УДК 519.684.4

МЕТОД ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВОСТУПЕНЕВОГО ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ЗАСАДАХ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

М. І. Горбійчук, О. А. Скріпка, В. М. Медведчук

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504521, e-mail: gorb@nung.edu.ua

Аналіз розробленої діагностичної моделі двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу показав, що її параметри є функціями геометричних розмірів робочого колеса нагнітача. Лише частина геометричних розмірів, таких як радіальний зазор, ширина і товщина лопаток, зазнає змін у процесі експлуатації нагнітача. Параметри математичної моделі є складними функціями від геометричних розмірів колеса, що унеможливлює визначення їх значень за результатами ідентифікації. Тому для оцінки технічного стану двоступеневого ВЦН запропоновано використовувати параметри діагностичної моделі, які дістали назву узагальнених діагностичних ознак. Показано, що для спрощення задачі ідентифікації доцільно визначати не абсолютні значення узагальнених діагностичних ознак, а їх відхилення від значень для нового нагнітача або після його капітального ремонту. Розроблений метод оцінки технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу на основі ідентифікації параметрів лінеаризованої діагностичної моделі і який ґрунтується на системі нечіткого висновку типу Мамдані.

Ключові слова: робоче колесо, геометричні розміри, параметри моделі, узагальнені діагностичні ознаки, ідентифікація, генетичний алгоритм, нечіткий висновок.

Анализ разработанной диагностической модели двухступенчатого центробежного нагнетателя природного газа показал, что ее параметры являются функциями геометрических размеров рабочего колеса нагнетателя. Лишь часть геометрических размеров, таких как радиальный зазор, ширина и толщина лопаток, претерпевают изменения в процессе эксплуатации двухступенчатого нагнетателя. Параметры математической модели являются сложными функциями от геометрических размеров колеса, что делает невозможным определение их значений по результатам идентификации. Поэтому для оценки технического состояния двухступенчатого ЦБН предложено использовать параметры диагностической модели, которые получили название обобщенных диагностических признаков. Показано, что для упрощения задачи идентификации целесообразно определять не абсолютные значения обобщенных диагностических признаков, а их отклонения от значений для нового нагнетателя или после его капитального ремонта. Разработан метод оценки технического состояния двухступенчатого нагнетателя природного газа на основе идентификации параметров линеаризованной диагностической модели и основанный на системе нечеткого вывода типа Мамдани.

Ключевые слова: рабочее колесо, геометрические размеры, параметры модели, обобщенные диагностические признаки, идентификация, генетический алгоритм, нечеткий вывод.

The analysis of the developed diagnostic model of the two-stage centrifugal supercharger of natural gas showed that its parameters are the functions of the geometrical dimensions of the supercharger impeller. Only some geometrical parameters, such as radial clearance, width, and thickness of the blades, are changed during the supercharger operation. The mathematical model parameters are complicated functions of the impeller geometrical dimensions that makes it impossible to determine their values on the basis of the identification results. Therefore, the diagnostic model parameters, which are called generalized diagnostic features, were suggested to be used for the technical state evaluation of the two-stage centrifugal supercharger of natural gas. It is shown that in order to simplify the identification it is better to determine the deviations of the generalized diagnostic features instead of their absolute values for the new supercharger or after its complete overhaul. The method for the technical state evaluation of the two-stage centrifugal supercharger of natural gas was developed on the basis of identification of the parameters of the linearized diagnostic model and system of Mamdani's fuzzy inference.

Keywords: impeller, geometric dimensions, model parameters, generalized diagnostic features, identification, genetic algorithm, fuzzy inference.

Вступ

Основним елементом системи транспорту газу є компресорні станції (КС) [1], на яких встановлені газоперекачувальні агрегати (ГПА). До складу ГПА входить нагнітач природного газу та його привод.

Елементи ГПА працюють при підвищених температурах та при значних механічних навантаженнях, що у сукупності призводить до спрацювання і деградації камери згорання, підшипників, лопаток турбіни та її валів, проточної частини відцентрового нагнітача та інших частин ГПА. Деградація компресора і турбіни призводить до зменшення політропного коефіцієнта корисної дії (к. к. д.) і змінами витрати палива; деградація камери згорання спричинює зниження її ефективності, який характеризується коефіцієнтом повноти згорання (к. к. д. камери згорання). Спрацювання підшипників і валів турбін призводить до зниження ефективності потужності за рахунок збільшення тертя між рухомими частинами ГПА, що є причиною збільшення втрат потужності до 0,4 % від її номінального значення [2].

Спрацювання та деградація вузлів та елементів ГПА проявляється у зміні факторів, що характеризують функціонування ГПА як складової частини газотранспортної системи. Сукупність таких факторів у певний момент часу, за певних умов зовнішнього середовища визначають технічний стан ГПА [3].

Таким чином, ефективна і безаварійна експлуатація газоперекачувальних агрегатів неможлива без об'єктивної інформації про фактичний технічний стан як ГПА, так і окремих його вузлів. Інформація про технічний ГПА необхідна для вирішення цілого ряду технологічних задач керування газотранспортною системою, що дасть змогу транспортувати природний газ з меншими енергетичними затратами [4 - 6].

Аналіз сучасних досліджень і публікацій

Розвиток методів оцінки технічного стану на стадії експлуатації пов'язаний з труднощами зі збиранням і аналізом інформації про відмови обладнання. Методи вирішення задач оцінки технічного стану ГПА є загальними для всіх типів агрегатів, але ефективність кожного з них визначається на основі результатів використання на конкретному типі ГПА в експлуатації, що, в свою чергу, визначає впровадження комплексу методів, які найбільше задовольняють особливостям самого агрегату як об'єкта діагностування і умовам його експлуатації.

Залежно від постановки завдання розрізняють наступні основні види діагностики: функціональну, при проведенні якої визначають зміну (погіршення) основних енергетичних показників агрегату (наприклад, його потужності і к. к. д.), структурну, що оцінює характер і ступінь пошкоджень та зносу деталей механізму (наприклад, за аналізом відпрацьованого масла і визначенню в ньому механічних домішок); візуальну, що оцінює причини руйнування деталей при їх огляді; прогнозну, що прогнозує характер протікання зношування деталей і час виходу їх з ладу.

В умовах оцінки роботи ГТУ на газопроводах важливе значення мають всі види вказаних діагностик [7, 8], перш за все тому, що агрегати на КС безперервно працюють протягом багатьох сотень і тисяч годин без зупинки. Саме у цих умовах, не маючи можливості у ряді випадків з технологічних причин зупинити агрегат, особливо важливо оцінити його стан і передбачити хід зміни його основних характеристик (потужність, к. к. д.), коли режим його роботи практично залишається незмінним.

