

УДК 629.139.19

¹Е.П. Ясиніцький, канд. техн. наук
²М.Б. Налісний**ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ
З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ
ВІБРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ**¹Кафедра авіаційних двигунів, НАУ, e-mail: avsacsm@nau.edu.ua²Національна акціонерна компанія “Нафтогаз України”, e-mail: transgaz@megastyle.com

Запропоновано набір методів регресійного аналізу, реалізованих авторами в пакеті спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяють виконати автоматизовану оцінку залишкового ресурсу газоперекачувального агрегату за динамікою зміни числових значень його скалярних вібраційних параметрів.

Вступ

Підвищення економічності та надійності роботи компресорних станцій (КС) у газовій промисловості може бути досягнуто за рахунок упровадження методів і засобів технічної діагностики силового устаткування.

Застосування методів технічної діагностики газоперекачувальних агрегатів (ГПА) як основного силового устаткування КС дозволяє вирішити два основних завдання загальної теорії надійності:

– дати оцінку технічного стану агрегатів, виконати прогноз зміни цього стану;
– за детального вивчення причин раптових відмов перевести ці відмови в категорію поступових (передбачуваних), що сприяє зменшенню потоку відмов.

Особливого значення технічна діагностика як теоретичний фундамент створення оптимальних систем контролю, що найбільшою мірою відповідають вимогам експлуатації, набуває в зв'язку з розробкою систем автоматичного діагнозу і впровадженням методів експлуатації за технічним станом.

Сучасні методи діагностування дозволяють з достатнім ступенем вірогідності визначити технічний стан таких складних енергетичних систем: устаткування КС і їх елементів (осьового компресора, камери згоряння, турбіни). Визначення рівня технічного стану устаткування, у свою чергу, дозволяє прогнозувати залишкові ресурси агрегатів у процесі їх експлуатації.

Аналіз досліджень і публікацій

Віброакустична діагностика – високоефективний метод виявлення прихованих дефектів і поломок ГПА [1].

За основний контрольований параметр інтенсивності вібрації ГПА беруть такий скалярний параметр, як загальний рівень середнього квадратичного значення віброшвидкості V_e , обмірюваний у рекомендованих місцях.

Як додаткові скалярні параметри використовують: середнє, пік (амплітуда), пік-пік (розмах), куртозис та ін.

Прийнята градація за зонами інтенсивності вібрації, класифікації агрегатів і вибір максимально допустимих значень інтенсивності вібрації для різних класів агрегатів базуються на рекомендаціях СТ СЭВ 1367–78 і ISO 2372–74, а вібраційна діагностика ГПА – на методах хвильового, скалярного, статистичного, спектрального і регресійного аналізів [2; 3].

У цій статті пропонується математичний апарат регресійної обробки вібраційних даних ГПА, реалізований у вигляді пакета спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяє виконати автоматизовану оцінку залишкового ресурсу ГПА за результатами безупинної або періодичної реєстрації значень його скалярних вібропараметрів (рис. 1).

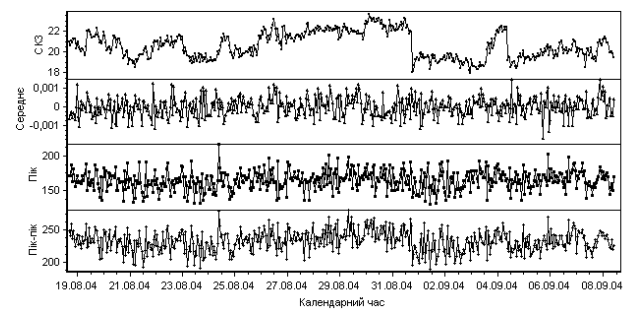


Рис. 1. Вихідні дані для виконання регресійного аналізу зміни вібропараметрів ГПА

Постановка завдання

Регресійний аналіз – це вид статистичного аналізу, використовуваний для прогнозування. Регресійний аналіз дозволяє оцінити ступінь зв'язку між змінними, пропонуючи механізм обчислення передбачуваного значення параметра на підставі декількох уже відомих значень.

Використовуючи регресійний аналіз, можна продовжити лінію тренда в діаграмі за межі реальних даних для прогнозування майбутніх значень.

Завдання полягає у виборі, адаптації та реалізації у вигляді ефективних алгоритмів для ПЕОМ відомих методів регресійного аналізу для оцінки динаміки зміни числових значень скалярних вібраційних параметрів ГПА, які завжди вимірюються під час їх експлуатації.

