

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОМПАЖНИХ ЯВИЩ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

Н. В. Ткачешак, М. І. Горбійчук

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15; тел. (0342) 504521,
e-mail: gorb@nimg.edu.ua, jameskent1993@gmail.com

Розроблено методику дослідження помпажних явищ газотурбінного двигуна (ГТД) на основі вейвлет-аналізу. Для проведення досліджень був обраний ГТД ДГ-90. Проведено вейвлет-розкладання сигналу тиску повітря за компресором високого тиску із застосуванням вейвлетів Добеші, Симлета, Койфлета та дискретного вейвлету Мейєра. Переваги і недоліки фільтруючих властивостей цих вейвлетів були графічно представлені у вигляді амплітудно-частотних характеристик. За отриманими результатами було побудовано схему вибору параметрів вейвлет-перетворення, що ґрунтується на аналізі амплітудно-частотних характеристик вейвлет-фільтрів, та розраховано оптимальний час дискретизації вейвлет-фільтрування досліджуваного сигналу для визначення помпажу та обертового зриву у турбокомпресорі ГТД. За даною схемою серед вейвлетів Добеші, Симлета, Койфлета і дискретного вейвлету Мейєра для дослідження сигналу тиску повітря за компресором упродовж зривних процесів першими були обрані вейвлети Добеші і Симлета 2-го порядку відповідно до їх швидкості фільтрації. Враховуючи високу швидкість та особливості опису виникнення помпажних явищ за допомогою швидкого перетворення Фур'є до розподілу вейвлет-коефіцієнтів сигналу тиску повітря за турбокомпресором, для діагностування явищ нестійкої течії, що виникають у газоповітряному тракті ГТД (помпажу та обертового зриву), був обраний вейвлет Добеші 2-го порядку. При цьому відслідковувати поведінку вейвлет-коефіцієнтів деталізації досліджуваного сигналу необхідно на 7-му рівні розкладання. Таким чином, отримані результати дозволяють проводити подальший аналіз зривних процесів за допомогою вейвлетів із низьким порядком.

Ключові слова: стійкість, газотурбінний двигун, помпаж, обертовий зрив, вейвлет-аналіз, вейвлет-фільтр, амплітудно-частотна характеристика.

Разработана методика исследования помпажных явлений газотурбинного двигателя (ГТД) по результатам вейвлет-анализа. Для проведения исследований был выбран ГТД ДГ-90. Проведено вейвлет-разложение сигнала давления воздуха за компрессором высокого давления с применением вейвлетов Добеша, Симлета, Койфлета и дискретного вейвлета Мейера. Преимущества и недостатки фильтрующих свойств этих вейвлетов были графически представлены в виде амплитудно-частотных характеристик. По полученным результатам построена схема выбора параметров вейвлет-преобразования, базирующаяся на анализе амплитудно-частотных характеристик вейвлет-фильтров, и рассчитано оптимальное время дискретизации вейвлет-фильтрации исследуемого сигнала для определения помпажа и вращающегося срыва в турбокомпрессоре ГТД. По данной схеме среди вейвлетов Добеша, Симлета, Койфлета и дискретного вейвлета Мейера для исследования сигнала давления воздуха за компрессором при срывных процессах первыми были выбраны вейвлеты Добеша и Симлета 2-го порядка в соответствии с их скоростью фильтрации. Учитывая высокую скорость и особенности описания возникновения помпажных явлений с помощью быстрого преобразования Фурье с распределением вейвлет-коэффициентов сигнала давления воздуха в турбокомпрессоре, для диагностирования явлений неустойчивого течения, возникающих в газоздушном тракте ГТД (помпажа и вращающегося срыва), был избран вейвлет Добеша 2-го порядка. При этом отслеживать поведение вейвлет-коэффициентов детализации исследуемого сигнала необходимо на 7-м уровне разложения. Таким образом, полученные результаты позволяют проводить дальнейший анализ срывных процессов с помощью вейвлетов низкого порядка.

Ключевые слова: устойчивость, газотурбинный двигатель, помпаж, вращающийся срыв, вейвлет-анализ, вейвлет-фильтр, амплитудно-частотная характеристика.

The method for research of a gas turbine engine (GTE) surging phenomena based on wavelet analysis was developed. GTE DG-90 was chosen for research. A wavelet decomposition of the air pressure signal was carried out using a high pressure compressor and Dobecki, Symlet, Coffle and Meyer's discrete wavelet. The advantages and disadvantages of filtering properties of these wavelets were graphically represented in the form of amplitude-frequency characteristics. Based on the results obtained, a wavelet transform parameter selection scheme based on the analysis of the frequency response of wavelet filters was constructed, and the optimum sampling time of the wavelet filtering of the investigated signal was calculated for determination of the propagation and rotational breakdown in the GTE turbocompressor. According to this scheme, among the wavelets of Dobecki, Simlet, Koeffleta, and Meyer's discrete wavelet, for studying the air pressure signal at the compressor during bursting processes, the first were selected by the Dobeckes and Symmetes wavelets of the 2nd order according to their filtration rate. Considering high speed and characteristics of the description of the occurrence of excite phenomena by means of a fast Fourier transform to the distribution of the wavelet coefficients of the air pressure signal by turbocompressor, for the diagnosis of unstable flows occurring in the gas path of the gas turbine trajectory (surging and rotary breakdown), the Dobecki wavelet was selected 2nd order. At the same time, to monitor the wavelet coefficients behavior, the detail of the investigated signal is necessary at the 7th level of decomposition.

Thus, the obtained results allow to carry out further analysis of breakdown processes using low-order wavelets.

Keywords: stability, gas turbine engine, surging, rotary breakdown, wavelet analysis, wavelet filter, amplitude-frequency characteristic.

Вступ. Однією із важливих проблем при експлуатації газоперекачувальних агрегатів (ГПА) природного газу є забезпечення їх безперебійної роботи. Трубопровідний транспорт природного газу є найбільш ефективним видом постачання палива і вуглеводневої сировини. Одним із основних елементів ГПА є газотурбінний двигун (ГТД), який слугує приводом відцентрового нагнітача (ВЦН). Як привод ВЦН природного газу найчастіше використовують тривальні ГТД. Основні проекти модернізації компресорних станцій (КС) реалізуються в Україні на ГПА власного виробництва із застосуванням конверсійних ГТД авіаційного та корабельного типів потужністю 6,3-25 МВт.

Нестійка робота ГТД негативно відбивається на стабільності роботи ВЦН, тому у процесі керування ГТД необхідно вчасно виявити несправності, щоб запобігти переходу ГТД в нескориговані режими роботи. Одним з таких завдань є раннє діагностування розвитку помпажу в турбокомпресорі ГТД для систем автоматичного керування газотурбінного двигуна.

