



УДК 681.5.015.87

DIAGNOSTICS OF THE GAS-TURBINE ENGINE ON THE FOUNDATION OF THE FOURY TRANSFORMATION**ДІАГНОСТИКА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є**

Tkacheshak N. V. / Ткачешак Н. В.

Doctoral Student / Аспірант

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

15 Carpathian St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

Анотація. Трубопровідний транспорт природного газу є найефективнішим видом постачання палива і вуглеводневої сировини для промислових споживачів, як в Україні, так і за кордоном. Однією із основних проблем при експлуатації газоперекачувальних агрегатів (ГПА) природного газу є забезпечення стійкої їх роботи. В даній статті проведено дослідження обертового зриву та помпажу газотурбінного двигуна (ГТД) на основі аналізу сигналу тиску повітря за компресором з використанням методу перетворення Фур'є.

Ключові слова: помпаж, обертовий зрив, газотурбінний двигун, турбокомпресор, перетворення Фур'є, спектральний аналіз, обробка сигналу.

Вступ. Вирішенням проблем діагностики та контролю технічного стану конкретного об'єкта ГПА і, тим самим, забезпеченням стійкої роботи ГПА займалось чимало провідних спеціалістів нафтогазової галузі. Накопичено значний світовий досвід з використання методів діагностики обертового зриву і помпажу на основі методів спектральної діагностики, причому вагомий внесок здійснили І. Л. Письменный, С. Малла, В. А. Карасев, А. Б. Шитов та інші. Визначення діапазону можливих частот коливань необхідно для розробки й налаштування засобів захисту газотурбінних двигунів підчас виникнення помпажу та обертового зриву [1]. Спектральне представлення сигналів надає можливість виявляти приховані властивості фізичних процесів і, таким чином, запобігти повторній появі ймовірних небезпечних ситуацій.

Виклад основного матеріалу. У загальному випадку довільний сигнал $s(t)$ можливо представити у вигляді зваженої суми простих складових – базисних функцій $\psi_k(t)$ помножених на коефіцієнти C_k [2]:

$$s(t) = \sum_k C_k \psi_k(t), \quad (1)$$

де k – порядковий номер коефіцієнтів.

Звичайно $\psi_k(t)$ – є функціями визначеного виду, а коефіцієнти C_k містять інформацію стосовно конкретного сигналу.

Для дослідження стаціонарних сигналів з постійною по часу потужністю випадкових періодичних компонент традиційно застосовується перетворення Фур'є (ПФ) – метод обчислення коефіцієнтів тригонометричного ряду. При цьому ПФ забезпечує можливість представлення довільних функцій та сигналів за допомогою набору синусоїд із кратними частотами (гармоніками).

Отже, ПФ розкладає довільний процес на елементарні гармонійні



коливання з різними частотами, а всі необхідні властивості й формули виражаються за допомогою однієї базисної функції $\exp(j\Delta\omega t)$ або двох дійсних функцій $\sin(\Delta\omega t)$ і $\cos(\Delta\omega t)$, де $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}$ (T – період коливань). При відомих вираженнях базисних функцій досліджуваний сигнал $s(t)$ однозначно визначається сукупністю коефіцієнтів C_k і може бути абсолютно точно відновлений (реконструйований) по цих коефіцієнтах [2]:

$$s(t) \sim \sum_k C_k \exp(itk), \quad (2)$$

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-itk) dt, \quad (3)$$

де $k \in (-\infty; +\infty)$.

Відповідно рівняння (1-2) є зворотним і прямим ПФ сигналу $s(t)$.

Таким чином, будь-яка функція з гільбертового простору може бути представлена у вигляді комплексного ряду Фур'є (2) через спектральне представленням сигналу або його Фур'є-образ.

Більш доцільно використовувати методику віконного ПФ. При цьому повний часовий інтервал сигналу розділяється на вікна, і перетворення Фур'є виконується послідовно для кожного вікна окремо. Тим самим здійснюється перехід до частотно-часового представлення сигналів, що дозволяє виділяти та аналізувати особливості нестационарних сигналів на координатній осі. Розмір носія віконної функції $w(t)$ звичайно встановлюється порівнянним із інтервалом стаціонарності сигналу.

