

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

Я.В. Грудз

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157,
e-mail: public@nuing.edu.ua

Розглядаються методи індивідуального прогнозування технічного стану газоперекачувального агрегату, в основі яких лежить положення, згідно з яким за результатами вимірювання параметрів установлюються закономірності їх зміни і робиться висновок про справність агрегату до моменту часу в майбутньому відносно моменту контролю. Заключення про справність агрегату до заданого моменту часу видається у вигляді ймовірності його безвідмовної роботи

Методи прогнозування шляхом екстраполяції результатів вимірів параметрів найповніше враховують індивідуальні особливості контрольованого об'єкта та за наявності зв'язку між послідовними вимірами дозволяють отримати кращу, порівняно з іншими методами, точність прогнозу. Практичне застосування цих методів забезпечує підвищення ефективності використання для попередження відмов всієї інформації про стан агрегату у вигляді результатів вимірів параметрів, що накопичуються при контролі під час експлуатації.

Ключові слова: газоперекачувальний агрегат, прогнозування, технічний стан

Рассматриваются методы индивидуального прогнозирования технического состояния агрегата для перекачивания газа, в основе которых лежит положение, согласно которому за результатами измерений параметров устанавливаются закономерности их изменения и делается вывод об исправности агрегата к моменту времени в будущем относительно момента контроля. Вывод об исправности агрегата к заданному моменту времени выдается в виде вероятности его безотказной работы

Методы прогнозирования путем экстраполяции результатов измерений параметров полнее всего учитывают индивидуальные особенности контролируемого объекта и при наличии связи между последовательными измерениями позволяют получить, по сравнению с другими методами лучшую точность прогноза. Практическое применение этих методов обеспечивает повышение эффективности использования для предупреждения отказов всей информации о состоянии машины в виде результатов измерений параметров, которые накапливаются при контроле во время эксплуатации.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, прогнозирование, техническое состояние

Based on the provision that the regularities in parameters variations are established as a result of their measurements, some methods of individual prediction of gas-compressor unit equipment performance are considered. On the same basis, the prediction concerning unit serviceability at a certain moment in the future is made, with the control measurements data in view. The conclusion as to the serviceability of the unit at a given future moment is formulated as a probability of its survival.

Employing extrapolation of measurements results as a predicting method enables utmost considering individual characteristics of the object under control. Compared with other methods, extrapolate on of the results in combination with providing connection among consecutive measurements provides better prediction accuracy. In practice, application of individual predicting methods aimed at preventing failure at the object under control enhances the efficiency of using information on the technical condition of the unit, accumulated during its operation.

Key words: gas-compressor unit, predicting, serviceability

Прогнозування стану полягає у встановленні моменту виникнення несправності та досягання газоперекачувальним агрегатом (ГПА) стану втрати працездатності. Ця інформація є базовою для планування термінів і об'ємів технічного обслуговування та ремонтів, оптимізації режимів роботи, необхідного об'єму поставки запасних частин. Дані спостереження за станом агрегату в минулому є вихідною інформацією для прогнозу і планування заходів у майбутньому. Залежно від часу попередження під час експлуатації технічних об'єктів розрізняють оперативне-календарне планування та поточне економічне планування.

Із збільшенням часу попередження потрібно розширювати інформацію про минуле. Перспективна інформація, що розробляється у ході планування, має ймовірнісний характер і певну достовірність у межах довірчого інтервалу.

Прогноз – ймовірнісне судження про стан ГПА, а процес формування прогнозу зміни стану агрегату на основі аналізу тенденцій розвитку є прогнозуванням. Метою аналізу об'єкта прогнозування є розроблення прогностичної моделі, що дає змогу отримати прогнозу інформацію. У ході аналізу обираються методи прогнозування, адекватні цілям прогнозування та об'єкта.

Прогнозування стану агрегату включає три етапи: уточнення опису ГПА; попереднє вирішення проблеми джерел інформації; попереднє вирішення проблеми вимірювання характеристик ГПА.

Сучасні прогностичні моделі об'єктів будуються здебільшого в термінах статистичних моделей, використовуються також ймовірнісні та аналітичні методи. Вибір способу прогнозування визначається методами оцінки стану і

пошуку несправностей: аналітичні методи найбільш доцільні для логічного діагностування. Основними методами індивідуального прогнозування з урахуванням передісторії зміни технічного стану ГПА є методи, засновані на екстраполяції функції, побудовані за результатами вимірів діагностичного параметра.