При виникненні помпажних явищ відбувається різке падіння тиску повітря за компресором високого тиску (КВТ) і по всій довжині тракту ГТД, що повторюється при кожному імпульсі помпажних коливань. Оскільки помпаж може призвести не тільки до скорочення терміну служби роботи ГТД, але й до його поломки, необхідне розроблення ефективної системи захисту двигуна від помпажу та обертового зриву. Існуючі електронні системи керування двигуном дозволяють виявити деякі найнебезпечніші джерела газодинамічної нестійкості (ГДН) у роботі турбокомпресора і забезпечити автоматичне виведення ГТД з помпажу. Робота таких систем заснована на вимірюванні надлишкового тиску за останнім ступенем КВТ, на основі якого формується електричний сигнал, що послідовно порівнюється з попередньо заданими критеріями для помпажу та обертового зриву. Визначення діапазону можливих частот коливань необхідно для розроблення та налаштування засобів захисту газотурбінних двигунів під час виникнення помпажу та обертового зриву [1]. Спектральне відображення сигналів дає змогу виявляти приховані властивості фізичних процесів і, таким чином, запобігти повторній появі ймовірних небезпечних ситуацій.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Вирішенням проблем діагностування та контролю технічного стану конкретного елемента ГПА і забезпеченням стійкої роботи ГПА загалом займалось чимало провідних спеціалістів нафтогазової галузі. Аналізуючи останні публікації [2,3], бачимо, що існуючі розрахункові методи режимів роботи ГПА є недосконалими. Так, методика розрахунку режимів роботи компресорних агрегатів [2] ґрунтується на загальноприйнятих математичних співвідно-

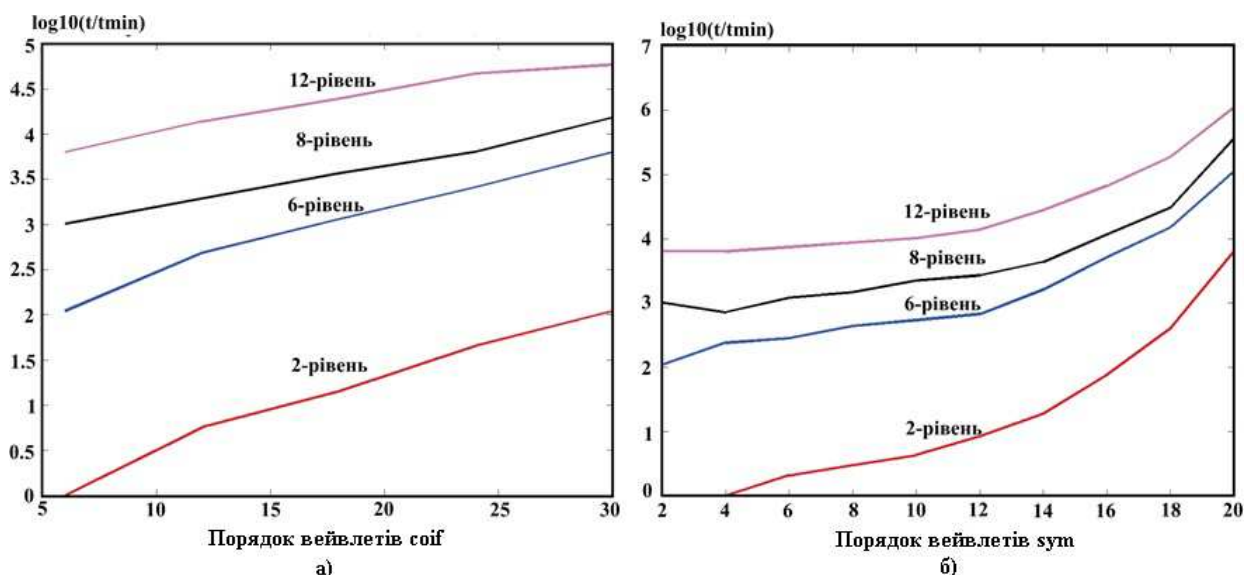
шеннях матеріальних та теплових балансів газових потоків і може застосовуватись для технологічних розрахунків компресорів, в тому числі із двокаскадними двигунами, але передбачає контроль температури та тиску в характерних точках газового тракту ГПА. В роботі [3] розглядається та досліджується статистична модель ГТД з метою створення діагностичних алгоритмів. Ця модель ґрунтується на аналітичних співвідношеннях, які описують термодинамічні процеси у двигуні, і передбачає повузловий розрахунок режимів роботи. Однак ця модель потребує уточнення за результатами стендових випробувань на реальних конверсійних ГТД, що є приводами ГПА.

Також накопичено значний світовий досвід застосування методів дослідження та діагностування помпажних явищ, що виникають під час керування ГТД, за методами спектрального діагностування, причому вагомий внесок здійснили Письменный І. Л. [1], Карасев В. А. [4], Дьяконов В. П. [5], Дрьомин І. М. [6] та інші.

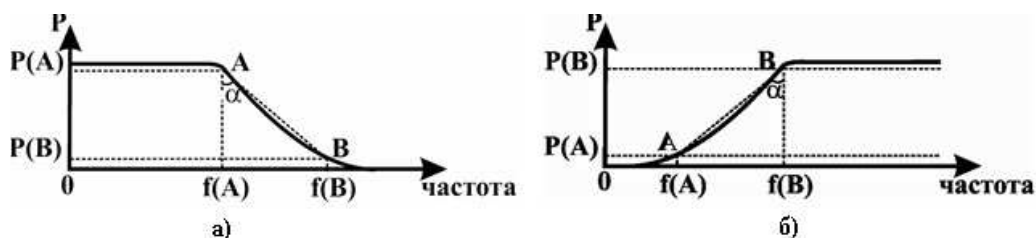
Одним із підходів до ранньої діагностики розвитку помпажу стало використання методу вейвлет-аналізу (ВА) для обробки часових і амплітудних характеристик сигналів вимірювальних систем, що визначають стійкість роботи турбокомпресора ГТД. Згідно з результатами, отриманими Дрьоминим І. М. [6], на певних масштабах статистичні моменти розподілу вейвлет-коефіцієнтів (ВК) сигналів від давачів тиску, розташованих у турбокомпресорі, помітно змінюються перед тим, як відбувається різка зміна режиму роботи ГТД, що часто призводить до його руйнування.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Газоперекачувальний агрегат є ключовим елементом всієї газотранспортної системи України. Стабільність всієї газотранспортної системи (ГТС) безпосередньо залежить від надійності і безпеки роботи газоперекачувального обладнання. В умовах старіння і зношування обладнання газотранспортної системи України одним із шляхів підвищення надійності експлуатації конкретного елемента ГПА і забезпеченням стійкої роботи ГПА загалом буде розроблення методів діагностування та контролю технічного стану ГПА на основі спектрального аналізу, що дасть змогу проводити індивідуальний контроль технічного стану конкретного елемента ГПА у широкому діапазоні частот та виявляти приховані властивості фізичних процесів і, таким чином, запобігати повторній появі ймовірних небезпечних ситуацій.

Постановка завдання. Актуальним завданням даної статті є розроблення нових і модифікація існуючих методів для запобігання виникненню помпажних явищ у турбокомпресорі ГТД.