Стан агрегатів можна і доцільно оцінити не тільки за значеннями вимірюваних параметрів робочого процесу ГТУ, що несуть симптоми відхилень у працюючому механізмі, але і за таких характеристиками роботи ГТУ, як шум, вібрація, колір вихлопних газів, витоки повітря трактом і, зокрема, регенератором і тому подібне [9].

Одним із перспективних напрямків оцінки технічного стану є побудова діагностичних моделей як ГПА, так і його елементів [1, 10]. Такі моделі повинні функціонально зв'язувати технологічні параметри (вхідні величини) і геометричні розміри елементів (вихідні величини), які зазнають зношування у процесі експлуатації. На шляху вирішення поставленої задачі виникає ряд труднощів, серед них – створення адекватної математичної моделі, вибір діагностичних ознак, які однозначно визначають технічний стан ГПА і його елементів, отримання інформації про технологічні параметри з необхідною точністю.

Таким чином, метою роботи є створення адекватної лінеаризованої діагностичної моделі та розроблення методу оцінки технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу на засадах нечіткої логіки.

Основна частина

У роботі [11] на основі рівняння збереження кількості енергії отримана залежність продуктивності двоступеневого відцентрового нагнітача (ВЦН) природного газу від його конструктивних та технологічних параметрів у такому вигляді:

$$Q=\omega\left(-\frac{\alpha_1}{2\alpha_0}+\sqrt{\left(\frac{\alpha_1}{2\alpha_0}\right)^2+\frac{\alpha_2}{\alpha_0}}\right), \qquad (1)$$

де $\alpha_0=\frac{X_1}{k_{v_1}}+\frac{X_2}{k_v}$;

$$\alpha_1=\left(\frac{\varepsilon}{k_v}-1\right)\frac{A}{n_\Pi^2}-X_0+0,5\left(1+k_v+2k_{v1}\right)\left(\frac{X_1}{k_{v_1}}+\frac{X_2}{k_v}\right)X_3;$$

$$\alpha_2=0,5\left(1+k_v+2k_{v1}\right)X_0X_3+X_4\left(k_{v_1}+k_v\right);$$

$$X_0=\mu\left(2R_2^2-R_1^2\right);$$

$$X_1=\mu\left(\frac{R_2 ctg\beta_2}{F_2^{(1)}}-\frac{R_1 ctg\beta_1}{F_1^{(2)}}\right),$$

$$X_2=\frac{\mu R_2 ctg\beta_2}{F_2^{(2)}};$$

R_1, R_2 – внутрішній та зовнішній радіуси робочих коліс ВЦН;

$k_v=\frac{\rho_3}{\rho_1}$ – поправка на стиснення газу [12];

ρ_1, ρ_3 - густина газу на вході і на виході;

$k_{v1}=\varepsilon^{\frac{1}{2m}}$;

ε - ступінь підвищення тиску нагнітача;

m - показник політропи;

$A=\frac{A_0}{\omega_н^2}$;

$A_0=z_0R_0T_0$;

z_0, R_0, T_0 - параметри зведення [13];

$n_П$ - зведена частота [1];

$\omega_н$ - номінальна кутова швидкість обертання ротора ВЦН;

$$X_3 = 0,5\alpha\pi s D_s \sqrt{\frac{3}{Z_s}\left(R_2^2 - R_1^2\right)};$$

α - коефіцієнт витрати колеса;

D_s – діаметр ущільнення,

s – радіальний зазор;

Z_s – число ущільнень колеса ВЦН;

$F_1^{(2)} = \pi D_1 b_1^{(2)}$,

$F_2^{(1)} = \pi D_2 b_2^{(1)}\tau$,

$F_2^{(2)} = \pi D_2 b_2^{(2)}\tau$

$$\tau = 1 - \frac{z_s\delta_m}{\pi D_2 \sin\beta_2},$$

b_1, b_2 - ширина лопаток колеса першого і другого робочих коліс;

z_s, δ_m - число лопаток і середня товщина лопаток кожного із двох коліс;

μ - поправка на кінцеве число лопаток;

β_1, β_2 - вхідний і вихідний лопатеві кути робочих коліс;

$$X_4 = k_T\frac{D_2^5}{8};$$

k_T - постійний коефіцієнт, значення якого зумовлено технологією обробки лопаток колеса нагнітача;

$D_i = 2R_i$, $i = 1,2$.

Поправочний коефіцієнт μ Пфлейдерер рекомендує обчислювати за такою формулою [14]:

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{a + 1,2\sin\beta_2}{z_s\left(1-\lambda^2\right)}},$$

де a – постійна величина;

$$\lambda = \frac{D_1}{D_2}.$$

Аналіз формули (1) показує, що величини X_1, X_2 і X_3 визначаються через радіальний зазор s, ширину і товщину лопаток δ_m і b_i, тобто $X_i = X_i\left(b_i, \delta_m\right)$, $i = 1,2$; $X_3 = X_3(s)$. З огляду на те, що ці параметри через рівняння (1) зв'язані з технологічними параметрами роботи нагнітача, їх можна вважати діагностичними ознаками, а співвідношення (1) діагностичною моделлю відцентрового нагнітача природного газу.

З огляду на те, що залежності $X_i\left(b_i, \delta_m\right)$ і $X_3(s)$ є складними функціями своїх параметрів, які змінюються у процесі експлуатації ВЦН, то доцільно визначати не значення s, δ_m і b_i, а величини X_1, X_2 і X_3, які назвемо узагальненими діагностичними ознаками ВЦН [15].

Проведений аналіз показав, що у процесі роботи ВЦН незмінними залишаються величини X_0 та X_4, які виражаються через внутрішній R_1 та зовнішній R_2 радіуси робочих коліс, та коефіцієнти μ і k_T.

При оцінці технічного стану ВЦН важливо знати не абсолютні значення узагальнених діагностичних ознак, а їх відхилення від їх початкових значень, які визначені для нового ВЦН або після його капітального ремонту.

