

тривимірної інтерполяції. Інформація про вплив на НДС діючих типів дозволяє виявляти ділянки, на яких, крім вказаних, діють інші типи навантажень – при цьому використовується метод суперпозиції розв'язків задачі теорії пружності.

1. Браун У., Сроули Д. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. – М.: Мир, 1972. – 246 с.
2. Карзов Г.П., Леонов В.П., Тимофеев Б.Т. Сварные сосуды высокого давления. – Л.: Машиностроение,

1982. – 287с. 3. Трубопроводный транспорт газа / за ред. М.П.Ковалка. – К.: агентство з раціонального використання енергії та екології, 2003. – 600с.
4. Мартинюк Х.В., Олійник А.П. Математичне моделювання напружено-деформованого стану ділянок трубопроводу з оптимізацією процедури згладжування початкових даних // Методи та прилади контролю якості, №13, 2005. – С.21-25.
5. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1984, Т.2. – 560 с.

УДК 681.3.06+681.518.54.621.51

ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НАГНІТАЧІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

© Скріпка О.А., Горбійчук М.І., 2006

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

За допомогою імітаційного моделювання досліджено ефективність методу діагностування нагнітачів природного газу, яке здійснюється з використанням нейромереж. Показано, що при існуючих засобах вимірювання технологічних параметрів мережа може в 0,25 % випадках неправильно віднести діагностичну ознаку до одного із трьох класів – придатний, працездатний і непрацездатний

Сучасні газоперекачувальні агрегати – апарати довготривалої експлуатації. Тому збір експериментального матеріалу, який послужив би основою для навчання нейромереж з метою ідентифікації їх технічного стану вимагає значних затрат часу. Процес навчання моделі і перевірку запропонованого методу діагностування можна значно пришвидшити, якщо скористатись технологією імітаційного моделювання. Остання передбачає створення імітаційної моделі, яка є формальним описом логіки функціонування нагнітача природного газу, враховуючи найсуттєвіші причинно-наслідкові зв'язки, і яка забезпечує проведення статистичних експериментів. При цьому повинні бути враховані дві важливі обставини [1]:

а) взаємозв'язок між окремими елементами системи (нагнітача), а також між деякими величинами (параметрами) може бути поданий у вигляді певних аналітичних залежностей;

б) модель можна вважати ефективною, тільки в тому випадку, коли в ній відтворені лише ті властивості, які впливають на значення вибраного показника ефективності функціонування реальної системи.

Оцінка технічного стану відцентрового

нагнітача (ВН) здійснюється [2] за трьома показниками:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon - \varepsilon^*}{\varepsilon^*}, \quad (1)$$

$$\Delta T_2 = \frac{T_2 - T_2^*}{T_2^*}, \quad (2)$$

$$\Delta N = \frac{N - N^*}{N^*}, \quad (3)$$

де ε – ступінь стиску, N – внутрішня потужність ВН, T_2 – температура газу на виході ВН.

Значком „*” позначені базові значення відповідних величин, які обчислюються за формулами [3]:

$$\varepsilon^* = f_\varepsilon(x, y), \quad (4)$$

$$\frac{N^*}{\rho_g} \left(\frac{n_0}{n} \right)^3 = f_N(x), \quad (5)$$

де ρ_g – густина газу, приведена до умов всмоктування; n_0 , n – відповідно номінальне і поточне значення швидкості обертання ротора нагнітача.

Залежності $f_\varepsilon(x, y)$ і $f_N(x)$ – це паспортні (зведені) характеристики нагнітачів, які надаються у

вигляді графіків заводами-виготовлювачами.

Зведені витрата x і швидкість обертання ротора нагнітача y знаходять за такими формулами:

$$x = Q \frac{n_0}{n}, \quad y = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{z_0 R_0 T_0}{z R T_1}}, \quad (6)$$

де z – коефіцієнт стисливості газу, R – газова постійна, T – температура за абсолютною шкалою.

Індекс „0” відноситься до відповідних величин, які визначаються за нормальних умов.

Базове значення температури на виході нагнітача знаходять у відповідності з виразом

$$T_2^* = T_1 \varepsilon^{*1/\sigma}, \quad (7)$$

де $\sigma = \eta_{noz} \frac{k}{k-1}$, k – показник адиабати, T_1 – температура газу при вході у нагнітач.

