

УДК 539.3:620.179.17

DOI: 10.15587/2706-5448.2021.224432

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Заміховський Л. М., Заміховська О. Л., Павлик В. В.

Об'єктом дослідження є деградаційні процеси, які проходять в вузлах і елементах газоперекачувального агрегату (ГПА) при його тривалій експлуатації та призводять до появи дефектів і, як наслідок, до зміни його технічного стану. Сьогодні для визначення технічного стану ГПА використовують методи параметричної та вібраційної діагностики. Для виявлення діагностичних ознак технічного стану ГПА використовуються різноманітні перетворення, зокрема вейвлет-перетворення, які застосовуються при обробці вібраційних процесів, що супроводжують роботу ГПА та їх технологічних параметрів. В той же час при дослідженні діагностичних ознак технічного стану ГПА акустичні процеси, що супроводжують роботу ГПА та можуть бути більш інформативними в порівнянні з вібраційними, практично не розглядалися.

Розроблена методика експериментальних досліджень і їх технічне забезпечення, що дозволило проводити запис акустичних процесів, що супроводжують роботу ГПА типу ГТК-25і фірми «Нуово Піньюне» (Італія). В ході проведення експериментальних досліджень були отримані реалізації акустичних процесів ГПА для трьох його станів – «номінального», «дефектного» та «поточного».

Подальші дослідження акустичних процесів для трьох станів ГПА ГТК-25і з використанням вейвлет-перетворення показали, що за зовнішнім виглядом вейвлет-спектрограм важко помітити різницю у виникненні або зникненні різних частотних складових в залежності від технічного стану ГПА. Для отримання кількісних показників такої залежності було проведено дискретне вейвлет-перетворення, яке дозволяє виділити характерні тренди в зміні значень шуму на різних масштабах. Були отримані значення норми апроксимації та норм деталізації по відношенню до норми сигналу (у відсотках) для п'ятирівневого вейвлет-розкладу за наборами даних. Встановлена лінійна залежність норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку від часу напрацювання ГТК-25і (зміни технічного стану), яка може бути прийнята за діагностичну ознаку його технічного стану.

Досліджена діагностична ознака може бути покладена в основу методу діагностування технічного стану ГТК-25і за характеристиками його акустичного процесу з використанням вейвлет-перетворення. Розглянутий підхід виявлення діагностичної ознаки за характеристиками акустичних процесів з використанням вейвлет-перетворення може бути використаний для

будь-якого типу ГПА.

Ключові слова: *газоперекачувальний агрегат, акустичний процес, вейвлет-перетворення, діагностична ознака, технічний стан, експериментальні дослідження.*

1. Вступ

Для визначення технічного стану газоперекачувальних агрегатів (ГПА) в процесі експлуатації використовується значна кількість методів їх діагностування, серед яких найбільш розповсюдженими є методи параметричної та вібраційної діагностики. З метою виявлення діагностичних ознак використовуються різноманітні перетворення, які застосовуються при обробці вібраційних процесів, що супроводжують роботу ГПА та їх технологічних параметрів.

До одного з таких перетворень відносяться вейвлет-перетворення. В [1] наведено поняття вейвлетів і коротко описано їх використання в практичних обчисленнях і різних додатках без строгих математичних тверджень, посилання на які наведені в списку цитованої літератури (92 найменування). Робота [2] є однією з перших щодо використання вейвлет-перетворення для обробки вібраційних сигналів. В роботі розглядаються в доступній для сприйняття та розуміння формі теоретичні основи вейвлет-аналізу, а також наводяться приклади його застосування в практиці аналізу вібрації машин. В роботі викладені також принципи вейвлет-орієнтованих методик віброакустичної діагностики машин.