При незмінній кутовій швидкості обертання ротора ВЦН ω продуктивність нагнітача буде функцією трьох параметрів X_1, X_2 і X_3

$$Q = \varphi\left(\bar{X}\right),$$

де $\bar{X} = \left(X_1, X_2, X_3\right)^T$,

Опираючись на результати роботи [16], було встановлено, що максимальне відхилення узагальнених діагностичних ознак від своїх початкових значень не перевищує 10 %. За таких умов функціональну залежність (1) можна розкласти у ряд Тейлора, обмежившись лише лінійними членами такого розкладу. Тоді

$$\Delta Q = \frac{\partial\varphi\left(\bar{X}^{(0)}\right)}{\partial X_1}\Delta X_1 + \frac{\partial\varphi\left(\bar{X}^{(0)}\right)}{\partial X_2}\Delta X_2 + \frac{\partial\varphi\left(\bar{X}^{(0)}\right)}{\partial X_3}\Delta X_3, \quad (2)$$

де $\frac{\partial\varphi\left(\bar{X}^{(0)}\right)}{\partial X_i} = \left.\frac{\partial\varphi\left(\bar{X}\right)}{\partial X_i}\right|_{\bar{X}=\bar{X}^{(0)}}$, $i = 1,2,3$;

$\Delta Q = \overset{(0)}{Q}_{count} - Q$; $\overset{(0)}{Q}_{count}$ - перераховане значення об'ємної продуктивності нового (або після капітального ремонту) нагнітача до поточних умов;

Q - поточне значення об'ємної продуктивності нагнітача;

$\Delta X_i = X_i^{(0)} - X_i$, $i = 1,2,3$;

$X_i^{(0)}$ - значення узагальнених діагностичних ознак, які відповідають $Q^{(0)}$.

Введемо такі позначення: $r_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_0}$ і $r_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_0}$. Тоді

$$Q = \omega\left(-\frac{r_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 + r_2}\right).$$

Знайдемо часткові похідні, що входять до формули (2)

$$\frac{\partial\varphi\left(\bar{X}\right)}{\partial X_i} = \frac{\omega}{2r}\left(\left(\frac{r_1}{2} - r\right)\frac{\partial r_1}{\partial X_i} + \frac{\partial r_2}{\partial X_i}\right), \; i = 1,2,3,$$

де $r = \sqrt{\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 + r_2}$.

З врахуванням значень r_1 і r_2 отримаємо

$$\frac{\partial\varphi\left(\bar{X}\right)}{\partial X_1} = \frac{\omega}{2r\alpha_0 k_{\nu 1}} \times$$
$$\times\left(\left(\frac{r_1}{2} - r\right)\left(\frac{X_3}{2}\left(1 + k_\nu + 2k_{\nu 1}\right) - r_1\right) - r_2\right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial\varphi\left(\bar{X}\right)}{\partial X_2}=\frac{\omega}{2r\alpha_0 k_v}\times$$
$$\times\left(\left(\frac{r_1}{2}-r\right)\left(\frac{X_3}{2}\left(1+k_v+2k_{v1}\right)-r_1\right)-r_2\right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial\varphi\left(\bar{X}\right)}{\partial X_3}=\frac{\omega\left(1+k_v+2k_{v1}\right)}{4r\alpha_0}\times$$
$$\times\left(\left(\frac{r_1}{2}-r\right)\left(\frac{X_1}{k_{v_1}}+\frac{X_2}{k_v}\right)+X_0\right). \quad (5)$$

Для обчислення часткових похідних $\frac{\partial\varphi\left(\bar{X}^{(0)}\right)}{\partial X_i}=\left.\frac{\partial\varphi\left(\bar{X}\right)}{\partial X_i}\right|_{\bar{X}=\bar{X}^{(0)}}$, $i=1,2,3$, які входять до рівняння (2), необхідно знати значення $X_i^{(0)}$, $i=\overline{0,4}$. Їх можна визначити двома способами – аналітичним або скориставшись процедурою ідентифікації математичної моделі (1). Для реалізації першого способу необхідно мати інформацію про значення величин R_1, R_2, μ і k_T. У переважній більшості випадків така інформація є недоступною. Тоді ідентифікація параметрів $X_i^{(0)}$, $i=\overline{0,4}$ математичної моделі (1) здійснюється, коли ВЦН новий або він запущений у роботу після капітального ремонту. Для розв'язку поставленої задачі доцільно застосувати метод найменших квадратів (МНК) [17], суть якого полягає в тому, що мінімізується функціонал

$$J(\bar{x})=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}e_j^2(\bar{x}), \quad (6)$$

де $\bar{x}^T=\left(X_0^{(0)},X_1^{(0)},X_2^{(0)},X_3^{(0)},X_4^{(0)}\right)$ - вектор параметрів моделі (1);

$e_j\left(\bar{x}\right)=\tilde{Q}_j-Q\left(\bar{x},\bar{u}^{(j)}\right)$ - функція нев'язки;

$Q\left(\bar{x},\bar{u}^{(j)}\right)$ - продуктивність нагнітача природного газу, обчислена за формулою (1);

$\tilde{Q}_j$ - продуктивність нагнітача природного, виміряна на об'єкті;

$\bar{u}^T=\left(P_a,T_a,T_1,T_2,P_1,P_2,\omega\right)$ - вектор технологічних параметрів;

P_a,T_a - атмосферний тиск і температура навколишнього середовища;

T_1,T_2, P_1,P_2 - відповідно температури і тиски на вході і виході нагнітача;

N - число спостережень (вимірів) в експериментальному дослідженні.

Очевидно, що на шукані величини $X_i^{(0)}$, $i=\overline{0,4}$ необхідно накласти наступне обмеження:

$$X_i^{(0)}\geq 0\,,\; i=\overline{0,4}\,. \quad (7)$$

Задача (6) з обмеженням (7) відноситься до класу оптимізаційних задач з обмеженнями, і її успішний розв'язок залежить від вибору відповідного методу розв'язку. Перш за все, необхідно врахувати структуру функції мети і обмежень.

Традиційний підхід до вирішення поставленої задачі ґрунтується на використанні градієнтних методів, таких як методи Ньютона-Гауса, Левенберга-Марквардта, квазіньтоновські методи [18], які адаптовані до задач найменших квадратів. Використання даних пасивного експерименту для вирішення задачі (6) з врахуванням обмеження (7) не завжди приводить до бажаного результату.

Це пояснюється кількома причинами: по-перше, матриця Гессе може бути погано обумовлена, по-друге, змінні задачі МНК незадовільно відмаштабовані і зрештою, топологія функції мети (3) може бути досить складною – мати вигляд яру або бути багатоекстремальною.

Як альтернативу градієнтним методам для розв'язку задачі МНК (6) з обмеженням (7) у роботі [19] був використаний генетичний алгоритм.

Зношення елементів проточної частини ВЦН приводить до зміни його продуктивності, але така зміна може відбутися і в результаті зміни технологічних параметрів нагнітача. Для усунення фактору залежності продуктивності нагнітача від технологічних параметрів і виявлення зміни продуктивності нагнітача від узагальнених діагностичних ознак ВЦН необхідно поточну продуктивність приводити до умов нового нагнітача або після його капітального ремонту. Для цього необхідно на основі спостережень за роботою нового нагнітача або після його капітального ремонту побудувати емпіричну модель.