Для прогнозування вибираються діагностичні параметри, що містять кількісну інформацію. Суть індивідуального прогнозування полягає в тому, що за результатами вимірювання параметрів встановлюються закономірності їх зміни і робиться висновок про справність агрегату до моменту часу в майбутньому відносно моменту контролю. Якщо несправність описується декількома ознаками, то прогнозування виконується за всіма цими ознаками, причому за час появи несправності приймається час досягнення граничного значення останньою із ознак. У випадку, коли несправність описується двома або декількома незалежними ознаками, прогнозування виконується за кожною з них, причому час відмови визначається за ознакою, яка першою досягне граничного значення.

Висновок про справність агрегату до заданого моменту часу подається у вигляді ймовірності його безвідмовної роботи, тобто ймовірності, що параметр не вийде за межі поля допуску або значення очікуваного параметра.

Методи прогнозування шляхом екстраполяції результатів вимірів параметрів найповніше враховують індивідуальні особливості контрольованого об'єкта і за наявності зв'язку між послідовними вимірами дають змогу отримати більшу, в порівнянні з іншими методами, точність прогнозу. Практичне застосування методів індивідуального прогнозування з метою попередження відмов контрольованого агрегату підвищує ефективність використання накопиченої у ході експлуатації інформації про його технічний стан.

Математичний апарат прогнозування включає елементи числового аналізу і теорії випадкових функцій [1, 2].

Нехай контрольований процес, що характеризує стан об'єкта діагностування, набуває значень $y(\tau_0), y(\tau_1), \dots, y(\tau_n)$ в періоди часу $0 < \tau < \tau_n^*$, які зафіксовані вимірювальними приладами. Необхідно за відомими значеннями $y(\tau)$ контрольованої функції в минулому ($\tau_i \in \tau^*$) передбачити майбутні значення величин $y(\tau_{n+1}), \dots, y(\tau_{n+m})$, де $\tau_{n+1} \in \tau > \tau^*$. Сформульований у такий спосіб принцип прогнозування називається аналітичним.

Якщо контрольована функція змінюється монотонно, і похідна не змінює знак, то можна застосовувати аналітичне прогнозування, яке якнайкраще описує контрольовані функції на ділянці $\tau > \tau^*$. Нехай існує функція $y(\tau)$, задана дискретними значеннями $y(\tau_0), y(\tau_1), y(\tau_2), \dots, y(\tau_n)$. Необхідно підібрати такий аналітичний вираз $Y(\tau)$, щоб в моменти часу $\tau_i \in \tau^*$ виконувались умови:

$$Y(\tau_0) = y(\tau_0);$$

$$Y(\tau_1) = y(\tau_1);$$

$$\dots \dots \dots$$

$$Y(\tau_n) = y(\tau_n),$$

а в моменти часу $\tau_j \in \tau > \tau^* -$

$$Y(\tau_{n+1}) = y(\tau_{n+1}) + \epsilon_1 /;$$

$$Y(\tau_{n+1}) = y(\tau_{n+1}) + \epsilon_1 /;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$Y(\tau_{n+1}) = y(\tau_{n+1}) + \epsilon_1 /;$$

при цьому $\epsilon_i = \min$ та із послідовної системи рівнянь визначаються значення $y(\tau_{n+k})$ тощо.

Величини ϵ_i можуть бути визначені експериментальним шляхом для конкретних реалізацій $y(\tau)$. Нехай за прогнозуючу функцію обрано многочлен $Y(\tau)$ у вигляді

$$Y(\tau) = \sum_{i=1}^k A_i F_i(\tau),$$

де $F_i(\tau)$ – складові функції;
 A_i – вагові коефіцієнти складових функцій.

Приймаємо умови $\sum_{i=1}^m A_s = 1$, які спрощують розрахункові операції.

