

Література

1 Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Том 1. – М.: Машиностроение, 1980.

2 Раабен А.А. Шевалдин Н.Х. Максutow Н.Х. Монтаж и ремонт бурового и нефтепромышленного оборудования. – М.: Недра, 1980.

3 ГОСТ ИСО 10816. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях

4 ГОСТ ИСО 7919/3-2002 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на вращающихся валах. Промышленные машины и комплексы.

5 Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. – 1996 // [www.vibrocenter.ru/book.htm](http://www.vibrocenter.ru/book.htm)

УДК 622.691.4.052.012

## ВПЛИВ ФАКТОРІВ РОБОТИ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ НА ЧАС ЇХ НАПРАЦЮВАННЯ

<sup>1</sup>М.І.Горбійчук, <sup>1</sup>Б.В.Копей, <sup>1</sup>А.Беллауар, <sup>2</sup>І.В.Щупак

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504521

e-mail: [gorb@nung.edu.ua](mailto:gorb@nung.edu.ua)

<sup>2</sup>ДП "Укрметртестстандарт", 03680, м. Київ, вул. Метрологічна, 4, тел. (044) 1265389,

e-mail: [shchurpak@gmail.com](mailto:shchurpak@gmail.com)

Методом самоорганізації моделей отримано рівняння, яке дає можливість по показателям вібрації прогнозувати значення часу наработки газоперекачуючих агрегатів (ГПА) і, як наслідок, визначати його технічний стан як "предупреждение" або як "остановка". Останнє обставина відкриває можливість для переходу від планового обслуговування ГПА до обслуговування по його фактичному технічному стану.

Багаторічна практика експлуатації газоперекачуючих агрегатів (ГПА) на компресорних станціях показала, що в агрегатах з приводом від турбін стаціонарного типу виникає ряд певних дефектів, що впливають на показники надійності ГПА. Ці дефекти викликають основний потік відмов, створюючи високий рівень вібрації, які призводять до поломки деталей і вузлів агрегату. Вибродіагностика ГПА проводиться в два етапи. На першому етапі перевіряється придатність агрегатів до експлуатації і ухвалюється рішення про переведення його в ремонт чи експлуатацію. На цьому етапі реалізується перший рівень регламенту вимірювань і при цьому використовується середньоквадратичне значення вібрації (загальний рівень). На другому етапі вібраційної діагностики проводиться розпізнавання конкретного дефекту, а також прогнозування його розвитку. Основним методом вирішення цього завдання є спектральний аналіз вібрації, який проводиться за допомогою спеціальної апаратури.

Дослідження спектру вібрації стаціонарних газотурбінних ГПА виявило, що у всьому досліджуваному діапазоні частот – від 20 до 2000 Гц спостерігається суцільний безперервний спектр з дискретними викидами на частотах, що відповідають розрахунковим. Рівні віброшвидкості дискретних частотних складових на 10-30 дБ

The method of self-organization of models is used for equalization, which enables the indexes of vibration to forecast the value of time of work aggregate on pumping over of gas (APG) and, as a result, determine his technical state as "warning", or as a "stop". The last circumstance opens possibilities for a transition from the planned maintenance of AGP to service after his actual technical state.

перевищують рівень безперервного спектра. Прийнято рівень безперервного суцільного спектра вважати акустичним шумом, а дискретні частотні складові роторної гармоніки використовувати для виявлення залежності їх рівня від наявності дефекту і ступеня його розвитку.

Дослідження спектрів вібрації проводилося на ГПА типу ГТК-10, встановлених на КС м. Богородчани. Додатково фіксувались: температура вихлопу, осьовий зсув турбіни нагнітача (мм) та ступінь підвищення тиску природного газу.

Постає завдання – виявлення залежностей напрацювання ГПА  $T_w$  від чинників, що характеризують його технічний стан. З цією метою через кожні 2000 годин напрацювання, крім трьох перерахованих вище показників, визначався вібраційний стан агрегату (табл. 1): для турбіни - віброшвидкість підшипників № 1 і № 2 (мм/с); для нагнітача: горизонтальні і вертикальні складові амплітуди опорного та опорно-упорного (ОУП) підшипників (мм) [1].