Використання методів регресійного аналізу вібраційних параметрів газоперекачувальних агрегатів

Один з найбільш простих методів регресійного аналізу – виконання експонентного згладжування (розрахунок експонентної середньої) часового ряду скалярних вібропараметрів.

Експонентно згладжена крива зміни вібропараметра в часі (рис. 2, крива 2) порівняно з кривою фактичних значень (рис. 2, крива 1) являє собою більш плавну лінію (згладжену тенденцію).

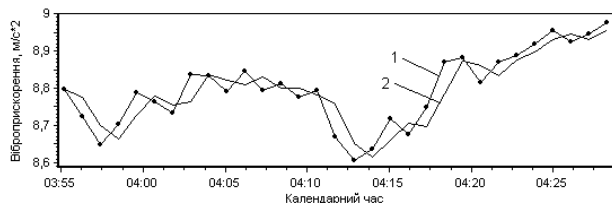


Рис. 2. Виконання експонентного згладжування тренда скалярного вібропараметра ГПА:
1 – крива фактичних значень; 2 – експонентно згладжена крива

Згладжування досягається з урахуванням впливу на наступне значення вібропараметра попередніх значень ряду. При цьому, чим давніше спостереження, тим менше воно впливає на величину експонентної середньої.

Основна ідея методу полягає у використанні як прогнозу лінійної комбінації минулих і поточних спостережень.

Криву експонентно згладженого скалярного параметра розраховують за формулою

$$Q_t = \alpha y_t + (1 - \alpha) Q_{t-1}, \quad (1)$$

де Q_t – експонентна середня (згладжене значення рівня ряду) на момент t ; α – коефіцієнт, що характеризує вагу поточного спостереження при розрахунку експонентної середньої (параметр згладжування); y_t – зареєстроване значення скалярного параметра в момент часу t ; Q_{t-1} – експонентна середня (згладжене значення рівня ряду) на момент $t-1$.

Як видно з формули (1), середній рівень параметра на момент часу t дорівнює лінійній комбінації двох величин:

- фактичного рівня для цього ж моменту часу;
- середнього рівня, розрахованого для попереднього періоду.

Якщо $\alpha = 1$, то крива, розрахована за формулою (1), збігається з вихідною кривою тренда вібропараметра.

Якщо $\alpha = 0$, то розрахована крива буде являти собою лінію, кожна точка якої зсунута праворуч по горизонтальній осі відносно вихідної кривої на величину $\Delta t = t_i - t_{i-1}$.

Параметр згладжування може знаходитися в межах $0 \leq \alpha \leq 1$.

Проте практичний діапазон значень α знаходиться в межах $0,1-0,3$.

У більшості випадків прийнятні результати дає $\alpha = 0,1$.

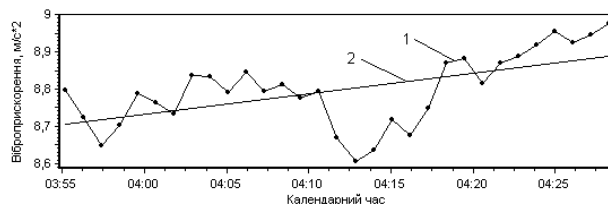
Вибираючи значення α , необхідно враховувати, що для підвищення швидкості реакції на зміну процесу розвитку належить підвищувати значення α (тим самим збільшується вага поточних спостережень), однак при цьому зменшуються фільтраційні можливості експонентного згладжування.

Використання експонентно згладженої кривої як основи для прогностичної оцінки ефективно за відносно невеликої коливальності рівнів вібропараметра.

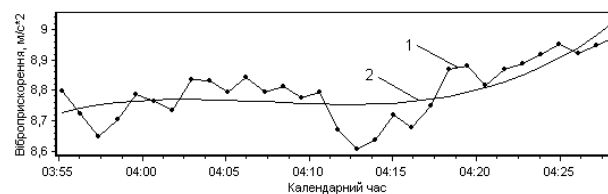
Такий метод прогнозування належить до найпоширеніших методів екстраполяції трендів.

Більш складний метод регресійного аналізу – побудова лінійного тренда скалярних вібропараметрів.

Лінійна регресія являє собою пряму лінію, побудовану за методом найменших квадратів (МНК) для креслення лінії тренда так, щоб у середньому відстані між зареєстрованими значеннями вібропараметра і лінією тренда були мінімальними (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Побудова лінійної (а) і поліноміальної (б) регресій скалярного вібропараметра ГПА

Формула лінійної регресії являє собою поліном першого степеня:

$$y'_i = a_0 + a_1 t, \quad (2)$$

де y'_i – значення лінії тренда в момент часу t ; a_0, a_1 – параметри (коефіцієнти) лінійної регресії. Величина a_0 характеризує кут нахилу прямої лінійного (арифметичного) тренда, a_1 – координата перетинання прямої осі абсцис.

