

Назарій Ткачешак, Михайло Горбійчук

ДІАГНОСТИКА ПОМПАЖУ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ S-ДИСКРИМІНАНТА

Актуальність теми дослідження. Спектральне представлення сигналів надає можливість виявляти приховані властивості фізичних процесів і, таким чином, запобігти появі ймовірних небезпечних ситуацій. Метод діагностування газотурбінного двигуна (ГТД) на основі S-дискримінанта використовується для розроблення й налаштування засобів захисту газотурбінних двигунів від помпажу та обертового зриву.

Постановка проблеми. Розробка цього методу дасть змогу застосовувати S-дискримінант для раннього діагностування розвитку зривних процесів у турбокомпресорі ГТД, і тим самим визначити певні граничні умови, перевищення яких свідчатиме про втрату газодинамічної стійкості й дасть змогу системам автоматичного керування двигунами вчасно завадити поширенню помпажних явищ у турбокомпресорі ГТД.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті останні публікації з досвіду використання схожих методів при діагностиці помпажу та обертового зриву в турбокомпресорі ГТД.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Можливість використання методу діагностування ГТД на основі S-дискримінанта для раннього діагностування розвитку зривних процесів у турбокомпресорі ГТД не досліджена.

Постановка завдання. Вдосконалення методу діагностування помпажу ГТД на основі S-дискримінанту.

Виклад основного матеріалу. У роботі проведено дослідження методу діагностування на основі S-дискримінанта. Показано, що цей метод діагностування має певні переваги, серед яких можна відзначити такі: проведення індивідуального контролю технічного стану конкретного об'єкта у широкому діапазоні частот; визначення розладнання машини та її експлуатаційних пошкоджень на ранній стадії; здійснення контролю розвитку несправностей залежно від часу наробітки, що дає змогу захищати машини та механізми від аварійних ситуацій. Запропонована модифікація методу S-дискримінанта.

Висновки відповідно до статті. Використання модифікованого методу S-дискримінанта в процесі діагностування розвитку помпажу в турбокомпресорі ГТД має певні переваги перед іншими схожими методами діагностики.

Ключові слова: помпаж; газотурбінний двигун; вейвлет-аналіз; метод S-дискримінанта; діагностика.

Рис.: 5. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Трубопровідний транспорт природного газу є найефективнішим видом постачання палива і вуглеводневої сировини для промислових споживачів як в Україні, так і за кордоном. Однією з основних проблем під час експлуатації газоперекачувальних агрегатів (ГПА) природного газу є забезпечення стійкості їхньої роботи. Для запобігання явищ помпажу, які можуть призвести до катастрофічних наслідків, використовують автоматичні системи антипомпажного захисту.

У цій статті проведено дослідження обертового зриву та помпажу ГТД на основі аналізу сигналу тиску повітря за компресором. Визначення діапазону можливих частот коливань необхідно, насамперед, для розробки й налаштування засобів захисту двигунів під час помпажу та обертового зриву. Спектральне представлення сигналів надає можливість виявляти приховані властивості фізичних процесів і, таким чином, запобігти повторній появі ймовірних небезпечних ситуацій. На основі цих досліджень і був представлений метод діагностування помпажу ГТД зі застосуванням S-дискримінанта, що дає змогу проводити індивідуальний контроль технічного стану конкретного об'єкта у широкому діапазоні частот.

Постановка проблеми. Таким чином, виникає потреба в модифікації методу діагностування на основі S-дискримінанта в умовах динамічної зміни стану об'єкта для підвищення чутливості до несправностей, які мають місце в процесі експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Накопичено значний світовий досвід із використання методів діагностики помпажу на основі S-дискримінанта, причому вагомий внесок здійснили І. Л. Письменний, С. Малла, В. А. Карасьов, А. Б. Шитов та багато інших.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є подальше вдосконалення методу діагностики ГТД на основі S-дискримінанта, зокрема для раннього діагностування розвитку зривних процесів у турбокомпресорі ГТД.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Вирішення задачі діагностики зривних процесів у турбокомпресорі ГТД на основі методу S-дискримінанта.

Виклад основного матеріалу. Ефективність використання статистичних ознак визначається однозначністю зв'язків ознак із відповідним станом об'єкта діагностики (ОД). У роботі [1] джерела приведені неінваріантності поділені на чотири групи (рис. 1), при цьому значну частину з них можливо вивчити й усунути в процесі дослідження.

Джерела неінваріантності:



Рис. 1. Джерела неінваріантності статистичних ознак

У роботі [2] для діагностування розвитку помпажних явищ у турбокомпресорі ГТД пропонується використання перших статистичних моментів для оцінки розподілення вейвлет-коефіцієнтів (ВК) сигналу $P_{КВТ}$, що пов'язані з абсолютними значеннями характеристик процесу й тому не є інваріантними. Для досліджень був вибраний логарифмічний датчик типу ДОЛ-32.