Стосовно контролю технічного стану ГПА та їх вузлів, а також газотурбінних двигунів (ГТД) в [3] розглядається модель діагностування вузлів ГТД, що відрізняється від існуючих застосуванням безперервного вейвлет-аналізу, крос-спектрального аналізу та S-дискримінанта. Наведені в роботі результати експериментальних досліджень розроблених методів аналізу вібраційних сигналів показали їхню ефективність при виділенні ознак зношування вузлів двигуна. У роботі [4] подано короткий огляд і порівняння різних перетворень, які можуть бути виконані при обробці вібраційних процесів повітряного компресора для оцінки трьох його станів. Були використані наступні перетворення: швидке перетворення Фур'є, дискретне косинусне перетворення, автокореляційна функція, розподілу класів Коена, S-перетворення та різні вейвлет-перетворення.

Алгоритм діагностування несправностей повітряного компресора, заснований на використанні вейвлет-перетворення та штучних нейромереж, розглядається в [5]. При цьому посилання в роботі на результати практичної реалізації розробленого алгоритму відсутні. В роботі [6] розглядаються особливості використання вейвлет-перетворення для визначення діагностичної ознаки технічного стану ГПА за результатами обробки віброакустичних процесів, що характеризують його роботу для трьох якісних станів ГПА. Використання вейвлет-перетворення обумовлено тим, що основна область його застосування – аналіз і обробка сигналів і функцій, нестационарних в часі або неоднорідних в просторі. На відміну від спектрального аналізу, при вейвлет-

перетворенні не потрібно модифікувати алгоритми в залежності від того, чи є досліджуваний процес стаціонарним або нестаціонарним, складовим або складним. Метод аналізу не змінюється залежно від характеристики процесу. Навпаки, вейвлет-перетворення дозволяє визначити структуру сигналу, виконати його поділ на квазістаціонарні ділянки [7]. При цьому результати аналізу містять не тільки загальну частотну характеристику сигналу (розподіл енергії сигналу по частотним складовим), але і відомості про певні локальні координатах, на яких виявляють себе ті чи інші групи частотних складових, або на яких відбуваються швидкі зміни частотних складових сигналу [8]. В [7] наводяться приклади використання вейвлет-перетворення щодо дослідження процесів в елементах газотурбінних двигунів (ГТД) контролю технічного стану підшипників ГТД, виявлення розвитку явища помпажу компресора ГТД та ін.

Таким чином, для виявлення діагностичних ознак технічного стану ГПА та ГТД використовуються вейвлет-перетворення для обробки вібраційних процесів, що супроводжують їх роботу. В той же час при дослідженні діагностичних ознак технічного стану ГПА акустичні процесам, що супроводжують роботу ГПА можуть бути більш інформативними в порівнянні з вібраційними, практично не розглядалися. Виняток становить робота [9], однак в ній обробка акустичного процесу проводилася з використанням перетворення Фур'є. У зв'язку з цим актуальною є задача використання вейвлет-перетворення для обробки акустичних процесів, що супроводжують роботу ГПА.

Таким чином, *об'єктом дослідження* обрано деградаційні процеси, які проходять в ГПА при його тривалій експлуатації та призводять до появи дефектів і, як наслідок, до зміни його технічного стану.

Метою роботи є дослідження характеристик акустичних процесів з використанням вейвлет-перетворення для виявлення діагностичних ознак технічного стану ГПА.

2. Методика проведення досліджень

Методика проведення експериментальних досліджень передбачала проведення запису акустичних процесів, що супроводжують роботу ГПА типу ГТК-25і фірми Нуово Піньоне (Італія), та встановлення на КС-39 «У-П-У» Богородчанського лінійного виробничого управління магістральних газопроводів (Богородчанського ЛВУМГ, смт. Богородчани, Івано-Франківська обл., Україна) ТОВ «Оператор газотранспортної системи України» (м. Київ, Україна). Для цього була використана система акустичного контролю, яка реалізована на чутливому електретному мікрофоні [10], змонтованому в вибухобезпечному корпусі. Мікрофон був встановлений в районі підшипника № 1 безпосередньо біля лопатей 0,1,2 ступеней осьового компресора ГТК-25і, оскільки вони є найбільш навантаженими елементами. Для організації он-лайн записів та обробки сигналів електретного мікрофона використовувався програмний пакет Steinberg Nuendo 3.2.0. Відповідно до методики проведення експериментальних досліджень були отримані вихідні файли формату .mat з записом акустичних сигналів, які підлягали обробці.