Оскільки значення $y(\tau)$ відомі в зоні $0 < \tau < \tau_n^*$, то $F_i(\tau)$ та A_i можуть також визначатися тільки в цій зоні. Зона $0 < \tau < \tau_n^*$ розбивається на декілька ділянок. Для монотонних функцій достатньо мати дві ділянки $T_1 \in T_1$ та $T_1^{(2)} \in T_1$. На першій ділянці $T_1^{(1)}$ визначається складова функція, яка в загальному випадку може мати вигляд

$$F(\tau) = \sum_{i=0}^k \alpha_i \varphi_i(\tau),$$

де $\varphi_i(\tau)$ – функція найпростішого вигляду;
 α_i – невідомі коефіцієнти.

Коли $\varphi_0(\tau) = 1, \varphi_1(\tau) = \tau, \dots, \varphi_k(\tau) = \tau^k$, тоді рівняння набуде вигляду

$$F(\tau) = \sum_{i=0}^k \alpha_i \tau^i.$$

В результаті задача зводиться до визначення коефіцієнтів поліному $\alpha_i = f[y(\tau_i)]$. На ділянці $T_1^{(2)}$ визначаються вагові коефіцієнти A_i . З огляду на те, що складові функції $F_i(\tau)$ знайдені як функції від поточного часу, значення A_i можуть бути знайдені на ділянці $T_1^{(2)}$. Тоді значення вагових коефіцієнтів A_i визначаються із такої системи рівнянь:

Таблиця 1 – Вибірка вимірів значень потужності

τ, тис. г.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
N _{e1} , кВт	9600	9700	10000	9800	9800	9700	0600	9700	9650	9600	9550
N _{e2} , кВт	9600	9800	10000	10100	10100	10000	10000	9800	9800	9750	9700

$$y(\tau_{r+1}) = \sum_{i=1}^m A_i F_i(\tau_{r+1})$$

$$y(\tau_{r+2}) = \sum_{i=1}^m A_i F_i(\tau_{r+2})$$

.....

$$y(\tau_n) = \sum_{i=1}^m A_i F_i(\tau_n)$$

$$\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_r \in T_1^{(1)}; \quad \tau_{r+1}, \tau_{r+2}, \dots, \tau_n \in T_1^{(2)}.$$

Таким чином, прогнозний многочлен визначається розв’язком одержаної системи рівнянь. Перевагою прогнозного многочлена є те, що в нього можна підставляти деякі стандартні базові поліноми, а ваговими коефіцієнтами коректувати їх та підвищувати точність прогнозування.

Як прогнозні функції застосовуються стандартні базові поліноми Лагранжа та Ньютона. Аналіз кривих змін параметрів окремих елементів ГПА вказує на можливість їх апроксимації порівняно простими виразами. У разі зміни параметрів цих елементів переважає необоротна складова, яка в основному визначає закон зміни параметра і має майже детермінований характер. При розв’язанні багатьох практичних задач успішно застосовуються елементарні математичні функції.

Математичний опис аналітичними залежностями зміни роботоздатності виробів здійснюється здебільшого експериментально-статистичними методами. Успішна побудова математичної моделі одного-двох факторів у багатьох практичних випадках дозволяють вирішити задачу прогнозування.

Коефіцієнти прогнозних поліномів знаходяться на основі обробки диспетчерської інформації за контрольованими робочими параметрами, тобто неперервна функція $y(\tau)$ замінюється її оцінкою $\hat{y}(\tau)$, де A_i – коефіцієнти розкладу $y(\tau)$ в ряд за відомими базисними функціями. Робочі параметри на компресорних станціях замірнюються щогодини. Якщо зафіксовано відхилення робочого параметра від номінального значення, виконується обробка результатів вимірів з метою оцінки зміни технічного стану ГПА компресорних станцій магістральних газопроводів, а також для прогнозування значень параметрів.

Загалом вибір екстраполяційних поліномів здійснюється після згладжування результатів вимірів з метою мінімізації випадкових відхилень результатів вимірів від кривої допустимого тренда процесів. В найпростішому випадку функція згладжування лінійна і проходить че-

рез попередню і наступну за аналізовану точки, в більш складному випадку нелінійної функції використовується група з довільного числа точок, причому ступінь складності апроксимуючого поліному залежить від характеру відхилення результатів вимірів.

