

ТЕСТУВАННЯ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ ПОЛАМОК МЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА АУДІОСИГНАЛАМИ

Артем Сєрєбряков, Володимир Тарануха, Олександр Бушма

***Анотація.** Розроблено та протестовано ресурсоефективний підхід на основі алгоритму Детекції Піків на Границях Циклів для виявлення механічних несправностей двигунів внутрішнього згорання за аналізом акустичних сигналів. Розроблений підхід має мінімалістичну архітектуру та може бути реалізований на апаратних платформах із низькими обчислювальними ресурсами, зокрема, на мікроконтролерах. Експериментально підтверджено ефективність запропонованого методу та його вищу розрізняльну здатність у порівнянні з методами на основі Емпіричного Розкладу Модів. Це задовольняє вимогам галузі індустріального Інтернету речей та сприяє підвищенню рівня приватності, оскільки надає змогу замість потокового аудіо передавати мережею технічний стан системи.*

Ключові слова: акустичний сигнал, механічна система, Інтернет речей, нейромережа.

I. ВСТУП

Сучасні методи діагностики на основі глибокого навчання нейромереж показують високу точність у класифікації ознак несправностей у обертових механізмах. Однак існують суттєві обмеження, які значно ускладнюють їх широке практичне впровадження. Такі рішення вимагають великих обсягів маркованих даних для навчання у різних експлуатаційних умовах. При цьому алгоритми глибокого навчання часто виявляють низьку переносимість моделей між різними платформами або режимами роботи, а при змінених умовах експлуатації точність також знижується [1]. Досить великі нейромережі забезпечують якість роботи, але вони непридатні для роботи на мінімізованих платформах [2], [3]. У той же час, при використанні нейромереж мінімального розміру та мінімального набору ознак якість розпізнавання лишається порівняно невисокою [4], [5]. В сфері індустріального IoT залишається потреба в мінімізованій системі, яка може надати високу якість розпізнавання при роботі з достатньою швидкістю. Запропонований алгоритм Детекції Піків на Границях Циклів (ДПГЦ) [6] розроблений для виявлення поламок у механічних пристроях з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ) за їх аудіосигналами та може бути адаптований під відповідні ресурсоефективні рішення. Для оцінки його роботоспроможності в галузі IoT необхідно провести додаткові кваліфікаційні дослідження.

Метою роботи є тестування методу виявлення поламок у механічних пристроях з ДВЗ на основі алгоритму ДПГЦ у випадку розширеного датасету, який містить як більшу кількість записів справних двигунів, так і записи нових типів поламок, для його використання у сфері індустріального IoT та моніторингу периферії.

Для визначення точності, результати виявлення поламок протестовано за допомогою Байєсівського класифікатора для початкової та розширеної множини ознак. Засіб показав кращі результати у порівнянні з методами на основі Емпіричного Розкладу Модів (від англ. «Empirical Mode Decomposition», EMD) [7].

II. ДАНІ ТА МЕТОДИ

Розроблений засіб виявлення поламок у механічних пристроях з ДВЗ реалізовано на основі аналізу послідовності домінантних піків в аудіосигналах, з розподілу яких можуть обчислюватися їх ознаки. Тестування запропонованого підходу виконано з використанням датасету з записами роботи справних ДВЗ чотирьох моделей мотоциклів та записами цих же двигунів з різними поламаками, аналогічно [6]. Для цього дослідження було додано в датасет

більше записів: для справних двигунів кожної моделі мотоциклу, та для нових типів поламок. При тестуванні використовувалися записи звуків з ознаками поламок, отримані імітацією несвоєчасного запалювання та пропусків запалювання, а також змінами часу відкриття/закриття клапанів [6]. Також досліджувалися аудіосигнали з поламками підшипників та інші типи поламок, що призводять до утворення шумів та ударів [8], [9].

Робота орієнтована на індустріальний IoT та моніторинг периферії, де первинне оброблення аудіо виконується на ресурсно-обмеженому вузлі для прийняття рішення “норма/аномалія” на edge-пристрої. Це трансформує систему з простого сенсора у розумний IoT-вузол, що передає в мережу лише події та оцінки стану, зменшуючи трафік та затримки.

Методологічну основу роботи склали методи часо-частотного аналізу сигналів (перетворення Фур’є, аналіз спектрограми, вейвлет-перетворення), Байєсівський класифікатор, а також розроблений алгоритм отримання послідовності домінуючих піків, результати якого використані для формування статистичних портретів аудіосигналів.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ

Алгоритм ДПГЦ базується на припущенні, що аудіосигнал є коливальним процесом, породженим механічними елементами об’єкта у різних комбінаціях їх взаємодії. Повторення таких коливань протягом достатнього часового інтервалу формує коливальний режим, який може бути описаний квазіперіодичною звуковою хвилею. Вважається, що цей режим характеризується розподілом найбільш виражених локальних екстремумів хвилі, а їх послідовність дозволяє адекватно описати структуру коливального процесу. Для її отримання визначаються виражені частоти сигналу та окремо аналізується часова структура хвилі для кожної з них.

