УДК 621.438.622

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ

[1]А.З.Багнюк, [1]В.Я. Грудз, [1]О.Т. Мартинюк, [2]Р.М.Терефенко

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

[2] БМК "Укргазпромбуд", м. Івано-Франківськ, вул. Галицька 57а, тел. 8 (0342) 965430

Рассмотрены вопросы прогнозирования технического состояния и ресурса газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций газопроводов. Приведены рекомендации по выбору функций, аппроксимирующих изменений параметров состояния.

The article deals with forecasting of technical state and resource of gas-pumping aggregates of compression stations. Recommendations have been given on selecting functions that approximate changes of state parameters.

У зв'язку зі старінням об'єктів систем транспортування газу на далекі відстані велике значення надається питанням прогнозування ресурсу газоперекачувальних агрегатів (ГПА) на компресорних станціях (КС), газопроводів і показників надійності їх експлуатації.

Основою теорій прогнозування служить прогностика – наука, що вивчає поведінку прогнозованих систем залежно від зміни прогнозуючих параметрів. Основна задача прогнозування полягає в передбаченні поведінки системи-функції за відомої поведінки системи-аргумента у визначений час чи у визначеній ситуації.

Повний цикл прогнозування складається з трьох етапів. Перший етап – ретроспектива – полягає в дослідженні прогнозованого процесу в минулому виявленні і уточненні характеристик і структурних параметрів та змін цих показників. На другому етапі – діагностуванні – встановлюються початкові і допустимі значення параметрів, вимірюють їхній тренд і вибирають методи прогнозування. Третій етап – прогноз – передбачає поведінку системи в майбутньому.

На перших двох етапах зміну параметрів технічного стану машин і їх відхилення від номінальних значень слід апроксимувати деякими функціями. Від вибору цих апроксимуючих функцій залежить подальша методика прогнозування і точність передбачення. Тому до вибору апроксимуючих функцій необхідно приділяти особливу увагу.

Класичними працями в галузі надійності і прогнозування технічного стану машин є роботи Міхліна В.М., Мозгалевського А.В., Ставровського Е.Р., Сухарєва М.Г., в яких розглядаються системи, пов'язані з автомобільним транспортом. Об'єкти і специфіка трубопровідного транспорту накладають певні особливості на зміну технічного стану системи. У галузі трубопровідного транспорту визначальними роботами слід вважати праці Бородавкіна П.П., Паршакова Б.П. Однак розширення діапазону знань у даній галузі з плином часу експлуатації вимагає доопрацювання і конкретизації задач прогнозування технічного стану обладнання.

Зміна параметрів технічного стану газоперекачувальних агрегатів компресорної станції підкоряється складним залежностям. Тому в практичних цілях відхилення параметрів від номінальних значень звичайно виражають з достатньою точністю простими апроксимуючими функціями. У розробці методів прогнозування стану елементів агрегату дуже важливо установити визначену апроксимуючу функцію. Від її вибору залежать похибка і трудомісткість прогнозування і в остаточному підсумку весь процес керування показниками надійності машин.

Вимоги, пропоновані до математичного обґрунтування апроксимуючої функції відхилення параметра, зводяться до наступного. Функція повинна: враховувати фізичну картину відхилення параметра, зокрема зовнішні і внутрішні чинники, випадкову величину швидкості і характер зміни параметра, міжконтрольне напрацювання, бути зростаючою, відображати інтегральний характер відхилення параметра стану елемента залежно від напрацювання чи терміну служби; бути простою універсальною; містити невелике число коефіцієнтів для полегшення прогнозування.

З аналізу чинників, що впливають на процес зміни параметрів, і вимог, пропонованих до математичного опису цього процесу, випливають деякі загальні положення. Відхилення параметра стану залежно від напрацювання або часу необхідно апроксимувати випадковою упорядкованою функцією зі зростаючими реалізаціями. Значення $u(t)$ функції у фіксований момент є позитивною багатозначною величиною. Реалізацію зміни параметра можна розглядати як монотонну, тобто не завжди зростаючу функцію в діапазоні від нуля до граничного відхилення параметра.