На рис. 2 наведені розподіли значень параметрів середньоквадратичного відхилення δ для ВК деталізації сигналу $P_{КВТ}$ з 6-го до 8-го рівня розкладання (де а – це сигнал про обертовий зрив від датчика ДОЛ-32). При цьому упродовж помпажних явищ амплітудні значення δ зі зростанням масштабу збільшуються і приймають максимум на 8-му рівні. Однак розподіли цієї ознаки не визначають граничне значення, перевищення якого свідчить про наявність зривних процесів у турбокомпресорі ГТД. Тому необхідна відповідна модифікація наведеного методу для аналізу ВК сигналів $P_{КВТ}$ на основі дискримінантних оцінок, які позбавлені цього недоліку.

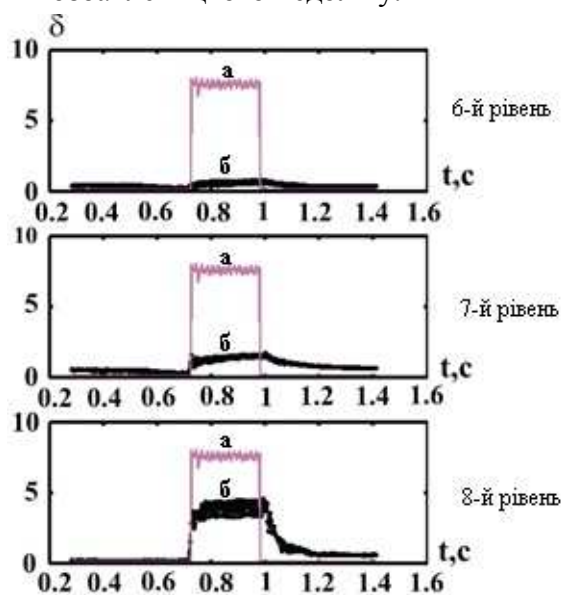


Рис. 2. Розподілення параметрів δ для ВК сигналу тиску повітря за компресором на 6-8-му рівнях розкладання:

а – сигнал про обертовий зрив від датчика ДОЛ-32;

б – розподілення параметрів δ для ВК деталізації сигналу $P_{КВТ}$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

У більшості алгоритмів контролю машинного обладнання роторного типу використовують безрозмірні амплітудні дискримінанти, сформовані з моментних характеристик різного порядку. Найбільш поширеними серед них є пік-фактор PF , коефіцієнти ексцесу E_k та асиметрії S_k , кurtosis Стюарта β [3-5]:

$$PF = \frac{X_{\max}}{\delta}; E_k = \frac{\mu_4}{\delta^4} - 3; S_k = \frac{\mu_3}{\delta^3}; \beta = \frac{\mu_4}{\mu_2^2},$$

де μ_2 – центральний момент другого порядку (дисперсія);

δ – середньоквадратичне відхилення від стандартного значення;

μ_4 – центральний момент четвертого порядку;

X_{\max} – пікове значення сигналу.

Для підвищення чутливості безрозмірних амплітудних дискримінант, що використовуються, наприклад, як діагностичні ознаки в задачах віброакустичної діагностики тріщин від утомленості в елементах роторних систем [6], було запропоновано проведення попередньої обробки виміряного сигналу із застосуванням вейвлет-перетворення.

Аналіз розподілу ВК деталізації сигналу P_{KBT} на 7-му рівні розкладання за допомогою параметрів ексцесу E_k та асиметрії S_k був виконаний за такими виразами:

$$E_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_7} (coef_{i,7} - MO(coef_7))^4}{N_7 \delta^4 (coef_7)} - 3; S_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_7} (coef_{i,7} - MO(coef_7))^3}{N_7 \delta^3 (coef_7)},$$

де N_7 – кількість ВК на 7-му рівні розкладання;

i – порядковий номер ВК;

$coef_{i,7}$ – i -й коефіцієнт на 7-му рівні розкладання;

$MO(coef_7), \delta(coef_7)$ – відповідно математичне очікування й середньоквадратичне відхилення для ВК на 7-му рівні розкладання.

На рис. 3 наведено порівняльний аналіз визначення зривних процесів за допомогою коефіцієнтів ексцесу, асиметрії до розподілу ВК деталізації сигналу P_{KBT} на 7-му рівні розкладання із фактичним сигналом від логарифмічного датчика типу ДОЛ-32. При цьому на рис. 3 позначками 1 та 2 були відзначені відповідно сигнали про обертовий зрив та помпаж від датчика ДОЛ-32 за даними стендових випробувань ГТД DG-90, де ширина часового вікна становила 0,23, а зсув – 0,0001с.

