

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НАГНІТАЧІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

М.І. Горбійчук

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри*
Контактний тел.: 8 (03422) 50-45-21
E-mail: gorb@nung.edu.ua

С.Т. Самуляк

Аспірант*
Контактний тел.: 8 (068) 541-24-13
E-mail: scipion.st@gmail.com
*Кафедра комп'ютерних систем та мереж
ІФНТУНГ
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000

І.В. Щупак

Молодший науковий співробітник
ДП "Укрметрестандарт"
вул. Метрологічна, 4, м. Київ, 03680
Контактний тел.: 8 (044) 126-53-89
E-mail: shchupak@gmail.com

В даній статті сформовано інтегральні діагностичні ознаки для оцінки технічного стану газоперекачувальних агрегатів, а також отримана діагностична модель відцентрового нагнітача природного газу

Ключові слова: інтегральні діагностичні ознаки, газоперекачувальний агрегат, відцентровий нагнітач, політропний коефіцієнт корисної дії, внутрішня потужність

В данной статье сформированы интегральные диагностические признаки для оценки технического состояния газоперекачивающих агрегатов, а также получена диагностическая модель центробежного нагнетателя природного газа

Ключевые слова: интегральные диагностические признаки, газоперекачивающий агрегат, центробежный нагнетатель, политропный коэффициент полезного действия, внутренняя мощность

In given article integral diagnostic features for an estimation of a technical condition of a gas pumping unit are generated, and also the diagnostic model of a natural gas centrifugal blower is received

Key words: integral diagnostic features, gas pumping unit, centrifugal blower, polytropic efficiency, internal power

1. Вступ

Формування діагностичних ознак є передумовою успішного розв'язання задач діагностування газоперекачувальних агрегатів (ГПА) і, як наслідок, вчасного виявлення несправностей, які виникають в умовах роботи компресорних агрегатів, що в кінцевому результаті приводить до зменшення числа аварій, підвищення надійності і продуктивності компресорних станцій.

2. Суть інтегральних діагностичних ознак

У роботі [1] запропоновано обчислювати діагностичні ознаки як відхилення степені підвищення тиску, політропного коефіцієнта корисної дії та внутрішньої потужності нагнітача від їх базових значень, що визначаються за відповідними приведеними характеристиками відцентрових нагнітачів (ВЦН) природного газу. Недоліком такого підходу є його чутливість до

шумів, що зумовлює значну невизначеність при інтерпретації результатів обстежень компресорних станцій (КС). На відміну від такого підходу тут розглядається інший метод формування діагностичних ознак, які названі нами інтегральними.

Суть цього методу у тому, що за методикою роботи [2] обчислюються політропний коефіцієнт корисної дії $\eta_{пол}$ та внутрішня потужність нагнітача N_i за даними, які фіксуються інформаційно-виміральною системою. Отримані залежності $\eta_{пол} = f(Q_{np})$ і $N_i = f(G)$ апроксимують поліномом другої степені

$$\mu(q) = a_0 + a_1q + a_2q^2, \tag{1}$$

де $\mu(q) \in \{f(Q_{np}), f(G)\}$, $q \in \{Q_{np}, G\}$; Q_{np} , G - приведена об'ємна і масова продуктивності нагнітача.

Коефіцієнти, що входять у модель (1), обчислюються за методом найменших квадратів

$$\bar{a} = CF^T \bar{\mu},$$

де $\bar{a}^T = (a_0, a_1, a_2)$ - вектор параметрів моделі (1);

$C = (F^T F)^{-1}$ - дисперсійна матриця;

$$F = \begin{bmatrix} 1 & q^{(1)} & (q^{(1)})^2 \\ 1 & q^{(2)} & (q^{(2)})^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & q^{(N)} & (q^{(N)})^2 \end{bmatrix} - \text{матриця розміром } N \times 3;$$

N - кількість точок спостережень;

$\bar{\mu}$ - вектор, компоненти якого це значення $\eta_{\text{пол}}$ чи N_i у точках спостережень.