Методом статистичного аналізу було виявлено, що тільки частина показників впливають на величину  $T_w$  [2]. Серед них: віброшвидкість підшипника № 1 ( $v_h$ ), горизонтальні ( $a_h$ ) та вертикальні ( $a_v$ ) складові амплітуди опорного

Таблиця 1 – Технічний стан ГПА через кожні 2000 годин напрацювання

Дата	t° ви- хлопу, °C	Турбіна		Нагнітач				Осьо- вий зсув, мм	Ступінь підви- щення тиску
		Підшип- ник № 1	Підшип- ник № 2	Опорний		ОУП			
				горизон- тальний	верти- кальний	горизон- тальний	верти- кальний		
06.05.2003	510	4,4	2,3	17	10	12	11	0,22	1,25
28.12.2003	520	5,6	3,0	19	16	11	10	0,28	1,41
05.05.2004	520	5,0	3,8	26	28	11	10	0,25	1,36
14.10.2004	512	5,4	1,7	25	14	15	16	0,27	1,36
06.06.2005	485	5,4	3,4	32	18	16	14	0,20	1,41
21.01.2006	515	4,7	1,9	33	17	17	14	0,18	1,50
07.12.2006	519	4,8	1,9	27	27	13	12	0,22	1,38
04.06.2007	520	3,9	1,8	30	23	13	13	0,18	1,32
07.02.2008	515	3,8	2,1	34	21	11	15	0,24	1,42
01.04.2008	518	3,8	2,0	36	25	12	14	0,22	1,35

підшипника та вертикальна складова ( $A_h$ ) амплітуди ОУП. Отже, будемо шукати залежність

$$T_w = f(v_h, a_h, a_v, A_h). \quad (1)$$

Завдання полягає в тому, щоб за результатами експериментального дослідження ідентифікувати залежність (1), яку можна подати як функціональну залежність між відомим набором факторів  $\bar{x}^T = (v_h, a_h, a_v, A_h)$  і величиною

$$T_w = f(\bar{x}).$$

У дійсності величина  $T_w$  спотворена перешкодою  $e$ . Тому спостереженню доступна інша функція  $\hat{T}_w = \hat{f}(\bar{x}, e)$ . Як правило, припускають, що перешкода  $e$  є адитивною по відношенню до  $T_w$ , тобто

$$\hat{T}_w = \hat{f}(\bar{x}) + e.$$

Таким чином, завданням ідентифікації є знаходження залежності  $\hat{f}(\bar{x})$  за умови дії на досліджуваний об'єкт (ГПА) перешкод, статистичні характеристики, як правило, невідомі.

Проблема знаходження залежності може бути розв'язана двома шляхами. Перший з них передбачає, що залежність  $\hat{f}(\bar{x})$  можна вивести із теоретичних міркувань з точністю до певного числа невідомих параметрів. Зважаючи на надто складний характер залежності (1), отримання її аналітичним шляхом здається малоімовірним.

Другим шляхом є експериментальний підхід. В цьому випадку для побудови математичної моделі повинні бути використані відомості про об'єкт дослідження, на основі яких можна було би зробити висновок про адекватність моделі. Задача знаходження наближення (апроксимації) експериментальних даних до деякої функції має назву задачі ідентифікації, а модель (1), отримана в процесі розв'язання цієї задачі, є емпіричною моделлю.