Згідно з рис. 3 характер коефіцієнтів ексцесу та асиметрії свідчить про те, що за відсутності зривних процесів розподіл ВК сигналу P_{KBT} на 7-му рівні розкладання близький до нормального.

На рис. 3 за 1 мс до початку обертового зриву та за 11 мс до помпажу, що були зафіксовані за допомогою логарифмічного датчика типу ДОЛ-32, значення параметрів E_k та S_k починають зростати [7].

Крім того, для покращення здатності дискримінантних оцінок визначати експлуатаційні пошкодження на ранніх стадіях розвитку, амплітудні значення досліджуваних сигналів кліпують, тобто утворюють знакозмінну послідовність імпульсів, ширина кожного з яких дорівнює відстані між сусідніми моментами зміни полярності сигналу. Таке нех-

тування амплітудними значеннями сигналу різко спрощує обчислення і тим самим забезпечує високу швидкість обробки. Для цього застосовують метод S-дискримінанта.

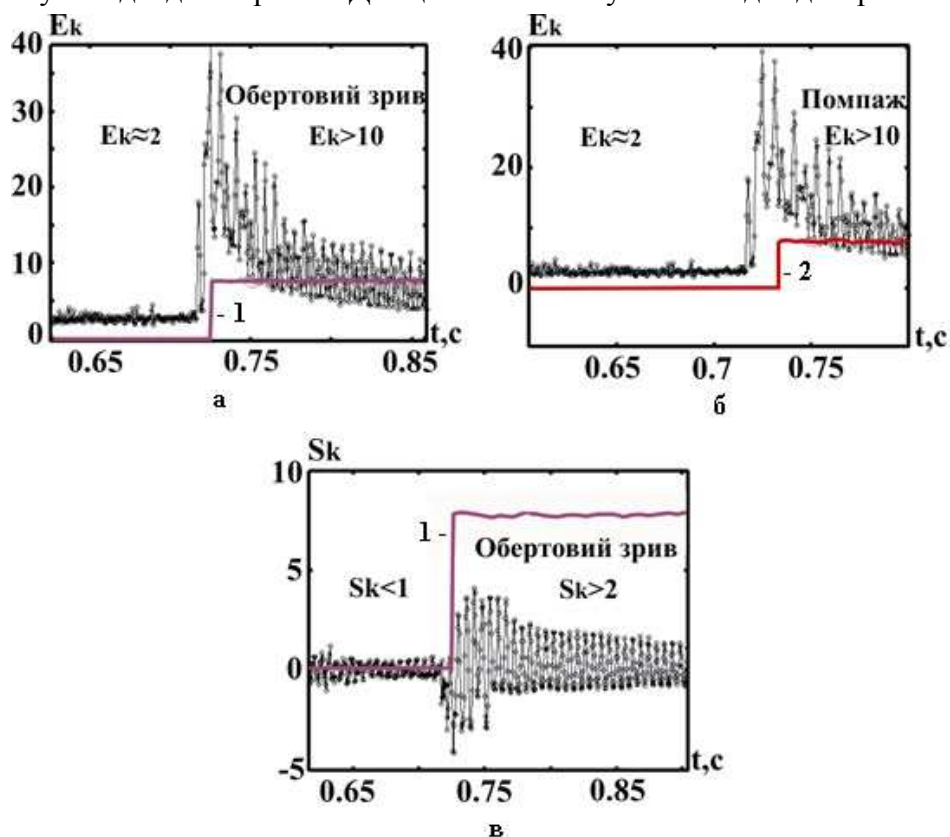


Рис. 3. Визначення зривних процесів за допомогою коефіцієнтів ексцесу та асиметрії:

а – порівняння сигналу про обертвий зрив від датчика ДОЛ-32 із параметром E_k ;

б – порівняння сигналу про помпаж від датчика ДОЛ-32 із значеннями E_k ;

в – порівняння сигналу про обертвий зрив від датчика ДОЛ-32 із параметром S_k

S-дискримінант базується на формуванні тільки тієї частини сигналу, амплітудні значення якого перевищують заданий поріг P . Таким чином, той шум, що є властивим до нормального режиму виключається зі спостереження.

На рис. 4 наведено порівняльний аналіз, виконаний для діагностування стану вузлів газотурбінного двигуна DG-90 залежно від напрацювання. Завдяки високій чутливості S-дискримінанта (а саме, безрозмірного індексу перевищення порога P по «дисперсії» – I_d) до порушення стаціонарності сигналу, яку спричинили змінення параметрів технічного стану DG-90, можливо помітити відхилення дискримінанту від еталонного значення (становить одиницю), що відповідає нормальному технічному стану елементів редуктора [8; 9; 10].

У роботі [8] значення параметра порогу кліпування P припускаються відомими заздалегідь і формуються, якщо немає збоїв у роботі машинного обладнання. Труднощі виникають, коли величину P необхідно динамічно змінювати залежно від поточного стану сигналу.

