

УДК 681.5.015

СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ДВОСТУПЕНЕВОГО НАГНІТАЧА ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

*В. М. Гарасимів, Т. Г. Гарасимів, О. В. Мойсеєнко

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, 76019, e-mail: gorb@nung.edu.ua

Синтезовано систему оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого відцентрового нагнітача (ВЦН) природного газу із використанням основних понять та визначень нечіткої логіки, що підвищує ефективність прийняття відповідних рішень для оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН. Експериментальну перевірку синтезованої системи виконано за місяць до капітального ремонту двоступеневого нагнітача на КС-39 «Прогрес» і місяць після нього, під час якої, на основі розробленої бази правил та логічної обробки нечітких даних, зроблено висновок, що технічний стан проточної частини нагнітача – допустимий. Даний результат збігається із реальним станом проточної частини нагнітача.
Ключові слова: система, технічний стан, капітальний ремонт, база правил, проточна частина.

Синтезировано систему оценки технического состояния проточной части двухступенчатого центробежного нагнетателя (ЦБН) с использованием основных понятий и определенной нечеткой логики, что повышает эффективность принятия соответствующих решений для оценки технического состояния проточной части двухступенчатого ЦБН. Экспериментальную проверку синтезированной системы выполнено за месяц до капитального ремонта двухступенчатого нагнетателя на КС-39 «Прогресс» и месяц после него, во время которой на основе разработанной базы правил и логической обработки нечетких данных, сделан вывод, что техническое состояние проточной части нагнетателя - допустимый. Данный результат совпадает с реальным положением проточной части нагнетателя.

Ключевые слова: система, техническое состояние, капитальный ремонт, база правил, проточная часть

Using the existing object fuzziness, the estimation system of the volute technical state of the two-stage centrifugal compressor, consisting of separate modules, has been developed. The experimental verification of this system has been done one month before the overhaul of the two-stage centrifugal compressor on the compressor station "Progress" and the month after it. Based on the rule base and data processing, it was concluded that the volute technical state of the two-stage centrifugal compressor 650-21-2 was acceptable. This result coincided with the real state of the compressor.

Keywords: system, technical state, overhaul, rule base, volute

Вступ

На сьогодні оцінювання технічного стану ВЦН здійснюють шляхом проведення планово-попереджувальних ремонтів, що має ряд недоліків. По-перше, ВЦН може бути виведений у ремонт у справному стані при досягненні терміну чергового ремонту. По-друге, дефекти вузлів ВЦН під дією зовнішніх та суб'єктивних чинників (порушення правил експлуатації, недосконалість конструкції) можуть розвиватися стрімко в міжремонтний період, що веде до втрати його працездатності і в подальшому до ремонтно-відновлювальних робіт [1].

Оскільки більшість нагнітачів, які постачає промисловість в останні роки, мають два ступені стиснення газу та їхні основні властивості пов'язані із формою і розмірами їхньої проточної частини, то синтезування системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого нагнітача природного газу даватиме можливість оперативно відстежувати технічний стан його проточної частини, що приведе до скорочення втрат природного газу під час його компримування.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Питанню оцінювання технічного стану проточної частини нагнітачів та обчисленню втрат в їх елементах присвячена значна

кількість публікацій як зарубіжних, так і вітчизняних авторів [2-5], які, в основному, використовують дослідження Еккерта, К. Пфлейдерера, А. І. Степанова, В. Траупеля та інших. Оцінка технічного стану проточної частини нагнітачів проводиться на основі газодинамічного розрахунку їхньої проточної частини із використанням експериментальних даних. Проте запропоновані методи в даних роботах, в основному, призначені для одноступеневих нагнітачів, а більшість компресорних станцій (КС) України використовують двоступеневі нагнітачі природного газу. Тому метою статті є синтезування системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу із використанням основних понять та визначень нечіткої логіки, що підвищить ефективність прийняття відповідних рішень для оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН

Основна частина

У роботі [6] запропоновано оцінювати технічний стан проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу за значеннями величин Δx_i , $i=1,2,3$, які розглядаються як нечіткі величини і визначаються за формулою:

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

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

$X_i^{(0)}$, $i=1,2,3$ – значення параметрів технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН, які відповідають умовам роботи нового нагнітача або після його капітального ремонту (КР).

X_i , $i=1,2,3$ – значення параметрів технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН.