Тривалість трьох записів для станів ГПА № 3 – «дефектний»,

«номінальний» та «поточний» – складала по 10 с з частотою дискретизації 44,1 кГц, що є стандартом для запису звукових сигналів.

Розрядність запису складає 16 біт (значення від -32768 до $+32768$). Рівень запису складає -35 дБ. В програмному забезпеченні, що застосовувалося для запису шуму та вібрації рівень 0 дБ відповідає вхідному сигналу 0,775 В з підсилювача. Рівень сигналу при отриманні звукових сигналів з підсилювачів були значно вищими. Тому, для уникнення явища «кліппінгу» (обрізання) амплітуди сигналів, було застосовано програмне пониження коефіцієнта запису відповідно на 20 дБ, 30 дБ та 35 дБ.

3. Результати досліджень та обговорення

Для визначення характеристик сигналу та відслідковування змін параметрів сигналу в часі використаємо вейвлет-перетворення. За базову функцію виберемо симлет-вейвлет четвертого порядку (функція `sym4` в середовищі Matlab, рис. 1) [6]. Вейвлети сімейства симлетів є модифікованою версією вейвлетів Добеши з кращим показником симетрії.

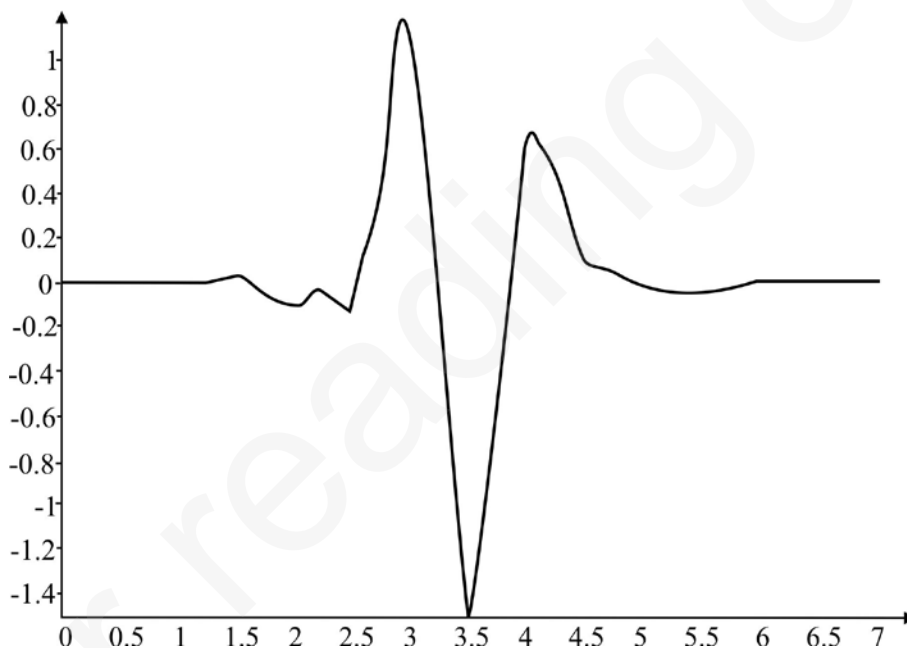


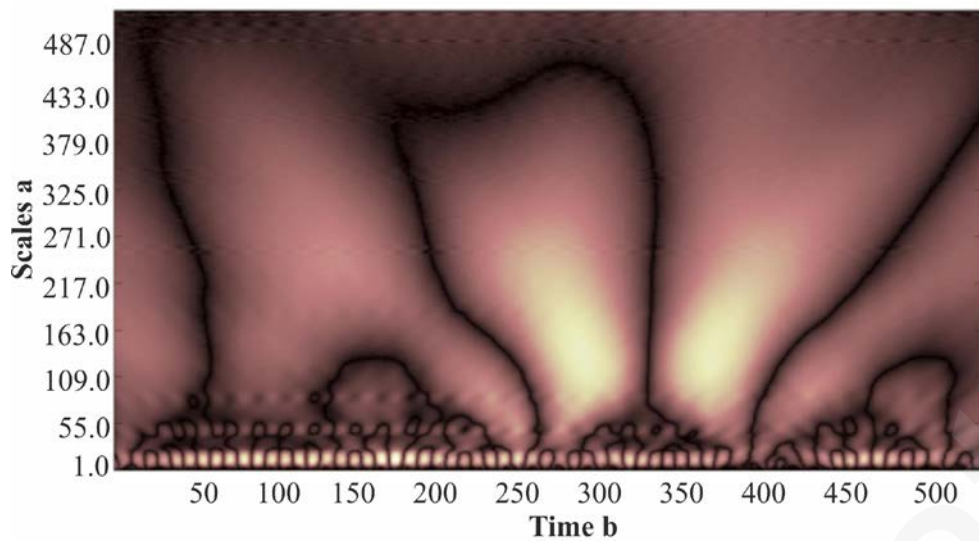
Рис. 1. Вейвлет-функція `sym4`

Дане сімейство вейвлетів застосовується в ряді задач, а саме: зменшенні рівня зашумленості сигналу, прогнозуванні [11] та обробці сигналів і зображень [12]. Першим етапом опрацювання була побудова спектрограм акустичного сигналу.

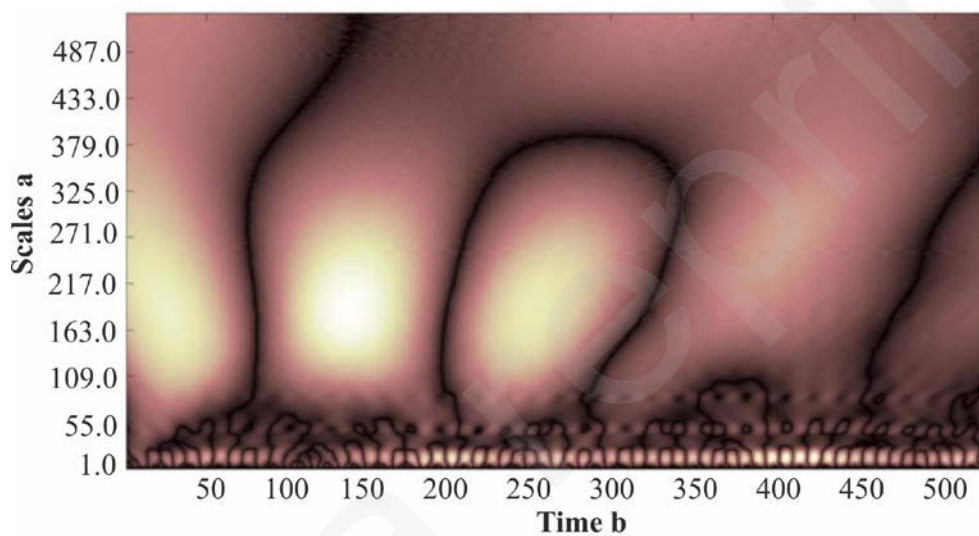
Послідовність операцій опрацювання наступна:

- завантаження даних в середовище Matlab;
- вибір масиву даних довжиною в 532 символи;
- побудова спектрограм з використанням симлет-вейвлета четвертого порядку;
- вивід спектрограми для кожного з наборів даних.