3. Формування інтегральних діагностичних ознак

У процесі роботи ВЦН зміна його технічного стану відбувається під дією експлуатаційних факторів, що приводить до дрейфу статичних характеристик нагнітача відносно його початкової характеристики. Якщо тепер статичні характеристики $\eta_{\text{пол}} = f(Q_{\text{нр}})$ і $N_i = f(G)$ фіксувати через певні проміжки часу, то їх апроксимація рівнянням (1) породжує сімейство кривих (рис. 1).

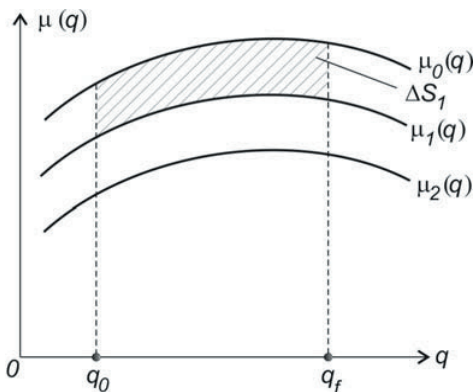


Рис. 1. Формування інтегральної діагностичної ознаки

Інтегральні діагностичні ознаки визначимо як відношення зміни площі ΔS_i до початкової площі S_0 (рис. 1).

$$\varphi_i = \frac{\Delta S_i}{S_0}.$$

Оскільки $\Delta S_i = S_0 - S_i$, то

$$\varphi_i = 1 - \frac{S_i}{S_0}. \quad (2)$$

Величину S_i визначимо за формулою

$$S_i = \int_{q_0}^{q_f} \mu_i(q) dq. \quad (3)$$

Враховуючи значення $\mu_i(q)$, отримаємо

$$S_i = a_0^{(i)}(q_f - q_0) + \frac{a_1^{(i)}}{2}(q_f^2 - q_0^2) + \frac{a_2^{(i)}}{3}(q_f^3 - q_0^3), \quad i = \overline{0, m}, \quad (4)$$

де m - кількість періодів, на протязі яких велось спостереження за роботою нагнітачів.

Оскільки інтервали інтегрування у формулі (3) для статичних характеристик $\eta_{\text{пол}} = f(Q_{\text{нр}})$ і $N_i = f(G)$, що отримані за кожний із m місяців різні, то для правомірного співставлення площ S_i інтервали інтегрування слід вибрати із умови

$$q_0 = \max_i(q_i), \quad i = \overline{1, m},$$

$$q_f = q_0 + \Delta q,$$

де:

$$\Delta q = \min_i(\Delta q_i);$$

$$\Delta q_i = \max(q_i) - \min(q_i);$$

$$q_0 \in \{G_0, Q_{\text{нр},0}\}; \quad q_f \in \{G_f, Q_{\text{нр},f}\}.$$

Із формули (4) випливає, що $0 \leq \varphi_i < 1$. Якщо $\varphi_i = 0$ при $i \geq 1$, то це означає, що немає зміщення характеристики $\eta_{\text{пол}} = f(Q_{\text{нр}})$ або $N_i = f(G)$ і вичерпаний ресурс ВЦН дорівнюватиме нулю. Збільшення величини φ_i приводить до збільшення вичерпного ресурсу. Очевидно, що існують певні граничні значення $\varphi_{\text{нр}}^{(j)}$, $j = 1, 2$, коли залишковий ресурс дорівнюватиме нулю.

4. Залежність інтегральних діагностичних ознак від часу

На рис. 2 показані графіки зміни інтегральних діагностичних ознак для відцентрового нагнітача ГП16С, із якого видно, що після шостого місяця роботи збільшились значення $\varphi_1^{(1)}$ (діагностична ознака за політропним к. к. д. нагнітача) і $\varphi_1^{(2)}$ (діагностична ознака за внутрішньою потужністю ВЦН). Це може свідчити про погіршення техніко-економічних показників роботи ВЦН.

Для оцінки вичерпного ресурсу ВЦН апроксимуємо залежності $\varphi^{(1)} = f_1(t)$ і $\varphi^{(2)} = f_2(t)$ певним функціональним наближенням – емпіричною моделлю. Через $\varphi^{(1)}$ ми позначили інтегральну діагностичну оцінку за політропним коефіцієнтом корисної дії, а через $\varphi^{(2)}$ - за внутрішньою потужністю, тобто $\varphi \in \{\varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}\}$. Побудова емпіричної моделі передбачає вибір деякої залежності і на основі експериментально отриманих значень $\varphi_i^{(j)}$, $j = 1, 2$, $i = \overline{1, m}$ та оцінку коефіцієнтів (параметрів) моделі.