Для знаходження величин Δx_i , $i=1,2,3$ використано експлуатаційні характеристики роботи ВЦН 650-21-2 (КС-39 «Прогрес» Богородчанського ЛВУМГ) на протязі місяця до КР і на протязі місяця після нього. Прямі вимірювання при розкритті проточної частини ВЦН дали середнє значення радіального зазору $s_r = 0,8$ мм (за номінальної величини зазору $s_r = 0,5$ мм), що свідчить про незначне зношення проточної частини ВЦН 650-21-2.

Обґрунтування зв'язку між отриманими параметрами та станом проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Обґрунтування впливу параметрів Δx_i на технічний стан проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу

Параметр	Приклад взаємозв'язку	Джерело
$\Delta x_1 = 1,2690 \%$	Цей параметр визначається через середню товщину і ширину лопаток першого РК двоступеневого ВЦН природного газу. Характеризує ерозійне зношення першої ступені стиснення газу нагнітача.	[2-5]
$\Delta x_2 = 2,4613 \%$	Цей параметр визначається через середню товщину і ширину лопаток другого РК двоступеневого ВЦН природного газу. Характеризує ерозійне зношення другої ступені стиснення газу нагнітача.	[2-5]
$\Delta x_3 = 5,0552 \%$	Цей параметр суттєво впливає на технічний стан проточної частини ВЦН, оскільки залежить від зміни радіального зазору покривального диску, збільшення якого має найбільший вплив на політропний к.к.д. ВЦН.	[7-8]

Використовуючи основні поняття та визначення нечіткої логіки (Fuzzy Logic), що є ефективним методом розроблення, оптимізації та побудови складних систем контролювання на основі інтуїції експерта та досвіду інженера [9], синтезовано систему оцінювання технічного

стану проточної частини двоступеневого ВЦН (рис. 1), що складається з окремих модулів:

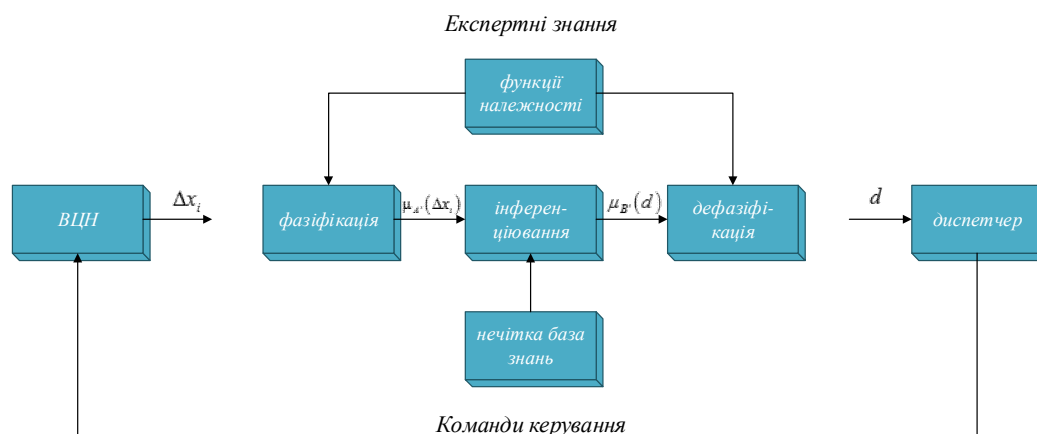


Рисунок 1 – Структура системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу

- **фазифікації** – знаходження значень і форми функцій належностей лінгвістичних змінних (термів) за відомими входніми даними Δx_i та визначення кількості значень вибраних термів. Якщо A^k , $A^k \subseteq X$ – нечітка множина входних лінгвістичних змінних, то їхні функції належності позначимо як $\mu_{A^k}(\Delta x_i)$, де k – кількість лінгвістичних змінних.

Щодо визначення кількості лінгвістичних змінних k в розглянутій літературі [10-12] не подано конкретних рекомендацій. Зауважено, що їхня кількість вибирається від 2 до 11, а іноді до 14 (подальше збільшення може призвести до ускладнення самої моделі). Оскільки зміна параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН залежить від його технологічних параметрів, то кількість лінгвістичних змінних визначаємо на основі діапазону їхньої зміни та інтервалу квантування [13]. Для цього використаємо методу подання невизначених входних даних, які описують процес як динамічний стохастичний об'єкт.

За відомими мінімальним \underline{x}_i і максимальним \bar{x}_i значеннями кожного сигналу можливо визначити інтервали, в яких перебувають їхні припустимі значення. Кожний інтервал розділимо на w відрізків [14]:

$$w_i = \frac{\bar{x}_i - \underline{x}_i}{R_i}, \quad (1)$$

де R_i – розмах контрольованого параметру.