Розглянемо загальний метод обчислення S-дискримінанта та його модифікацію для можливості застосування цього підходу при ранньому діагностуванні зривних процесів.

Дискримінант формулюється як відношення поточного значення вимірюваного параметра до опорного, що відповідає нормальному режиму роботи обладнання.

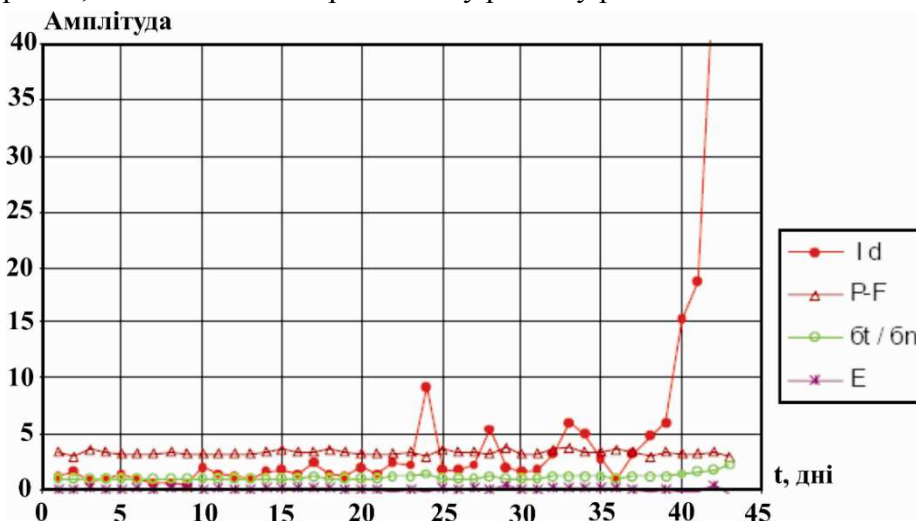


Рис. 4. Діагностування стану вузлів ГТД DG-90 за допомогою безрозмірних амплітудних дискримінант у смузі частот 1-1,75 КГц

На відміну від наведеного підходу S-дискримінант має більшу чутливість до порушення роботи машинного обладнання завдяки кліпуванню амплітудних значень сигналу (S) та введенню до дискримінанта додаткового математичного виразу:

$$I_s = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (s_i^{(t)} - P) \cdot K^{(t)}}{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N (s_j^{(n)} - P) \cdot K^{(n)}}; I_d = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (s_i^{(t)} - P)^2 \cdot K^{(t)}}{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N (s_j^{(n)} - P)^2 \cdot K^{(n)}}, \quad (1)$$

де $s_i^{(t)}, s_j^{(n)}$ – значення сигналів відповідно до поточного (t) та «нормального» (n) стану роботи обладнання;

$K^{(t)}, K^{(n)}$ – позначають відповідно кількості значень сигналів $s^{(t)}, s^{(n)}$, що перевищують заданий поріг P , відповідно до поточного та нормального режиму;

P – поріг кліпування (clip-threshold), що визначається таким співвідношенням:

$$P = \lambda \delta_n, \quad (2)$$

де δ_n – стандартне відхилення опорного розподілу значень сигналу від середнього значення, що відповідає нормальній роботі газотурбінного двигуна;

$\lambda = 1...3$ – коефіцієнт пропорційності, що визначає чутливість дискримінанта.

Значне поширення мають безрозмірні амплітудні індекси перевищення порогів кліпування по «середньому значенню» (I_s) і по «дисперсії» (I_d) [5; 8; 10].

Чим вищий поріг, тим вища чутливість дискримінанта.

Для аналізу стану процесу використовують такі властивості узагальненого S-дискримінанта (I_A) [5]:

- а) $I_A \approx 1$ – при несуттєвих відхиленнях параметрів технічного стану від норми;
- б) $I_A > 1$ – при допустимих відхиленнях параметрів;
- в) $I_A \gg 1$ – при неприпустимих відхиленнях параметрів, що граничать із виникненням аварійної ситуації.

Відповідно при розвитку зривних процесів значення параметра I_d буде зростати.

Таким чином, розглянутий метод дозволяє виконати такі дослідження:

- провести індивідуальний контроль технічного стану конкретного об'єкта у широкому діапазоні частот;
- визначити розладнання машини та експлуатаційних пошкоджень на ранній стадії;
- здійснити контроль розвитку несправностей залежно від часу наробітки, що дає змогу прогнозувати залишковий ресурс, тобто захищати машини та механізми від аварійних ситуацій.

Розглянемо модифікацію цього методу, що забезпечує підвищення чутливості до визначення несправностей та застосування S-дискримінанта в умовах динамічної зміни нормального стану системи відповідно до її поточного стану.