Розрахунок параметрів (коефіцієнтів) лінійної регресії (2) виконується МНК, в якому як розв'язок береться точка мінімуму суми квадратів відхилень між теоретичним і зареєстрованим рівнями скалярного вібропараметра:

$$\sum (y'_i - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

де y_i – зареєстрований рівень скалярного вібропараметра в момент часу t .

Параметри a_0, a_1 у рівнянні (2), що задовольняють умову (3), знаходять шляхом розв'язання системи нормальних алгебричних рівнянь, наприклад, числовим методом Гаусса:

$$na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n y_i; \quad (4)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n t_i + a_1 \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i t_i,$$

де n – кількість зареєстрованих значень вібропараметра; t_i – моменти реєстрації вібропараметра ($i = \overline{1, n}$);

Нахил лінії лінійної регресії (2) дозволяє визначити напрямок тренда, тобто лінія є трендовим індикатором.

Якщо лінія напрямлена вгору, то і тренд відповідно висхідний.

Якщо лінія регресії напрямлена вниз, то і тренд спадний.

Якщо лінія регресії майже горизонтальна, тренда скалярного вібропараметра немає.

Лінійна регресія – це окремий випадок методу нелінійної, наприклад, поліноміальної регресії. Поліноміальна регресія являє собою криву лінію (рис. 3, б), що відповідає повному поліному степеня k :

$$y'_i = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_k t^k, \quad (5)$$

де y'_i – значення лінії тренда в момент часу t ; $a_0, a_1, a_2 \dots a_k$ – параметри (коефіцієнти) рівняння нелінійної регресії.

Розрахунок параметрів (коефіцієнтів) нелінійної регресії (5), аналогічно лінійній регресії, виконують МНК, в якому за розв'язок беруть точку мінімуму суми квадратів відхилень між теоретичним і зареєстрованим рівнями скалярного вібропараметра (3).

Як видно з рівняння (5), лінійна регресія (2) є окремим випадком нелінійної поліноміальної регресії, якщо $k = 1$.

Якщо $k = 2$, рівняння (5) буде задавати криву другого порядку (параболу), якщо $k = 3$ – гіперболу, якщо $k = 4$ – кубічну параболу і т. д.

Параметри $a_0, a_1, a_2 \dots a_k$ рівняння (5), що задовольняють умову (3), знаходять шляхом розв'язання системи нормальних алгебричних рівнянь, наприклад, числовим методом Гаусса. Для кривої другого порядку

$$y'_i = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (6)$$

система рівнянь має вигляд:

$$na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n t_i + a_2 \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i;$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n t_i + a_1 \sum_{i=1}^n t_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n t_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i t_i; \quad (7)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n t_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n t_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n t_i^4 = \sum_{i=1}^n y_i t_i^2.$$

Максимальний ступінь прогнозованого полінома k визначається обсягом зареєстрованої на момент виконання аналізу діагностичної інформації. При виборі $k = 1$ лінії лінійної й поліноміальної регресії збігаються (рис. 4).

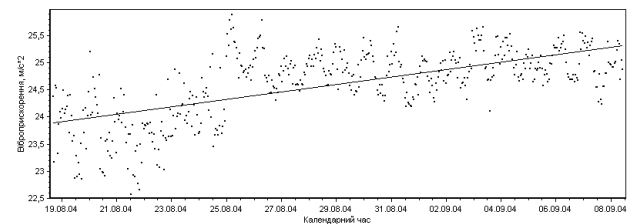


Рис. 4. Вигляд лінії поліноміальної регресії скалярного вібропараметра ГПА, якщо $k = 1$

Інтерполяція кубічними сплайнами – ефективний і стійкий спосіб інтерполяції функцій, що є основним конкурентом поліноміальної інтерполяції (5).

Криву, зображену на рис. 5, розраховують таким чином.

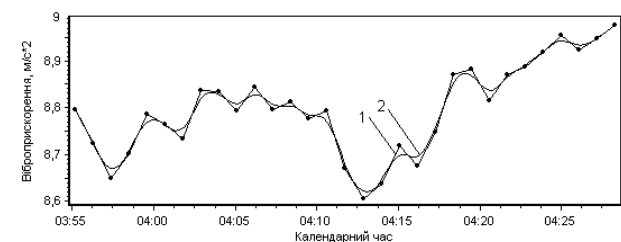


Рис. 5. Побудова тренда скалярного вібропараметра ГПА у вигляді сплайн-функції:

1 – крива фактичних значень; 2 – сплайн-функція

Інтервал інтерполяції (часовий період аналізу тренда вібропараметра) розбивають на невеликі відрізки, на кожному з яких функція задається поліномом третього степеня.