а) – аналіз вейвлетів coif1-coif5; б) – аналіз вейвлетів sum1-sum10
Рисунок 1 – Залежність часу вейвлет-розкладання сигналу P_{KBT} від порядку вейвлета і рівня розкладання



а) – кут крутості зрізу для Фур'є-образів ВФ низьких частот (ФНЧ);
 б) – кут крутості зрізу для Фур'є-образів ВФ високих частот (ФВЧ);
 α – кут крутості смуги пропускання АЧХ;
 P – потужність частотних складових для Фур'є-образів вейвлетів

Рисунок 2 – Кут крутості зрізу АЧХ Фур'є-образів досліджуваних типів вейвлет-фільтрів

Метою даної статті є розробка методики дослідження помпажних явищ ГТД на основі ВА сигналу тиску повітря за компресором високого тиску.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Для дослідження помпажних явищ у турбокомпресорі ГТД був обраний ГТД ДГ-90 та вейвлети, дані про які зведено у табл. 1. Оскільки при виконанні вейвлет-перетворення (ВП) сигналу час обробки зростає за кількістю вейвлет-коефіцієнтів, то розглянуті вейвлети не перевищували 20-го порядку.

Таблиця 1 – Вейвлети, досліджувані у даній статті

Тип	Назва	Порядок
Ортогональні вейвлети із компактним носієм	Добеші (db)	db1-db20
	Симлет (sym)	sym1-sym10
	Койфлет (coif)	coif1-coif5
Нескінченні регулярні вейвлети	Дискретний вейвлет Мейера (Dmey)	Dmey

На рис. 1 наведено залежність логарифмованого часу виконання вейвлет-розкладання сигналу тиску повітря за КВТ (P_{KBT}) для вейвлетів Симлета (symN) та Койфлета (coifN) (відповідно N – порядок вейвлета). Дані залежності показують, що час обробки цього сигналу, за участю ВП, збільшується відповідно до порядку вейвлета і кожного наступного рівня розкладання.

Також відомо, що масштабні коефіцієнти діють у часі, змінюючи "ширину" вейвлетів і, відповідно, "середню" частоту Фур'є-образів. Таким чином, кожній частоті відповідає власна тривалість часового вікна аналізу і навпаки. Багатовимірне часове вікно ВП дозволяє однаково добре виявляти і низькочастотні, і високочастотні характеристики сигналів.

Аналіз фільтруючих властивостей цих вейвлетів свідчить про те, що порядок вейвлета (N) є еквівалентом характеристики зрізу смуги пропускання амплітудно-частотної характеристики (АЧХ). За допомогою визначення кута крутості α смуг пропускання вказаних фільтрів можливо порівняти якість оброблення сигналів досліджуваних вейвлетів (рис. 2).

Визначимо схему обчислення кута крутості α .

Для цього визначимо рівні зрізу фільтрів, відповідно до смуг пропускання $K_{СПР}$ і переходу $K_{СП}$ у дБ:

а) для ФНЧ:

$$\begin{aligned} P(1) - P(A) &\leq K_{СПР}; \\ P(1) - P(A+1) &> K_{СПР}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P(1) - P(B) &\leq K_{СП}; \\ P(1) - P(B+1) &> K_{СП}; \end{aligned} \quad (2)$$

б) для ФВЧ:

$$P\left(\frac{M}{2}\right) - P(B) \leq K_{СПР}; \quad (3)$$

$$P\left(\frac{M}{2}\right) - P(B-1) > K_{СПР};$$

$$P\left(\frac{M}{2}\right) - P(A) \leq K_{СП}; \quad (4)$$

$$P\left(\frac{M}{2}\right) - P(A-1) > K_{СП};$$

де M – загальна кількість точок Фур'є-образу вейвлет-фільтрів (ВФ);

$K_{СПР}, K_{СП}$ – відповідно встановлюють межі для смуг пропускання і переходу ВФ.

На рис. 2 точка А і точка В для ФНЧ відповідно границя смуг пропускання і переходу (рис. 2а), а для ФВЧ – початок смуг переходу і пропускання (рис. 2б).

В даній роботі, для набору ФНЧ і ФВЧ, кут α обчислювали за такою схемою:

а) визначали рівні $K_{СПР}$ і $K_{СП}$;

б) визначали положення точки А і точки В на АЧХ ВФ через пошук граничних точок, які задовольняли таким умовам:

- для ФНЧ:

$$\begin{aligned} |P_1 - P_k| &\leq K_{СПР}, |P_1 - P_{k+1}| > K_{СПР}, \\ k &\in \left[1; \frac{M}{2}\right], k = A; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} |P_1 - P_{k1}| &\leq K_{СП}, |P_1 - P_{k1+1}| > K_{СП}, \\ k1 &\in \left[1; \frac{M}{2}\right], k1 = B; \end{aligned} \quad (6)$$

- для ФВЧ:

$$\begin{aligned} \left|P_{\frac{M}{2}} - P_k\right| &\leq K_{СПР}, \left|P_{\frac{M}{2}} - P_{k-1}\right| > K_{СПР}, \\ k &\in \left[\frac{M}{2}; 1\right], k = B; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left|P_{\frac{M}{2}} - P_{k1}\right| &\leq K_{СП}, \left|P_{\frac{M}{2}} - P_{k1-1}\right| > K_{СП}, \\ k1 &\in \left[\frac{M}{2}; 1\right], k1 = A; \end{aligned} \quad (8)$$

в) для кожного з вейвлетів визначались максимальні значення потужностей частотних складових для ФНЧ (\max_H_i) і ФВЧ (\max_G_i) за наступними виразами:

$$\begin{aligned} \max_H_i &= \max\{ФНЧ_i\}, \\ \max_G_i &= \max\{ФВЧ_i\}; \end{aligned} \quad (9)$$

де i – номер вейвлета в наборі при $i \in [1; L]$;

L – загальна кількість вейвлетів у наборі;

г) серед усіх значень \max_H_i і \max_G_i визначались максимальні значення \max_H_0 і \max_G_0 ;

д) для кожного вейвлету обчислювалось процентне співвідношення модуля різниці $|P(A) - P(B)|$ відповідно до максимумів \max_H_0 та \max_G_0 за виразами:

$$\Delta P_H = \frac{|P(A) - P(B)|}{\max_H_0} \cdot 100\%, \quad (10)$$

$$\Delta P_G = \frac{|P(A) - P(B)|}{\max_G_0} \cdot 100\%;$$

де $\Delta P_H, \Delta P_G$ – процентне співвідношення різниці $|P(A) - P(B)|$ до максимумів потужностей ФНЧ і ФВЧ серед вейвлетів;