Таким чином, для визначення варіацій діагностичних ознак, які проявляються після певного періоду роботи ВЦН, крім значень $X_i^{(0)}$, $i=\overline{0,4}$ необхідно мати значення поточної об'ємної продуктивності $Q_j^{(count)}$, що перераховані до умов $Q_j^{(0)}$.

Аналіз формули (1) показує, що поточне значення Q об'ємної продуктивності нагнітача природного газу є функцією технологічних параметрів

$$Q=f\left(\omega,T_1,T_2,P_1,P_2,T_a,P_a\right). \quad (8)$$

Залежність (8) будемо шукати у вигляді полінома степені n

$$y=\sum_{i=0}^{M-1}a_i\prod_{j=1}^{n}x_j^{s_{ji}}\,, \quad (9)$$

Змінні, що входять в емпіричну модель (11), приведені до безрозмірного виду

$$y_i=\frac{Q_i-Q_{min}}{Q_{max}-Q_{min}}, \quad (10)$$

$$x_j^{(i)}=\frac{Z_j^{(i)}-Z_{j,min}^{(i)}}{Z_{j,max}^{(i)}-Z_{j,min}^{(i)}}\,,\; i=\overline{1,N}\,,$$

де $Z_1 = P_1$; $Z_2 = P_2$; $Z_3 = T_1$;
$Z_4 = T_2$; $Z_5 = \omega$; $Z_6 = P_a$;
$Q_{min} = \min_{i \in N} \{Q_i\}$; $Q_{max} = \max_{i \in N} \{Q_i\}$;
N - кількість точок відліку.
Інші позначення у формулі (6) такі:
M - кількість членів полінома;
a_i - коефіцієнти полінома;
s_{ji} - степені аргументів, які повинні задовольняти обмеженню $\sum_{j=1}^{n} s_{ji} \le m$;
m - число змінних x_j, $j = \overline{1,m}$.

Число членів M полінома (9) визначають за такою формулою [20]: $M = \frac{(m+n)!}{m!n!}$.

Побудова математичної моделі з використанням залежності (9) має назву емпіричного моделювання.

В основі емпіричного моделювання процесів і явищ лежить фундаментальний метод найменших квадратів (МНК). У МНК допускають, що структура моделі відома, яку в більшості випадків, вибирають лінійною відносно її параметрів.

На практиці, як правило, структура моделі (8) невідома, що вимагає довільного вибору як числа функцій, так і вигляду самих функцій у моделі (8). Якщо вибрана модель у вигляді полінома (9), то задача синтезу структури моделі зводиться до вибору степеня полінома і кількості членів такого полінома. Іншими словами, після того, як вибрано степінь полінома, необхідно визначити, які члени у поліноміальній залежності (9) слід залишити, а які не включати до складу полінома. Критерій, який використовується для визначення параметрів моделі (9), є внутрішнім критерієм [21] і його використання приводить до помилкового правила: чим складнішою є модель, тим вона точніша. Складність поліноміальної моделі визначається числом членів і найвищим степенем полінома: чим більше членів полінома, тим меншим є значення критерію апроксимації.

Тому для вибору структури моделі (9) був запропонований індуктивний метод самоорганізації моделей [21], що базується на теоремі Геделя. У відповідності з цією теоремою ніяка система аксіом не може бути логічно замкненою: завжди можна знайти таку теорему, для доведення якої необхідне зовнішнє доповнення – розширення початкової системи аксіом. Стосовно задачі визначення структури моделі (9) геделівський підхід означає застосування зовнішнього критерію, який дає змогу однозначного вибору єдиної моделі із заданого класу моделей. Критерій називають зовнішнім, якщо його визначення засновано на застосуванні нових даних, які не використовувались при синтезі моделі (9). Це означає, що всі дані числом N, які отримані у результаті експерименту, розбиваються на дві частини N_A і N_B так, що $N = N_A + N_B$. Перша із них - навчальна, а друга – перевірна.

У більшості випадків для вибору структури моделі використовують критерії регулярності

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} (Y_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{N_B} Y_i^2}, \qquad (11)$$

де Y_i, y_i - експериментальні і розрахункові значення продуктивності нагнітача на множині точок B,

і мінімуму зміщення

$$\Delta^2(A,B) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left(y_i(A) - y_i(B)\right)^2}{\sum_{i=1}^{N} Y_i^2}, \qquad (12)$$

де $y_i(A)$, $y_i(B)$ - розрахункові значення продуктивності нагнітача за формулою (9) відповідно на множинах точок A і B.

Якщо вибраний критерій регулярності (8), то вибирають наступний розподіл даних експерименту [24]: $N_A = 0,7N$ і $N_B = 0,3N$, а при виборі критерію (14) - $N_A = 0,5N$ і $N_B = 0,5N$.

Реалізація індуктивного методу самоорганізації моделей здійснюється поетапно: перший етап – генерація моделей-претендентів (у певному порядку підвищення складності); другий етап – відбір найкращої моделі за критерієм селекції (11) або (12).

Розрізняють три способи генерації моделей-претендентів.

Перший із них комбінаторний метод, який вибирає моделі із виразу (9) шляхом прирівнювання до нуля деяких його коефіцієнтів. Таким чином, отримуємо сукупність моделей. Вибір найкращої моделі здійснюється на основі одного із критеріїв селекції.

Другий спосіб відомий як метод групового врахування аргументів (МГУА), в якому генерація моделей здійснюється на основі багаторядної процедури. У першому ряду селекції утворюють всі можливі пари аргументів, і для кожної із них знаходять часткові моделі, наприклад, у вигляді повного полінома. Із всіх часткових моделей вибирають K найкращих, за вибраним критерієм селекції. Із виходів цих K моделей знову утворюють комбінації всіх можливих пар, які є входами моделей другого ряду селекції. Для кожної із цих пар знову формують часткові моделі і т. д. Оцінка коефіцієнтів часткових моделей здійснюється за допомогою МНК. Нарощування рядів селекції відбувається до тих пір, поки основний критерій селекції зменшується.

Третій метод подібний до другого. Різниця лише у тому, що на кожному ряді селекції часткові моделі утворюють шляхом прирівнювання до нуля певного числа їх коефіцієнтів.