Отже, необхідно за даними $\varphi_i^{(1)}$ і $\varphi_i^{(2)}$, які залежать від змінної t , визначити, який функціональний зв'язок існує між $\varphi_i^{(1)}$ (або $\varphi_i^{(2)}$) і часом t . Як видно із рис. 2 функції $f_1(t)$ і $f_2(t)$ - нелінійні відносно аргументу t . Залежності $f_1(t)$ і $f_2(t)$ можна описати поліномами степені n

$$f(t) = \sum_{i=0}^n c_i t^i,$$

$$\text{де } f(t) \in \{f_1(t), f_2(t)\};$$

c_i - коефіцієнти поліному, $i = \overline{1, n}$. (у нашому випадку $n \leq 4$).

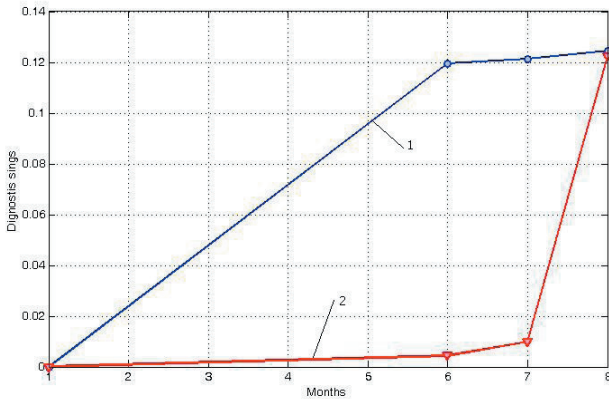


Рис. 2. Зміна інтегральних діагностичних ознак у часі (1 – за політропним к. к. д.; 2 – за внутрішньою потужністю нагнітача)

Були вибрані поліноми 2, 3 і 4 степенів і для них знайдені коефіцієнти за методом найменших квадратів. Аналіз отриманих результатів показав, що поза вузлами апроксимації отримані криві не забезпечують плавну зміну ознак $\varphi^{(1)}$ і $\varphi^{(2)}$. Як альтернатива були запропоновані залежності

$$\varphi_1(t) = \alpha_1 t^{\beta_1}, \tag{5}$$

$$\varphi_2(t) = \alpha_2 (e^{\beta_2 t} - 1). \tag{6}$$

Прологарифмуємо ліву і праву частини залежності (5) і введемо такі позначення: $Y_1 = \ln \varphi_1(t)$, $A_0 = \ln \alpha_1$, $A_1 = \beta_1$ і $X_1 = \ln t$. Тоді

$$Y_1 = A_0 + A_1 X_1.$$

Аналогічним способом здійснюємо перетворення залежності (6) у лінійну форму

$$Y_2 = B_0 + B_1 t,$$

$$\text{де } Y_2 = \ln(\varphi_2(t) + \alpha_2), B_0 = \ln \alpha_2, B_1 = \beta_2.$$

Для перевірки тісноти лінійного зв'язку між змінними X_1 і Y_1 та t і Y_2 обчислювався коефіцієнт кореляції за формулою

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}},$$

де N - число експериментальних точок;

$$X \in \{X_1, t\}, Y \in \{Y_1, Y_2\};$$

\bar{X} , \bar{Y} - оцінки математичних сподівань випадкових величин X_1 і Y_1 .

Для експериментальних даних, які наведені на рис. 1 були отримані такі значення вибірових коефіцієнтів кореляції: $\rho_{X_1 Y_1} = 0,9961$, $\rho_{t Y_2} = 0,9463$. Оскільки значення $\rho_{X_1 Y_1}$ і $\rho_{t Y_2}$ близькі до одиниці, то можна стверджувати, що між змінними X_1 і Y_1 та t і Y_2 існує лінійний зв'язок, а це свідчить про те, що залежності $f_1(t)$ і $f_2(t)$ можна вибрати у формі (5) і (6).