У цій статті для раннього діагностування помпажних явищ використовується простий і ефективний у реалізації безрозмірний амплітудний індекс перевищення порогу кліпування P (clip-threshold) по “дисперсії [5; 11]. Згідно із (1) аналіз розподілення ВК досліджуваного сигналу на рівні *level*, виконується за таким виразом:

$$I_d^{level} = \frac{\sum_{i=1}^N (coef_i^{(t)} - P)^2 \cdot K^{(t)}}{\sum_{j=1}^N (coef_j^{(n)} - P)^2 \cdot K^{(n)}},$$

де $coef_i^{(t)}, coef_j^{(n)}$ – коефіцієнти вейвлет-розкладання сигналу на рівні *level* для поточного та опорного (еталонного) стану об'єкта відповідно;

$K^{(t)}, K^{(n)}$ – кількість відліків амплітудних значень вейвлет-коефіцієнтів сигналу, які перевищують заданий поріг P у поточному та еталонному режимі функціонування обладнання;

N – кількість вейвлет-коефіцієнтів на рівні *level*.

Відповідно до (2), δ_n – стандартне відхилення опорного розподілу вейвлет-коефіцієнтів сигналу від середнього значення, що відповідає нормальній роботі газотурбінного двигуна.

На рис. 5 представлена схема діагностування стану процесу за допомогою вейвлет-аналізу (ВА) і модифікованого методу обчислення I_d .

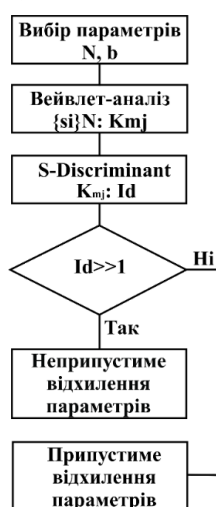


Рис. 5. Діагностування сигналу за допомогою ВА та S-дискримінанта:

$\{s_i\}$ – вихідний сигнал с номером i ; b – параметр зсуву часового вікна; N – кількість вимірювань у часовому вікні; t – кількість ВК на рівні j ; K_{mj} – множина ВК на рівні j , кількістю t

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

За цією схемою на попередньому етапі проведення дослідження необхідно обрати параметри ширини (N) та зсуву часового вікна (b) для подальшого виконання вейвлет-перетворення.

Наступним етапом є обчислення розподілу ВК (або K_{mj} , як показано на рис. 5) сигналу $P_{КВТ}$ на 7-му рівні розкладання. Далі обчислюється амплітудний індекс I_d для розподілу K_{mj} . Значне перевищення параметра I_d одиничного значення буде свідчити про наявність явищ нестійкої течії в газоповітряному тракті ГТД, тобто помпажу та обертового зриву.

Завдяки вейвлет-фільтрації сигналу на відповідних рівнях розкладання, чутливість S-дискримінанта до діагностування розвитку несправностей зростає.

Для формування порогу кліпування P (clip-threshold) відповідно до поточного стану процесу була розроблена процедура обчислення опорного сигналу. При цьому, приведення об'єкта до еталонного стану $x_j^{(n)}$ відбувається за допомогою правила корекції синаптичних ваг нейронів карти Кохонена (Self-organization map, SOM) під час навчання. Корекція векторів синаптичних ваг усіх нейронів відбувається відповідно до виразу:

$$w_j(t+1) = w_j(t) + \eta h_{j,c}(t)(b - w_j(t)), \quad (3)$$

де b – обраний з певною ймовірністю вектор з вихідної множини даних;

$w_j(t)$ – вагове значення нейрона j у момент часу t ;

$w_j(t+1)$ – вагове значення нейрона j після корегування;

$\eta(t)$ – параметр швидкості навчання;

$h_{j,c}(t)$ – функція сусідства з центром у нейроні-переможці c .

Згідно з отриманими результатами, розподіл параметрів ексцесу та асиметрії ВК сигналу $P_{КВТ}$ на певному рівні розкладання (наприклад, на 7-му рівні для часу дискретизації 0,000047 с) близький до нормального за відсутності зривних процесів. Тому ймовірність появи зривних процесів для ВК сигналу $P_{КВТ}$ на 7-му рівні розкладання становить:

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx = \Phi\left(\frac{b - MO_x}{\delta}\right) - \Phi\left(\frac{a - MO_x}{\delta}\right),$$

$$P(MO_x - L < X < MO_x + L) = \Phi\left(\frac{L}{\delta}\right) - \Phi\left(-\frac{L}{\delta}\right) = 2\Phi\left(\frac{L}{\delta}\right),$$

де MO_x – математичне очікування множини значень X ;

P – ймовірність відхилення значень X від MO на величину L ;

Φ, L – відповідно функція Лапласа та відхилення досліджуваних параметрів процесу від середнього значення MO_x .

Таким чином, ймовірність появи розглянутого відхилення залежить від його відношення до параметра δ .