Вигляд екстраполяційної функції апріорно визначається для кожного робочого параметра і залежить від характеру технологічного процесу, який він кількісно визначає. Для процесів накопичування втоми і термічних пошкоджень, зносу найбільш відповідає експоненціальна функція [3], також для прогнозування параметрів використовуються лінійні та параболічні залежності. Зміна вигляду апроксимуючої функції є ознакою появи несправності.

Оцінка частоти опитування робочих параметрів проведена на основі апріорних даних про надійність системи. Період опитування температури вибирається так, щоб знизити ймовірність появи відмови газоперекачувального обладнання.

Для експоненціальної залежності розподіл напрацювання T на одну відмову, ймовірність появи відмови дорівнює:

$$P(T) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right);$$

після розкладання в ряд:

$$P(T) \approx \frac{t_0}{t};$$

звідси частота опитувань

$$n \geq (1/t_0).$$

Критерієм оцінки технічного стану агрегату є коефіцієнт відношення потужності.

$$K_{Ne} = \frac{N_{enp}^t}{N_e^0} \geq 0,95.$$

Як зазначалось вище, процеси зносу, накопичення втоми і термічних пошкоджень найкраще описуються експоненціальною функцією [3]. Експоненціальна модель показує, що процеси швидкості накопичення ушкоджень є функцією накопичення ушкоджень. Цій залежності добре відповідає зміна потужності ГПА на КС у міжремонтний період, а також залежність зміни ККД елементів агрегату. Вибірку вимірів значень потужності наведено в таблиці 1.

Оскільки зміна потужності досить добре узгоджується з нормальним законом розподілу випадкових величин, оцінку значення знаходимо за формулою:

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{10 \sum_{i=1}^{10} y_i} = 9700 \quad \bar{y}_2 = 9900.$$

N,кВт														
	9500		x x		x x									
		x		.						x				
		.			.			x			x			
					.			.		.				
		x								
	9000											x		
											.			
		2	4	6	8	10	12	τ						

... – до очищення агрегату; xxx – після очищення агрегату

Рисунок 1 – Прогнозування зміни потужності

Наявність грубої помилки у вибірці перевіряється за гіпотезою:

$$S_{1y} = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (y_i - \bar{y})^2} = 120, \quad S_{2y} = 150.$$

З рівень значущості критерію перевірки гіпотези для $q = 10\%$, $n = 10$, $q_{pn} = 3$, тоді

$$\bar{U}_{pn}^- = \bar{y} - Sq_{pn};$$

$$\bar{U}_{pnq}^- = 9700 - 120 \cdot 3 = 9340;$$

$$\bar{U}_{pn1}^+ = 10060; \quad \bar{U}_{pn2}^+ = 12000; \quad \bar{U}_{pn2}^- = 9450.$$

Оскільки $y_{\min} > U_{pn}^-$, $y_{\max} < U_{pn}^+$, то грубих помилок немає.

Довірчий інтервал для оцінюваного параметра – це такий інтервал, який утримує з заданою близькою до одиниці ймовірністю Р параметру, що оцінюється \hat{y} . При $P = 0,95$ будемо довірчий інтервал. При $q = 5$, $n = 1$ за таблицею розподілу Стюдента визначається параметр t_q , тоді верхня межа довірчого інтервалу $I_y(y_-, y_+)$ –

$$y_+ = \bar{y} + \frac{S_y t_q (n-1)}{\sqrt{n-1}} = 10400;$$

нижня межа –

$$y_- = \bar{y} - \frac{S_y t_q (n-1)}{\sqrt{n-1}} = 9600;$$

I_y – утримує параметр y , що оцінюється, із ймовірністю $Z = 0,95$ та I_y є мірою надійності оцінки параметра y . Для оцінки значення потужності на майбутній момент контролю будеться апроксимуюча функція у вигляді:

$$y = ay^{-bx}.$$

Коефіцієнти функції відповідно визначаються за формулами

$$b = (\ln y - \ln a)/x \quad a = ye^{-(\ln y - \ln a)},$$

значення потужності при $\tau = 11$, розраховане за моделлю, дорівнює відповідно:

$$N_{e1} = 9580 < N_e^-; \quad N_{e2} = 9600 > N_e^-,$$

точність прогнозування оцінюється за відношенням середньоквадратичної похибки прогнозу до середньоквадратичного відхилення параметра: $\tilde{\sigma} = \sigma/\bar{\sigma}$. За цим критерієм порівнюються точності розглянутих методів прогнозування.

