

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 622.691.4.052.012

ІНФОРМАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

М. І. Горбійчук¹⁾, Б. В. Коней¹⁾, А. Беллауар¹⁾, І. В. Щупак²⁾

¹⁾Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (80342)504521, e-mail:gorb@nung.edu.ua

²⁾ДП "Укрметртестстандарт", вул. Метрологічна, 4, м. Київ, 03680, тел. (8044)1265389, e-mail:shchupak@gmail.com

Методом статистического анализа информационных показателей газоперекачивающих агрегатов природного газа выявлены основные факторы, которые влияют на техническое состояние этих агрегатов. К таким факторам отнесены виброскорость подшипника № 1, горизонтальные и вертикальные составные амплитуды опорного подшипника и вертикальная составляющая амплитуды опорно-упорного подшипника.

Багаторічна практика експлуатації газоперекачувальних 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 приводять до поломок деталей і вузлів агрегату. Вібродіагностика 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 здійснюють розпізнавання конкретного дефекту, а також прогнозування його розвитку. Основним методом вирішення цієї задачі є спектральний аналіз вібрації, який проводиться за допомогою спеціальної апаратури.

Дослідження спектру вібрації стаціонарних газотурбінних ГПА виявило, що

Found out the method of statistical analysis of informative indexes of aggregates of pumping over of natural gas basic factors which influence on their technical state. To such factors attributed is speed of vibration of bearing № 1, horizontal and vertical component amplitudes of the supporting bearing and vertical constituent of amplitude of the persistent bearing.

на всьому досліджуваному діапазоні частот від 20 до 2000 Гц спостерігається суцільний безперервний спектр з дискретними викидами на частотах, відповідних розрахунковим. Рівні віброшвидкості дискретних частотних складових на 10-30 дБ перевищують рівень безперервного спектру. Прийнято рівень безперервного суцільного спектру вважати акустичним шумом, а дискретні частотні складові роторні 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 компресорній станції м. Богородчани. Статистична обробка експериментальних даних дозволила встановити діагностичні ознаки дефектів, а для визначення діагностичної ознаки бездефектного агрегату проведено теоретичне обґрунтування зменшення амплітуд роторних гармонік спектру віброшвидкості згідно із законом, близьким до експоненціального.

Останнім часом намітилась тенденція переходу від планового обслуговування ГПА

природного газу до обслуговування їх за технічним станом. Для вирішення цієї проблеми необхідно виявити інформаційні показники, які визначають технічний стан ГПА і на цій основі побудувати математичну модель, за допомогою якої можна було б визначити такі стани ГПА, як "попередження" та "зупинка". При досягненні стану "зупинка" ГПА детально обстежується і вирішується питання про необхідність його ремонту.

У даній статті вирішується перша частина задачі – виявлення основних факторів, які впливають на технічний стан ГПА. З цієї метою через кожні 2000 годин наробітку визначались такі показники стану ГПА, як температура вихлопу ($^{\circ}\text{C}$), ступінь підвищення тиску газу, осьовий зсув турбіни нагнітача (мм), а також вібраційний стан агрегату (табл.1). Для турбіни: віброшвидкість (мм/с) підшипників №1 і №2. Для нагнітача: горизонтальні і вертикальні складові амплітуди опорного та опорно-упорного (ОУП) підшипників (мкм) [1]. Обстеження наземного механічного технологічного обладнання проводилося у відповідності з відомими методиками [1,2]. За отриманими експериментальними даними були побудовані графіки зміни інформаційних ознак у функції від часу наробітку, аналіз яких показав, що вони мають певний тренд.

Найбільш поширеним методом виявлення тренду є апроксимація даних багаточленом невисокого порядку ($n \leq 3$) за допомогою методу найменших квадратів [3].

Якщо заданий поліном порядку n

$$y = a_0 + a_1u + a_2u^2 + \dots + a_nu^n \quad (1)$$

і маємо N даних ($N \geq n$), то параметри апроксимуючого полінома обчислюють шляхом мінімізації квадрату різниць експериментально отриманої послідовності $\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_N$ і значень багаточлена, які обчислені при $u = u^{(1)}, u = u^{(2)}, \dots, u = u^{(N)}$. Ці значення позначимо через y_1, y_2, \dots, y_N . Тоді мінімізація виразу

$$Y(\bar{a}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - y_i)^2 \quad (2)$$

дає можливість визначити параметри a_0, a_1, \dots, a_n полінома (1). Слід зауважити, що в результаті мінімізації $Y(\bar{a})$ отримують не дійсні значення параметрів полінома (1), а його оцінки, які є випадковими величинами. Це пояснюється обмеженим числом даних, які отримані в рамках експериментального дослідження.