Отже, через середньоквадратичне відхилення δ отримаємо масштаб відхилень:

$$\frac{L}{\delta} = a, \quad P(MO_x - a\delta < X < MO_x + a\delta) = 2\Phi(a).$$

При цьому величина $P = 2\Phi(a)$ становить довірчу ймовірність відхилення $\pm a\delta$.

Оскільки випадкова величина X , розподілена за нормальним законом, з ймовірністю $2\Phi(a)$, то вона опиниться в інтервалі $\pm a\delta$ (довжина інтервалу $2a\delta$). Зі збільшенням відносного відхилення $\frac{L}{\delta}$ збільшується ймовірність, що інтервал $\pm L$ містить розглянуту випадкову величину X .

Звідси отримуємо, що:

$$MO - a\delta \leq \text{coef}_{i,\text{level}}^{(t)} \leq MO + a\delta, \quad (4)$$

де δ – стандартне відхилення ВК $\text{coef}_{i,\text{level}}^{(t)}$;

$\text{coef}_{i,\text{level}}^{(t)}$ – сукупність вейвлет-коефіцієнтів деталізації на рівні розкладання level ;

a – параметр настроювання (набуває значення від 1 до 3);

MO – математичне очікування розподілу ВК $\text{coef}_{i,\text{level}}^{(t)}$.

Згідно із (4) як параметр b будемо розглядати математичне очікування (MO) сукупності вейвлет-коефіцієнтів $\text{coef}_{i,\text{level}}^{(t)}$; $w_j(t)$ – позначає поточний розподіл ВК; $w_j(t+1)$ – відкоректоване положення ВК, яке в порівнянні з $w_j(t)$, ближче до еталонного стану процесу.

Зміна параметрів ексцесу та асиметрії (рис. 3), для розподілу деталізованих ВК сигналу P_{KBT} умова (4) буде вказувати на еталонний режим функціонування турбокомпресору за відсутності зривних процесів.

Таким чином, для формування порогу кліпування P , якщо немає попередньо сформованих вимірювань на етапі стабільної роботи двигуна, необхідно виконати такі етапи:

Етап 1. Обрати ефективну ширину часового вікна (window) та зсуву (shift) для дослідження зривних процесів. Встановити початкове значення порядкового номера часового вікна: $i=1$.

Етап 2. Виконати вейвлет-фільтрацію сигналу P_{KBT} у поточному вікні window_i (де i – номер часового вікна) на рівні розкладання level за допомогою вейвлету Добеші.

Етап 3. Обчислити значення параметрів MO та δ для деталізованих ВК $\text{coef}_{i,\text{level}}^{(t)}$ сигналу P_{KBT} на рівні level .

Етап 4. Задати початкові значення для формування опорної вибірки ВК, що відповідає роботі компресора за відсутності зривних процесів: $\text{coef}_{1,\text{level}}^{(n)} = \text{coef}_{1,\text{level}}^{(t)}$.

Етап 5. Задати початкове значення для кількості обчислювальних операцій: $\text{inc} = 1$.

Етап 6. Встановити початкове значення для порядкового номера ВК: $j = 1$.

Етап 7. Перевірити виконання умови (4): якщо вона виконується, перейти на етап 8, якщо ні – зміщення векторів $\{\text{coef}_{i,\text{level}}^{(t)}\}$ відбувається за такими виразами:

$$\text{coef}_{j,\text{level}}^{(n)} > MO + \delta a, \quad (5)$$

$$\text{coef}_{j,\text{level}}^{(n)} = MO + a\delta(1 - \eta), \quad (6)$$

$$\text{coef}_{j,\text{level}}^{(n)} = MO - a\delta(1 - \eta), \quad (7)$$

$$\text{coef}_{j,\text{level}}^{(n)} < MO - \delta a, \quad (8)$$

де $\eta = 0,1 \exp(-10^{-3} \text{inc})$ – параметр навчання;

inc – кількість обчислювальних операцій.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Етап 8. Збільшити на одиницю кількість обчислювальних операцій: $inc = inc + 1$.

Етап 9. Перерахувати значення параметрів MO і δ для деталізованих ВК опорної вибірки при нових значеннях $coef_{i,level}^{(n)}$.

Етап 10. Якщо розглянуті всі ВК – перейти на етап 11, якщо ні, то задати $j = j + 1$ і перейти на етап 7.

Етап 11. Обчислити середньоквадратичне відхилення для опорної вибірки: $\delta_n = \delta \left(coef_{j,level}^{(n)} \right)$.

Етап 12. Обчислити значення порогу кліпування $P = \lambda \delta_n$.

Етап 13. Зсунути значення параметра $window_i$ на величину $shift$ і збільшити на одиницю порядковий номер часового вікна: $i = i + 1$.

Етап 14. Якщо час проведення іспитів триває, перейти на етап 2, якщо ні – закінчити діагностування.