Віконне ПФ виконується відповідно до виразу:

$$C(\omega, b_k) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \omega(t - b_k) \exp(-itk) dt, \quad (4)$$

де $\omega(t - b_k)$ – є функцією вікна зсуву ПФ по координаті t ;

b – параметр, через який задаються фіксовані значення зсуву (при зсуві вікон із рівномірним кроком $b_k = k\Delta b$);

k – порядковий номер зсуву вікна w .

Для дослідження сигналів також може бути застосоване ПФ з використанням прямокутного вікна ($w(t)=1$ у межах вікна і $w(t)=0$ за його границями), або спеціального вагового вікна (Бартлета, Гауса, Кайзера та ін.), що забезпечить невеликі викривлення спектру за рахунок граничних умов обмеженості віконних відрізків сигналів. Для кожного положення вікна на часовій осі сигналу обчислюється свій комплексний спектр.

Ефективна ширина віконної функції, як правило, зберігається постійною по усім інтервалам сигналу [3]. Через наявність широкосмугового шуму, що потрапляє до смуги пропускання, оцінка амплітуди спектру на заданій частоті виявляється зсунутою. Мінімізувати накопичений шум можливо за допомогою вузькосмугового вікна. Зручною мірою ширини смуги пропускання вікна є еквівалентна шумова смуга (ЕШС) – ширина смуги пропускання прямокутного фільтру з тим самим максимальним посиленням по потужності, який накопичує



ту ж саму потужність, як і це вікно [3].

Обчислення ЕШС проводиться за виразом:

$$EШС = \frac{\sum_n w^2(nT)}{[\sum_n w(nT)]^2}, \quad (5)$$

де $w(nT)$ – дискретні значення вагової функції.

T – часовий інтервал спостереження.

У випадку застосування вагових вікон для постійного сигналу у відсутність шуму спектральна складова буде пропорціональна вхідній амплітуді. Зменшення коефіцієнту пропорційності для того або іншого вікна відносно прямокутного характеризує похибку (зсув) оцінок спектральних складових. Посилення перетворення визначається як частка від ділення відношень $\frac{\text{Сигнал}}{\text{Шум}}$ на виході і на вході і є величиною, зворотною до нормованої ЕШС вікна. Таким чином, збільшення ЕШС веде до зменшення посилення перетворення (ПП) [3].

Для того, щоб уникнути втрат даних поблизу границь інтервалу (у випадку, коли ШПФ впливає на зважувані дані), перетворенню звичайно піддають ті ділянки послідовності, що перекриваються. Ступінь перекриття звичайно обирається 50% або 75%. У табл. 1 вказані значення коефіцієнтів кореляції для кожного вікна, яке реалізоване у пакеті WinПОС при заданому віконному перекритті.

Таблица 1

Значення коефіцієнтів кореляції для вікон

Вікно	Коефіцієнти кореляції, %	
	75	50
Прямокутне	75.0	50.0
Блекмана-Херіса	46.0	3.8
Ханінга	65.9	16.7
Трикутне	71.9	25

Авторська розробка

При усередненні вимірювань випадкової величини дисперсія середнього $\delta_{\text{серед}}^2$ пов'язана із дисперсією індивідуальних вимірювань $\delta_{\text{вимір}}^2$ наступним співвідношенням:

$$\frac{\delta_{\text{серед}}^2}{\delta_{\text{вимір}}^2} = \frac{1}{K}, \quad (6)$$

де K – кількість вимірювань.