5. Визначення параметрів моделі для оцінки залишкового ресурсу ВЦН

Наступним кроком у процесі побудови емпіричних моделей (5) і (6) є оцінка їх параметрів, яка здійснюється за методом найменших квадратів

$$J(\bar{a}) = \min_{\bar{a}} \sum_{i=1}^N (\varphi_i - \varphi(t_i))^2, \tag{7}$$

де $\varphi_i \in \{\varphi_i^{(1)}, \varphi_i^{(2)}\}$ - експериментально отримані значення інтегральних діагностичних ознак у i -тому спостереженні;

$\varphi(t_i) \in \{\varphi_1(t_i), \varphi_2(t_i)\}$ - обчислені значення інтегральних діагностичних ознак за формулами (5) і (6) при $t = t_i$.

t_i - i -тий місяць на протязі якого велось спостереження за статичною характеристикою нагнітача.

Задача (7) є задачею ідентифікації, метою розв'язку якої є визначення оцінок параметрів моделей (5) і (6). Ця задача є задачею нелінійного оцінювання параметрів α_1 , β_1 (або α_2 , β_2) і ефективність її розв'язку залежить від топології функції нев'язки $J(\bar{a})$. Як приклад, дослідимо топологію функціонала (7) для моделі (5). Для цього у площині параметрів α_1 і β_1 побудуємо лінії рівня. Щоб побудувати такі лінії, необхідно у співвідношенні (7) $\varphi(t_i)$ замінити на $f_1(t_i) = \alpha_1 t_i^{\beta_1}$, а φ_i - на $\varphi_i^{(1)}$; значення $J(\bar{a})$ прирівняти до постійної величини C . У результаті отримаємо

$$\sum_{i=1}^N (\varphi_i^{(1)} - \alpha_1 t_i^{\beta_1})^2 = C.$$

Після очевидних перетворень приходимо до квадратного рівняння відносно параметру α_1

$$r_2 \alpha_1^2 - r_1 \alpha_1 + r_0 = 0, \tag{8}$$

$$\text{де } r_2 = \sum_{i=1}^N t_i^{2\beta_1}, r_1 = 2 \sum_{i=1}^N \varphi_i^{(1)} t_i^{\beta_1}, r_0 = \sum_{i=1}^N (\varphi_i^{(1)})^2 - C.$$

Для кожного фіксованого значення C будемо змінювати значення β_1 від $\beta_{1, \min}$ до $\beta_{1, \max}$ з вибраним кроком $\Delta \beta_1$. Визначивши із рівняння (8) значення α_1 , будуємо лінії рівня (рис. 3).

Аналіз рис. 3 показує, що топологія $J(\bar{a})$ має вигляд «яру». Добре відомо [3, 4], що застосування методів локальної оптимізації не приводить до розв'язку задачі (7), оскільки градієнт функції $J(\bar{a})$ різко змінює своє значення на дні «яру». Отже, локальний пошук приводить процес обчислень лише на дно «яру», а там практично зводить до мінімуму швидкість збіжності параметрів α_1 і β_1 до своїх оптимальних значень. Навіть якщо використовувати спеціальні методи локаль-

ної оптимізації, то немає впевненості, що без достатньо точного початкового наближення ми отримаємо розв'язок задачі (7). Виниклі обчислювальні труднощі можна подолати, якщо скористатися тією обставиною, що параметри α_1 і α_2 входять у рівняння (5), (6) лінійно.

Для моделі (5) запишемо

$$J^{(1)}(\bar{a}) = \min_{\bar{a}} \sum_{i=1}^N (\varphi_i^{(1)} - \alpha_1 t_i^{\beta_1})^2. \quad (9)$$

$$C \in \{0,01; 0,51; 1,01; 1,51; 2,01\}$$

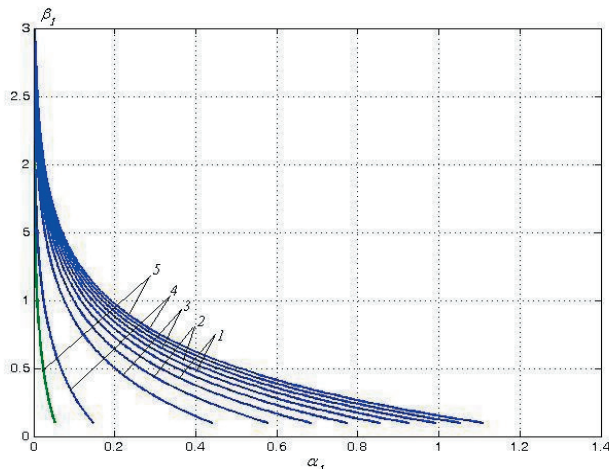


Рис. 3. Лінії рівня функціоналу (7) (модель $f_1(t_i) = \alpha_1 t_i^{\beta_1}$)