Оскільки вимірювання робочих параметрів на компресорних станціях проводиться через невеликі проміжки часу (щогодини), то короткострокове прогнозування діагностичних параметрів досить добре описується лінійними моделями (рис. 1 – 2) у вигляді:

$$y = a + b\tau.$$

Коефіцієнти a та b визначаються під час обробки даних контролю робочих параметрів за методом найменших квадратів з використанням стандартних комп'ютерних програм.

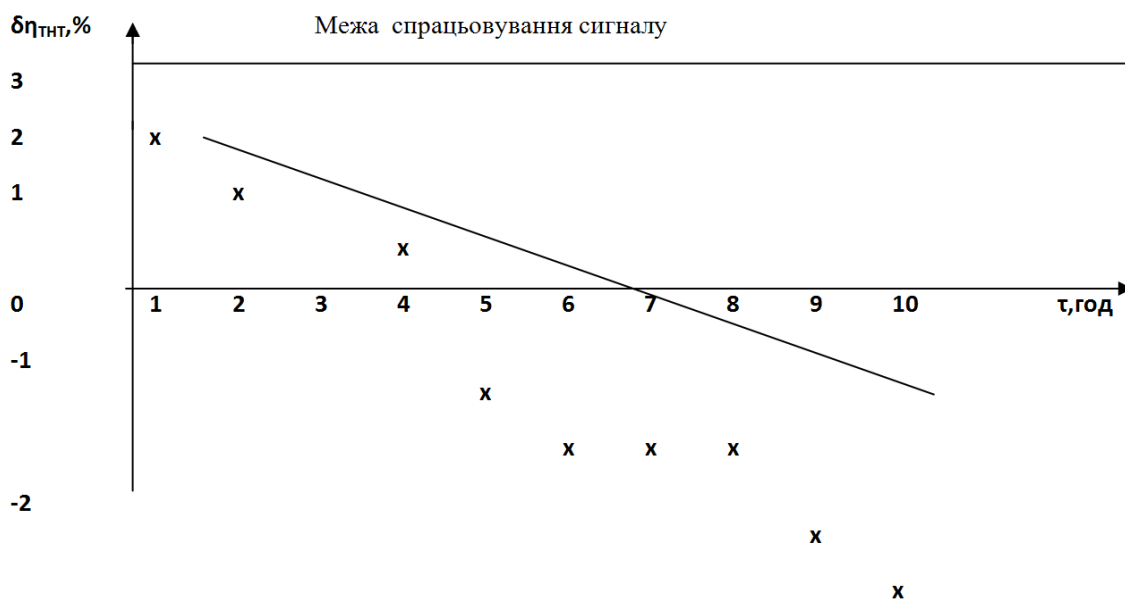


Рисунок 2 – Прогнозування зміни швидкості ТНТ

Висновок про справність агрегату в майбутньому по відношенню до моменту контролю робиться на підставі значення очікуваного робочого параметра. Це виявляється краще, ніж інформація про ймовірність безвідмовної роботи, бо дозволяє, по-перше, розрахувати значення функціонально пов'язаних параметрів та значення комплексних параметрів для оцінки працездатності вузлів агрегату, по-друге, за зміною стану робочих параметрів до моменту контролю ідентифікувати можливу несправність, причому зміна вигляду кривої прогнозування може бути ознакою виникнення несправності.

Література

- 1 Волков Е.Б. Основы теории надежности ракетных двигателей / Е.Б. Волков, Р.С. Судачков, Т.А. Сырицын. – М.: Машиностроение, 1974. – 476 с.
- 2 Мозгалевский А.В. Техническая диагностика / А.В. Мозгалевский, Р.Д. Гаскаров. – М.: Выс. школа, 1975. – 205 с.
- 3 Глезер Б.И. Современные методы диагностики конструктивной прочности и технического состояния деталей газотурбинных установок на компрессорных станциях / Б.И. Глезер. – М.: Транспорт и хранение газа, 1974. – 65 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
09.10.12
Рекомендована до друку професором
Грудзом В.Я.*