Відповідно до (6), якщо корельовані вимірювання усереднюються, то отримаємо наступні вирази:

а) для 50%-го перекриття: $\frac{\delta_{\text{серед}}^2}{\delta_{\text{вимір}}^2} = \frac{1}{K} (1 + 2c^2(0,5)) - \frac{2}{K^2} [c^2(0,5)],$



б) для 75%-го перекриття:

$$\frac{\delta^2_{\text{серед}}}{\delta^2_{\text{вимір}}} = \frac{1}{K} (1 + 2c^2(0,75) + 2c^2(0,5) + 2c^2(0,25)) - \frac{2}{K^2} [c^2(0,75) + c^2(0,5) + 3c^2(0,25)],$$

де $c^2(0,75), c^2(0,5), c^2(0,25)$ – відповідно коефіцієнти кореляції для 75%, 50%, 25%-го перекриття.

Від'ємні члени описують крайові ефекти усереднення, при $K \geq 10$ і їх можна не враховувати.

Таким чином, вікно поводить себе як фільтр, на виході якого потужність сигналу пропорційна потужності гармонік вхідного сигналу в смузі пропускання (рис. 1). Вікна впливають на багато показників гармонійного аналізу, в тому числі на результативність, деталізованість, динамічний діапазон, ступінь достовірності і легкість реалізації обчислювальних операцій.

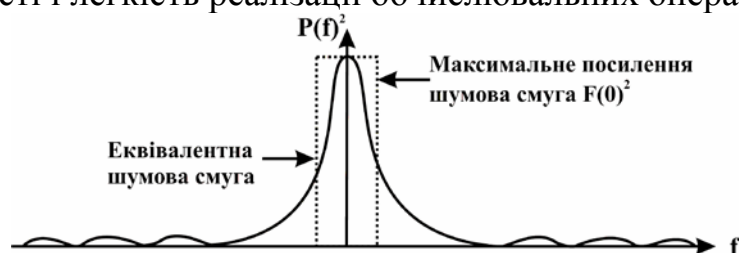


Рис. 1. Еквівалентна шумова смуга: $P(f)^2$ – потужність амплітудно-частотної характеристики фільтра; f – частотні складові

На практиці звичайно здійснюють аналіз сигналів із використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), який реалізує дискретне обчислення ПФ.

Основним діапазоном частот при аналізі є інтервал від 0 Гц до частоти Найквіста, і не залежить від кількості дискретних значень (N), що утворюють реалізацію аналізованого сигналу. Частота Найквіста f_N пов'язана із частотою вибірки f_s через співвідношення $f_N = \frac{f_s}{2}$ [3]. Кількість спектральних ліній в основному частотному діапазоні пов'язана із кількістю дискретних значень N і звичайно дорівнює $\frac{N}{2}$ в діапазоні у відповідності із частотою f_N .

Частота, що відповідає i -й спектральній складовій дорівнює:

$$f_i = i \left(\frac{f_s}{N} \right), \quad (7)$$

де f_s - частота опитування.

Частота дискретизації (Δf) – або інтервал поміж двома суміжними спектральними лініями, визначається через наступні співвідношення:

$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(N\Delta t)} = \frac{f_s}{N}, \quad (8)$$

де T – довжина реалізації аналізованого сигналу, що піддається перетворенню;



Δt – крок дискретизації.

Ширина частотної смуги (B) при аналізі звичайно більша за частоту дискретизації і визначається за формулою:

$$B = \Delta f \cdot K_{ЕШП}, \quad (9)$$

де $K_{ЕШП}$ – коефіцієнт пов'язаний із ваговою функцією.

Для зменшення розмивання спектральних компонент при ШПФ також використовують вікна або вагові функції. При цьому вплив вікна на масив даних складається із зменшення порядку розривів на границі періодичного положення за рахунок ефекту згладжування.

Таким чином, для дослідження частотних складових сигналу тиску повітря за компресором необхідно виконати ШПФ даного сигналу із застосуванням вагової функції.

При настроюванні параметрів реєстрації вихідної інформації враховувалися дані газодинамічної нестійкості (ГДН) у турбомашин, наведені в табл. 2 [1].

Результати обробки сигналу $P_{КВТ}$ (рис. 2) за допомогою дискретного ПФ (із використанням алгоритму ШПФ та прямокутного вікна) наведені на рис. 3-4. Для проведення даного дослідження був використаний логарифмічний датчик типу ДОЛ-32.