е) для кожного з вейвлетів обчислювалось процентне співвідношення модуля різниці $|f(A) - f(B)|$ відповідно до максимальної частоти \max_F за наступними виразами:

$$\Delta f_H = \frac{|f(A) - f(B)|}{\max_F} \cdot 100\%, \quad (11)$$

$$\Delta f_G = \frac{|f(A) - f(B)|}{\max_F} \cdot 100\%;$$

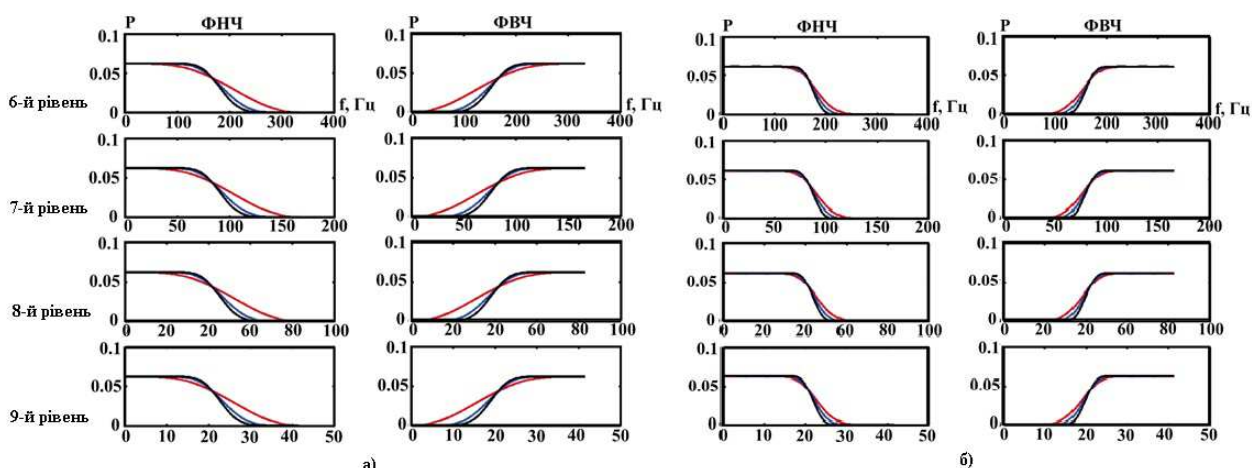
ж) кут α для ФНЧ і ФВЧ кожного вейвлета, обчислювався за виразами:

$$\alpha_H = \frac{180 \cdot \arctan\left(\frac{\Delta f_H}{\Delta P_H}\right)}{3.14}, \quad (12)$$

$$\alpha_G = \frac{180 \cdot \arctan\left(\frac{\Delta f_G}{\Delta P_G}\right)}{3.14}.$$

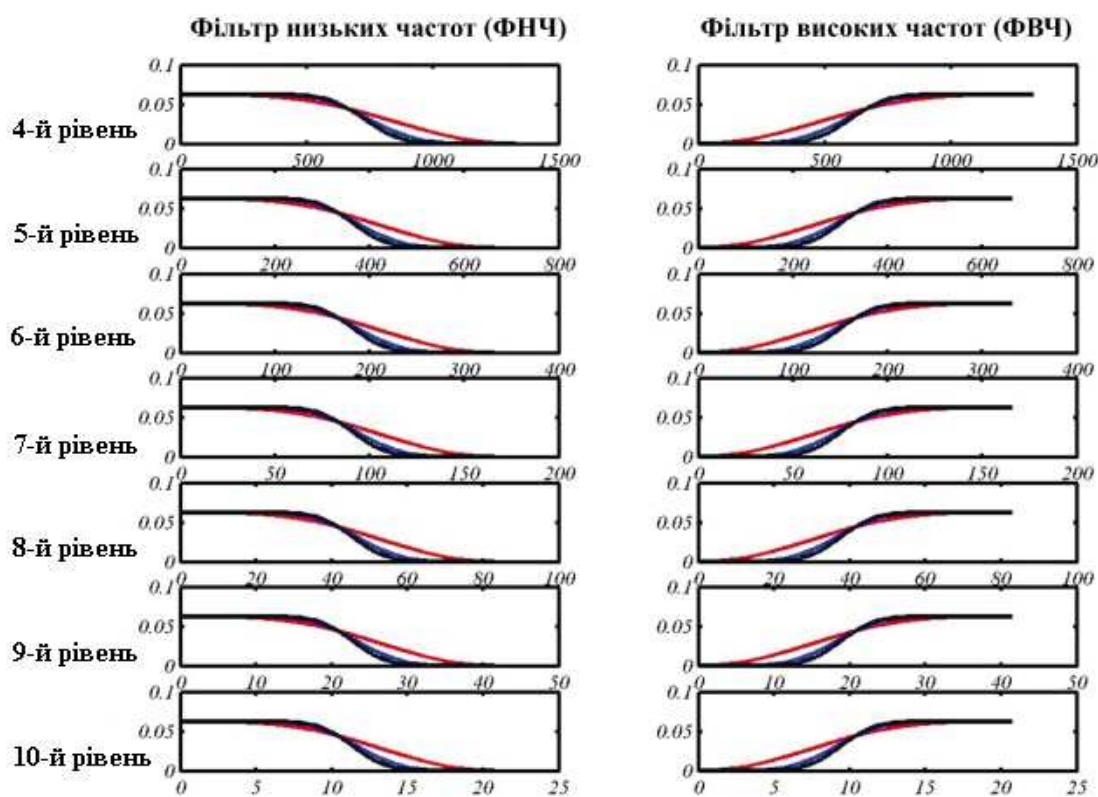
Отримані результати показали, що із збільшенням N крутість зрізу АЧХ вейвлетів збільшується (значення кутів на рис. 2 зменшуються) і відповідно покращується якість реконструкції сигналів.

На рис. 3 та рис. 4 зображені частотні діапазони зривних процесів, які відповідають 7-10-му рівням розкладання сигналу тиску повітря за компресором ($P_{КВТ}$) (при фіксованій ширині часового вікна $\Delta t = 0.000047c$).



а) – coif1 (червоний), coif3 (блакитний), coif5 (чорний колір);
 б) – coif5 (червоний), db20 (блакитний), dmeu (чорний колір)

Рисунок 3 – Фур’є-образи вейвлетів для 6-9-го рівня (час дискретизації $\Delta t = 0.000047c$)



db2 – червоний колір; db8 – блакитний колір; db10 – чорний колір

Рисунок 4 – АЧХ вейвлет-фільтрів Добеші для 4-10-го рівня (час дискретизації $\Delta t = 0.000047c$)

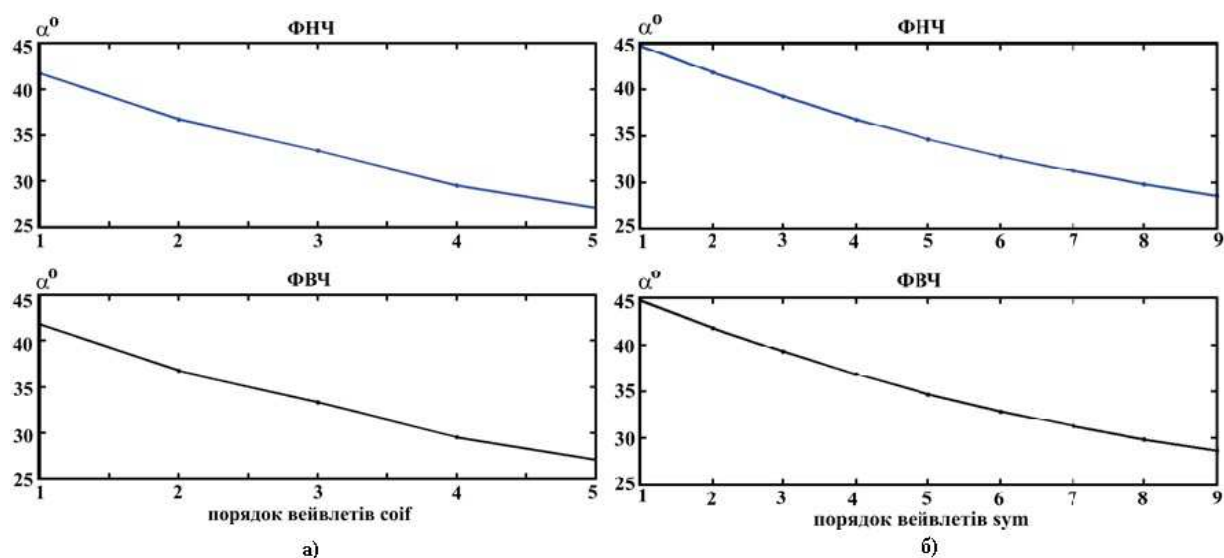
Розрахунки кута нахилу АЧХ смуги пропускання вейвлетів Койфлета та Симлета, наведених на рис. 5, підтверджують результати, отримані під час дослідження вейвлетів Добеші для 1-20-го порядків.