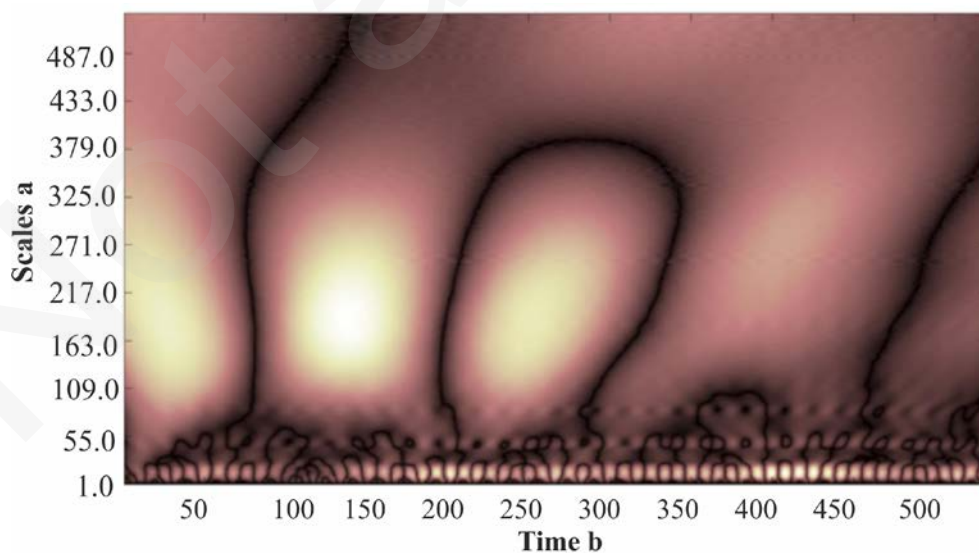
Результуючі спектрограми наведені на рис. 2.



a



б



в

Рис. 2. Спектрограми вибірки з записів акустичного сигналу: *a* – «дефектного», *б* – «номінального», *в* – «поточного» станів газоперекачувальних агрегатів № 3

Як видно з графіків на рис. 2, на малих масштабах (1–28 значень), вейвлет-

спектрограма наборів даних для «номінального» стану ГПА майже повністю зберігає періодичність. В той же час набір даних для «дефектного» стану має деякі відхилення в районі значень 370–530 по часовому відліку.

На масштабах 28–55 на спектрограмі рис. 2, а спостерігається відхилення від спектрограм на рис. 2, б, в. Оскільки в значеннях 200–500 зникає високочастотна складова, а спектрограма в цій області описується 5 піковими значеннями. В подальших масштабах видно, що в значеннях 200–350 в спектрограмах на рис. 2, б, в присутнє згладжене пікове підвищення. Тоді як на рис. 2, а в великих масштабах (400–480) дане підвищення має межі неправильної форми. Крім того, на великих масштабах (500 і вище) на спектрограмі рис. 2, а з'являється незначна періодична складова, тоді як на інших двох спектрограмах вона майже не виражена.

Аналізуючи отримані спектрограми, можна зробити висновок, що вони мають дуже багато подібностей. В той же час при їх дослідженні на малих та великих масштабах помітні різниці в виникненні або зникненні різних частотних складових в залежності від «поточного» стану.

Для отримання кількісних показників такої залежності проведемо дискретне вейвлет-перетворення. У випадку даного дослідження, ця операція дозволяє виділити характерні тренди в зміні значень шуму на різних масштабах. Це досягається за рахунок операції розкладу на компоненти вейвлет-перетворення (рис. 3).