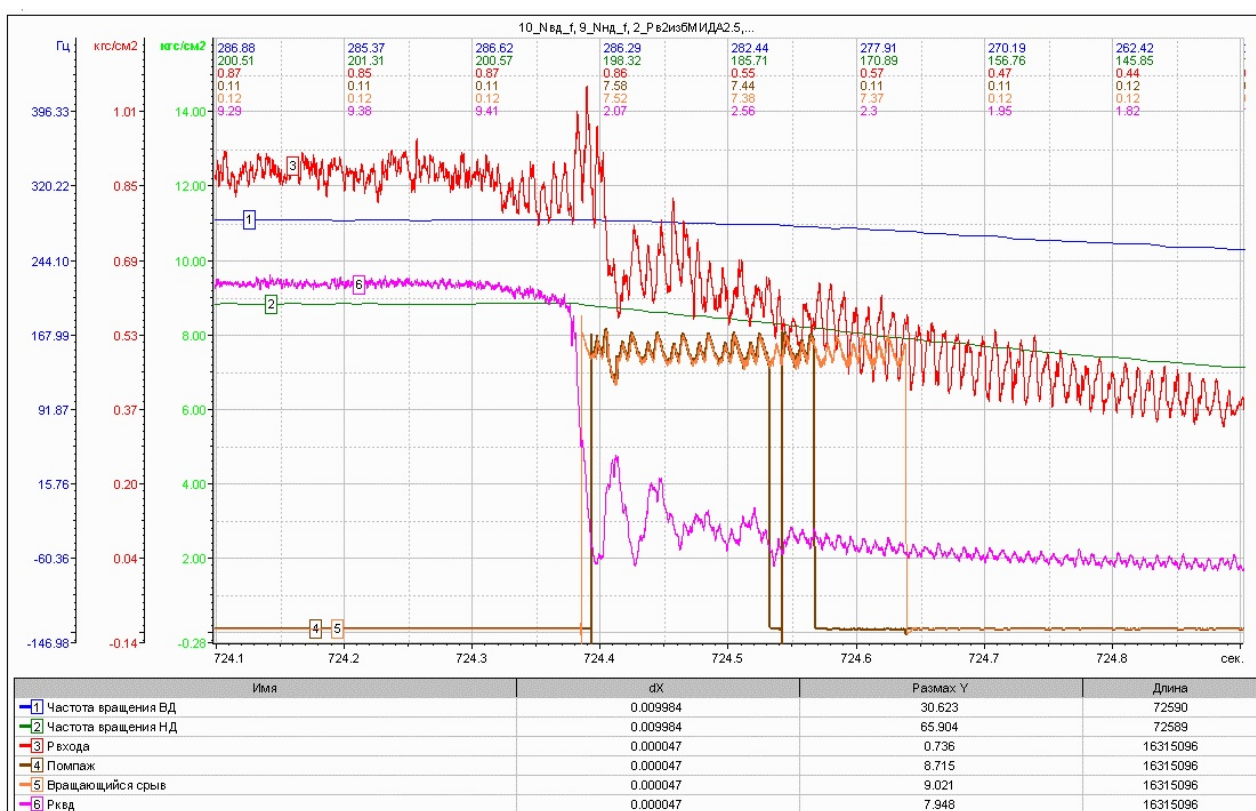


Рис. 2. Зміна параметрів при спрацьовуванні системи захисту ГТД від помпажу в ПАК “WinПОС”