Недоліком комбінаторного методу селекції моделей є необхідність перебору великого числа моделей. Якщо вихідною моделлю вибраний повний поліном степеня n, то загальне число моделей-претендентів складає $2^M - 1$, де M - загальне число членів повного полінома степеня n. Навіть сучасні ЕОМ не здатні реалізувати такі алгоритми при значному числові змінних і високому степені полінома. МГУА породжує моделі, у яких фігурують проміжні змінні кожного із рядів селекції, що значно утруднює процес переходу до вхідних змінних системи, що моделюється. Сказане стосується і третього методу, оскільки він, по суті, є модифікацією МГУА.

Із усіх трьох методів найпривабливішим є комбінаторний метод, оскільки він дає можливість отримати модель, де аргументами виступають вхідні величини системи. Для зняття проблеми великої розмірності застосуємо генетичний підхід [22].

При комбінаторному методі синтезу моделі із повного полінома (9) отримують емпіричну модель, де частина параметрів приймає значення нуль. Інші параметри, що залишились, будуть відмінні від нуля. Утворимо упорядковану структуру довжиною M, в якій на i-тому місці буде одиниця або нуль, що залежатиме від того, чи параметр a_i, $i=\overline{1,M}$ моделі (9) відмінний від нуля, чи нульовий. У теорії генетичних алгоритмів така упорядкована послідовність має назву хромосоми або особі, а атомарний елемент хромосоми (одиниця або нуль) – це ген. Набір хромосом утворює популяцію. Важливим поняттям у теорії генетичних алгоритмів є функція пристосування, яка визначає ступінь пристосування окремих осіб у популяції. Вона дає змогу із всієї популяції вибрати особі, які є найбільш пристосованими, тобто такі, які мають найбільше (найменше) значення функції пристосування. У задачі синтезу емпіричних моделей функцією пристосованості виступає критерій селекції (11) або (12).

Таким чином, задача синтезу емпіричної моделі сформована наступним чином: із початкової популяції хромосом шляхом еволюційного відбору вибрати таку хромосому, яка забезпечує найкраще значення функції пристосування (мінімальне значення критерію селекції (11) або (12)). Розроблений метод синтезу емпіричних моделей оптимальної складності та відповідне програмне забезпечення показали свою придатність та ефективність при синтезі емпіричних моделей складних процесів [13, 14].

Перерахунок об'ємної продуктивності нового нагнітача (або після капітального ремонту) до поточних умов здійснюється за формулою

$$y^{(0)}_{count} = F\,\overline{a},$$

де F - матриця, яка утворена із функцій

$$f_i\left(\overline{x}\right) = \prod_{j=1}^{n}\left(x_j\right)^{s_{ji}},$$

де x_j, $j=\overline{1,6}$ - поточні вхідні змінні моделі приведені до безрозмірного вигляду;

$\overline{a}$ - параметри емпіричної моделі (9), включаючи і нульові їх значення.

Перехід від безрозмірних одиниць до розмірних здійснювався у відповідності з (10)

$$Q^{(o)}_{count,i} = y^{(0)}_{count,i}\left(Q^{(0)}_{max} - Q^{(0)}_{min}\right) + Q^{(0)}_{min},$$

де $Q^{(0)}_{min}$, $Q^{(0)}_{max}$ - мінімальна і максимальна продуктивності нового нагнітача (або після капітального ремонту).

Знаючи значення величин $Q^{(o)}_{count,i}$, а також значення параметрів $X_i^{(0)}$, $i=\overline{0,4}$, за формулами (3) – (5) знайдемо величини $\beta_i = \dfrac{\partial\varphi\left(\overline{X}^{(0)}\right)}{\partial X_i}$, $i=1,2,3$.

Аналіз залежності (2) та (4) – (6) показує, що

$$\beta_i^{(k)} = \beta_i\left(\overline{X},\overline{u}^{(k)}\right),$$

де $\overline{u}^{(k)} = \left(\varepsilon^{(k)}, z^{(k)}, \tau^{(k)}, T_1^{(k)}, z_1^{(k)}, \omega^{(k)}\right)^T$;

$\varepsilon^{(k)} = \dfrac{P_2^{(k)}}{P_1^{(k)}}$ - коефіцієнт стисливості газу; $k=\overline{1,N}$.

З врахуванням прийнятих позначень залежність (3) набуде такого вигляду;

$$\Delta Q^{(k)} = \beta_1\left(\overline{X},\overline{u}^{(k)}\right)\Delta X_1 + \beta_2\left(\overline{X},\overline{u}^{(k)}\right)\Delta X_2 + \\ +\beta_3\left(\overline{X},\overline{u}^{(k)}\right)\Delta X_3\,, \tag{13}$$

Задача тепер у тому, щоб за значеннями $\Delta Q_k^{(count)} = Q^{(0)}_{count,k} - Q_k$ і значеннями $\Delta Q\left(\overline{X},\overline{u}^{(k)},\Delta\overline{X}\right)$, які обчислюються за формулою (13), знайти значення ΔX_i, $i=1,2,3$. Розв'язок поставленої задачі ґрунтується на використанні методу найменших квадратів. У відповідності з цим методом мінімізується критерій апроксимації

$$J\left(\Delta\overline{X}\right) = \sum_{k=1}^{N}\left(\Delta Q_k^{(count)} - \Delta Q\left(\overline{X},\overline{u}^{(k)},\Delta\overline{X}\right)\right)^2. \tag{14}$$

Мінімізація виразу (14) відносно значень ΔX_i, $i=1,2,3$ приводить до такого результату:

$$\Delta\overline{X} = CF^T\Delta\overline{Q}^{(count)},$$

де $C = \left(F^TF\right)^{-1}$;

$$\Delta\overline{Q}^{(count)} = \left(\Delta Q_1^{(count)}, \Delta Q_2^{(count)}, \cdots, \Delta Q_N^{(count)}\right)^T;$$

$$F = \begin{bmatrix} \beta_1\left(\overline{X},\overline{u}^{(1)}\right) & \beta_2\left(\overline{X},\overline{u}^{(1)}\right) & \beta_3\left(\overline{X},\overline{u}^{(1)}\right) \\ \beta_1\left(\overline{X},\overline{u}^{(2)}\right) & \beta_2\left(\overline{X},\overline{u}^{(2)}\right) & \beta_3\left(\overline{X},\overline{u}^{(2)}\right) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \beta_1\left(\overline{X},\overline{u}^{(N)}\right) & \beta_2\left(\overline{X},\overline{u}^{(N)}\right) & \beta_3\left(\overline{X},\overline{u}^{(N)}\right) \end{bmatrix}.$$

Таким чином, за значеннями величин ΔX_i, $i=1,2,3$ можна оцінити технічний стан ВЦН. Зважаючи не те, що значення технологічних параметрів вимірюється з певною похибкою, а похибка вимірювання продуктивності нагнітача може досягати до 20 %. Крім того, існують похибки методу синтезу емпіричних моделей оптимальної складності та визначення варіацій ΔX_i, $i=1,2,3$ за методом найменших квадратів. Тому отримані значення ΔX_i, $i=1,2,3$ слід розглядати як нечіткі величини.