З урахуванням заводських і експлуатаційних чинників, які мають вплив на зміну параметра, можна досліджувати його відхилення в будь-який момент напрацювання як суму двох величин:

$$u_{ф} = u + Z\,, \qquad (1)$$

де: $u_{ф}$ — фактичне відхилення параметра (істотно позитивна неперервна випадкова величина);

u — теоретичне відхилення параметра під впливом внутрішніх, заводських чинників (істотно позитивна неперервна випадкова величина),

Z — відхилення величини u під впливом зовнішніх, експлуатаційних чинників (неперервна випадкова величина).

Випадкові величини u і Z можуть приймати те чи інше значення, невідоме до виміру.

Величина u формує розподіл параметра у фіксовані моменти напрацювання за усередненими результатами роботи елемента, що характеризує середнє експлуатаційне навантаження; величина Z — розподіл відхилення фактичної зміни параметра від усередненої кривої.

Середні величини $u_{ф}$ усіх елементів, що випробовувалися, одержані за результатами першого і всіх наступних вимірів, утворять на графіку ряд експериментальних точок. Побудована за цими точками з допомогою методу найменших квадратів плавна теоретична крива виражає характер визначеного процесу зміни параметра сукупності елементів під час їх роботи з усередненим експлуатаційним навантаженням. Значення функції в тій чи іншій точці відповідає середньому значенню випадкової величини $u(t)$. Середнє відхилення експериментальної точки від теоретичної кривої буде рівне величині, що прямує до нуля за умови зростання числа випробовуваних елементів чи часу роботи одного елемента.

Замість рівняння (1) можна записати в момент t випадкову величину $u(t)$ як суму двох випадкових величин

$$u(t) = V_c(t) + V_t' f_1(t), \qquad (2)$$

де: $f(t)$ і $f_1(t)$ — детерміновані (невипадкові) функції, що характеризують залежність u і Z від напрацювання t;

V_c — випадкова величина, що представляє швидкість зміни параметра під впливом внутрішніх чинників;

V_t' — випадкова величина відхилення Z на одиницю зміни параметра під впливом зовнішніх чинників.

Перший доданок $V_c f(t)$ являє собою елементарно випадкову функцію. Усі можливі реалізації цієї дикції можуть бути одержані з графіка функції простою змінною масштабу осі ординат. Елементарна випадкова функція — це найбільш проста з випадкових. У ній V_c — звичайна випадкова величина і $f(t)$ — звичайна невипадкова функція.

Лінійна випадкова функція має вигляд

$$u(t) = V_c t + Z(t). \qquad (3)$$

Функції (2) і (3) можуть характеризувати також зміну параметра конкретного елемента, тобто одну реалізацію. При цьому V_c є постійною, а $Z(t)$ випадковою величиною в момент t. У випадку гладких чи відносно гладких зростаючих реалізацій відхилення параметра стану елемента, а також за наближеного обліку реального процесу зміни параметра доданок $Z(t)$ може дорівнювати нулю. Тоді

$$u(t) = V_c t\,. \qquad (4)$$

Просту функцію (4) будемо називати базовою. Різні варіанти випадкової функції зміни параметра одержують шляхом послідовного ускладнення цієї функції.

Коефіцієнт варіації випадкової величини, одержаної за фіксованого значення t_1 елементарної випадкової функції $V_c f(t_1)$, є величина постійна, рівна коефіцієнту варіації випадкової величини V_c. Це можна довести в такий спосіб. Нехай у фіксований момент напрацювання t_1 є випадкова величина $u(t_1)$ зі середньоквадратичним відхиленням $\sigma_u = \sigma_V f(t_1)$. Математичне сподівання цієї величини $m_V f(t_1)$, де m_V — математичне сподівання V_c. Тоді коефіцієнт варіації величини $u(t_1)$ становить

$$\frac{\sigma_u}{f_0(t1)} = \frac{\sigma_V f(t_1)}{m_V f(t_1)} = \frac{\sigma_V}{m_V}\,, \qquad (5)$$

що і потрібно було довести.