Діапазони змін технологічних параметрів ВЦН передбачено такими: $x^{(1)} - [4000; 6000]$; $x^{(2)} - [2.5; 3.5]$; $x^{(3)} - [3.5; 5.5]$; $x^{(4)} - [0.01; 0.03]$; $x^{(5)} - [280; 300]$; $x^{(6)} - [300; 340]$.

Значення розмахів (рис. 2) приймаємо рівними: $R_1 = 5200 - 4698 = 502$; $R_2 = 3,3931 - 3,0489 = 0,3442$; $R_3 = 4,5787 - 3,9472 = 0,6315$; $R_4 = 0,0286 - 0,0226 = 0,0061$; $R_5 = 296,5 - 290,8 = 5,7$; $R_6 = 324,5 - 313,2 = 11,3$.

Тоді кількість термів, потрібну для фазифікації входних параметрів у межах допуску, можна визначити за формулою (1). Оскільки для більшості параметрів необхідна кількість термів рівна 3, тому для опитування експертів було використано розбиття усіх параметрів на три терми, що носять назву: відмінний (*prf*), нормальний (*nrm*) та необхідне втручання (*n_iter*) [6].

Функції належності $\mu_{A^k}(\Delta x_i)$ можуть бути визначені із використанням різних методів: методу статистичної обробки експертної інформації, методу парних порівнянь, вдосконаленого методу парних порівнянь Сааті або з застосуванням стандартних функцій належності.

Оскільки методологія статистичної обробки експертної інформації містить похибку рівну 30 %, а вдосконалий метод парних порівнянь Сааті вводить додаткову похибку, що пов'язана із наближеним зведенням отриманої функції належності до стандартного вигляду з аналітичною формою запису, то згідно з рекомендаціями в роботі [15] вибираємо трапецеподібні функції належності та функції належності класів L і γ (рис. 3).

Закінченням етапу фазифікації є знаходження нечітких множин A' з функціями належності $\mu_{A'}(\Delta x_i)$.

Як тип операції фазифікації вибираємо синглетон (singleton) [16]:

$$\mu_{A_i}(\Delta x_i) = \delta(\Delta x_i, \bar{x}) = \begin{cases} 1, \Delta x_i = \bar{x} \\ 0, \Delta x_i \neq \bar{x} \end{cases} \quad (2) \quad \begin{aligned} \mu_{A_1}(\Delta x_1) &= \delta(\Delta x_1 - \Delta \bar{x}_1), \quad \mu_{A_2}(\Delta x_2) = \delta(\Delta x_2 - \Delta \bar{x}_2), \\ \mu_{A_3}(\Delta x_3) &= \delta(\Delta x_3 - \Delta \bar{x}_3). \end{aligned}$$

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

Після виконання операції фазифікації типу (2) на вході блоку інференціювання отримаємо нечіткі множини A_1 , A_2 та A_3 :

Результати фазифікації величин Δx_i , $i=1, 2, 3$ наведено в таблиці 2.