Політропний коефіцієнт корисної дії η_{noz} , який входить у формулу (7), можна знайти за такою формулою:

$$\eta_{noz} = f_\eta(x),$$

де $f_\eta(x)$ – паспортна характеристика нагнітача.

Для обчислення базових значень величин N^* і T_2^* характеристики $f_\eta(x)$ і $f_N(x)$ нами апроксимувались поліномами третього степеня виду

$$Y^{(i)} = a_0^{(i)} + a_1^{(i)}x + a_2^{(i)}x^2 + a_3^{(i)}x^3, \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

де $Y^{(1)} = f_N(x)$, $Y^{(2)} = f_\eta(x)$.

Ординати функцій $f_\eta(x)$ і $f_N(x)$ визначались за графіками зведених характеристик нагнітача. Як приклад був вибраний нагнітач PCL-804-2, який встановлений на компресорній станції КС-39 "Уренгой – Помари - Ужгород" Богородчанського лінійного управління магістральних газопроводів. Для цього нагнітача методом найменших квадратів визначені коефіцієнти $a_j^{(i)}$, $j = \overline{0, 3}$. Базове значення ступені стиску газу ε^* є функцією двох змінних x і y . Для залежності (4) наводять сімейство статичних характеристик, які представляють собою лінії рівня при $y = const$. Апроксимація залежності (4) здійснювалась поліноміальним виразом такого типу:

$$\varepsilon(x, y) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4y + a_5y^2 + a_6y^3 + a_7xy + a_8x^2y + a_9xy^2. \quad (9)$$

Допускалось, що в процесі експлуатації ВН, відбувалось зміщення його статичних характеристик, яке моделювалось такими залежностями:

$$\tilde{a}_j = (1 - m_i)a_j,$$

де a_j - коефіцієнти функціональних залежностей (8) і (9), m_i - варіації коефіцієнтів.

За даними авторів роботи [3] відхилення

робочих характеристик спрацьованих ВН від паспортних досягають до 17 %. Тому значення m_i вибирались із множини (0; 0,1; 0,17). На величини, які беруть участь у формуванні діагностичних ознак, накладається адитивна складова, яка зумовлена похибками вимірювань витрати, температури, тиску, густини газу і впливом зовнішнього середовища. Ця складова імітувалась випадковою величиною, що розподілена за нормальним законом з нульовим математичним сподіванням і дисперсією

$$\sigma_k^2 = \left(\frac{\Sigma_k}{S_{k,ном}} \right)^2, \quad (10)$$

де Σ_k^2 – дисперсія k -ої складової ($k = 1, 2, 3$), яка є розмірною величиною; $S_{k,ном}$ – нормувальне значення k -ої величини, яка бере участь у формуванні відповідної діагностичної ознаки.

Дослідимо вплив факторів, які зумовлені похибками вимірювань технологічних параметрів, на відхилення значень діагностичних ознак від їх дійсних значень.

Для визначення діагностичної ознаки $\Delta\varepsilon$ необхідно виміряти тиски на вході P_1 і виході P_2 ВН. Тому

$$\delta\varepsilon = \left(\frac{\partial\Phi(P_1, P_2)}{\partial P_1} \right)_0 \delta P_1 + \left(\frac{\partial\Phi(P_1, P_2)}{\partial P_2} \right)_0 \delta P_2, \quad (11)$$

де $\Phi(P_1, P_2) = \frac{P_2}{P_1}$; $\delta\varepsilon$ – абсолютна похибка вимірювання (обчислення) ступені стиску газу; δP_1 , δP_2 - абсолютні похибки вимірювання тисків на вході і виході нагнітача.

Індекс "0" у формулі (11) означає, що обчислення частинних похідних здійснюється при тисках, що дорівнюють результатам їх вимірювань [4].

Рівняння (10) приведемо до такого безрозмірного вигляду:

$$\frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon_\sigma} = C_1 \frac{\delta P_1}{P_{1\sigma}} + C_2 \frac{\delta P_2}{P_{2\sigma}}, \quad (12)$$

де $C_i = \left(\frac{\partial\Phi(P_1, P_2)}{\partial P_i} \right)_0 \cdot \frac{P_{i\sigma}}{\varepsilon_\sigma}$, $i = 1, 2$; ε_σ , $P_{1\sigma}$, $P_{2\sigma}$ – деякі „базові” величини.