У формулі (3) $Z(t) = V_t' f_1(t)$ являє собою функцію відхилення фактичних значень параметра від усередненої гладкої теоретичної кривої. При цьому V_t' можна розглядати в часі як гауссівський центрований стаціонарний або нестаціонарний процес. Гауссівським він є тому, що в будь-якому перетині (у будь-який момент часу t) значення функції є випадкова величина, що підкоряється нормальному розподілу. Математичне сподівання випадкової функції в будь-якому перетині дорівнює нулю, тому процес центрований. Стаціонарність процесу характеризується однаковим середньоквадратичним відхиленням випадкової величини в будь-якому перетині, а також залежністю кореляційної функції, тільки від різниці напрацювання (часу), що відповідає цим перетинам.

Перший доданок функції (2) строго монотонно зростає залежно від напрацювання. Цю властивість використовують для цілей прогнозу.

Як уже відзначалося, характер зміни параметра елемента визначається детермінованою функцією $f(t)$. Вона може бути різною. Критерієм вибору тієї чи іншої функції (лінійної, степеневої, експонентної, дрібно-лінійної, багаточлена n-ого степеня й ін.) служить близькість значень апроксимуючої функції фактичним реалізаціям зміни параметра стану елемента. Тут недостатньо доброго погодження математичного сподівання із середньою експериментальною кривою, а необхідно також одержати рівність системи теоретичних кривих із системою реалізації. За недостатньої близькості системи теоретичних кривих одержують різке збільшення коефіцієнтів варіації зміни параметра і ресурсу елементів, що знижує ефективність прогнозування показників машин. Таким чином, як критерій апроксимації тут виступають коефіцієнти варіації. Коефіцієнт варіації ресурсу елементів більш інформативний, оскільки враховує обчислення на всьому діапазоні зміни параметра з урахуванням характеру цієї зміни. Коефіцієнт же варіації зміни параметра може локально відбивати ступінь апроксимації тільки на одній чи декількох ділянках.

Під час апроксимації функції зміни параметра враховується напрацювання деталей машини, протягом якого спостерігається короткочасне різке збільшення зміни параметра. Однак найбільший інтерес представляє не ділянка напрацювання, а ділянка зміни параметра, близького до граничного значення, тому що тут формуються відмови елементів. Тому найбільший ступінь апроксимації бажаний у діапазоні від кінця напрацювання до досягнення параметром граничного відхилення — u_n. У більшості випадків з метою досягнення достатнього збігу на згаданому діапазоні теоретичних і експериментальних кривих ділянкою напрацювання можна знехтувати. Тоді характер функції зміни на ділянці напрацювання можна умовно прийняти таким, як на інших ділянках:

$$u_1(t) = V_c f(t) + Z(t) + \Delta\Pi, \qquad (6)$$

де $\Delta\Pi$ — показник, що характеризує напрацювання елемента, чисельно дорівнює значенню ординати за $t=0$. Він забезпечує нормальну апроксимацію відхилення параметра від кінця періоду напрацювання до моменту досягнення граничного відхилення u_n.

У зв'язку з відносно невеликою зміною параметра в період напрацювання порівняно з u_n варіація показника $\Delta\Pi$, що є за своєю природою випадковим, виявляється величиною другого порядку, яку можна не брати до уваги. Це дає можливість розглядати показник $\Delta\Pi$ як детерміновану величину.

У випадку $Z(f)=0$ умова існування елементарної випадкової функції зміни параметра $u(t)$ зберігається і в разі перенесення члена $\Delta\Pi$ у ліву частину вираз (6). Наприклад, лінійна апроксимація зміни параметра з ділянкою напрацювання $u_1(t) = V_c t + \Delta\Pi$ буде мати вигляд $u(t) = u_1(t) - \Delta\Pi = V_c t$, що призводить до базової функції (4).