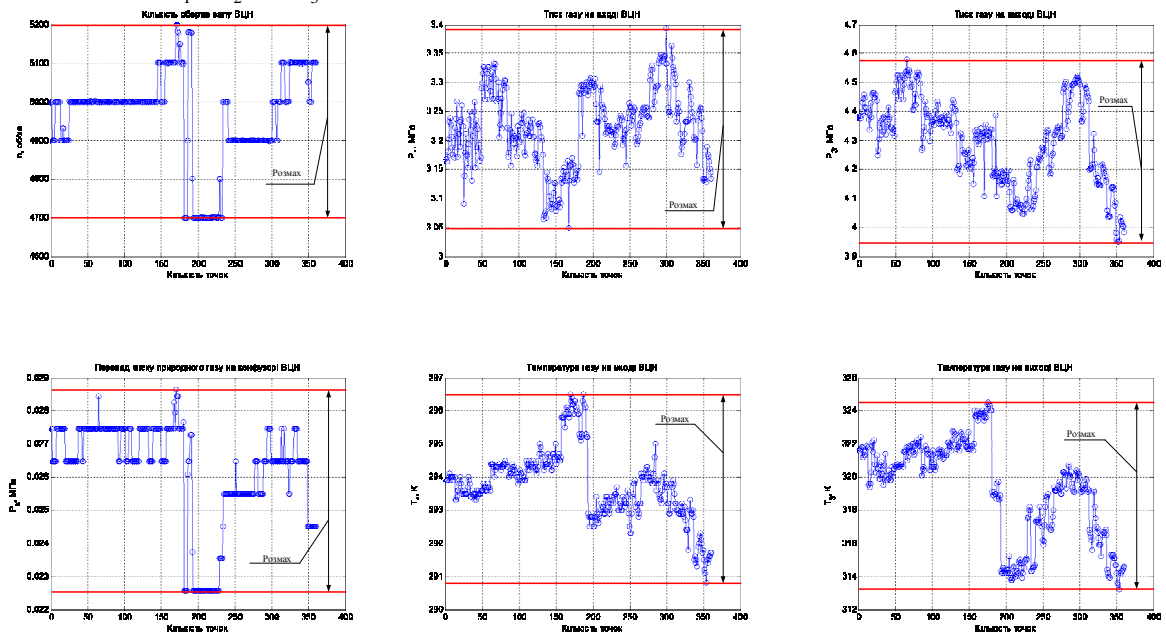


Рисунок 2 – Розмах параметрів

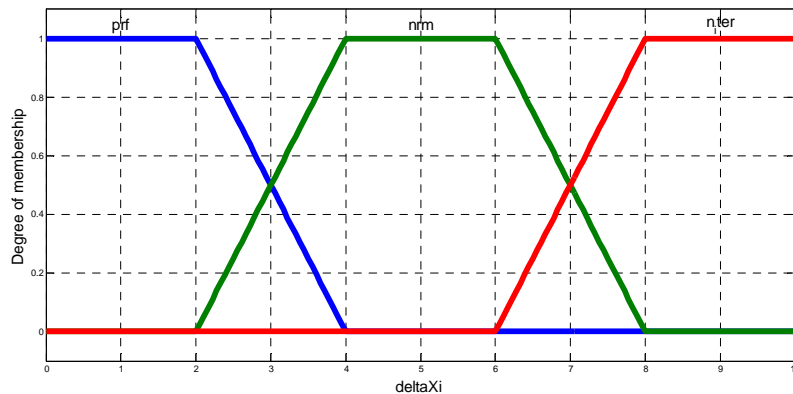


Рисунок 3 – Функції належності $\mu_{A_k}(\Delta x_i)$ вхідних нечітких величин

Таблиця 2 – Фазифікація вхідних лінгвістичних змінних Δx_i , $i=1, 2, 3$

Лінгвістична змінна	Значення вхідних змінних	Значення функції належності	Терм
Параметр Δx_1	1,2690 %	1	«prf» (відмінний)
Параметр Δx_2	2,4613 %	0,76935	«prf» (відмінний)
Параметр Δx_3	5,0552 %	1	«nrm» (нормальний)

Якщо $B^m \subseteq D$ – нечітка множина вихідних лінгвістичних змінних, m – кількість термів вихідної змінної, D – простір вихідних змінних, то $\mu_{B^m}(d)$ – відповідні функції належності на виході (рис. 4). Вихідна змінна d характеризується трьома термами: нормальний (*fine*), допустимий (*perm*) та необхідно вжити заходів (*ntm*).

База правил сформована за допомогою експертів, в якості яких використовувались

технологи-оператори компресорних станцій. Максимальна кількість правил визначається за формулою [6]

$$N_{max} = n^k.$$

Враховуючи те, що $k=3$ і $n=3$, маємо $N_{max} = 27$.

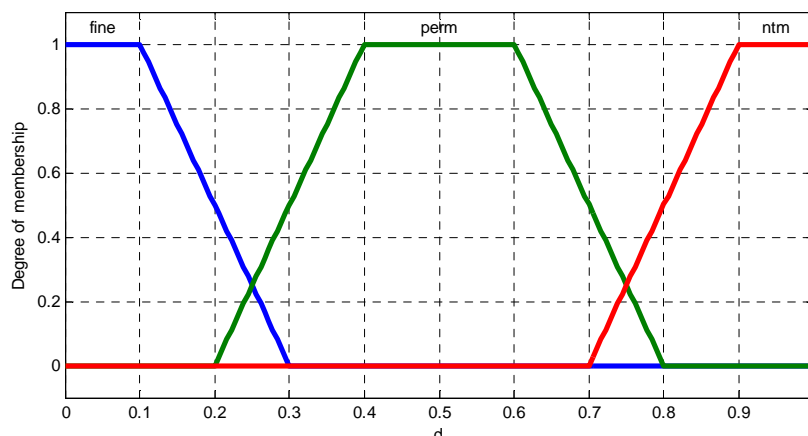


Рисунок 4 – Функції належності $\mu_{B^m}(d)$ для термів нечіткої змінної d

Припустимо, що відповідні правила $R^{(N)}$ пов'язані між собою логічним оператором «AND», тоді використовуємо нечіткі правила типу *modus ponens* зі скалярним виходом у формі [16]:

$$R^{(N)} : \text{IF } (\Delta x_1 \text{ це } A_1^k \text{ AND } \Delta x_2 \text{ це } A_2^k \text{ AND } \Delta x_3 \text{ це } A_3^k) \text{ THEN } (d \text{ це } B^m). \quad (3)$$

Правила (3) можна представити у вигляді нечіткої імплікації [16]:

$$R^{(N)} : A_1^k \times A_2^k \times A_3^k \rightarrow B^m, \quad (4)$$

де $A_1^k, A_2^k, A_3^k \subseteq X$, $B^m \subseteq D$.

Правила (4) можна інтерпретувати як нечітке відношення на множині $X \times D$, в якому $R^{(N)} \subseteq X \times D$ – нечітка множина із наступною функцією належності:

$$\mu_{R^{(N)}}(\Delta x_i, d) = \mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k \rightarrow B^m}(\Delta x_i, d).$$

Результати дії умов, які стоять у правилах (6) після слова «IF» необхідно відповідним методом об'єднати, тобто визначити степені істинності всіх умов в усіх правилах. Правило активується, якщо істинність його умови більша за нуль. Ця процедура виконується на етапі

агрегування із використанням операції нечіткої кон'юкції (нечітке «AND») [17].

Результатом виконання цього етапу буде множина $\bar{B}^m \subseteq D$, функцію належності якої знаходимо за такою формулою:

$$\mu_{\bar{B}^m}(d) = \sup \left[\min(\mu_{A^k}(\Delta x_i), \mu_{R^{(N)}}(\Delta x_i, d)) \right]. \quad (5)$$

Наступним етапом інференціювання є процедура імплікації – знаходження вагових коефіцієнтів правил (3) та визначення функції належності $\mu_{A^k \rightarrow B^m}(\Delta x_i, d)$ нечіткої імплікації (4).

Як відомо, вагові коефіцієнти правил впливають на результат нечіткого логічного висновку. У зв'язку з цим необхідно підібрати такі значення вагових коефіцієнтів правил, які забезпечать найкращу якість нечіткої бази знань (3). Підбирання вагових коефіцієнтів вирішується шляхом розв'язання відповідної задачі оптимізації, в якій цільовою функцією є якість нечіткої бази знань, а керованими змінними є вагові коефіцієнти правил w_k , $k = \overline{1, 27}$ [11]. Обмеженням задачі оптимізації є те, що керовані змінні перебувають у діапазоні $[0, 1]$.

Якщо \bar{w} – вектор керованих змінних, а $C(\bar{w})$ – критерій якості нечіткої бази знань, то задача оптимізації нечіткої бази знань полягає в тому, щоб знайти такий вектор \bar{w} , щоб [11]

$$C(\bar{w}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1,n} (d - F(\bar{w}, \bar{x}))^2} \rightarrow \min, \quad (6)$$

де $F(\bar{w}, \bar{x})$ – результат нечіткого логічного висновку з параметрами \bar{w} при значеннях вхідних змінних \bar{x} .

Оскільки всі висновки правил (3) задані у формі нечітких лінгвістичних висловів першого роду, то як нечітку імплікацію (4) використовуємо правило типу minimum (правило Мамдані):

$$\begin{aligned} \mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k \rightarrow B^m}(\Delta x_i, d) &= \mu_{A^k}(\Delta x_i) \wedge \mu_{B^m}(d) = \\ &= \min[\mu_{A^k}(\Delta x_i), \mu_{B^m}(d)] \end{aligned}$$

Акумуляція висновків нечітких правил продукцій (3), тобто, визначення значення функції належності для терму вихідної змінної виконується із використанням операції мах-диз'юнкції, що приводить у результаті до нечіткої множини, функцію належності якої запишемо таким чином:

$$\mu_B(d) = \max\{\min[\mu_{A^k}(\Delta x_i), \mu_{B^m}(d)]\}. \quad (7)$$

Оскільки оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу здійснюється із використанням понять нечіткої логіки, то в середовищі MatLab було створене спеціальне програмне забезпечення. Структура типу Мамдані системи контролювання параметрів двоступеневого ВЦН зображена на рисунку 5.