Якщо базовими вибрати нормувальні значення величин $\varepsilon_n = \varepsilon_\sigma$, $P_{in} = P_{i\sigma}$, то отримаємо зведені похибки [4]

$$\gamma_\varepsilon = \frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon_n}, \quad \gamma_{P_i} = \frac{\delta P_i}{P_{in}}, \quad i = 1, 2.$$

Використовуючи формулу (11), знайдемо дисперсію $\sigma_1 = \sigma_\varepsilon$. Оскільки похибки вимірювань тисків P_1 і P_2 є випадковими і незалежними

величинами, то

$$\sigma_\varepsilon^2 = C_1^2 \sigma_{P_1}^2 + C_2^2 \sigma_{P_2}^2, \quad (13)$$

де $\sigma_\varepsilon^2 = D[\gamma_\varepsilon]$, $\sigma_{P_i}^2 = D[\gamma_{P_i}]$, $i = 1, 2$.

Оцінимо значення σ_ε^2 . Оскільки при імітаційному моделюванні ε змінювалось в широких межах, то при обчисленні числових значень часткових похідних у формулі (11) доцільно взяти P_{in} , $i = 1, 2$ (P_{in} – нормувальне значення тиску) замість P_i . Це дасть можливість оцінити верхню межу $\sigma_\varepsilon^{(sup)}$. Такий підхід до оцінювання σ_ε не вплине на загальні висновки щодо здатності нейромережі розпізнавати технічний стан нагнітачів, оскільки реальні значення σ_ε не будуть перевищувати $\sigma_\varepsilon^{(sup)}$. Для вимірювання тисків на вході і виході ВН PCL – 804 – 2 застосовувались пристрої фірми Honeywell з діапазоном 0–8 МПа і класом точності 0,5. Були вибрані такі значення величин: $P_{1n} = 5,6$ МПа, $P_{2n} = 7,5$ МПа.

З урахуванням вказаного отримаємо, що

$$\left(\frac{\partial\Phi(P_1, P_2)}{\partial P_1}\right)_0 = \left(\frac{\partial\Phi(P_1 / P_2)}{\partial P_1}\right)_0 = -\frac{P_{2n}}{P_{1n}^2} = -0,988;$$

$$\left(\frac{\partial\Phi(P_1, P_2)}{\partial P_2}\right)_0 = \left(\frac{\partial\Phi(P_1 / P_2)}{\partial P_2}\right)_0 = \frac{1}{P_{1n}} = 0,988.$$

Отже, $-C_1 = C_2 = 0,988$.

Клас точності приладу визначає граничну зведену похибку $\gamma_{p,sp}$. Тому дисперсія кожної складової похибки $\sigma_{P_1}^2$ і $\sigma_{P_2}^2$ дорівнює [4]

$$\sigma_{P_i}^2 = \left(\frac{\gamma_{P,sp}}{3 \cdot 100}\right)^2, \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

У відповідності з формулою (11) для значення $\gamma_{p,sp} = 0,5$ % маємо, що $\sigma_\varepsilon = 1,667 \cdot 10^{-3}$. Оскільки для ВН PCL – 804 – 2 $\varepsilon_n = 1,48$; то, виходячи із (10), знайдемо, що $\Sigma_\varepsilon = 3,445 \cdot 10^{-3}$.

Температура T_2 , яка бере участь у формуванні діагностичної ознаки ΔT_2 , вимірюється безпосередньо. Тому за аналогією з формулою (13) можна записати, що

$$\sigma_{T_2}^2 = \left(\frac{\gamma_{T_2,sp}}{3 \cdot 100}\right)^2. \quad (15)$$

У відповідності з формулою (14), для пристроїв вимірювання температури фірми Honeywell з класом точності 0,5, знаходимо, що $\sigma_{T_2} = 1,667 \cdot 10^{-3}$ або, використовуючи співвідношення (10), знайдемо $\Sigma_{T_2} = \sigma_{T_2} T_{2n}$. При $T_{2n} = 76^\circ\text{C}$ матимемо, що $\Sigma_{T_2} = 0,127^\circ\text{C}$.