У разі використання степеневої функції зміна параметра становить

$$u_1(t) = V_c t^{\alpha} + Z(t) = \Delta\Pi. \qquad (7)$$

За $Z=0$

$$u(t) = u_1(t) - \Delta\Pi = V_c t^{\alpha}; \qquad (8)$$

$$t, \alpha, V_c > 0,$$

де α — показник степеня, що визначає характер зміни параметра.

У формулі (8) V_c чисельно можна розглядати як швидкість зміни параметра за $t=1$, зменшену в α раз. Дійсно, після диференціювання вираз (8) по t і за $t=1$

$$\frac{\partial[u(t)]}{\partial t} = \alpha V_c.$$

За $\alpha=1$ і $Z(t)=0$ апроксимуючий вираз представляє елементарну випадкову лінійну функцію. У цьому випадку швидкість зміни параметра для конкретного елемента протягом терміну служби є постійною. За $\alpha>1$ і $0<\alpha<1$ елементи мають відповідно неперервні строго монотонно зростаючу й спадаючу швидкості зміни параметра стану елемента. Крива відхилення параметра в першому випадку буде вгнутою, у другому – опуклою. Неважко помітити, що степенева функція зміни параметра має достатню універсальність. Коефіцієнтів у цієї функції небагато, усі вони мають чіткий фізичний зміст. Тому функцію зручно використовувати для практичного прогнозування.

Досягнення параметром граничної величини зумовлює відмову елемента. Щільність розподілу напрацювання до відмови визначають на основі теореми перетворення випадкових величин. Наприклад, у базовій функції $u(t)=V_c t$ член V_c — випадкова величина зі щільністю розподілу $\varphi_0(V_c)$. Ресурс елемента, що має швидкість відхилення параметра V_c, виражається прямою функцією

$$t = u_n / V_c; \; u_n, \; V_c > 0. \qquad (9)$$

Тоді щільність розподілу ресурсу за фіксованого граничного відхилення u_n знаходять як функцію випадкового аргументу

$$\varphi(t) = \varphi_0[R(t)]\,|R'(t)|, \qquad (10)$$

де: $R(t)$ — зворотна функція $V_c = u_n/t$;

$R'(t)$ — похідна цієї функції по t.

За нормального розподілу

$$\varphi(t) = \frac{u_n}{\sqrt{2\pi}\sigma_V t^2} \exp\left[-\frac{(u_n/t - m_V)^2}{2\sigma_V^2}\right]. \qquad (11)$$

За розподілу Вейбулла

$$\varphi(t) = \frac{bK_b^b u_n}{m_V^b t^2}\left(\frac{u_n}{t}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{K_b u_n}{m_V t}\right)^b\right], \qquad (12)$$

де: K_b — значення гамма-функції;

$$K_b = \Gamma(1/b+1);$$

b — параметр форми розподілу;

Γ — індекс гамма-функції.

З урахуванням виразу (10) щільність розподілу ресурсу елемента за степеневої функції зміни параметра і нормального розподілу

$$\varphi(t)=\frac{u_n\alpha}{\sqrt{2\pi}\sigma_V t^{\alpha+1}}\exp\left[-\frac{\left(u_n/t^{\alpha}-m_V\right)^2}{2\sigma_V^2}\right]; \quad (13)$$

за розподілу Вейбулла

$$\varphi(t)=\frac{bK_b^b u_n\alpha}{m_V^b t^{\alpha+1}}\left(\frac{u_n}{t^{\alpha}}\right)^{b-1}\exp\left[-\left(\frac{K_b u_n}{m_V t^{\alpha}}\right)^b\right]. \quad (14)$$

Функція розподілу ресурсу елемента за розподілу Вейбулла в результаті інтегрування (14) у межах від 0 до t має вигляд

$$F(t)=\exp\left[-\left(\frac{K_b u_n}{m_V t^{\alpha}}\right)^b\right];\ K_b=\Gamma(1/b+1).$$