Отримані ознаки для набору виражених частот сигналу, пораховані за розподілами відповідних послідовностей екстремумів для кожної, характеризують коливальні режими джерела та надають змогу його ідентифікувати. Алгоритм визначення коливальних режимів подано на рисунку 1.

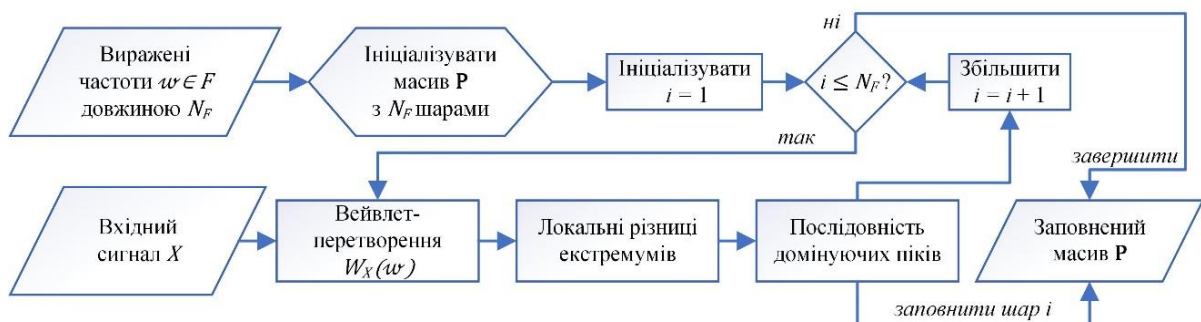


Рисунок 1. Блок-схема алгоритму визначення коливальних режимів

Спочатку обчислюються виражені частоти $F = \{w_1, w_2, \dots, w_{N_F}\}$ вхідного сигналу X , із застосуванням віконного перетворення Фур’є. За частотами виконується вейвлет перетворення $Y_w = W_X(w)$. Для сусідніх екстремумів, отриманих з Y_w , обчислюються різниці їх значень та відстань між ними. Для отриманих значень формується список темпів наростання, серед яких за локальним вікном обирається максимальний.

На виході отримуємо послідовність домінуючих піків для поточної w - це моменти часу початку піків та їх оцінені темпи наростання. З послідовності піків формується масив P , який може містити як отримані розподіли піків безпосередньо, так і пораховані з них статистичні портрети – середні значення та дисперсії. На відміну від ДПГЦ, для формування послідовності за EMD використовується локальний максимум за ковзним вікном.

Враховуючи очікуване падіння точності через ускладнення задачі було розширено експеримент шляхом долучення більшої кількості ознак для оброблення послідовності піків. Додано: медіану, медіану абсолютних відхилень, квантиль p_{10} , квантиль p_{90} , середнє, матсподівання, коефіцієнт варіації, автокореляцію з затримкою.

Оскільки ця задача прив'язана до конкретного пристрою, то для кожної моделі мотоцикла вживається Байєсівський класифікатор однакової архітектури, навчений на даних цієї моделі. Для початкового класифікатора використано статистичні портрети від початкового (Б1) та розширеного (Б2) датасету. У випадку розширеного класифікатора використано додаткові перелічені вище ознаки для розширеного датасету (Б3). Результати наведено в Таблиці 1. Показники точності наведено за мірою F_1 .

Таблиця 1. Точність класифікації поламак

Класифікатори Алгоритми	Б1	Б2	Б3
EMD	0.86	0.66	0.71
ДПГЦ	1.0	0.79	0.83

Як видно з таблиці, збільшення вибірки та збільшення кількості типів поламак призвело до втрати якості порівняно з [6]. Експеримент з використанням розширеного набору ознак сигналу показав, що попри очікуване падіння точності, збільшення їх кількості та якості робить втрату меншою. Класифікація за портретами, отриманими з розмічених за ДПГЦ даних, вища для кожного класифікатора у порівнянні з EMD. Запропонований алгоритм демонструє вищу точність визначення поламак і є більш робастним до розширення датасету.

IV. ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Запропоновано ресурсоефективний алгоритмічний підхід на основі ДПГЦ, який використовує домінуючі спектральні піки для опису коливальних режимів акустичних сигналів. Для валідації методу було розширено експериментальний датасет, збільшивши кількість записів роботи ДВЗ та розглянутих типів поламак. Зростання складності задачі призвело до певного зниження точності діагностики для обох порівнюваних підходів – ДПГЦ та EMD, однак результати підтвердили вищу робастність запропонованого алгоритму.