Мінімізація виразу (1) приводить до такого результату [3]:

$$\bar{a} = CF^T \tilde{Y}, \quad (3)$$

де $\bar{a}^T = (a_0, a_1, \dots, a_n)$ – вектор оцінок параметрів полінома (1); C – дисперсійна матриця;

Таблиця 1 – Технічний стан ГПА через кожні 2000 годин наробітку

Дата	Т-ра вихлопу	Турбіна		Нагнітач				Осьовий зсув	Ступінь підвищення тиску
		Підшипник № 1	Підшипник № 2	Опорний		ОУП			
				горизонтальний	вертикальний	горизонтальний	вертикальний		
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

$$F = \begin{bmatrix} 1 & u^{(1)} & u^{(1)2} & \dots & u^{(1)n} \\ 1 & u^{(2)} & u^{(2)2} & \dots & u^{(2)n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & u^{(N)} & u^{(N)2} & \dots & u^{(N)n} \end{bmatrix} \quad - \quad \text{матриця}$$

розміром $N \times (n+1)$; $\tilde{Y}^T = (\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_N)$ – вектор даних; T – символ операції транспортування матриць.

Дисперсійна матриця $C = M^{-1}$, де $M = F^T F$, F – матриця Фішера.

В нашому випадку був вибраний поліном першого порядку ($n = 1$)

$$y = a_0 + a_1 u, \quad (4)$$

де u – має зміст часу $t = k\Delta t$ (Δt – наробіток ГПА через кожні 2000 год.), y – один із дев'яти інформаційних параметрів ГПА (табл. 1).

У результаті обчислень за формулою (3) були визначені параметри a_0 і a_1 регресійної моделі (4) (табл. 2), аналіз якої показує, що цілий ряд значень коефіцієнта a_1 близький до нуля і можна поставити запитання: Чи дійсно $a_1 = 0$, а його відмінність від нуля є випадковою? Чи в дійсності вихідні дані мають тренд?

Висунемо гіпотезу $H_0: a_1 = 0$ і альтернативну їй гіпотезу $H_1: a_1 \neq 0$.

Введемо безрозмірну t_{st} – статистику Стьюдента

$$t_{st} = \frac{a_1 - \mu_0}{S_{a_1}},$$

де $\mu_0 = M[a_1]$ – математичне сподівання

випадкової величини a_1 , $S_{a_1}^2$ – оцінка дисперсії випадкової величини a_1 .

Дисперсія $S_{a_1}^2$ обчислюється за формулою [4]:

$$S_{a_1}^2 = (c_{1,1})S_y^2,$$

де $c_{1,1}$ – діагональний елемент дисперсійної матриці C , $S_y^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{j=0}^{N-1} (\tilde{y}_j - y_j)^2$ – дисперсія вихідної величини.

Якщо виконується умова $|a_1| < t_{1-\alpha/2} S_{a_1}$ [3], то гіпотеза H_0 приймається.

Результати обчислень, які наведені у табл. 2, показують, що має місце як гіпотеза H_0 , так і альтернативна гіпотеза H_1 . Тут можуть мати місце два випадки.

По-перше, може мати місце помилка другого типу, коли гіпотеза H_0 відкидається, хоча насправді вона є вірною. Такі помилки виникають тоді, коли об'єм вибірки обмежений. Нехай β – ймовірність помилки другого типу. Тоді при будь-якому розмірі вибірки N ймовірність помилки першого типу можна зробити досить малою за рахунок зменшення рівня довіри α . Але при цьому зростає ймовірність β помилки другого типу. Єдиний спосіб одночасно зменшити α і β полягає у збільшенні розміру вибірки N [3].