Стан проточної частини ВЦН будемо визначати не за абсолютними значеннями варіацій ΔX_i, $i=1,2,3$, а за їх відносними значеннями, що виражені у відсотках

$$\Delta x_i = \frac{|\Delta X_i|}{X_i} \cdot 100\%,\ i=1,2,3.$$

Технічний стан проточної частини ВЦН будемо оцінювати у відповідності з табл. 1.

Таблиця 1 – Стан проточної частини ВЦН

Стан ВЦН	Значення Δx_i, %	Позначення
відмінний	0 - 5	prf
нормальний	5 -10	nrm
необхідне втручання	≥ 10	n_inter

Функції належності $\mu(\Delta x_i)$ нечітких величин Δx_i, $i=1,2,3$ показані на рис. 1.

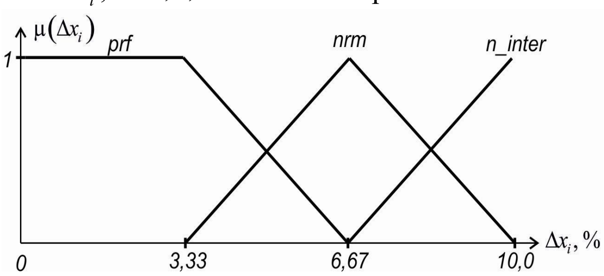

Рисунок 1 – Функції належності нечітких величин Δx_i, $i=1,2,3$

Стан протічної частини ГПА будемо характеризувати такими терм-множинами як «відмінно», «добре», «допустимо», «необхідно приймати міри». Увесь діапазон зміни вихідної величини d, що характеризує стан ВЦН, приймемо за одиницю.

Отже, лінгвістична змінна «стан ВЦН» d буде характеризуватись чотирма термами (табл. 2).

Таблиця 2 – Значення вихідної лінгвістичної змінної

Лінгвістична змінна d	Значення	Позначення
відмінно	0 – 0,25	well
добре	0,25 - 0,5	fine
допустимо	0,5 – 0,75	perm
необхідно приймати міри	0,75 – 1,0	Ntm

Графік функції належності для термів змінної d показаний на рис. 2.

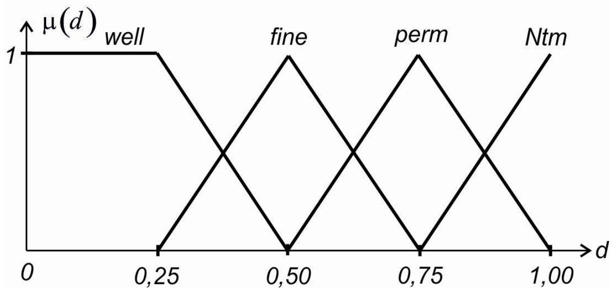

Рисунок 2 – Функції належності для термів нечіткої змінної d

Основу проектування нечітких систем складає база знань, основу якої складає формальне представлення знань з використанням логічних зв'язок «І», «АБО», «НІ» та імплікації «ЯКЩО … ТО …».

Таким чином, база знань дає змогу встановити функціональну залежність між вихідним параметром d та вектор-аргументом $\bar{x}$

$$d = f(\bar{x}), \qquad (15)$$

де $\bar{x} = (\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3)^T$.

Формалізм подання знань, які витікає із залежності (15), має такий вигляд:

ЯКЩО (*умова*): ТО (*дія*), ІНАКШЕ (*дія*). (16)

Коли поточна ситуація, яка характеризує технічний стан нагнітача, узгоджується з умовою ЯКЩО, то виконується дія, яка визначається частиною ТО або ІНАКШЕ.

Система нечіткого висновку про стан нагнітача дає змогу на основі інформації про варіації Δx_i отримати уявлення про його технічний стан. Для цього така система повинна мати базу правил нечітких продукцій і реалізувати нечіткий вивід висновків на основі посилань і умов, які подані у формі нечітких лінгвістичних висловлювань (16).

При складанні бази правил виходили із таких міркувань [23]. Технічний стан нагнітача природного газу характеризується трьома показниками Δx_1, Δx_2, Δx_3 ($k=3$, які будемо асоціювати із такою ж кількістю місць, на кожне із яких поміщаємо один із n термів. Потім із n термів вибираємо один (довільний) і ставимо його на перше місце потім із n термів знову вибираємо один і поміщаємо на друге місце і т. д. до k -го місця включно. Отже, на одному місці різними способами можна розмістити $n_i = C_n^1$, $i=\overline{1,k}$ термів. І відповідності з комбінаторним принципом множення загальне число таких комбінацій $N = (C_n^1)^k$.Оскільки $C_n^1 = n$, то загальне число правил (16) буде визначатись за формулою

$$N = n^k. \qquad (17)$$

Враховуючи те, що $k=3$ і $n=3$ (табл. 1), маємо $N=27$.

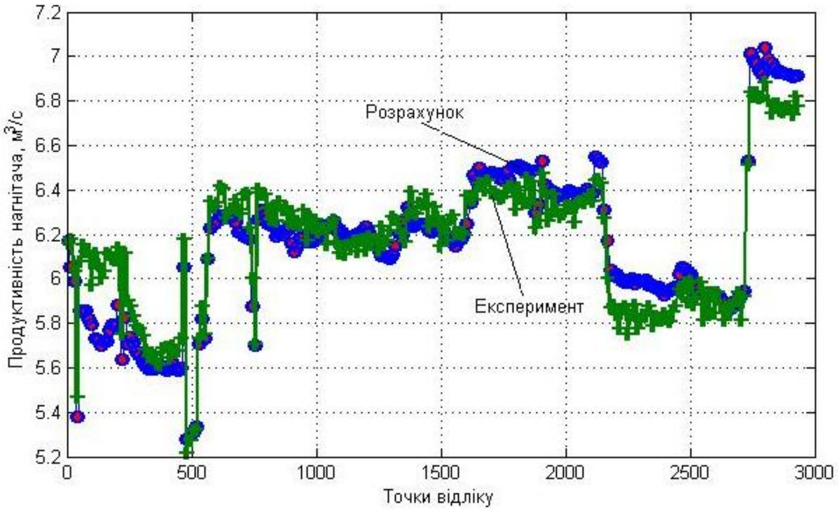

Рисунок 3 – Результат параметричної ідентифікації математичної моделі (1)

При складанні бази правил враховувалась така обставина. Якщо одна із лінгвістичних змінних Δx_i набуває значення «n_inter» (табл. 1), то нечіткий висновок d набуде значення «Ntm» (табл. 2).