АЧХ вейвлетів Добеші (рис. 6) порівняно з вейвлетами Койфлета того ж порядку, має більш низьку крутість зрізу смуги пропускання та збігається із Фур’є-образом Симлета.

Дискретний вейвлет Мейєра має найоптимальнішу характеристику зрізу смуги пропускання у порівнянні із вейвлетами Добеші 20-го порядку та Койфлета 5-го порядку (рис. 3).

Отже, вибір параметрів ВП можна здійснювати за такою схемою:

- обчислити Фур’є-образи ВФ низьких та високих частот відповідно;
- визначити допустимі значення для нижньої та верхньої границі частоти зрізу АЧХ ВФ низьких і високих частот (у Гц);
- визначити рівні зрізу фільтрів, відповідно до смуг пропускання $K_{СПР}$, і переходу $K_{СП}$ (у дБ) або кут нахилу смуги пропускання АЧХ (або Фур’є-образів) ВФ;
- задати частотний діапазон або частоту досліджуваного сигналу;



а) – вейвлет-фільтри Кофлета до 5-го порядку; б) – вейвлет-фільтри Симлета до 10-го порядку

Рисунок 5 – Кут крутості АЧХ для вейвлет-фільтрів
($\Delta t = 0.000047c$, порядок 1-9, 7-й рівні розкладання)

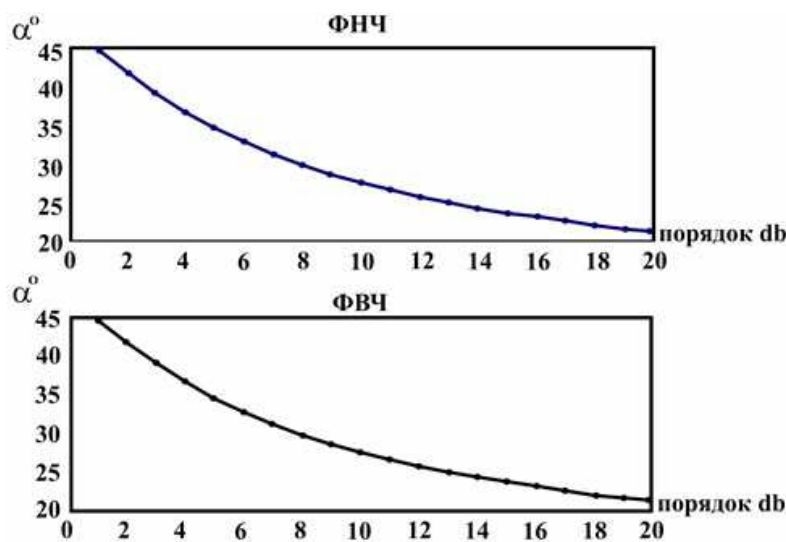


Рисунок 6 – Кут крутості АЧХ для вейвлетів Добеші

– за встановленим частотним інтервалом дослідження $[f_A; f_B]$ визначити припустимі рівні вейвлет-розкладання серед розглянутих ВФ;

– при визначених на попередньому етапі рівнях розкладання обрати вейвлети, що задовольняють встановленим вимогами щодо припустимих значень нижньої (для f_B) та верхньої границь (для f_A) частоти зрізу ВФ низьких і високих частот, а також значень коефіцієнтів $K_{СПР}$ і $K_{СП}$.

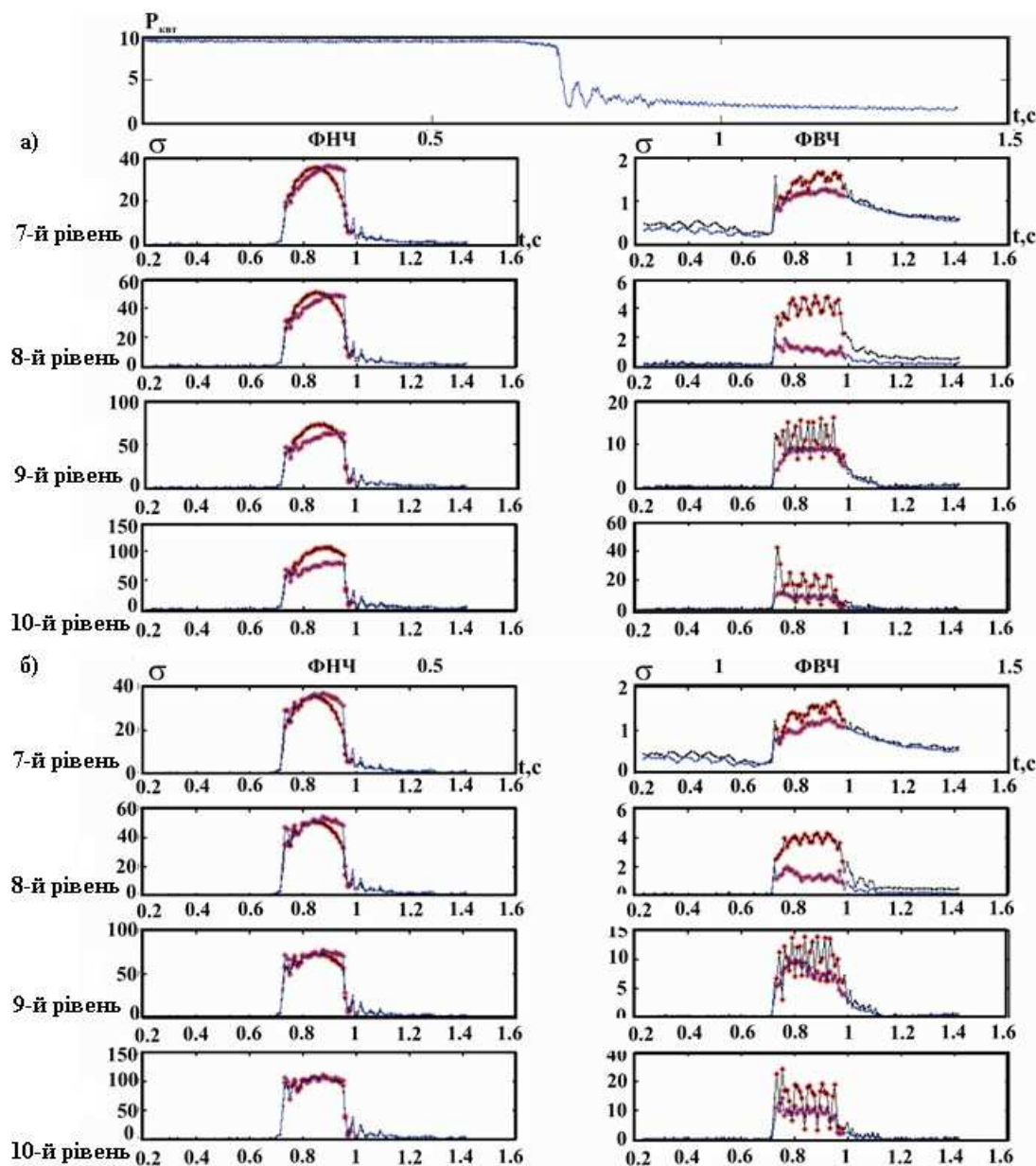
За даною схемою при дослідженні розвитку обертового зриву, (тобто при фільтрації близько 100 Гц, (табл. 2) [7] за сигналом тиску повітря за КВТ, шириною частотного вікна у 200 Гц та значеннях коефіцієнтів $K_{СПР} = -10$, $K_{СП} = -30$) першими були обрані вейвлети Добеші та Симлета 2-го порядку (відповідно до швидкості ВП).