Коефіцієнти полінома підбирають так, щоб на межах інтервалів забезпечувалася неперервність функції, а також її першої і другої похідних. Крім того, задаються граничні умови – значення першої або другої похідної на межах інтервалу. Отже, якщо відомі моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n і відповідні їм зареєстровані значення y_1, y_2, \dots, y_n скалярного вібропараметра на кожному з відрізків

$$[t_i, t_{i+1}], i=1, 2, \dots, n-1$$

функція описується за допомогою полінома третього степеня у вигляді:

$$S(t) = y_i + a_{1i}(t-t_i) + a_{2i}(t-t_i)^2 + a_{3i}(t-t_i)^3, \quad (8)$$

де $t_i < t < t_{i+1}$.

Для обчислення коефіцієнтів

$$a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, i = 1, 2, \dots, n-1$$

розв'язують систему лінійних рівнянь, побудовану з умови неперервності похідної $S'(t)$ у вузлах сітки і додаткових крайових умов на другу похідну, що мають вигляд:

$$2S''_{i+1} + b_1 S''_i = b_2 b_3 \cdot S''_{i-1} + 2S''_i = b_4. \quad (9)$$

При розв'язанні системи потрібно розглядати два випадки.

У першому випадку, коли відомі значення першої похідної в крайових точках

$$y'_1 = y'(t_1), y'_n = y'(t_n),$$

покладається:

$$b_1 = 1; \quad b_2 = (6/(t_2-t_1))((y_2-y_1)/(t_2-t_1)-y'_1); \quad b_3 = 1; \quad b_4 = (6/(x_n-x_{n-1}))(y'_n - (y_n-y_{n-1})/(x_n-x_{n-1})). \quad (10)$$

$$b_1 = 0; \quad b_2 = 2y''_1; \quad b_3 = 0; \quad b_4 = 2y''_n.$$

У другому випадку, коли відомі значення другої похідної

$$y''_1 = y''(t_1), y''_n = y''(t_n),$$

покладається:

$$b_1 = 0; \quad b_2 = 2y''_1; \quad b_3 = 0; \quad b_4 = 2y''_n. \quad (11)$$

Таким чином, для n відрізків маємо $4n$ шуканих коефіцієнтів.

У реалізованому пакеті спеціалізованого програмного забезпечення як кубічні поліноми використовують криві Без'є, що мають більш зручний аналітичний опис.

Позначимо опорні точки як $P_i, i \in \overline{0,2}$, початок кривої покладемо в точці $P_0 (t = 0)$, а кінець у точці $P_2 (t = 1)$, для кожного $t \in [0,1]$ знайдемо точку P_0^2 (рис. 6):

$$\begin{aligned} P_0^1 &= (1-t)P_0 + tP_1; \\ P_1^1 &= (1-t)P_1 + tP_2; \\ P_0^2 &= (1-t)P_0^1 + tP_1^1 = (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2 P_2. \end{aligned} \quad (12)$$

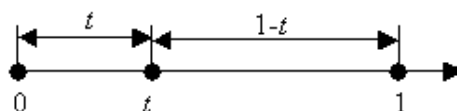


Рис. 6. Побудова кусково-кубічного полінома Без'є

Таким чином, одержимо криву другого порядку (рис. 7, а). Аналогічним методом будуємо криву Без'є з чотирма опорними точками (рис. 7, б):