Початковим етапом нечіткого висновку є фазифікація - знаходження значень функції належності нечітких множин (термів) за відомими вхідними даними Δx_i, $i=1,2,3$. Закінченням етапу фазифікації є знаходження значень $b_i=\mu(\Delta x_i)$, $i=1,2,3$ для кожної із підумов усіх правил, які утворюють базу правил системи нечіткого висновку.

На етапі агрегатування визначають істинність умов за кожним із правил системи нечіткого висновку (16), використовуючи множину значень $B=\{b_i\}$, яка отримана на етапі фазифікації. На цьому етапі значення b_i використовуються як аргументи нечіткої кон'юнкції (нечітке «and»). Результатом виконання етапу агрегатування буде множина $B'=\{b_i'\}$.

Наступним етапом у системі нечіткого висновку є процедура активізації, яка за відомою множиною значень $B'=\{b_i'\}$ і заданими ваговими коефіцієнтами w_i, знаходять степінь істинності для вихідної нечіткої величини d. Результатом виконання етапу активізації буде множина значень $D=\{d_i\}$, яка дає змогу визначити функції належності кожної із підумов для вихідної величини за правилом min - активізації

$$\mu'(d)=\min\left(x_i,\mu(d)\right),$$

де $x_i=b_i' w_i$.

Завершальним етапом нечіткого висновку є дефазифікація, яка на основі результатів акумуляції дає змогу визначити детерміноване значення вихідної величини і, відповідно, стан нагнітача природного газу. Для визначення числових значень вихідної величини d на етапі дезифікації застосовується метод центра ваги [24].

Перевірка основних положень розробленої методики здійснювалась на основі експериментальних даних отриманих у ході експлуатації відцентрового нагнітача природного газу 16 ГЦ2-395/53-76С у Долинському ЛВУМГ. Були взяті дані про режими роботи нагнітача за листопад місяць 2014 року і за лютий місць 2015 року.

Параметри математичної моделі (1) визначались за методом найменших квадратів з використанням експериментальних даних, отриманих у листопаді 2014 року. Задача мінімізації функції нев'язки

$$J\left(\bar{X}\right)=\sum_{k=1}^{N}\left(Q_k-Q\left(\bar{X},\bar{p}_k\right)\right)^2, \qquad (18)$$

де Q_k - продуктивність нагнітача у дискретні моменти часу $k\Delta t$;

$Q\left(\bar{X},\bar{p}_k\right)$ - розрахункове значення продуктивності нагнітача за формулою (1);

$\bar{X}=\left(X_0,X_1,X_2,X_3,X_4\right)^T$ - вектор параметрів моделі (1);

$\bar{p}_k$ - вектор технологічних параметрів;

N - кількість спостережень за умови, що $\bar{X}\geq 0$, відноситься до класу задач великої розмірності. Градієнтні методи розв'язування задачі (18), які входять до пакету Optimization Toolbox системи MatLab, використовують алгоритми Ньтона-Рафсона і Левенберга-Марквардта, які дають змогу знаходити лише локальний мінімум задачі (18) [18]. Як показали машинні експерименти, задача (18) є багато екстремальною. Тому для її розв'язання був вибраний генетичний алгоритм, який дає змогу знайти глобальний мінімум задачі (18) [25].

На рис. 3 зображений результат роботи програми з визначення параметрів математичної моделі (1). Основу програми склав генетичний алгоритм з пакета Global Optimization Toolbox.

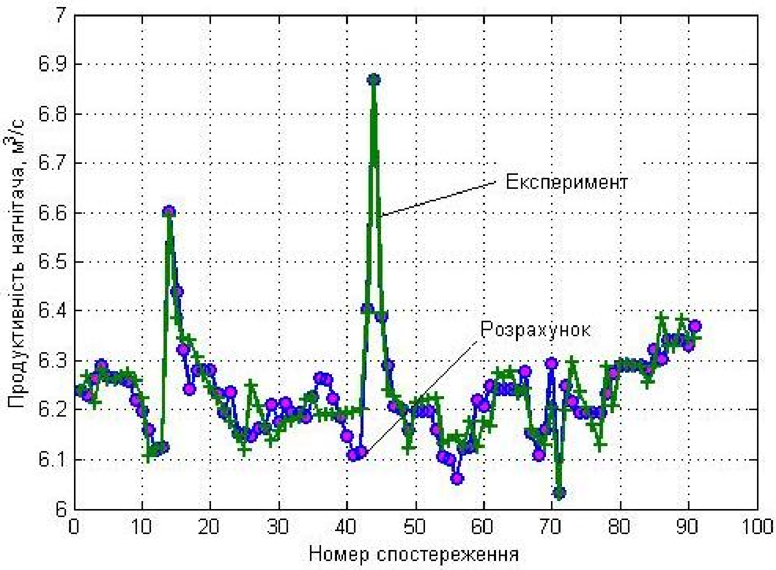

Рисунок 4 – Залежність продуктивності нагнітача від технологічних параметрів

Були отримані такі значення параметрів математичної моделі (1): $X_0 = 0,5206$; $X_1 = 16,9007$; $X_2 = 19,3157$; $X_3 = 9,0062$; $X_4 = 0,2524$. Залишкова сума квадратів $J\left(\bar{X}\right) = 40,6279$ (м³/с)². Для $N = 2933$ оцінка дисперсії склала $\hat{\sigma}_Q^2 = 0,014\left(м^3/с\right)^2$, а оцінка коефіцієнта кореляції $K_Q = 0,942$, що може служити підставою для висновку про адекватність математичної моделі (1).

Для визначення технічного стану нагнітача природного газу згідно з викладеною методикою були проведені спостереження за роботою нагнітача у лютому місяці 2015 року.