Необхідною умовою застосування S-дискримінанта під час дослідження зривних процесів є наявність експериментальних даних по стендових випробуваннях ГТД на етапі стабільної роботи турбомашин за відсутності явищ нестійкої течії (помпажу та обертового зриву) у газоповітряному тракті ГТД.

Висновки відповідно до статті. Наведена модифікація дозволяє застосовувати підхід, якщо немає заздалегідь відомого опорного сигналу. Тому можливе використання методу на основі вейвлет-аналізу (ВА) та S-дискримінанта для діагностування розвитку зривних процесів у турбокомпресорі ГТД.

Крім того, цей метод дозволяє виконати такі дослідження:

- провести індивідуальний контроль технічного стану конкретного об'єкта у широкому діапазоні частот;
- визначити розладнання машини та експлуатаційних пошкоджень на ранній стадії;
- здійснити контроль розвитку несправностей залежно від часу наробітки, що дає можливість прогнозувати залишковий ресурс, тобто захищати машини та механізми від аварійних ситуацій.

Розроблена модифікація методу на основі S-дискримінанта надає можливість застосовувати S-дискримінант для раннього діагностування розвитку зривних процесів у турбокомпресорі ГТД.

На відміну від статистичних моментів, S-дискримінант дозволяє визначити певні граничні умови, перевищення яких свідчить про втрату газодинамічної стійкості й надає можливість системам автоматичного керування двигунами вчасно завадити поширенню помпажних явищ у турбокомпресорі ГТД.

Список використаних джерел

1. Карасев В. А. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей / В.А. Карасев, В. П. Максимов, М. К. Сидоренко. – М. : Машиностроение, 1978. – 132 с.
2. Дремин И. М. Вейвлеты и их использование / И. М. Дремин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – № 55. – С. 465–501.
3. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
4. Ллойд Э. Справочник по прикладной статистике / Э. Ллойд, У. Ледерман, С. А. Айвазян. – М., 1990. – 526 с.
5. Неразрушающий контроль : справочник / В. И. Иванов, И. Э. Власов, Ф. Я. Балицкий, В. В. Клюев. – М. : Машиностроение, 2006. – 829 с.
6. Бурау Н. И. Повышение чувствительности дискриминантных признаков трещины в задачах виброакустической диагностики элементов роторных систем / Н. И. Бурау, Ю. В. Сопилка // Акустичний вісник. – 2003. – Т. 6, № 5. – С. 10–17.

7. Sokolova A. G. Dimensionless Machine Vibration S–Discriminants as a Mean to Improve Monitoring and Get Fault Detection [Electronic resource] / A. G. Sokolova, K. Pichugin. // The NDT Database & Journal. – Access mode: <http://www.ultrasonic.de/article/ecndt2006/doc/P82.pdf>.

8. Sokolova A. G. Algorithm of Machinery Vibration Condition Monitoring with Adaptation to a Reference State / A. G. Sokolova // *Machinostrojenije. Monitoring. Diagnostics.* – 2005. – Vol. 11. – P. 30–40.

9. Sokolova A. G. Sensitive and Noise–immune Vibration Discriminants for Instability Phenomema Detection caused by Incipient Machinery Deterioration / A. G. Sokolova, F. Balitsky // *ISCORMA–1: The 1st International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery: Proceedings, California, USA, 20–24 August, 2001.* – USA, 2001. – P. 1006.

10. Письменный И. Л. Многочастотные нелинейные колебания в газотурбинном двигателе / И. Л. Письменный. – М. : Машиностроение, 1987. – 128 с.

11. Киприч Т. В. Диагностика помпажа ГТД на основе модифицированного алгоритма вычисления S–дискриминанта / Т. В. Киприч, В. И. Дубровин // *Нейроинформатика-2008: научная сессия МИФИ-2008 X Всероссийской научно-технической конференции, 22-25 января, 2008.* – М., 2008. – С. 15.

References

1. Karasev, V. A., Maksimov, V. P. & Sidorenko, M. K. (1978). *Vibratsionnaia diagnostika gazoturbinykh dvigatelei [Vibration diagnostics of gas turbine engines]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

2. Dremine, I. M., Ivanov, O. V. & Nechitailo, V. A. (2001). Veivlety i ikh ispolzovanie [Wavelets and their use]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Advances in the physical sciences*, 55, 465–501 [in Russian].

3. Aivazian, S. A., Enyukov, I. S. & Meshalkin, L. D. (1983). *Prikladnaia statistika. Osnovy modelirovaniia i pervichnaia obrabotka dannykh [Application statistics. Basics of modeling and primary data processing]*. Moscow: Finansy i statistika [in Russian].

4. Lloyd, E., Lederman, U. & Ayvazyan, S. A. (1990). *Spravochnik po prikladnoi statistike [Handbook of Applied Statistics]*. Moscow: Finansy i statistika [in Russian].