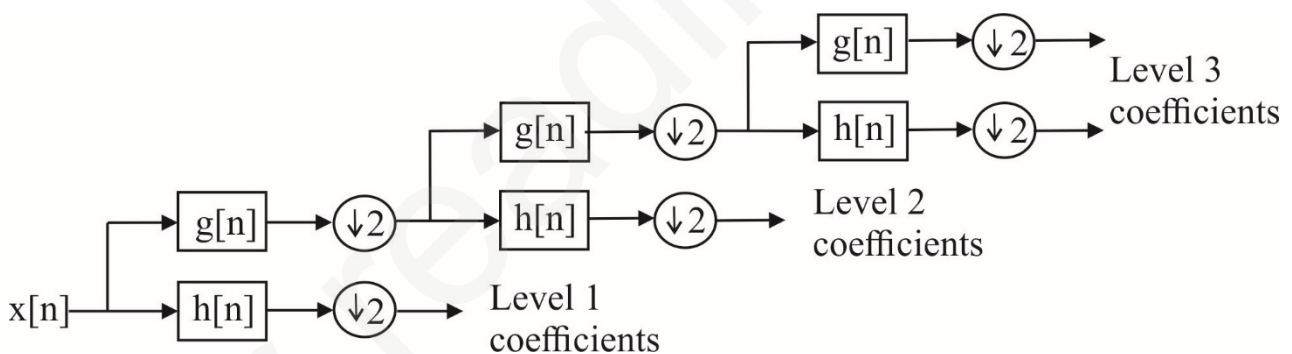


Рис. 3. Дерево (банк) вейвлет-розкладу

Типова картина вейвлет-розкладу сигналу за симлет-вейвлетом четвертого порядку за 5 компонентами подана на рис. 4.

Як видно з графіків на рис. 4, з відділенням кожної з компонент $d1-d5$ фільтрується високочастотна складова, при цьому залишковий сигнал $a5$ є по своїй суті аперіодичним. В табл. 1 наведено значення норми апроксимації та норм деталізації по відношенню до норми сигналу (у відсотках) для п'ятирівневого вейвлет-розкладу за описаними вище наборами даних. Характеристикою кожного з наборів даних виступало напрацювання ГПА після ремонту на годину.