Таблиця 2 - Характеристика джерел газодинамічної нестійкості (ГДН) у турбомашинах

Явище	Частота, Гц
Вихрове скидання	10^4
Хвильовий слід	10^4
Потенціальна польова взаємодія	10^4
Викривлення входу	$5 \cdot 10^3$
Обертовий зрив	10^2
Помпаж	10^1

При цьому для часу дискретизації $\Delta t = 0.000047c$ вейвлет-фільтрування досліджуваного сигналу необхідно проводити на 7-му рівні розкладання.

Аналіз АЧХ ВФ Добеші (за 2-м, 8-м, 10-м, 20-м порядками), Коїфлета (за 1-м, 3-м та 5-м порядками) та дискретного вейвлету Мейєра



а) – розподіл δ для ВК db2 (чорний колір), db20 (блакитний колір);
 б) – розподіл δ для ВК coif1 (чорний колір), coif5 (блакитний колір)

Рисунок 7 – Визначення помпажу за параметрами δ для ВК сигналу P_{KBT} (ширина часового вікна – 0.23 с; зсув – 0.0094 с)

(наведений на рис. 3-4) також доводить, що необхідним частотним діапазоном (коли $\Delta t = 0.000047c$) при дослідженні зривних процесів відповідають з 7-го по 10-й рівні розкладання.

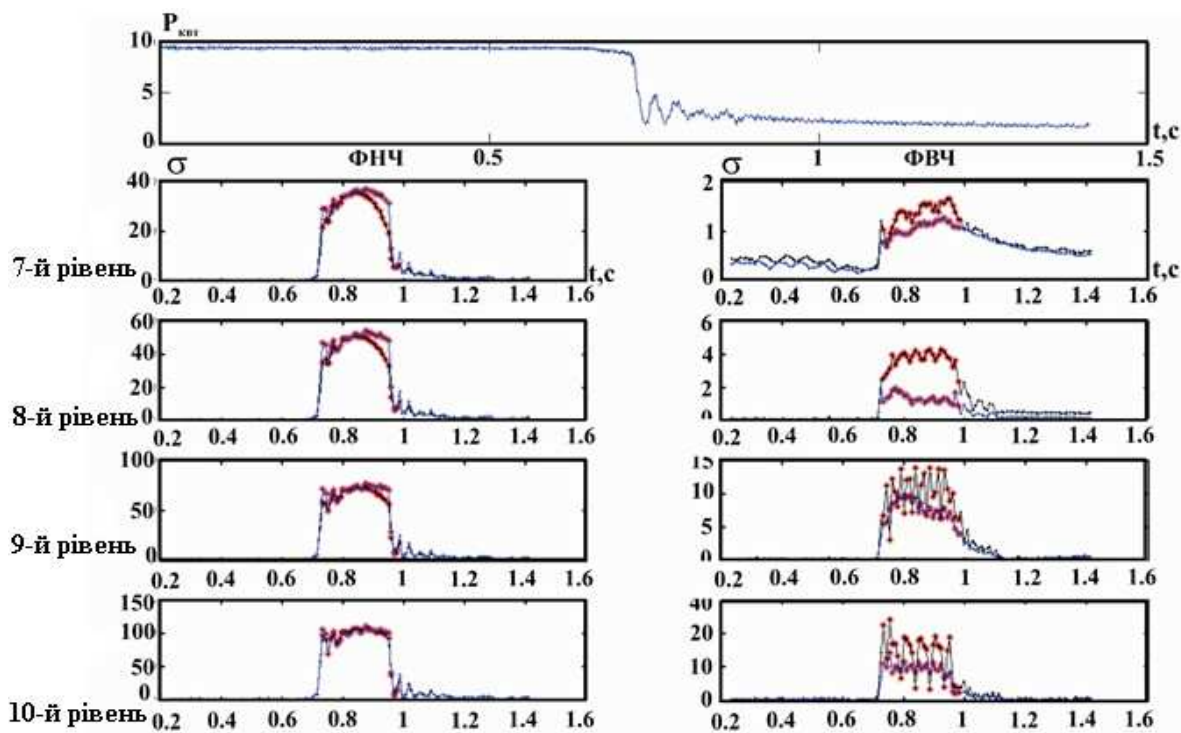
Вейвлет-фільтрація на певних масштабах дає можливість отримати сигнал із тим діапазоном частот, що є значущим відповідно до досліджуваних процесів.

На 7-10-му рівнях розкладання за допомогою стандартного відхилення (δ) було оцінено поведінку ВК деталізації сигналу тиску повітря за КВТ (P_{KBT}). Отримані результати показують (рис. 7-8), що значення параметру δ при виникненні помпажних явищ зростає і має більші значення для вейвлетів низьких порядків.

У результаті ШПФ частотне представлення розподілу ВК деталізації сигналу тиску повітря за компресором P_{KBT} вейвлетів першого та другого порядків (особливо вейвлетів Добеші та Симлета 2-го порядку) на 7-му рівні дозволяє демонструвати зростання потужностей у частотних областях, що є характерними для помпажу та обертового зриву (рис. 9).

Крім того, щоб унаочнити момент виникнення помпажу у турбокомпресорі ГТД, до коефіцієнтів апроксимації та деталізації ВП було застосовано швидке перетворення Фур'є (ШПФ).