Третя діагностична ознака ΔN формується шляхом обчислення $x = Q_{np}$ за вимірними значеннями витрати Q і швидкості обертання n ротора ВН за першою формулою згідно (6). Тому

$$\delta x = \left(\frac{\partial\Phi(Q, n)}{\partial Q}\right)_0 \delta Q + \left(\frac{\partial\Phi(Q, n)}{\partial n}\right)_0 \delta n. \quad (16)$$

За значенням x у відповідності з виразом (5) знаходимо, що

$$N = \rho_c \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 f_N(x). \quad (17)$$

Використовуючи формулу (17), знайдемо, що

$$\delta N = \left(\frac{\partial\Phi(\rho_c, n, x)}{\partial \rho_c}\right)_0 \delta \rho_c + \left(\frac{\partial\Phi(\rho_c, n, x)}{\partial n}\right)_0 \delta n + \left(\frac{\partial\Phi(\rho_c, n, x)}{\partial x}\right)_0 \delta x, \quad (18)$$

або

$$\delta N = \left(\frac{n_\varepsilon}{n_0}\right)^3 f_N(x_\varepsilon) \delta \rho + 3 \frac{\rho_c}{n_0} \left(\frac{n_\varepsilon}{n_0}\right)^2 f_N(x_\varepsilon) \delta n + \rho_c \left(\frac{n_\varepsilon}{n_0}\right)^3 \left(\frac{\partial f_N(x)}{\partial x}\right)_0 \delta x, \quad (19)$$

де δx - обчислюється за формулою (17), а $f_N(x)$ – апроксимаційний поліном (8).

Густина природного газу, яка входить у формулу (18), обчислювалась як середнє значення замірів на протязі одного року. Були отримані такі значення (за нормальних умов): $\rho_c = m_p = 0,679 \text{ кг/м}^3$; $\Sigma_{\rho_c} = 8,033 \cdot 10^{-4} (\text{кг/м}^3)^2$.

Швидкість обертання вала ВН вимірюється за допомогою пристроїв фірми Honeywell, а для вимірювання витрати газу через нагнітач слід застосовувати витратоміри фірми Флоугек. Клас точності названих пристроїв 0,5. Для нагнітача PCL–804–2 мають місце такі нормувальні значення величин технологічних параметрів: витрата природного газу, що приведена до нормальних умов $Q_n = 60 \text{ м}^3/\text{с}$; швидкість обертання вала нагнітача $n_n = 85 \text{ с}^{-1}$.

Обчислимо δx у відповідності з формулою (17). Оскільки Q визначається співвідношенням (6), то

$$\delta x = \frac{n_0}{n_n} \delta Q - Q_n \frac{n_0}{n_n} \cdot \frac{\delta n}{n_n},$$

або в безрозмірному вигляді

$$\gamma_x = \frac{n_0}{n_n} (\gamma_Q - \gamma_n).$$

Переходячи до дисперсій, отримаємо, що

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{n_0}{n_n} \right)^2 (\sigma_Q^2 + \sigma_n^2).$$

Рівняння (19) запишемо в безрозмірній формі, замінивши попередньо базові значення відповідних величин на їх нормувальні значення. В результаті будемо мати, що

$$\gamma_N = \gamma_p + 3\gamma_n + \frac{Q_n}{f_N(x_n)} \left(\frac{\partial f_N(x)}{\partial x} \right)_0 \gamma_x,$$

де γ_p , γ_n , γ_x – значення зведених похибок густини, швидкості обертання і зведеної витрати відповідно.

Останній вираз дає змогу визначити, що

$$\sigma_N^2 = \sigma_p^2 + 9\sigma_n^2 + \left(\frac{x_n}{f_N(x_n)} \left(\frac{\partial f_N(x)}{\partial x} \right)_0 \right)^2 \sigma_x^2, \quad (20)$$

де σ_p^2 , σ_n^2 , σ_x^2 – дисперсії густини, швидкості обертання і зведеної витрати відповідно.

Виходячи із заявленого класу точності для пристроїв вимірювання витрати і швидкості обертання ротора ВН визначимо σ_n^2 і σ_Q^2 за формулами, які аналогічні формулі (14). Знаходимо, що $\sigma_n = \sigma_Q = 1,667 \cdot 10^{-3}$. Отже, $\sigma_x = 2,593 \cdot 10^{-3}$.