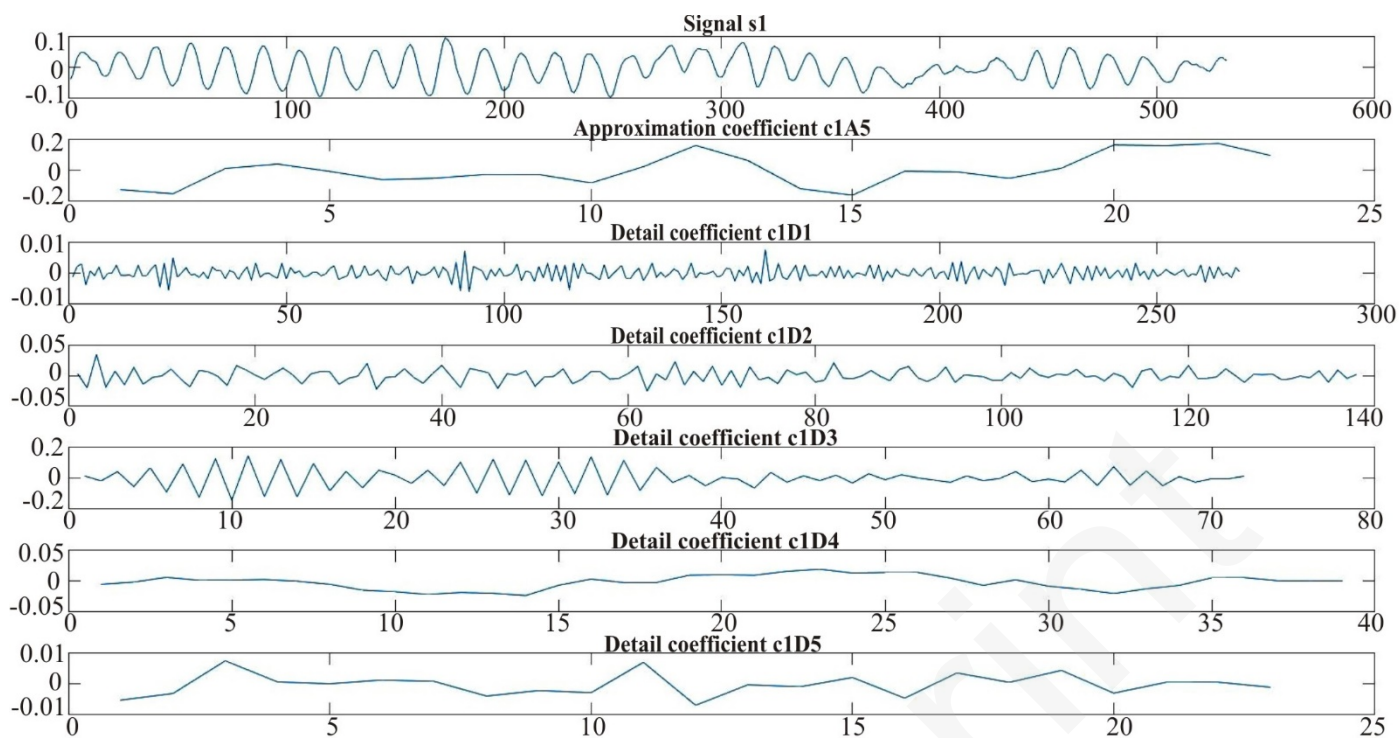


Рис. 4. Типова картина розкладу за симлет-вейвлетом четвертого порядку

Таблиця 1

Значення норми апроксимації та норм деталізації по відношенню до норми сигналу (у відсотках) для п'ятирівневого вейвлет-розкладу

Компонента розкладу/ від ношення норми компоненти до норми сигналу, %	«Номінальний» стан – 0 год. напрацювання	«Поточний» стан ГПА – 2500 год. напрацювання	«Дефектний» стан ГПА – 16000 год. напрацювання
S	3,3358	0,2376	0,9781
A7	37,4571	20,1177	30,6366
D1	3,0508	5,5549	3,3212
D2	18,5974	31,3913	12,0741
D3	56,9395	68,2173	60,435
D4	70,5102	61,9016	70,5607
D5	6,9896	7,6159	14,2671

Як видно з даних табл. 1, на 5-ій компоненті деталізації вейвлет-розкладу спостерігається зростання величини норми в залежності від напрацювання (технічного стану ГПА). Представимо отримані дані по D5P на графіку у вигляді точок (рис. 5).

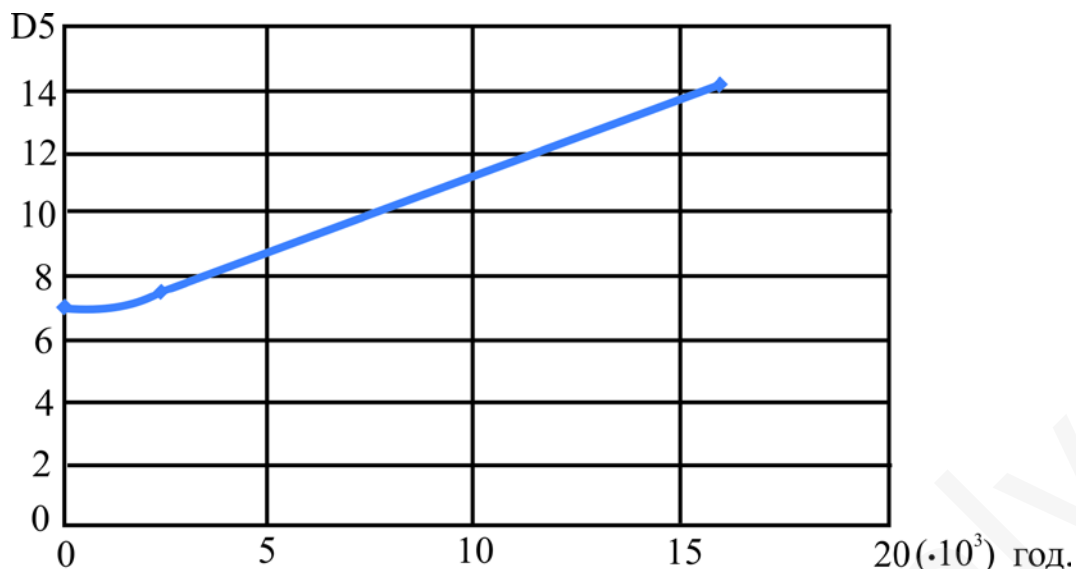


Рис. 5. Графік відношення норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку до часу напрацювання газоперекачувальних агрегатів

Як бачимо на рис. 5, спостерігається тенденція до лінійного зростання величини норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку відносно часу напрацювання. Проведемо апроксимацію отриманих даних (рис. 5):

$$D5=0.0005t+6.7414,$$

де t – напрацювання ГПА в годинах.