Необхідні умови існування розв'язку задачі (9) породжують систему рівнянь

$$\frac{\partial J^{(1)}(\bar{a})}{\partial \alpha_1} = -2 \sum_{i=1}^N (\varphi_i^{(1)} - \alpha_1 t_i^{\beta_1}) t_i^{\beta_1} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial J^{(1)}(\bar{a})}{\partial \beta_1} = -2 \alpha_1 \sum_{i=1}^N (\varphi_i^{(1)} - \alpha_1 t_i^{\beta_1}) t_i^{\beta_1} \ln t_i = 0. \quad (11)$$

Рівняння (10) розв'яжемо відносно параметру моделі α_1

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_i^{(1)} t_i^{\beta_1}}{\sum_{i=1}^N t_i^{2\beta_1}}. \quad (12)$$

Підставивши значення α_1 у рівняння (11), отримуємо

$$\sum_{i=1}^N \varphi_i^{(1)} t_i^{\beta_1} \ln t_i - \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_i^{(1)} t_i^{\beta_1}}{\sum_{i=1}^N t_i^{2\beta_1}} \sum_{i=1}^N t_i^{2\beta_1} \ln t_i = 0. \quad (13)$$

Таким чином, розв'язок задачі (9) звівся до знаходження кореня рівняння (13) з наступною підстановкою знайденого значення β_1 у формулу (12), із якої і визначаємо параметр α_1 . Рівняння (13) нелінійне і розв'язати його можна одним із методів пошуку нуля функції однієї змінної. Ми використали метод половинного ділення відрізка, оскільки інші методи потребують обчислення похідних (метод Ньютона) або не гаран-

тують збіжності обчислювальної процедури (метод січних і хибного положення) [4].

Графік функції

$$Y(\beta_1) = \sum_{i=1}^N \varphi_i^{(1)} t_i^{\beta_1} \ln t_i - \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_i^{(1)} t_i^{\beta_1}}{\sum_{i=1}^N t_i^{2\beta_1}} \sum_{i=1}^N t_i^{2\beta_1} \ln t_i$$

зображений на рис. 4, із якого видно, що функція має локальний нуль при $\beta_1 > 0$.

Розв'язок задачі (9) дав такі результати: $\alpha_1 = 0,0739$, $\beta_1 = 0,2572$ і $J^{(1)}(\bar{a}) = 1,3156 \cdot 10^{-5}$.

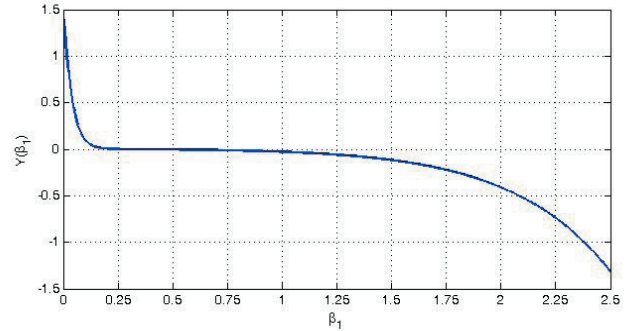


Рис. 4. Залежність $Y(\beta_1)$

Використання необхідних умов існування розв'язку задачі

$$J^{(2)}(\bar{a}) = \min_{\bar{a}} \sum_{i=1}^N (\varphi_i^{(2)} - \alpha_2 (e^{\beta_2 t_i} - 1))^2 \quad (14)$$