Авторська розробка

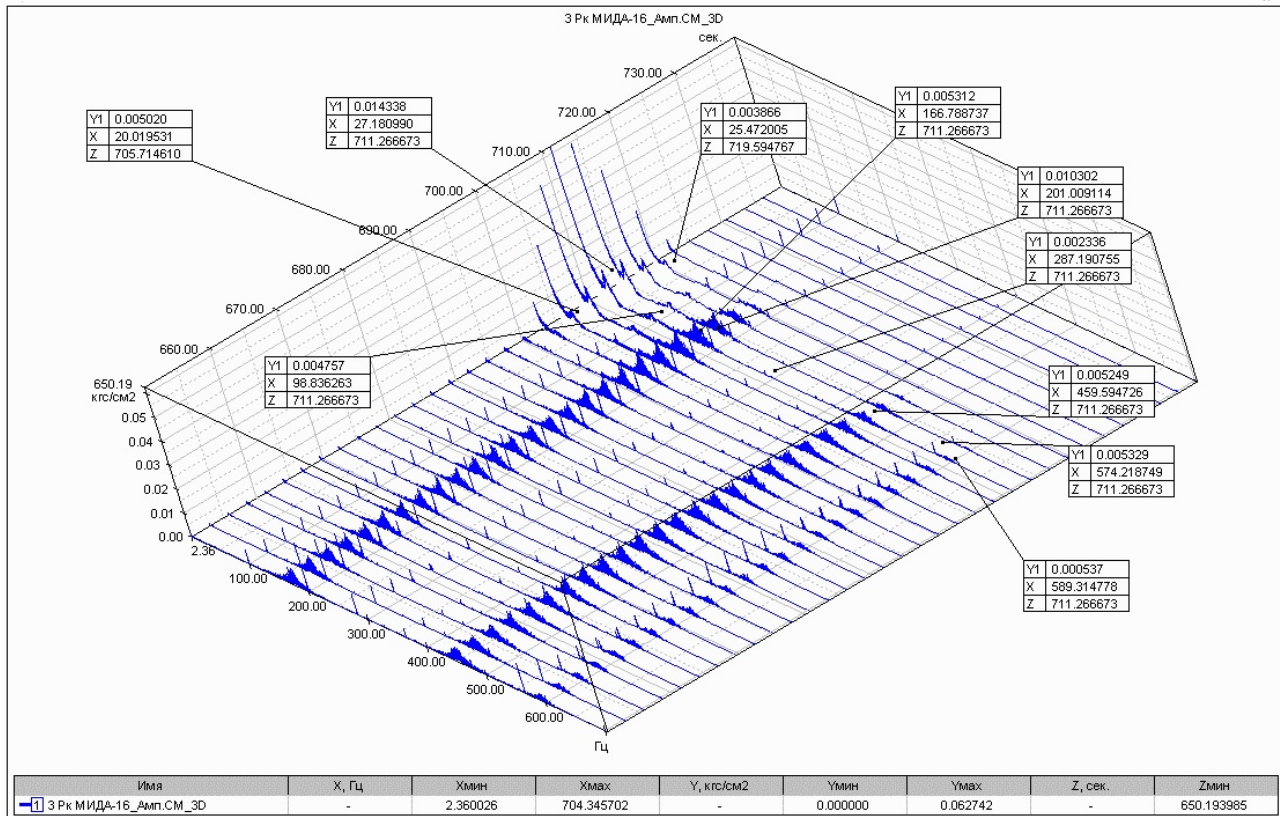


Рис. 3. Фрагмент 3D спектру сигналу $P_{КВТ}$ при відпрацюванні системи антипомпажного захисту ГТД