Експериментальна оцінка на розширеному наборі акустичних записів мотоциклетних ДВЗ продемонструвала ефективність ДПГЦ у задачах виявлення несправностей та його кращу розрізнявальну здатність у порівнянні з методами, що базуються на EMD. Отримані результати підтверджують придатність підходу для практичних застосувань у системах індустриального Інтернету речей, а також сприяє підвищенню рівня приватності, оскільки надає змогу замість потокового аудіо передавати мережею технічний стан системи.

ДЖЕРЕЛА

1. Tama, B.A., Vania, M., Lee, S. et al. Recent advances in the application of deep learning for fault diagnosis of rotating machinery using vibration signals. *Artif Intell Rev*, 56, 4667–4709 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10293-3>
2. Lo, Yi-Cheng, Tsung-Lin Tsai, Chieh-Wen Yang, and An-Yeu Wu. "An Efficient Anomalous Sound Detection System for Microcontrollers." *Sensors* 24, no. 23 (2024): 7478. <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/23/7478>
3. Ahvazi, Pourya Shadkami, and Hossein Mohammadi. "A High-Precision Voiceprint Recognition for Fault Diagnosis of Motor Bearings through Lightweight Dynamic Convolutional Neural

- Network." Results in Engineering (2025): 108463. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025045074>
4. Kfir, Tal, Sahar Tuvyahu, Boaz Ben Moshe, and Or Haim Anidjar. "Real-time detection of acoustic anomalies in drone servo motors using edge-based machine learning." Machine Learning with Applications (2025): 100755. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666827025001380>
5. Muthumala, Uditha, Yuxuan Zhang, Luciano Sebastian Martinez-Rau, and Sebastian Bader. "Comparison of tiny machine learning techniques for embedded acoustic emission analysis." In 2024 IEEE 10th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), pp. 444-449. IEEE, 2024. <https://arxiv.org/pdf/2411.17733>
6. O. Volkov, O. Bushma, A. Sieriebriakov, V. Taranukha, and Y. Linder, "Compact Acoustic Signal Portraits for Resource-Efficient Mechanical Fault Detection." Electronics Letters 62, no. 1 (2026): e70551. <https://doi.org/10.1049/ell2.70551>
7. Ye, Tongzhou, Tianhao Peng, and Lidong Yang. "Review on sound-based industrial predictive maintenance: from feature engineering to deep learning." Mathematics 13, no. 11 (2025): 1724. <https://www.mdpi.com/2227-7390/13/11/1724>
8. Wu, Xian, Dandan Peng, Hervé Denayer, and Konstantinos Gryllias. "Acoustic Monitoring of Rolling Element Bearings Using Simulation-Based Partial Domain Adaptation." Tagungsband/Proceedings (2024): 850-853. https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2024/files/upload/paper/197.pdf
9. Guo, Dong, Qinfeng Ning, Shuaishuai Ge, Yawen Wang, Yi Zhou, Yi Zhou, and Xiaohui Shi. "Nonlinear characteristic analysis of gear rattle based on refined dynamic model." Nonlinear Dynamics 110, no. 4 (2022): 3109-3133. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11071-022-07794-9>



АРТЕМ ССРСБРЯКОВ

с.н.с. відділу «Інтелектуального керування», Інститут інформаційних технологій і систем НАН України, Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-3189-7968

E-mail: sier.artem1002@outlook.com

Отримав ступінь магістра у Національному авіаційному університеті у 2018 році. Продовжив навчання та отримав ступінь доктора філософії у Інституті Інформаційних Технологій та Систем у 2023 році. Серед наукових інтересів — інформаційно-комунікаційні технології, дослідження акустичних сигналів різних типів джерел, вбудовані системи, сенсорика.



ВОЛОДИМИР ТАРАНУХА

н.с. відділу «Інтелектуалізації інформаційних технологій», Інститут інформаційних технологій і систем НАН України, Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-9888-4144

E-mail: volodymyr.taranukha@gmail.com

Закінчив Київський національний університет імені Тараса Шевченка 2002 році. К.ф.-м.н. Серед наукових інтересів - інформаційно-комунікаційні технології, людино-машинні системи, сенсорика, комп'ютерна лінгвістика.



ОЛЕКСАНДР БУШМА

професор кафедри комп'ютерних наук, Київський столичний університет ім. Бориса Грінченка, Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-1604-6129

E-mail: o.bushma@kubg.edu.ua

Закінчив Київський політехнічний інститут у 1976 році. доктор технічних наук, професор. Серед наукових інтересів — інформаційно-комунікаційні технології, людино-машинні системи, інформаційно-вимірвальні системи, системи моніторингу, вбудовані системи, сенсорика.