Як правило, у результаті розв'язання поставленої задачі знаходять регресійну модель, недоліком якої є те, що її структура вибирається довільною. Коефіцієнти моделі розраховуються за методом найменших квадратів (МНК). Такий критерій апроксимації результатів експерименту поліноміальною залежністю (регресійною моделлю) називається [3] внутрішнім критерієм. Вибір внутрішнього критерію призводить до хибного результату: чим складніша модель – тим вона точніша. Складність поліноміальної моделі оцінюється числом і максимальним ступенем доданків. Отримана у такий спосіб математична модель може досить точно описувати табличні дані експерименту, але вона може дати досить хибне уявлення як про структуру моделі, так і про властивості досліджуваного об'єкта. Це пояснюється неточністю вихідних експериментальних даних, оскільки на вимірювані значення факторів  $v_h, a_h, a_v$  і  $A_h$  накладається перешкода, яка значною мірою може спотворювати шукану залежність (1).

Альтернативою такому підходу до побудови математичних моделей є індуктивний метод моделювання [4], заснований на принципі самоорганізації і мінімального обсягу апріорної інформації про об'єкт. На відміну від методу регресійного аналізу, індуктивний метод самоорганізації моделей ґрунтується на зовнішніх критеріях, тобто при його визначенні використовуються нова інформація – експериментальні дані, які не використовувались для синтезу моделі. У відповідності з теоремою Геделя про необхідність зовнішнього доповнення [5] тільки зовнішні критерії дають можливість вибрати єдину модель оптимальної складності. Структура моделі оптимальної складності відповідає мінімуму зовнішнього критерію. Величину мінімального значення критерію – глибину мінімуму – можна розглядати як оцінку якості моделювання і надійності моделі [5].

Характерною особливістю індуктивного методу побудови оптимальних моделей є те, що

початкова вибірка експериментальних даних розбивається на три множини: множина  $A$  – навчальна; множина  $B$  – перевірна і множина  $C$  – екзаменаційна. Множина  $A$  слугує для визначення коефіцієнтів моделей. Вибір моделі оптимальної складності із множини можливих є багатозначною і некоректною задачею [5]. Для того, щоб отримати однозначну модель, додатково формулюють зовнішні критерії як на множині  $B$ , так і на множині  $C$ . До таких критеріїв відносять [5]: критерій регулярності  $\Delta^2(B)$  та критерій зміщення (непротиріччя) моделі  $n_{зм}^2$ .

Критерій регулярності визначає середньоквадратичне відхилення на множині  $B$

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{t \in N_B} (T_{w,t}^{(M)} - T_{w,t})^2}{\sum_{t \in N_B} T_{w,t}^2}, \quad (2)$$

де:  $T_{w,t}^{(M)}$  – експериментальні значення величини  $T_w$  на множині  $B$ .

$T_{w,t}$  – значення величини  $T_w$ , яка розрахована за моделлю оптимальної складності;

$t$  – номери точок відліку  $T_w$  через кожні 2000 годин напрацювання ГПА;

$M$  – кількість елементів (експериментальних точок) множини  $B$ .

Критерій зміщення визначають як середньоквадратичне значення відхилень виходів моделей  $T_{w,t}^A$  і  $T_{w,t}^B$ , визначених на множинах  $A$  і  $B$  для всієї вибірки  $N$

$$n_{зм}^2 = \frac{\sum_{t \in N} (T_{w,t}^A - T_{w,t}^B)^2}{\sum_{t \in N} T_{w,t}^2}. \quad (3)$$

В алгоритмах методу групового врахування аргументів (МГВА) рекомендують такий розподіл даних спостережень:

критерій регулярності –  $N_A = 0,7N$ ;  $N_B = 0,2N$ ;  $N_C = 0,1N$ ;

критерій зміщення –

$N_A = 0,5N$ ;  $N_B = 0,4N$ ;  $N_C = 0,1N$ .

При самоорганізації моделей використовуються деякий генератор моделей-претендентів, який визначає структури різної складності. Самоорганізація (оцінка за критеріями) дає можливість вилучити співвідношення і зв'язки, які є зайвими чи випадковими. Після виключення явно непридатних моделей, інші оцінюються за критерієм (2) або (3) і, як результат, вибирається модель оптимальної складності.