Обчислимо тепер σ_N^2 . Для цього подамо дисперсію густини газу в безрозмірній формі:

$$\sigma_p^2 = \frac{\Sigma_p^2}{m_p^2}. \text{ Коефіцієнти залежності (8), знайдені}$$

МНК-методом, мають такі значення: $a_0 = -0,15363$, $a_1 = 1,3757$, $a_2 = -0,26062$, $a_3 = 0,013901$. Використовуючи чисельні значення величин, які входять в формулу (20), знайдено, що $\sigma_N^2 = 0,283$.

Таким чином, були вибрані такі значення σ : $\sigma_\varepsilon = 0,168$; $\sigma_{T_2} = 0,167$; $\sigma_N = 1,171 \cdot 10^{-3}$. Розрахунковим шляхом встановлено, що внутрішня потужність ВН - $N = 1,284 \cdot 10^4$ кВт. Тому $\Sigma_N = 540,424$ кВт.

Для імітації роботи LVQ-нейромережі генерувалась діагностичні ознаки у відповідності з формулами (1) – (3), в яких $\varepsilon = \hat{\varepsilon} + e_\varepsilon$, $T_2 = \hat{T}_2 + e_{T_2}$, $N = \hat{N} + e_N$, де $\hat{\varepsilon}$, \hat{T}_2 , \hat{N} – відповідно значення ступені стиску газу, температури на виході нагнітача та його потужності, які обчислюються за формулами (5), (7) – (9). Адитивні шуми e_ε , e_{T_2} , e_N , які визначаються похибками вимірювання, імітувались як випадкові числа, що мають нормальний закон розподілу з нульовими математичними сподіваннями і дисперсіями σ_ε^2 , $\sigma_{T_2}^2$, σ_N^2 . Для кожної діагностичної ознаки $\Delta\varepsilon$, ΔT_2 і ΔN була сформована вибірка із 120 значень, яка імітувала придатний M_1 , працездатний M_2 і

непридатний M_3 стани ВН і яка використовувалась для навчання LVQ-нейромережі.

Після навчання мережа тестувалась шляхом багатократної прогонки імітаційної моделі. Було реалізовано сто прогонів імітаційної моделі. При цьому визначався процент правильного віднесення нейромережею до відповідного класу діагностичної ознаки. Було вибрано три класи – перший клас M_1 ; другий клас M_2 ; третій клас M_3 . Результат роботи нейромережі ілюструє рис. 1 (реалізація одного прогону).

Із рис. 1 видно, що нейромережа успішно справилась з класифікацією стану ВН. Після сто прогонів імітаційної моделі до першого класу було віднесено 100 % діагностичних ознак, до другого – 99,75 %, а до третього – 100 %. Таким чином, нейромережа лише в 0,25 % випадках неправильно віднесла діагностичну ознаку до відповідного класу. Це свідчить про високу ефективність запропонованого методу діагностування технічного стану ВН природного газу.

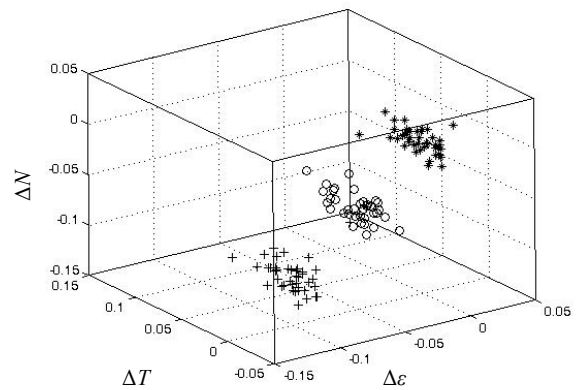


Рис. 1. Класифікація станів об'єкта діагностування: + – перший клас; o – другий клас; * – третій клас

1. Гультаев А.К. Визуальное моделирование в среде Windows. – СПб: Питер, 2000. – 432 с.
2. Горбійчук М.І., Козутяк М.І., Скріпка О.А. Контроль технічного стану газоперекачувальних агрегатів. // Методи та прилади контролю якості. – 2005, № 13. – С. 18–19.
3. Биков Г.О., Волянська Л.Г., Ізбаши В.І. Ідентифікація робочих характеристик спрацьованих відцентрових нагнітачів за експлуатаційними параметрами. // Нафтова і газова промисловість. – 2002, № 4. – С. 35–36.
4. Основи метрології та вимірювальної техніки. Том 1: Основи метрології. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". – 2005. – 529 с.