Після простих перетворень середній ресурс елемента

$$T_{cp}=\left(\frac{K_b u_n}{m_V}\right)^{1/\alpha}\Gamma\left(1-\frac{1}{\alpha b}\right), \quad (15)$$

середньоквадратичне його відхилення

$$\sigma_t=\sqrt{\left(\frac{K_b u_n}{m_V}\right)^{2/\alpha}\Gamma\left(1-\frac{2}{\alpha b}\right)-T_{cp}^2} \quad (16)$$

і коефіцієнт варіації ресурсу

$$\upsilon=\sqrt{\frac{\Gamma\left(1-\frac{2}{\alpha b}\right)}{\left[\Gamma\left(1-\frac{1}{\alpha b}\right)\right]^2}-1}\,. \quad (17)$$

Гамма-функція справедлива для значень виразів у круглих дужках більше нуля. У простому випадку з урахуванням виразу (2) член $Z(t)$ з рівняння (7) можна записати так:

$$Z(t)=V_t'\left(V_c t^{\alpha}\right). \quad (18)$$

Під час прогнозування за середньою статистичною змінною параметра сукупності одноіменних елементів V_c і V_t' є випадковими незалежними величинами в момент часу t. Під час прогнозування за реалізацією зміни параметра конкретного елемента V_c вони являють собою постійну величину для цього елемента, а V_t' — випадкову. На відміну від величини V_c, постійної для конкретного елемента, V_t' може приймати різні значення, змінюючись з часом. Тому за $V_t'\neq 0$ реалізації зміни параметра мають вигляд негладких ламаних кривих.

З урахуванням рівняння (18) функція (7) має вигляд

$$u(t)=V_c t^{\alpha}+V_t'V_c t^{\alpha}=V_c\left(1+V_t'\right)t^{\alpha}. \quad (19)$$

За експонентної функції зміни параметра

$$u_1(t)=ae^{V_c t}-\Delta\Pi;\ t,\ a,\ V_c>0, \quad (20)$$

де a — коефіцієнт.

Після логарифмування вираз (20)

$$\ln\left[u_1(t)+\Delta\Pi\right]=\ln a+V_c t. \quad (21)$$

У такому перетвореному вигляді V_c буде характеризувати випадкову швидкість зміни параметра, а $\ln a$ — показник зміни параметра в період напрацювання. Щільність розподілу ресурсу елемента у випадку нормального розподілу величини V_c становить

$$\varphi(t)=\frac{ln\frac{u_n}{a}}{\sqrt{2\pi}\sigma_u t^2}exp\left[-\frac{\left(ln\frac{u_n}{a}\Big/t-m_V\right)^2}{2\sigma_u^2}\right]. \quad (22)$$

У разі розподілу величини V_c за законом Вейбулла середній ресурс елемента можна знайти за формулою

$$T_{cp}=\left(\frac{K_b\ln\frac{u_n}{a}}{m_V}\right)\Gamma\left(1-\frac{1}{b}\right). \quad (23)$$

За аналогією запропоновано визначати і інші апроксимуючі відхилення параметра функції і виводити оцінки ресурсу елемента. Однак застосування різних апроксимуючих функцій має поряд із вказаними перевагами (підвищення точності апроксимації і прогнозу) серйозний недолік. Кожна функція вимагає своїх методів обчислення, прогнозування стану машин, застосування відповідних формул, таблиць і номограм, що різко ускладнює процес прогнозування.

Тому після вибору і обчислення коефіцієнтів будь-якого апроксимуючого виразу його слід перетворити у визначену функцію, для якої розробляється апарат прогнозування. Це єдиний шлях використання широкого класу апроксимуючих виразів за відносно негроміздкого математичного забезпечення прогнозування.

Література

1. Грудз В.Я., Тымкив Д.Ф., Яковлев Е.И. Обслуживание газотранспортных систем. – К.: УМК ВО, 1991. – 160 с.