У ході реалізації індуктивного методу моделювання припускається, що модель (1) задана у вигляді поліноміальної залежності

$$T_w = \sum_{t=1}^N a_t \prod_{k=1}^r x_k^{\alpha_{kt}}, \quad \sum_{k=1}^r \alpha_{kt} \leq n, \quad (4)$$

де:  $a_t$  – коефіцієнти моделі, визначають на множині  $A$ ;

$\alpha_{kt}$  – степені аргументів, які приймають значення 0, 1, ...,  $n$  і задовольняють вказаному обмеженню;

$r$  – кількість аргументів моделі (у нашому випадку  $r = 4$ ).

Число  $N$  членів полінома (4) визначається за такою формулою [6]:

$$N = \frac{1}{r!} \prod_{k=1}^r (n+k).$$

Оскільки

$$\prod_{k=1}^r (n+k) = \frac{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot \dots \cdot (n+r)}{n!} = \frac{(n+r)!}{n!},$$

то

$$N = \frac{(n+r)!}{r!n!}. \quad (5)$$

Визначення моделі за алгоритмом оптимальної складності відбувається у два етапи [6]. На першому етапі із повного набору моделей різної складності за критерієм регулярності або зміщення вибирається  $K$  кращих структур. На другому етапі для  $K$  структур, відібраних на першому етапі, перераховуються коефіцієнти на всій вибірці експериментальних даних. При цьому визначається середньоквадратична похибка апроксимації  $\Delta(A+B)$  і екстраполяції  $\Delta(C)$ . Кінцевий вибір моделі здійснюється самим дослідником шляхом порівняльного аналізу структур отриманих  $K$  моделей, середньоквадратичних похибок  $\Delta(A+B)$  та  $\Delta(C)$ .

Відповідно до табл. 1 кількість експериментальних точок  $N_G = 10$ . Оскільки був вибраний критерій регулярності, то отримані дані спостережень були розбиті на дві множини:  $N_A = 7$  і  $N_B = 3$ . Прийемо позначення:  $y = T_w$ ;  $x_1 = v_h$ ;  $x_2 = a_h$ ;  $x_3 = a_v$ ;  $x_4 = A_h$  та виберемо модель (4), у якій  $n \leq 2$ . У результаті отримаємо:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_1^2 + a_6 x_1 x_2 + a_7 x_2^2 + a_8 x_1 x_3 + a_9 x_2 x_3 + a_{10} x_3^2 + a_{11} x_1 x_4 + a_{12} x_2 x_4 + a_{13} x_3 x_4 + a_{14} x_4^2. \quad (6)$$

Для побудови моделі оптимальної складності був вибраний критерій зміщення, а кількість моделей, що підлягали відбору – три.

У середовищі MatLab створено програму, за допомогою якої отримано залежність (1) у вигляді полінома (6). Результат роботи програми відтворює табл. 2 та рис. 1.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів полінома (6)

Коефіцієнти моделей	Моделі оптимальної складності		
	Перша модель	Друга модель	Третя модель
$a_0$	-0.0753312	0.0410446	0.0505501
$a_1$	0.679601	0	0
$a_2$	1.08041	0	0
$a_3$	0.123268	0	0
$a_4$	-0.769022	0	0
$a_5$	-0.265478	0	0
$a_6$	0	0	0
$a_7$	0	0	0
$a_8$	-1.3184	0	0
$a_9$	-1.94017	0	0.398625
$a_{10}$	1.1254	0.187766	0
$a_{11}$	0	0	0
$a_{12}$	0	-0.0242062	0
$a_{13}$	2.0461	1.55785	1.20654
$a_{14}$	0.232751	0	0