На рис. 10 наведено частотні характеристики розподілу ВК деталізації сигналу P_{KBT} за участі вейвлету Добеші 20-го порядку.



soif1 – чорний колір; soif5 – блакитний колір

Рисунок 8 – Визначення помпажних явищ за допомогою середньоквадратичного відхилення δ для розподілу ВК сигналу P_{KBT} (ширина часового вікна – 0.23с; зсув – 0.0094с)

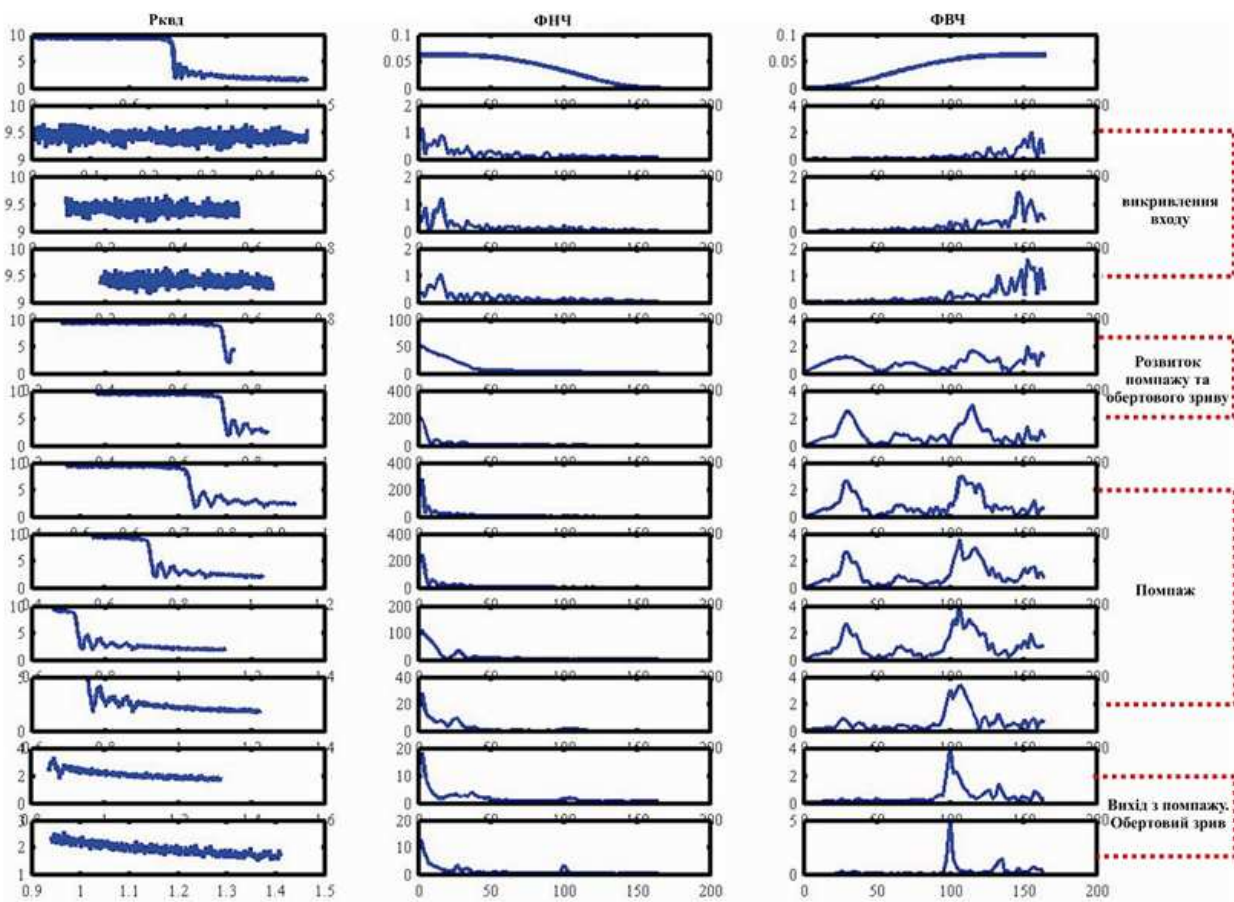


Рисунок 9 – Опис помпажних явищ через ШПФ за ВК ('db2') сигналом P_{KBT} на 7-му рівні розкладання

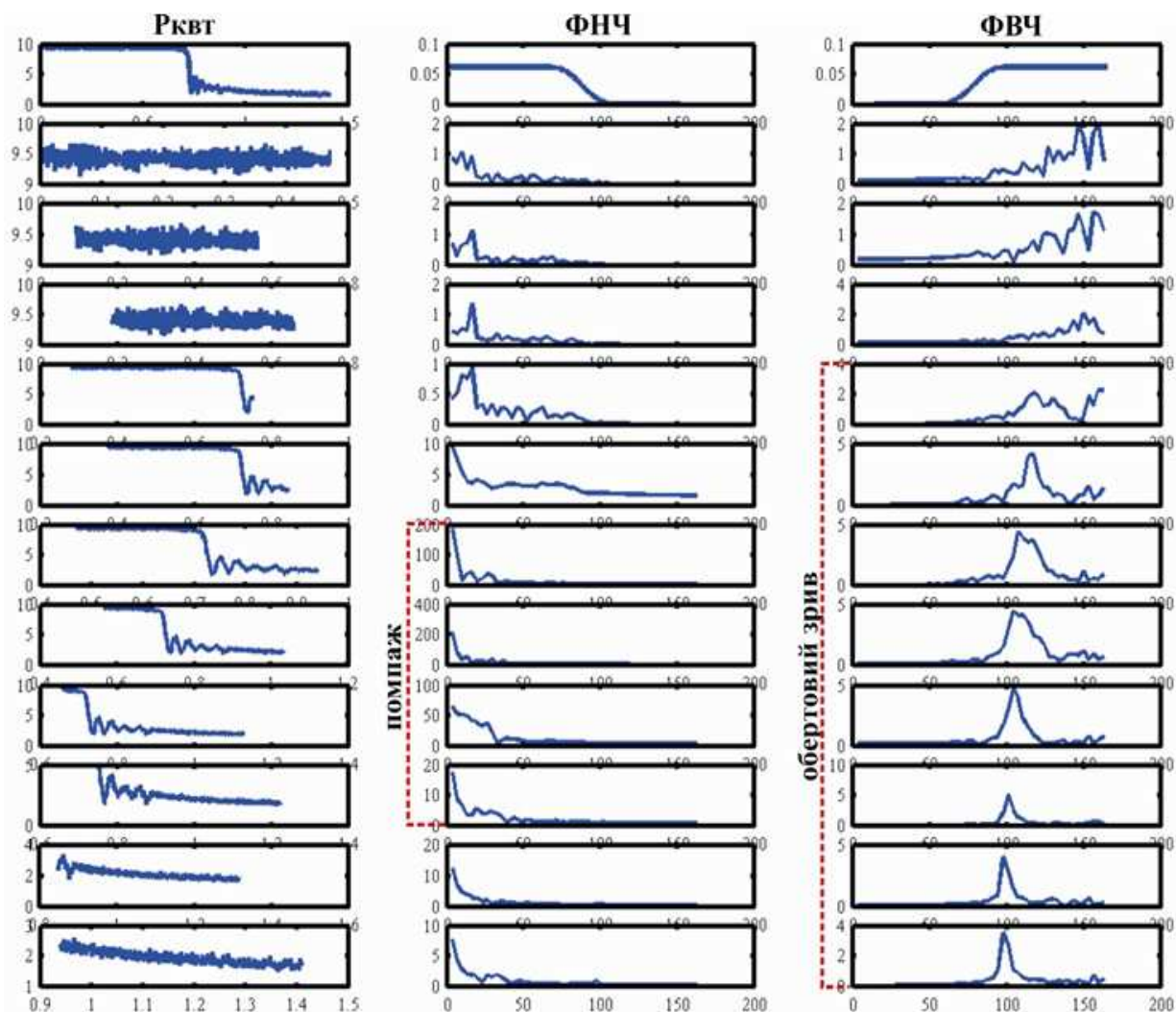


Рисунок 10 – Опис помпажних явищ через ШПФ за ВК ('db20') сигналом $R_{КВТ}$

Згідно з рис. 9-10 поступове збільшення порядку вейвлетів дає можливість спостерігати лише обертовий зрив, що відповідає частоті близько 100 Гц. Вказана особливість пояснюється АЧХ ФНЧ та ФВЧ розглянутих вейвлетів на 7-му рівні розкладання (рис. 3). За отриманими результатами можливо проаналізувати (дослідити) явища нестійкого плин у газоповітряному тракті ГТД (помпажу і обертового зриву) за допомогою вейвлетів із низьким порядком.