Авторська розробка

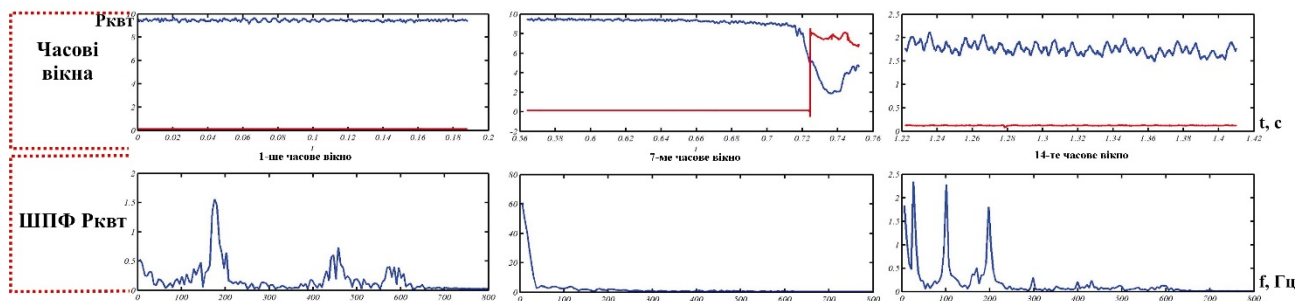


Рис. 4. Змінення сигналу $P_{КВТ}$ і його частотного представлення за допомогою ШПФ в 1-му, 7-му, 14-му часових вікнах: ширина часового вікна – 0.18 с; зсув часового вікна – 0.094 с; сигнал від датчика ДОЛ-32 про помпаж – червоний колір; сигнал $P_{КВТ}$ – синій колір

Авторська розробка

У кожному часовому вікні w із зсувом b (4) дискретне ПФ виконується згідно із виразом [5]:

$$C_j = \sum_{k=1}^N X_{k,w,b} \exp\left(\frac{2\pi i(j-1)(k-1)}{N}\right), \quad (10)$$

де C_j – j -й коефіцієнт, який повертає функція дискретного перетворення Фур'є вектора $X_{w,b}$, що обчислюється за допомогою алгоритму ШПФ;

$X_{k,w,b}$ – k -й елемент досліджуваного вектору X у часовому вікні w із



зсувом b ;

N – кількість елементів вектору X у часовому вікні w ;

i – мніма одиниця; j – номер гармоніки від 0 до $\pi/2$.

Таблиця 2

Характеристика джерел ГДН у турбомашинах [4]

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

Джерело [4]

Таким чином, кількість обчислювальних операцій становить N^2 комплексних множень та складань. Алгоритм ШПФ зменшує чисельну складність до величини $O(N \log_2 N)$ шляхом реорганізації обчислень за наступними виразами, коли індекс j – парний та $j+1$ – для непарного значення [5]:

$$C_{2j} = \sum_{k=0}^{N/2-1} (X_{k,w,b} + X_{k+\frac{N}{2},w,b}) \exp\left(\frac{-2\pi ijk}{N}\right), \quad (11)$$

$$C_{2j+1} = \sum_{k=0}^{N/2-1} e^{\frac{-2\pi ijk}{N}} (X_{k,w,b} - X_{k+\frac{N}{2},w,b}) \exp\left(\frac{-2\pi ijk}{N}\right). \quad (12)$$

Виходячи з обраних параметрів для ШПФ (ширини тимчасового вікна та зсуву) початок помпажних явищ було зафіксовано в 7-му часовому вікні (рис. 4). При наближенні до даного часового вікна спостерігається поступове збільшення потужностей частотних складових в областях відповідних 4-16 Гц (помпаж) і 20-100 Гц (помпаж і обертвий зрив) (рис. 5-6, відповідно).

Внесок частотних складових, що відповідають помпажу (4-16 Гц) (рис. 5), визначався за наступним виразом:

$$\text{Внесок} = \frac{\max(P_{i,4-16}) \times 100\%}{\max(P_i)}, \quad (13)$$

де i – номер часового вікна;

$\max(P_{i,4-16})$ – максимальна потужність в i -му вікні, що відповідає частотній області 4-16 Гц;

$\max(P_i)$ – максимальна потужність частотних складових ПФ в i -му часовому вікні.

Для дослідження обертвого зриву і помпажу обчислювалися суми потужностей ПФ (рис. 7), що відповідали частотним складовим в області 20-100 Гц у кожному з часових вікон.

Таким чином, відповідно до отриманої картини поведження частотних складових сигналу $P_{КВТ}$ упродовж зривних процесів, виникає задача вибору найбільш ефективного вейвлету, що володіє високою швидкістю та вибірковістю по частоті для пояснення фізики досліджуваного процесу.