По-друге, на протязі вказаного проміжку часу дійсно мав місце тренд і інформаційний параметр в середньому збільшувався (зменшувався). Але таке збільшення (зменшення) може бути незначним і ним можна

Таблиця 2 – Аналіз технічного стану ГПА (через 2000 годин наробітку)

Показники технічного стану ГПА		Параметри регресії		Гіпотеза H_0 ($a_0 = 0$)		
		a_0	a_1			
Температура вихлопу		510,4667	0,5333	Приймається		
Вібрація	Турбіна	підшипник № 1	5,5467	-0,1576	Не приймається	
		підшипник № 2	3,0533	-0,1206	Приймається	
	Нагнігач	Опорний	горизонтальна	17,8	1,8364	Не приймається
			вертикальна	13,8	1,1091	Не приймається
		ОУП	горизонтальна	12,9333	0,0303	Приймається
			вертикальна	10,7333	0,3939	Не приймається
Осьовий зсув		0,2527	-0,0048	Приймається		
Ступінь підвищення тиску газу		1,348	0,0054	Приймається		

знехтувати. Для оцінки можливих діапазонів зміни оцінки \hat{y} в часі побудуємо довірливий інтервал для лінії регресії (4).

Верхню і нижню межі довірливого інтервалу обчислюємо за формулами [4]:

$$U_i = Y_i + t_{1-\alpha/2} S_i; \quad (5)$$

$$L_i = Y_i - t_{1-\alpha/2} S_i, \quad (6)$$

$$\text{де } S_i^2 = S_y^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(t_i - t_c)^2}{\sum_{j=0}^{N-1} (t_j - t_c)^2} \right], \quad t_c = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=0}^{N-1} t_j.$$

Для інформаційних параметрів, перелік яких наведений у табл. 1, рівень довіри $\alpha = 0,1$. Як приклад аналізу одного із інформаційних показників розглянемо горизонтальну складову амплітуди вібрації h опорного підшипника нагнітача. У відповідності з формулою (3) були знайдені коефіцієнти моделі (4): $a_0 = 17,8$; $a_1 = 1,8364$. Оскільки перевіряється гіпотеза, що $a_1 = 0$, то $\mu_0 = M[a_1] = 0$. Знаходимо $S_{a_1}^2 = 0,35396$, а для рівня довіри $\alpha = 0,1$ і $N - 2$ степенів свободи статистика Стьюдента $t_{1-\alpha/2} = 1,8595$. Так як $a_1 = 1,8364$ і $t_{1-\alpha/2} S_{a_1} = 0,6582$, то має місце нерівність $|a_1| > t_{1-\alpha/2} S_{a_1}$ і приймається альтернативна гіпотеза H_1 ($a_1 \neq 0$). Детальніше результати аналізу відтворює рис. 1.

Таким чином, зроблений статистичний аналіз інформаційних показників показав, що частина із них не змінюється з плином часу і не впливає на технічний стан ГПА. Інша частина (віброшвидкість підшипника № 1, горизонтальні та вертикальні складові амплітуди опорного підшипника та вертикальна складова амплітуди ОУП) змінюється у часі внаслідок зношення механічних деталей ГПА, що може привести до необхідності зупинку агрегату для його

подальшого ремонту. Отримані результати можуть бути використані для розробки методу прогнозування технічного стану ГПА, що дозволить перейти від планового обслуговування до його обслуговування за технічним станом.

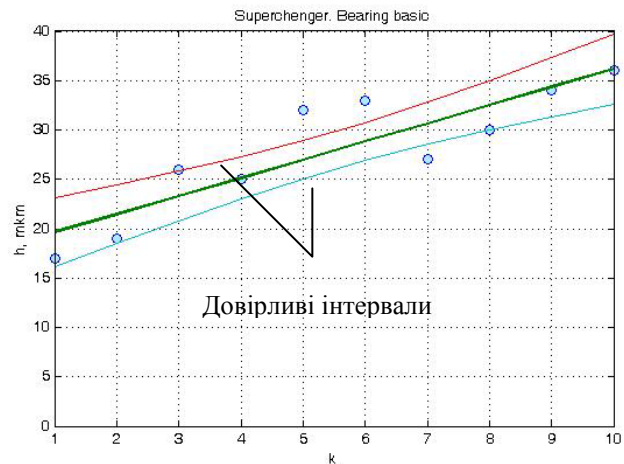


Рисунок 1 – Зміна у часі амплітуди вібраційного стану опорного підшипника нагнітача (горизонтальна складова вібрації)

Література

1. Комплексні обстеження наземного механічного технологічного обладнання компресорних станцій магістральних газопроводів. Стандарт підприємства. – К.: ДК "Укртрансгаз", 2002. – 56 с.
2. Компресорні станції. Контроль теплотехнічних та екологічних характеристик газоперекачувальних агрегатів. СОУ. – К.: ДК "Укртрансгаз", 2004. – 117 с.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
4. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 958 с.