Як бачимо, нечітка база знань містить двадцять сім правил. Для прикладу розглянемо два з них ($N = 2$):

$R^{(1)}$: **IF** (Δx_1 це A_1^{prf} **AND** Δx_2 це A_2^{prf} **AND** Δx_3 це A_3^{prf}) **THEN** (d це B^{well})

$R^{(2)}$: **IF** (Δx_1 це A_1^{prf} **AND** Δx_2 це A_2^{prf} **AND** Δx_3 це A_3^{nrm}) **THEN** (d це B^{fine})

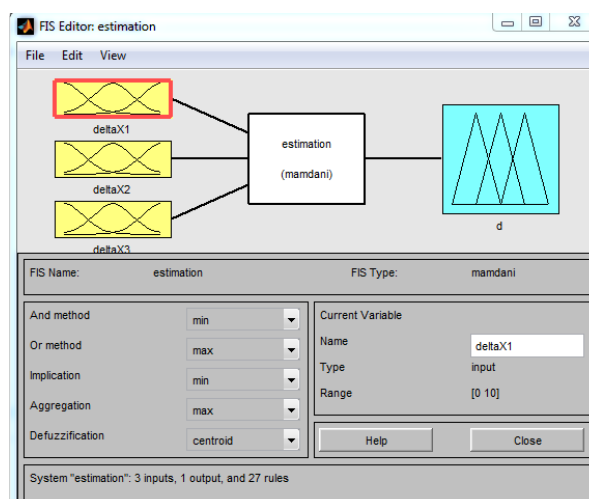


Рисунок 5 – Fuzzy модель Мамдані у програмному середовищі Matlab

У результаті агрегації підумов правил $R^{(1)}$ та $R^{(2)}$ із використанням операції нечіткої кон'юнкції отримаємо множину B^m , функцію належності якої знаходимо за формулою (5):

$$\mu_{B^m}(d) = \sup_{\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3} \left[\min \left(\mu_{A_1 \times A_2 \times A_3}(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3), \mu_{R^{(N)}}(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, d) \right) \right] \quad (8)$$

де $\mu_{R^{(N)}}(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, d)$ – функція належності нечіткого відношення $R^{(N)}$. Припустимо, що

$$\begin{aligned} \mu_{A_1 \times A_2 \times A_3}(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3) &= \min \begin{bmatrix} \mu_{A_1}(\Delta x_1), \\ \mu_{A_2}(\Delta x_2), \\ \mu_{A_3}(\Delta x_3) \end{bmatrix} = \\ &= \min[\delta(\Delta x_1 - \Delta \bar{x}_1), \delta(\Delta x_2 - \Delta \bar{x}_2), \delta(\Delta x_3 - \Delta \bar{x}_3)] \end{aligned}$$

Тоді

$$\begin{aligned} \mu_{B^m}(d) &= \sup_{\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3} \left[\min \begin{bmatrix} \delta(\Delta x_1 - \Delta \bar{x}_1), \\ \delta(\Delta x_2 - \Delta \bar{x}_2), \\ \delta(\Delta x_3 - \Delta \bar{x}_3) \end{bmatrix}, \mu_{R^{(N)}}(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, d) \right] = \\ &= \mu_{R^{(N)}}(\Delta \bar{x}_1, \Delta \bar{x}_2, \Delta \bar{x}_3, d) \end{aligned}$$

Оскільки

$$\mu_{R^{(N)}}(\Delta \bar{x}_1, \Delta \bar{x}_2, \Delta \bar{x}_3, d) = \mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k \rightarrow B^m}(\Delta \bar{x}_1, \Delta \bar{x}_2, \Delta \bar{x}_3, d),$$

то з використанням формули (5) на етапі імплікації отримаємо:

$$\mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k \rightarrow B^m}(\Delta\bar{x}_1, \Delta\bar{x}_2, \Delta\bar{x}_3, d) = \min \left[\mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k}(\Delta\bar{x}_1, \Delta\bar{x}_2, \Delta\bar{x}_3), \mu_{B^m}(d) \right].$$

Крім того,

$$\mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k}(\Delta\bar{x}_1, \Delta\bar{x}_2, \Delta\bar{x}_3) = \min \left[\mu_{A_1^k}(\Delta\bar{x}_1), \mu_{A_2^k}(\Delta\bar{x}_2), \mu_{A_3^k}(\Delta\bar{x}_3) \right].$$