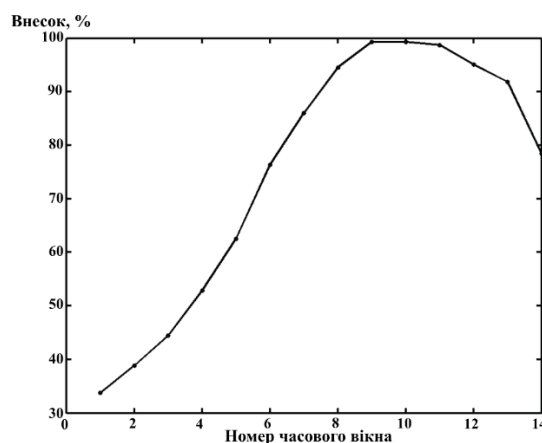


Рис. 6. Співвідношення частотних складових в області 4-16 Гц сигналу тиску повітря за компресором і максимуму частоти (ширина часового вікна – 0.18 с; зсув – 0.094с)

Авторська розробка

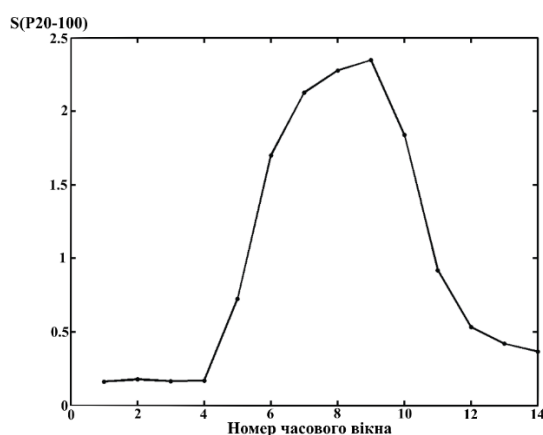


Рис. 7. Розподіл суми потужностей для частот в області 20-100 Гц для сигналу тиску повітря за компресором: $S(P_{20-100})$ – сума потужностей для частот в області 20-100 Гц у кожному з часових вікон

Авторська розробка

Подальші дослідження будуть розглянуті в наступних публікаціях.

Заключення і висновки. Таким чином, використання ШПФ дозволяє виконати наступні дослідження: провести індивідуальний контроль технічного стану конкретного об'єкту ГПА у широкому діапазоні частот; визначити розладнання машини та експлуатаційних пошкоджень на ранній стадії; здійснити контроль розвитку несправностей у залежності від часу наробітки, що дає можливість прогнозувати залишковий ресурс, тобто захищати машини та механізми від аварійних ситуацій.

Література:

1. Письменный И. Л. Многочастотные нелинейные колебания в газотурбинном двигателе / И. Л. Письменный. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.
2. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
3. WinПОС. Пакет обработки сигналов. Руководство пользователя. –



Королев: НПП “Мера”, 2005. – 147 с.

4. 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.

5. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М.: Мир, 2005. – 671 с.

References:

1. Pismennyi I. L. Multi-frequency non-linear oscillations in a gas turbine engine / I. L. Pismennyi. - Moscow: Mechanical engineering, 1987. - 128 p.

2. Dyakonov V. P. Wavelets. From theory to practice / V.P. Dyakonov. - Moscow: SOLON – R, 2002. - 448 p.

3. WinPOS. Signal processing package. User's manual. - Korolev: SPE “Measure”, 2005. - 147 p.

4. 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.

5. Malla S. Wavelets in signal processing / S. Malla. - Moscow: World, 2005. - 671 p.

Abstract. Pipeline transport of natural gas is the most effective type of supply of fuel and hydrocarbon raw materials for industrial consumers, both in Ukraine and abroad. One of the main problems with the operation of gas-pumping units (GPU) of natural gas is to ensure their stable operation. In this paper, a study of a rotating breakdown and a gas-turbine engine (GTE) surging was conducted on the basis of the analysis of the air pressure signal on the compressor using the Fourier transform method.

Keywords: surge, rotary breakdown, gas-turbine engine, turbocharger, Fourier transform, spectral analysis, signal processing.

Науковий керівник: д. т. н., проф. Горбійчук М. І.

Стаття відправлена: 09.11.2018 р.

© Ткачешак Н. В.