приводить до такого результату:

$$\alpha_2 = \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_i^{(2)} (e^{\beta_2 t_i} - 1)}{\sum_{i=1}^N (e^{\beta_2 t_i} - 1)^2}, \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^N \varphi_i^{(2)} t_i e^{\beta_2 t_i} - \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_i^{(2)} (e^{\beta_2 t_i} - 1)}{\sum_{i=1}^N (e^{\beta_2 t_i} - 1)^2} \sum_{i=1}^N (e^{\beta_2 t_i} - 1) t_i e^{\beta_2 t_i} = 0. \quad (16)$$

Задача (14) за своєю структурою аналогічна задачі (9). Тому для її розв'язку застосовані ті ж алгоритми, що і у попередньому випадку, знаходження нуля функції (13). Розв'язком рівняння (16) є значення $\beta_2 = 2,4480$, підставивши його у формулу (15), знаходимо $\alpha_2 = 3,8170 \cdot 10^{-10}$. При цьому функції нев'язки набула такого значення: $J^{(2)}(\bar{a}) = 1,2798 \cdot 10^{-5}$. На рис. 5 показані графіки функцій (5) і (6). На цьому ж рисунку нанесені значення інтегральних діагностичних ознак (у вигляді кружків), які розраховані за формулою (4).

Якщо відомі граничні $\varphi_{\text{гп}}^{(1)}$ і $\varphi_{\text{гп}}^{(2)}$, то із рівнянь (5) і (6) можна визначити

$$t_{\text{гп}}^{(1)} = \left(\frac{\varphi_{\text{гп}}^{(1)}}{\alpha_1} \right)^{1/\beta_1},$$

$$t_{\text{гп}}^{(2)} = \frac{1}{\beta_2} \ln \left(\frac{\varphi_{\text{гп}}^{(2)}}{\alpha_2} + 1 \right).$$

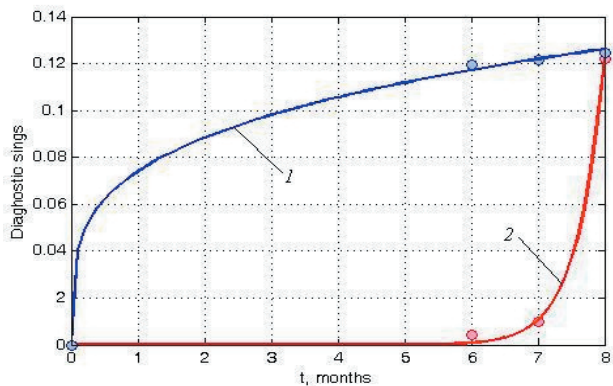


Рис. 5. Апроксимация интегральных диагностических ознак залежностями (5) і (6) (1 – за політропним к. к. д.; 2 – за внутрішньою потужністю нагнітача)

Очевидно, що вичерпний ресурс нагнітача $t_{гр}$ визначиться як найменше із двох значень $t_{гр}^{(1)}$ і $t_{гр}^{(2)}$, тобто

$$t_{гр} = \min(t_{гр}^{(1)}, t_{гр}^{(2)}) .$$

6. Висновок

Таким чином, отримана діагностична модель відцентрового нагнітача природного газу дає можливість

знайти його вичерпний ресурс, що створює передумови переходу від планового ремонту до його ремонту за технічним станом.

Погіршення технічного стану нагнітача приводить, як правило, до збільшення рівня вібрації, що свідчить про існування можливого функціонального зв'язку між інтегральними діагностичними ознаками та вібраційними характеристиками ВЦН. Виявлення такого функціонального зв'язку може бути предметом подальших досліджень.

Література

1. Горбійчук, М. І. Діагностична модель відцентрового нагнітача природного газу [текст] / М. І. Горбійчук, М. І. Когуляк, О. А. Скріпка // Нафтова і газова промисловість. – 2006. – № 2. – С. 36 – 38.
2. Компресорні станції. Контроль теплотехнічних та екологічних характеристик газоперекачувальних агрегатів [текст] : СОУ 60.03-30019801-011:2004. – Офіц. вид. – К. : ДК «Укртрансгаз», 2004. – 117 с.
3. Растрьгин, Г. Н. Системы экстремального управления [текст] / Г. Н. Растрьгин – М. : Наука, 1974. – 632 с.
4. Гилл, Ф. Практическая оптимизация [текст] / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт : пер. с англ. В. Ю. Лебедева. – М. : Мир, 1985. – 509 с.