Тому формулу (8) можна записати як

$$\mu_{B^m}(d) = \min \left[\mu_{A_1^k}(\Delta\bar{x}_1), \mu_{A_2^k}(\Delta\bar{x}_2), \mu_{A_3^k}(\Delta\bar{x}_3), \mu_{B^m}(d) \right].$$

На етапі акумуляції згідно з формулою (7) отримаємо:

$$\mu_{B^m}(d) = \max_{N=1,2} \left\{ \min \left[\mu_{A_1^k}(\Delta\bar{x}_1), \mu_{A_2^k}(\Delta\bar{x}_2), \mu_{A_3^k}(\Delta\bar{x}_3), \mu_{B^m}(d) \right] \right\}. \quad (9)$$

На рисунку 6 подана графічна інтерпретація нечіткого висновку за формулами (3)-(9).

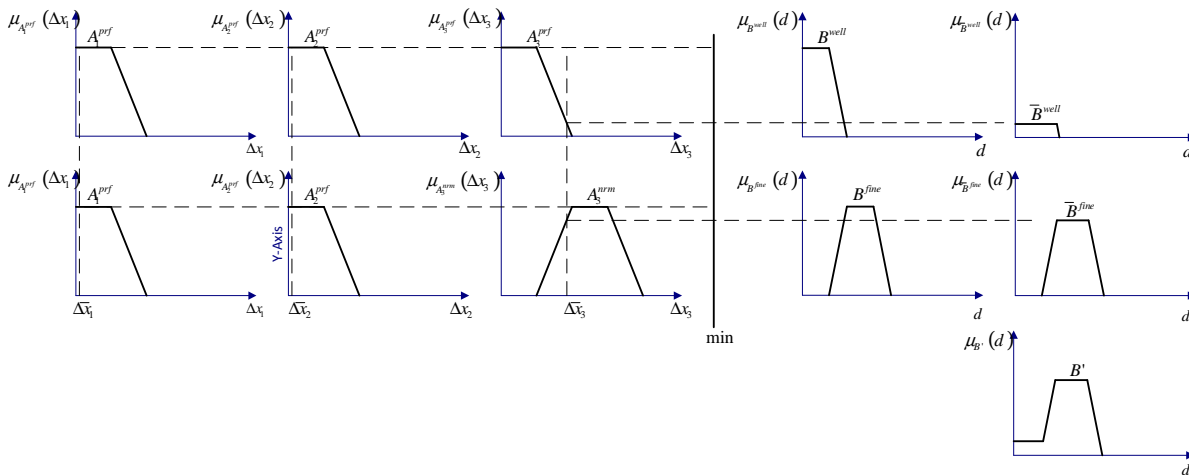


Рисунок 6 –Графічна інтерпретація нечіткого висновку

- **дефазифікації** – перетворення лінгвістичних змінних виходу у вихідний сигнал.

Після логічної обробки нечітких даних (процедура інференціонування) отримуємо нечітку множину B' з функцією належності (9).

Для відображення нечіткої множини B' в єдине значення $\bar{d} \in D$ використовуємо метод центра ваги, згідно з яким значення \bar{d} розраховують як центр ваги функції належності $\mu_{B'}(d)$:

$$\bar{d} = \frac{\int_D d \max_m \mu_{B'}(d)}{\int_D \max_m \mu_{B'}(d)}$$

Вагові коефіцієнти отриманої нечіткої моделі рівні 1, а середня абсолютна нев'язка між експериментальними даними та результатами нечіткого логічного висновку рівна 2,376. Тому для покращення результату нечіткого висновку розв'яжемо оптимізаційну задачу (6) з використанням функції Optimization Toolbox – fmincon. База правил нечітких продукцій у середовищі Matlab після

налаштування вагових коефіцієнтів показана на рисунку 7.

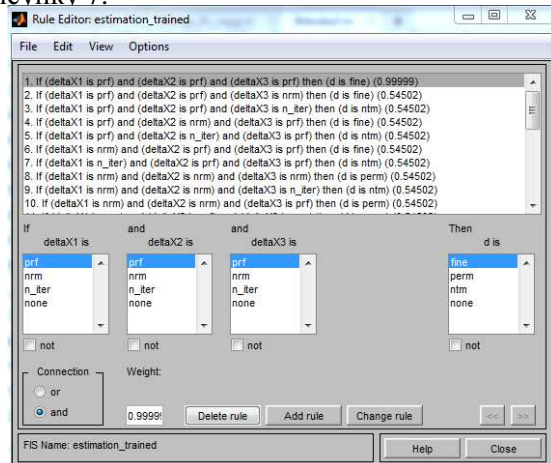


Рисунок 7 – База правил нечітких продукцій у середовищі Matlab після налаштування вагових коефіцієнтів

Дефазифікація вихідної лінгвістичної змінної \bar{d} методом центра ваги для значень функції належності $\mu_{B'}(d)$ приводить до значення 0,5. Це значення є результатом розв'язування задачі нечіткого висновку і

свідчить про те, що технічний стан проточної частини ВЦН 650-21-2 – допустимий.

