HIT OF THE FOREIGN OBJECTS INTO A ROTATING SYSTEM

*N. Bouraou, O. Pazdrii*

The paper analyzes the vibroacoustic signals obtained by physical modeling of the rotating system, for example, an aircraft gas turbine engine, in the conditions of steady-state and non-steady-state modes. An air starter (supercharger) is used as a physical model of a rotating system, which is driven by a DC motor. The measuring system uses a dynamic microphone with an amplifier, a tachometer, a two-channel digital oscilloscope, a personal computer with technological and special software. The simulation of the ingress of foreign objects into the rotating system is performed by throwing paper balls during the rotation. The multilevel processing based on sequential application of methods of frequency-time analysis, multispectral analysis, and fractal analysis is proposed and substantiated for processing of measured vibroacoustic signals. The results of the frequency-time analysis showed that at the time of throwing the balls the intensity of the components at higher frequencies increases. For fragments of signal realization without throwing and with the throwing of balls the multispectral analysis is carried out and estimates of the bispectrum modulus are received in the form of contour images. At the third level of signal processing, the Minkowski dimension of the contour images of the bispectrum module estimates is determined. The Minkowski dimension is an integral quantitative indicator of the geometry of isolines and differs in value for the selected fragments of the vibroacoustic signal. So it can be used as a diagnostic sign of a foreign object entering the rotating system at the final level of processing. The obtained results can be used to improve the systems of condition monitoring of complex rotating systems, increase sensitivity, expand functionality and provide multi-class diagnostics in the event of damage and violation of normal operating modes.

**Keywords:** gas turbine engine; vibroacoustic signals; signal processing; time-frequency analysis; multispectral analysis; fractal analysis; Minkowski dimension.

**Бурау Надія Іванівна** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. приладів і систем орієнтації і навігації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Паздрій Ольга Ярославівна** – аспірантка, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Nadiia Bouraou** – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Dept. of Instruments and Systems of Orientation and Navigation, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine,

e-mail: nbourau@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6848-816X, Scopus Author ID: 55389891200,

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=YfBqGZgAAAAJ>

**Olha Pazdrii** – PhD student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine,

e-mail: olgapazdri@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8970-5079, Scopus Author ID: 57189332323.