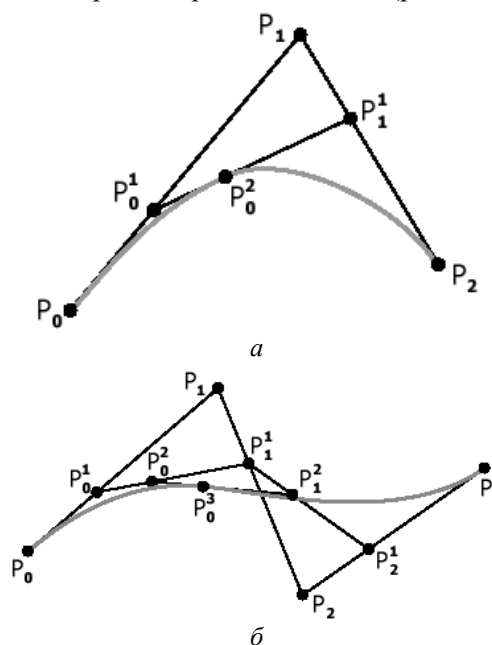


Рис. 7. Крива Без'є з трьома (а) і чотирма (б) опорними точками

$$\begin{aligned} P_0^1 &= (1-t)P_0 + tP_1; \\ P_1^1 &= (1-t)P_1 + tP_2; \\ P_2^1 &= (1-t)P_2 + tP_3; \\ P_0^2 &= (1-t)P_0^1 + tP_1^1 = \\ &= (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2 P_2; \\ P_1^2 &= (1-t)P_1^1 + tP_2^1 = (1-t)^2 P_1 + 2t(1-t)P_2 + t^2 P_3; \\ P_0^3 &= (1-t)P_0^2 + tP_1^2 = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t)P_2 + t^3 P_3. \end{aligned} \quad (13)$$

Загальне аналітичне представлення для кривої Без'є з $n+1$ опорною точкою має вигляд

$$P^n(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_i^n(t), \quad (14)$$

де $B_i^n(t)$ – базисні багаточлени Бернштейна n степеня (вагові функції Без'є–Бернштейна):

$$B_i^n(t) = C_i^n t^i (1-t)^{n-i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i};$$

C_i^n – біноміальні коефіцієнти:

$$C_i^n = \frac{n!}{i!(n-i)!}.$$

На підставі отриманих за формулами (1)–(14) рівнянь регресії скалярних вібропараметрів ГПА виконується оцінка його залишкового ресурсу. Це досягається шляхом екстраполяції ліній тренда на майбутні періоди часу за заданих попереджувального й аварійного рівнів скалярних вібропараметрів ГПА, як це показано на рис. 8.

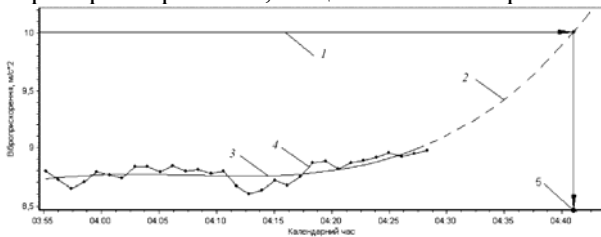


Рис. 8. Оцінка залишкового ресурсу ГПА на основі застосованих методів регресійного аналізу: 1 – попереджувальний рівень вібропараметра; 2 – екстрапольована лінія тренду; 3 – поліноміальна регресія третього порядку; 4 – фактичні значення; 5 – прогнозований залишковий ресурс ГПА

Висновок

Обраний набір відомих ефективних методів регресійного аналізу дозволив авторам реалізувати їх на практиці в пакеті спеціалізованого програмного забезпечення з вібраційного діагностування ГПА, елементи якого подано на рис. 1–8.

Певний інтерес становить вирішення подальшого наукового завдання, яке полягає в побудові алгоритму оцінки залишкового ресурсу ГПА з урахуванням сукупності трендів усіх одночасно вимірюваних на агрегаті вібраційних та інших параметрів.

Література

1. *Надежность систем энергетики и их оборудования*. Справ.: В 4 т. – Т. 3. Кн. 2. Надежность систем газо- и нефтеснабжения / Под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Недра, 1994. – 287 с.
2. *Налисний М.Б., Пустовий С.О.* Контроль технічного стану роторних машин на основі статистичної обробки вібраційних параметрів з застосуванням теорії толерантних меж // Труды академії: Зб. наук. пр. – К.: НАОУ, 2004. – Вип. 53. – С. 312–318.
3. *Налисний М.Б., Пустовий С.О.* Методика оперативної скалярно-спектральної обробки віброакустичної діагностичної інформації // Труды академії: Зб. наук. пр. – К.: НАОУ, 2004. – Вип. 54. – С. 200–207.

Стаття надійшла до редакції 23.03.05.

Э.П. Ясиницкий, Н.Б. Налисний

Прогнозирование технического состояния газоперекачивающих агрегатов с использованием методов регрессионного анализа вибрационных параметров

Предложен набор методов регрессионного анализа, реализованных авторами в пакете специализированного программного обеспечения, который позволяет выполнить автоматизированную оценку остаточного ресурса газоперекачивающего агрегата на основе динамики изменения численных значений его скалярных вибрационных параметров.

E.P. Yasinitsky, N.B. Nalisny

Forecasting of the gas pumping aggregates technical condition at methods regression analysis of the vibration parameters

Composition of the regression analysis methods is offered, which applied by authors in special software package. Presented mathematical associations allows to realize automatic rate of gas pumping aggregate remaining resource based on fluctuation of the scalar vibration parameters values.