Враховуючи високу швидкість, вибірковість за частотою, особливості опису виникнення помпажних явищ за допомогою ШПФ для розподілу ВК сигналу тиску повітря за турбокомпресором для діагностування помпажу для подальших досліджень був обраний вейвлет Добеші 2-го порядку. При цьому для поточного часу дискретизації $\Delta t = 0.000047c$ відслідковувати поведінку ВК деталізації необхідно на 7-му рівні розкладання.

Дослідження помпажних явищ шляхом аналізу сигналу тиску повітря за компресором довело, що з наближенням до зони помпажу поступово збільшуються потужності частотних складових в областях 4-16 Гц (помпаж) і 20-100 Гц (обертовий зрив та помпаж).

За отриманими результатами побудовано схему вибору параметрів ВП, що ґрунтується на аналізі АЧХ ВФ.

Крім того, щоб відобразити процеси, які проходять у момент виникнення помпажу у турбокомпресорі ГТД, до коефіцієнтів апроксимації та деталізації ВП було застосовано швидке перетворення Фур'є. Найкраще представлення ВК сигналу тиску повітря за компресором було отримано за допомогою вейвлетів Добеші та Симлета 2-го порядку на 7-му рівні розкладання (при поточній ширині часового вікна $\Delta t = 0.000047c$), які дозволяють побачити зростання потужностей у частотних областях, характерних для помпажу та обертового зриву.

Поступове збільшення порядку вейвлетів дає можливість спостерігати тільки обертовий зрив в діапазоні частоти, близької до 100 Гц. Приведена особливість пояснюється характеристиками загасання ВФ поза смугою пропускання на 7-му рівні розкладання.

Таким чином, отримані результати дозволяють провести подальший аналіз зривних процесів у турбокомпресорі ГТД за допомогою вейвлетів із низьким порядком.

Висновки

Результати дослідження помпажних явищ шляхом аналізу сигналу тиску повітря за компресором свідчить про те, що з наближенням до зони помпажу поступово збільшуються потужності частотних складових в областях 4-16 Гц (помпаж) і 20-100 Гц (обертовий зрив та помпаж).

З метою вибору найбільш ефективного для відображення помпажного процесу вейвлету, що володіє високою швидкістю та вибірковістю за частотою, було досліджено вейвлети Добеші, Симлета, Койфлета та дискретний вейвлет Мейєра.

Аналіз фільтрувальних властивостей даних вейвлетів показав, що порядок вейвлета є еквівалентом характеристики загасання фільтра поза смугою пропускання.

Частотна характеристика вейвлетів Добеші у порівнянні із вейвлетами Койфлета того ж порядку, має більш низьку крутість зрізу смуги пропускання та збігається із Фур'є-образом Симлета. Дискретний вейвлет Мейєра має найкращу характеристику зрізу смуги пропускання у порівнянні із вейвлетами Добеші 20-го порядку та Койфлета 5-го порядку. Однак поряд із порядком вейвлету зростає час ВП досліджуваного сигналу.

Отримані результати дозволили сформувавши схему вибору параметрів ВП, що ґрунтується на аналізі АЧХ ВФ. За даною схемою серед вейвлетів Добеші, Симлета, Койфлета і дискретного вейвлету Мейєра для дослідження сигналу тиску повітря за компресором упродовж зривних процесів першими були обрані вейвлети Добеші і Симлета 2-го порядку відповідно до їх швидкості фільтрації.

Крім того, відображення процесу виникнення помпажу у турбокомпресорі ГТД до коефіцієнтів апроксимації та деталізації ВП було застосовано ШПФ. Найкраще відображення ВК сигналу тиску повітря за компресором було отримано за допомогою вейвлетів Добеші і Симлета 2-го порядку на 7-му рівні розкладання (при поточній ширині часового вікна $\Delta t = 0.000047c$), які дозволяють побачити зростання потужностей у частотних областях, характерних для помпажу та обертового зриву.

Поступове збільшення порядку вейвлетів дає можливість спостерігати тільки обертовий зрив в околі частоти 100 Гц. Ця особливість пояснюється загасанням ВФ поза смугою пропускання на 7-му рівні розкладання.

Враховуючи високу швидкість та особливості опису виникнення помпажних явищ за допомогою ШПФ до розподілу ВК сигналу тиску повітря за компресором, для діагностування явищ нестійкої течії, що виникають у газоповітряному тракті ГТД (помпажу та обертового зриву), був обраний вейвлет Добеші 2-го порядку. При цьому відслідковувати поведінку ВК деталізації досліджуваного сигналу необхідно на 7-му рівні розкладання (для часу дискретизації $\Delta t = 0.000047c$).

Таким чином, завданням подальших досліджень є проведення аналізу зривних процесів в турбокомпресорі ГТД за допомогою вейвлетів із низьким порядком на основі отриманих результатів даної статті.

Література

- 1 Письменный И. Л. Многочастотные нелинейные колебания в газотурбинном двигателе / И. Л. Письменный. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.
- 2 Компресорні станції. Контроль теплотехнічних та екологічних характеристик газоперекачувальних агрегатів: СОУ 60.03-30019801-011:2004. – Офіц. вид. – К.: ДК «Укртрансгаз», 2004. – 117 с.
- 3 Белов М. С. Термогазодинамическая диагностика трехвальных приводных газотурбинных двигателей: дисс. на соискание степени канд. техн. наук; спец. 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника / М. С. Белов. – Тюмень, 2010. – 128 с.
- 4 Карасев В. А. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей / В.А. Карасев, В. П. Максимов, М. К. Сидоренко. – М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.
- 5 Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
- 6 Дремин И. М. Вейвлеты и их использование / И. М. Дремин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло. // Успехи физических наук. – 2001. – №55. – С. 465–501.
- 7 Chiang J. T. MEMS Turbomachinery Rotordynamics: Modeling, Design and Testing: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy / J. T. Chiang. – Massachusetts Institute of Technology, 2006. – 350 p.

Стаття надійшла до редакційної колегії
27.11.18

Рекомендована до друку
професором **Костишиним В.С.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Мещеряковим Л.І.**
(Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка», м. Дніпро)