Достовірність апроксимації R^2 складає 0,9954, що є високим показником.

4. Висновки

Проведені експериментальні дослідження акустичних процесів, супроводжуваних роботою ГПА для трьох його станів – «номінального» «дефектного» та «поточного», які дозволили отримати вибірки даних для їх подальшої обробки. Проведена обробка отриманих експериментальних даних з використанням вейвлет-перетворення дозволила отримати діагностичну ознаку технічного стану ГПА ГТК-25і – 5-у компоненту деталізації вейвлет-розкладу акустичного сигналу, зміна якої від періоду експлуатації ГПА (зміни його технічного стану) описується лінійним рівнянням.

Досліджена діагностична ознака може бути покладена в основу методу діагностування технічного стану ГПА за характеристиками акустичного сигналу з використанням вейвлет-перетворення.

Розглянутий підхід виявлення діагностичної ознаки за характеристиками акустичних процесів з використанням вейвлет перетворення може бути використаний для будь-якого типу ГПА.

Література

1. Дремін, И. М., Иванов, О. В., Нечитайло, В. А. (2001). Вейвлеты и их использование. *Успехи физических наук*, 171 (5), 465–501.
2. Прыгунов, А. И. (2003). *Вейвлеты в вибрационной динамике машин*.

Available at: <http://www.vibration.ru/wavelet.shtml>

3. Юр, Т. В., Харитонов, В. М., Дубровін, В. І. (2013). Модель оцінки технічного стану вузлів ГТД за параметрами вібрації з використанням вейвлет-перетворення. *Авиационно-космическая техника и технологии*, 10 (107), 177–182.
4. Verma, N. K., Gupta, R., Sevakula, R. K., Salour, A. (2014). Signal transforms for feature extraction from vibration signal for air compressor monitoring. *TENCON 2014 – 2014 IEEE Region 10 Conference*. doi: <http://doi.org/10.1109/tencon.2014.7022275>
5. Yang, W. S., Su, Y. X., Chen, Y. P. (2019). Air compressor fault diagnosis based on lifting wavelet transform and probabilistic neural network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 657, 012053. doi: <http://doi.org/10.1088/1757-899x/657/1/012053>
6. Заміховський, Л. М., Іванюк, Н. І., Павлик, В. В. (2017). Використання вейвлет-перетворення для визначення технічного стану газоперекачувальних агрегатів. *Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання*. Івано-Франківськ, 132–133.
7. Грызлова, Т. П., Пиралишвили, Г. Ш., Шепель, В. Т. (2006). Методическое и программное обеспечение обработки нестационарных процессов на основании wavelet-анализа. *Вестник двигателестроения*, 3, 138–143.
8. Наконечний, А. Й., Лагун, І. І., Верес, З. Є., Наконечний, Р. А., Федак, В. І.; Наконечний, А. Й. (Ред.) (2020). *Теорія і практика обробки сигналів у малохвильовій (wavelet) області*. Львів: Растр-7, 470.
9. Замиховский, Л. М., Павлык, В. (2014). Исследование диагностических признаков технического состояния газоперекачивающих агрегатов ГТК – 25i фирмы Нуово-Пиньоне. *Молодой ученый*, 15 (74), 75–79.
10. Павлик, В. В. (2012). Напрямки підвищення ефективності експлуатації газоперекачувальних агрегатів в умовах Богородчанського ЛВУМГ. *Наукові вісті*, 2 (22), 44–49.
11. Swee, E. G. T., Elangovan, S. (1999). Applications of symlets for denoising and load forecasting. *Proceedings of the IEEE Signal Processing Workshop on Higher-Order Statistics. SPW-HOS '99*. doi: <http://doi.org/10.1109/host.1999.778717>
12. Bultheel, A., Huybrechs, D. (2014). *Wavelets with applications in signal and image processing*. Available at: <https://people.cs.kuleuven.be/~daan.huybrechs/teaching/wavelets2014.pdf>