Поточну продуктивність нагнітача, яка визначається функціональною залежністю (8), шукали у вигляд полінома (9) четвертої степені. Параметри моделі розраховували за допомогою методу синтезу моделей оптимальної складності на засадах генетичних алгоритмів з використанням критерію регулярності (11). Число членів повного полінома (9) при $m = 4$ і $n = 7$ дорівнюватиме $M = 330$. Застосування розробленого методу дало змогу синтезувати емпіричну модель оптимальної складності з числом коефіцієнтів 56 (рис. 4)

Після перерахунку об'ємної продуктивності нового (або після капітального ремонту) нагнітача до поточних умов були обчислені коефіцієнти $\beta_i\left(\bar{X},\bar{u}^{(j)}\right)$ рівняння (13) у всіх точках спостережень, що дало змогу визначити матрицю F і відповідно варіації діагностичних ознак ΔX_i, $i = 1,2,3$. У результаті отримали такі значення: $\left|\Delta X_1\right| = 0,5239$; $\left|\Delta X_2\right| = 1,0817$; $\left|\Delta X_3\right| = 0,1981$. Відповідно отримали відносні значення варіацій - $\Delta x_1 = 3,1\%$, $\Delta x_2 = 5,6\%$ і $\Delta x_3 = 2,2\%$. За допомогою розробленої fuzzy-програми у середовищі MatLab встановлено, що стан проточної частини нагнітача – нормальний.

Висновки

Аналіз отриманої діагностичної моделі показав, що її параметри визначаються геометричними розмірами робочого колеса двоступеневого ВЦН. В процесі експлуатації ВЦН лише деякі елементи робочого колеса зношується, що призводить до зміни їх геометричних розмірів і, як наслідок, до зміни параметрів діагностичної математичної моделі. Залежність параметрів моделі від геометричних розмірів є складною і безпосередньо ідентифікувати геометричні розміри робочого колеса нагнітача на основі такої моделі неможливо.

Узагальнені діагностичні ознаки, які є функціями радіального зазору, товщини і ширини лопаток робочого колеса, дають змогу на основі спостережень за роботою ВЦН і з використанням розробленої математичної моделі ідентифікувати технічний стан ВЦН.

Показано, що задача оцінки технічного стану двоступеневого ВЦН спрощується, якщо визначати не абсолютні значення узагальнених діагностичних ознак, а їх відхилення від значень, що визначені для нового ВЦН (або після капітального ремонту). Розроблена методика оцінки такої зміни узагальнених діагностичних ознак.

Література

1 Трубопровідний транспорт газу / М. П. Ковалко, В. Я. Грудз, В. Б. Михалків та ін. – К.: АренаЕко, 2002. – 600 с.

2 Li Y. G. A Gas Turbine Diagnostic Approach with Transient Measurements / Y. G. Li // Journal of Power and Energy. – 2003. – Vol. 217, № 2. – pp. 169 – 177.

3 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення: ДСТУ 2389 – 94 – [Чинний від 01.01.1995]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 24 с.

4 Ковалко М.П. Методи та засоби підвищення ефективності функціонування систем трубопровідного транспорту газу / М. П. Ковалко. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2001. – 287 с.

5 Копелев С. З. Расчет турбин авиационных двигателей / С. З. Копелев, Н.Д. Тихонов. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.

6 Щуровский В.А. Инструкция по контролю и учету технического состояния элементов газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / В. А. Щуровский, С. П. Зарицкий. – М.: ВНИИГАЗ, 1977. – 32 с.

7 Лановий М. Д. Аналіз методів і критеріїв оцінювання технічного стану газоперекачувального агрегату / М. Д. Лановий // Вісник НАУ. – 2010. – № 2. – С. 33 – 39.

8 Giampaolo T. Gas Turbine Handbook: Principles and Practices / T. Giampaolo. – 3rd Edition. – London: Published by The Fairmont Press, Inc., 2006. – 437 p.

9 Parthasarathy G. Readiness Approach for Propulsion Engine LRUs / G. Parthasarathy, D. Mylaraswany, O. Uluyol // Proceedings of MFPT 2011, May 10-12, Virginia Beach, VA.

10 Зарицкий С. П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / С. П. Зарицкий. – М.: Недра, 1986 – 198 с.

11 Горбійчук М. І. Метод параметричної ідентифікації технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу / М. І. Горбійчук, В. М. Медведчук // Нафтогазова енергетика. – 2015. - № 1(23). – С. 78 – 85.

12 Ревзин Б. С. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты / Б. С. Ревзин. – М.: Недра, 1986. – 212 с.

13 Ивановский Н. Н. Центробежные нагнетатели природного газа / Н. Н. Ивановский, В. Н. Криворотько: учебное пособие. – М.: Недра, 1994. – 176 с.

14 Рис В. Ф. Центробежные компрессорные машины: монография / В. Ф. Рис. – Л.: Машиностроение, 1981. – 351 с

15 Горбійчук М. І. Метод параметричної ідентифікації технічного стану відцентрового нагнітача природного газу / М. І. Горбійчук, В. М. Медведчук, Г. П. Кропельницька // Методи та прилади контролю якості. – 2012. – № 2 (29). – С. 102 – 112.

16 Ziegler Kai U. A study on impeller-diffuser interaction. Pt.1. Influence on the performance / Ziegler Kai U., Gallus Heinz F., Niehuis Reinhard; Trans. ASME. J. Turbomach, 2003. – 125. – № 1. P. 173 – 182.

17 Горбійчук М. І. Ідентифікація діагностичних ознак нагнітача природного газу / М. І. Горбійчук, М. І. Когутяк, О. А. Скріпка // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 4 (17). – С. 39 – 45.

18 Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей; пер. с англ. В. Ю. Лебедева под ред. А. А. Петрова. – М.: Мир, 1985. – 509 с.

19 Горбійчук М. І. Лінеаризована діагностична модель відцентрового нагнітача природного газу / М. І. Горбійчук, В. М. Медведчук // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2013. – № 1 (34). – С. 146 – 155.

20 Горбійчук М. І. Індуктивний метод побудови математичних моделей газоперекачувальних агрегатів природного газу / М. І. Горбійчук, М. І.Когутяк, Я. І. Заячук // Нафтова і газова промисловість. – 2008. - № 5. – С. 32 – 35

21 Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко. – К.: Наукова думка, 1981. – 296 с.

22 Горбійчук М. І. Метод синтезу емпіричних моделей на засадах генетичних алгоритмів / М. І. Горбійчук, М. І. Когутяк, О. Б. Василенко, І. В.Щупак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 4 (33). – С. 72-79.

23 Горбійчук М. І. Метод оцінки стану ґрунтів з використанням fuzzy-технологій / М. І. Горбійчук, О. В. Пендерецький, М. А. Шуфнарович // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 3/5(33). – С. 29–32.

24 Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2007. – 288 с.

25 Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; пер. с польск. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 08.10.15

Рекомендована до друку
професором ***Семенцовим Г.Н.***
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором ***Николайчуком Я.М.***
(Карпатський державний центр інформаційних засобів і технологій НАН України, м. Львів)