Висновки

Синтезовано систему оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН, що ґрунтується на визначенні відносних значень зміни параметрів технічного стану ВЦН, виражених у відсотках. На основі розроблених бази правил та логічної обробки нечітких даних зроблено висновок, що технічний стан проточної частини ВЦН 650-21-2 до його капітального ремонту на КС «Богородчани» – допустимий. Даний результат збігається із реальним станом нагнітача, оскільки прямі вимірювання при розкритті проточної частини ВЦН дали середнє значення радіального зазору $s_r = 0,8$ мм (за номінальної величини зазору $s_r = 0,5$ мм), що свідчить про незначне погіршення технічного стану проточної частини ВЦН 650-21-2.

1 Горбійчук М. І. Комп'ютерна система поетапного діагностування роботи відцентрових нагнітачів природного газу / М. І. Горбійчук, О. А. Скріпка, М. І. Козуляк, С. В. Прокіпчин // *Енергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу*. – 2007. – №1 (2). – С. 67-71.

2 Ільченко Б. С. Діагностування функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів: монографія / Б. С. Ільченко. – Харків: ХНАМГ, 2011. – 228 с.

3 Галеркин Ю. Б. Турбокомпрессоры: учеб. Пособие / Ю. Б. Галеркин, Л. И. Козаченко. – СПб: изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 374 с.

4 Ваняшов А. Д. Теория, расчет и конструирование компрессорных машин / А. Д. Ваняшов. – Омск: изд-во ОмГТУ, 2007. – 270 с.

5 Парафейник В. П. Анализ режимов работы ГПА с газотурбинным приводом на стадии проектирования агрегата / В. П. Парафейник, А. В. Смирнов, И. Н. Тертышный, А. Н. Нефедов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 9. – С. 25-32.

6 Горбійчук М. І. Метод оцінки технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу на засадах нечіткої логіки / М. І. Горбійчук, О. А. Скріпка, В. М. Медведчук // *Нафтогазова енергетика*. – 2015. – № 2 (24). – С. 59-68.

7 Инструкция по эксплуатации агрегата ЕГПА-25РЧ. – СКД, Прага : зав. №2805647, 1996. 6 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.

8 Чигур І. І. Фазі-моделювання та автоматизований контроль відпрацювання шарошкових доліт в умовах невизначеності процесу буріння / І. І. Чигур // *Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу*. – 2001. – № 1. – С. 81-86.

9 Раскин Л. Г. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения / Л. Г. Раскин, О. В. Серая. – Х. : Парус, 2008. – 352 с. 9 Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab / С. Д. Штовба. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

10 Ротштейн А. П. Нечеткая надежность алгоритмических процессов / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба. – Винница : Континент-ПРИН, 1997. – 142 с.

11 Семенцов Г. Н. Метод вибору кількості термів для нечіткого опису базових змінних в F-перетворенні параметрів і показників процесу буріння свердловин / Г. Н. Семенцов, О. В. Фадєєва // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2005. – Ч. 1. Т. 1. – С. 30-35.

12 Заячук Я. І. Оптимальне керування газоперекачувальними агрегатами ком-пресорних станцій з урахуванням їх технічного стану : дис. канд. тех. наук: 05.13.07 / Заячук Ярослав Іванович. – Івано-Франківськ, 2009. – 213 с.

13 Семенцов Г. Н. Аналіз та вибір форми функцій належності для фазифікації вхідних сигналів систем / Г. Н. Семенцов, О. В. Фадєєва // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2006. – № 1 (78) – С. 219-225.

14 Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Пер. с польск. И. Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

15 Семенцов Г. Н. Фаззі-логіка в системах контролю: навч. посібник / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, М. В. Шавранський, В. С. Борин. – Івано-Франківськ : Факел, 2002. – 70 с.

Поступила в редакцію 22.05.2018 р.
Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Олійник А. П., докт. техн. наук, проф. Горбійчук М. І.