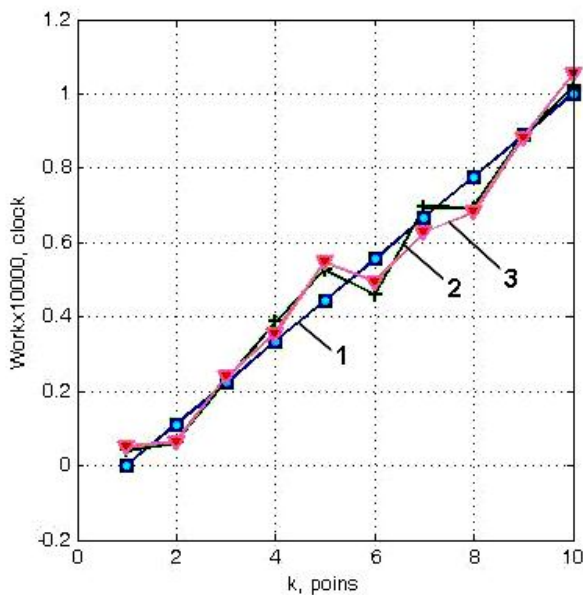


Рисунок 1 – Залежність часу напрацювання від факторів роботи ГПА

Обчислення коефіцієнтів часткових моделей здійснювалось за методом найменших квадратів. Для коректного розв'язання такої задачі необхідно [7], щоб матриця Фішера була добре обумовленою. Як свідчать чисельні розрахунки, цього можна досягти, якщо як вхідні, так і вихідні величини об'єкта привести до безрозмірного вигляду

$$x_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}},$$

$$y_i = \frac{Y_i - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}},$$

де:

$$X_{jmin} = \min_{1 \leq i \leq M} X_{ij}, \quad X_{jmax} = \max_{1 \leq i \leq M} X_{ij},$$

$$Y_{min} = \min_{1 \leq i \leq M} Y_i, \quad Y_{max} = \max_{1 \leq i \leq M} Y_i; \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, r};$$

$M$  – число експериментальних точок (довжина масиви).

Було отримано три моделі

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_1^2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3 + a_{10}x_3^2 + a_{13}x_3x_4 + a_{14}u; \quad (7)$$

$$y = a_0 + a_{10}x_3^2 + a_{12}x_2x_4 + a_{13}x_3x_4; \quad (8)$$

$$y = a_0 + a_{10}x_3^2 + a_{13}x_3x_4. \quad (9)$$

Критерій регулярності для кожної із трьох моделей набув таких значень:

- для першої моделі:  $\Delta^2(B) = 5.42983 \cdot 10^{-15}$ ;
- для другої моделі  $\Delta^2(B) = 0.0943417$ ;
- для третьої моделі  $\Delta^2(B) = 0.0972551$ .

Аналіз отриманих результатів свідчить, що найточніше результати експерименту апроксимує залежність (7). Її графік на рис. 1 позначено цифрою "1".

Отримане рівняння дає можливість за показниками вібрації (віброшвидкість підшипника № 1, горизонтальні та вертикальні складові амплітуди опорного підшипника та вертикальна складова амплітуди ОУП) прогнозувати значення часу напрацювання ГПА і, як наслідок, визначати його технічний стан як "попередження", або як "зупинка". Остання обставина відкриває можливості для переходу від планового обслуговування ГПА до обслуговування за його фактичним технічним станом.

### Література

- 1 Комплексні обстеження наземного механічного технологічного обладнання компресорних станцій магістральних газопроводів. Стандарт підприємства. – К.: ДК "Укртрансгаз", 2002. – 56 с.
- 2 Горбійчук М.І., Копей Б.В., Щупак І.В., Беллауар А. Інформаційні показники технічного стану газоперекачувальних агрегатів природного газу // Методи і прилади контролю якості. – 2008. – № 10.
- 3 Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. – К.: Наукова думка, 1985. – 216 с.
- 4 Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – К.: Наукова думка, 1981. – 296 с.
- 5 Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. – К.: Техніка, 1985. – 219 с.
6. Справочник по типовым программам моделирования / А.Г.Ивахненко, Ю.В.Коппа, В.С.Степашко и др.; под ред. А.Г.Ивахненко – К.: Техніка, 1980. – 180 с.
7. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1987. – 320 с.