5. Klyuev, V. V., Ivanov, V. I., Vlasov, I. E. & Balitskiy, F. Ya. (2006). *Nerazrushayushchii kontrol: Spravochnik [Non-Destructive Testing: A Handbook]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

6. Burau, N. I. & Sopilka, Yu. V. (2003). Povyshenie chuvstvitelnosti diskriminanykh priznakov treshchiny v zadachakh vibroakusticheskoy diagnostiki elementov rotornykh sistem [Increasing the sensitivity of discriminant signs of a crack in the tasks of vibro-acoustic diagnostics of elements of rotary systems]. *Akustichnyi visnyk – Acoustic visnyk*, 6 (5), 10–17 [in Russian].

7. Sokolova, A. G. & Pichugin, K. (2006). Dimensionless Machine Vibration S–Discriminants as a Mean to Improve Monitoring and Get Fault Detection. *The NDT Database & Journal*. Retrieved from <http://www.ultrasonic.de/article/ecndt2006/doc/P82.pdf> [in English].

8. Sokolova, A. G. (2005). Algorithm of Machinery Vibration Condition Monitoring with Adaptation to a Reference State. *Machinostroieniie. Monitoring. Diagnostics*, 11, 30–40 [in English].

9. Sokolova, A. G. & Balitsky, F. (2001). Sensitive and Noise–immune Vibration Discriminants for Instability Phenomema Detection caused by Incipient Machinery Deterioration. *ISCORMA–1: Proceedings of 1st International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery*. South Lake Tahoe [in English].

10. Pismennyi, I. L. (1987). *Mnogochastotnye nelineynye kolebaniia v gazoturbinnom dvigatele [Multi-frequency non-linear oscillations in a gas turbine engine]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

11. Kiprich, T. V. & Dubrovina, V. I. (2008). Diagnostika pompazha GTD na osnove modifitsirovannogo algoritma vychisleniya S–diskriminanta [Diagnostics of GTE surge on the basis of a modified algorithm for calculating the S-discriminant]. *Neuroinformatika-2008 – Neuroinformatics 2008: Scientific Session MEPhI-2008 X All-Russian Scientific and Technical Conference*. Moscow [in Russian].

Nazarii Tkacheshak, Mykhailo Horbiichuk

DIAGNOSTICS OF GAS-TURBINE ENGINE SURGING ON THE BASIS OF THE S-DISCRIMINANT

Urgency of the research. Spectral representation of signals provides the ability to detect the hidden properties of physical processes and, thus, prevent the emergence of probable hazardous situations. The method for diagnosing a gas turbine engine (GTE) based on the S-discriminant is used to design and configure the means for protecting gas turbine engines from surging and rotating breakdown.

Target setting. The development of this method will enable the use of the S-discriminant for early diagnostics of the breakthrough processes in the turbocharger of the GTE, and thereby determine certain boundary conditions, exceeding which will indicate a loss of gas-dynamic stability and will enable the systems of automatic control of engines in a timely manner to prevent the spread of exhausting phenomena in the turbocharger GTE.

Actual scientific researches and issues analysis. The latest publications on the experience of using similar methods in the diagnosis of surging and rotating breakdown in the turbocharger of the GTE have been considered.

Uninvestigated parts of general matters defining. The possibility of using the diagnostic method on the basis of the S-discriminant for early diagnosis of blasting processes in a turbocharger GTE.

The research objective. Improvement of the diagnostic method of the GTE runoff on the basis of the S-discriminant.

The statement of basic materials. In this work, the research of the diagnostic method on the basis of the S-discriminant was conducted. It is shown that this method of diagnostics has certain advantages, among which one can note the following: conducting individual control of the technical state of a particular object in a wide range of frequencies; determination of the disruption of the machine and its operational damage at an early stage; implementation of monitoring of the development of malfunctions depending on the time of work, which enables to protect cars and mechanisms from emergency situations. The modification of the S-discriminant method is proposed.

Conclusions. The use of a modified S-discriminator method in diagnosing the development of a spill in a turbocharger GTE has some advantages over other similar diagnostic methods.

Keywords: surging; gas turbine engine; wavelet analysis; method of the S-discriminant; diagnostics.

Fig.: 5. References: 11.

Ткачешак Назарій Володимирович – аспірант кафедри комп'ютерних систем і мереж, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна).

Tkacheshak Nazarii – PhD student of Department of Computer Systems and Networks, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (15 Carpathian Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine).

E-mail: jameskent1993@gmail.com

Горбійчук Михайло Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна).

Horbiichuk Mykhailo – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Computer Systems and Networks, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (15 Carpathian Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine).

E-mail: gorb@nung.edu.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8586-1883>

Researcher ID: I-4606-2017

Scopus Author ID: 57188683740