

Фізико-технічні проблеми транспорту та зберігання енергоносіїв

УДК 622.691

МЕТОД РАНЖУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗА ЇХ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

М.І.Горбійчук, М.І.Козуляк, Я.І.Заячук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)

e-mail: ksm@nimg.edu.ua

Вьоложен подход к ранжированию ГПА по их техническому состоянию.

In this article the authors offered approach for method of ranging supercharger of natural gas on their technical state.

У роботі [1] запропоновано ідею оптимального розподілу потоків природного газу між окремими групами газогінних агрегатів за критерієм мінімальних енергетичних затрат на їх експлуатацію. При цьому допускалось, що характеристики однотипних нагнітачів у групі ідентичні і не змінюються з плином часу. Але у процесі експлуатації газоперекачувальних агрегатів (ГПА) природного газу відбувається зміна їх технічного стану, під дією експлуатаційних чинників. Вплив таких чинників визначається, серед іншого [2], режимами роботи, властивостями робочого середовища, впливом оточуючої атмосфери, а також якістю і своєчасністю проведення ремонтних робіт, виконанням обслуговуючим персоналом правил технічної експлуатації. Вплив конструктивно-виробничих та експлуатаційних чинників на показники роботи ГПА носить випадковий характер і проявляється у їх відхиленні від паспортних даних.

Таким чином, актуальним є завдання врахування технічного стану кожного із нагнітачів у процесі розробки методу оптимального розподілу навантаження між ними у разі їх паралельного сполучення.

Отже, будемо розв'язувати таку задачу:

$$\min: R = C_{\Gamma} \sum_{i=1}^N q_i \quad (1)$$

за обмежень

$$t_{\text{вух.з}} \leq t_{\text{вух.з}}^{(\max)}, \quad (2)$$

$$t_2 \leq t_2^{(\max)}, \quad (3)$$

$$n_i^{(\min)} \leq n_i \leq n_i^{(\max)}, \quad (4)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N k_i Q_i, \quad (5)$$

де: R – вартість роботи групи із N агрегатів, віднесеної до одиниці часу;

C_{Γ} – вартість одиниці об'єму газу, що йде на споживання;

q_i – витрата газу віднесена до нормальних умов, яку споживає i -ий агрегат;

t_2 – температура природного газу на виході із нагнітача;

$t_{\text{вух.з}}$ – температура продуктів згоряння на виході із турбіни низького тиску;

$t_2^{(\max)}$, $t_{\text{вух.з}}^{(\max)}$ – максимально допустимі значення величин t_2 та $t_{\text{вух.з}}$;

n_i – частота обертання ротора i -го нагнітача природного газу;

$n_i^{(\min)}$, $n_i^{(\max)}$ – нижнє і верхнє обмеження на частоту i -го нагнітача;

Q – загальна (планова) продуктивність групи нагнітачів;

Q_i – продуктивність i -го нагнітача.

В обмеження (5) входить коефіцієнт завантаження k_i i -го агрегата, метод визначення якого ґрунтується на ранжуванні агрегатів за їх технічними станом. Для вирішення завдання ранжування скористаємось методом нечіткого виводу.

За основні параметри, які визначають технічний стан i -го ГПА, виберемо такі: швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі – C_i , коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропічним к.к.д. – $K_i^{(h)}$, коефіцієнт технічного стану газотурбінного двигуна (ГТД) за потужністю – $K_i^{(r)}$, віброшвидкість – $V_i^{(v)}$ та вібропереміщення – $S_i^{(v)}$ (максимальні значення серед усіх контрольованих точок). Між цими параметрами і величиною k_i існує певний функціональний зв'язок

$$k_i = f_i(C_i, K_i^{(h)}, K_i^{(r)}, V_i^{(v)}, S_i^{(v)}).$$

Введемо такі позначення: $x_i^{(1)} = C_i$; $x_i^{(2)} = K_i^{(h)}$; $x_i^{(3)} = K_i^{(r)}$; $x_i^{(4)} = V_i^{(v)}$; $x_i^{(5)} = S_i^{(v)}$.

Тоді

$$k_i = f_i(x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, x_i^{(3)}, x_i^{(4)}, x_i^{(5)}), \quad i = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Області зміни параметрів, які характеризують технічний стан ГПА, визначимо у вигляді діапазонів:

$$X_i^{(k)} = [x_{i, \min}^{(k)}, x_{i, \max}^{(k)}], \quad k = \overline{1, M}, \quad M = 5. \quad (7)$$

Аналогічно для вихідної змінної k_i будемо мати

$$K_i = [k_i^{(\min)}, k_i^{(\max)}], \quad (8)$$

де індексами \min , \max позначені нижні та верхні значення як вхідних $x_i^{(k)}$, так і вихідної k_i змінних.

Припустимо, що вхідні і вихідні змінні являють собою лінгвістичні змінні, задані на універсальних множинах (7) і (8). Значеннями лінгвістичної змінної є слова або речення природної мови, тобто терми. Для оцінки лінгвістичних змінних будемо використовувати якісні терми із наступних терм-множин:

$$X_i^{(k)} = \{u_i^{(1)}, u_i^{(2)}, \dots, u_i^{(r_k)}\}, \quad (9)$$

$$K_i = \{k_i^{(1)}, k_i^{(2)}, \dots, k_i^{(m_i)}\}, \quad (10)$$

де: $X_i^{(k)}$, K_i – терм-множини вхідних $x_i^{(k)}$ та вихідних k_i змінних;

$u_i^{(p)}$ – p -ий лінгвістичний терм вхідної змінної $x_i^{(k)}$, $p = \overline{1, r_k}$;

$k_i^{(s)}$ – s -ий лінгвістичний терм вихідної змінної k_i , $s = \overline{1, m_i}$;

r_k , m_i – кількість лінгвістичних термів змінних $x_i^{(k)}$ і k_i .

Якщо із елементів $u_i^{(p)}$, $k_i^{(s)}$ множин $X_i^{(k)}$, K_i поставити у відповідність певну нечітку множину $U_i^{(p)}$ та $K_i^{(s)}$, то процес фазифікації відбувається на основі нечітких правил $R_i^{(j)}$, які мають такий вигляд [3,4]:

$$R_i^{(j)}: \text{якщо } (x_i^{(1)} \text{ це } U_i^{(j1)}) \\ \text{і } x_i^{(2)} \text{ це } U_i^{(j2)} \dots \\ \text{і } x_i^{(k)} \text{ це } U_i^{(jk)}, \\ \text{то } (k_i \text{ це } K_i^{(js)}), \quad j = \overline{1, D}, \quad (11)$$

де: D – кількість нечітких правил;

$U_i^{(jp)}$, $K_i^{(js)}$ – елементи множин $U_i^{(p)}$ та $K_i^{(s)}$.

Увівши позначення

$$U_i = U_i^{(1)} \times U_i^{(2)} \times \dots \times U_i^{(r_k)} \text{ та} \\ (x_i^{(1)}, x_i^{(1)}, \dots, x_i^{(M)})^T = x_i \in X_i,$$

де $X_i = X_i^{(1)} \times X_i^{(2)} \times \dots \times X_i^{(M)}$, а символом " \times " позначено декартовий добуток множин, правило (11) подамо у вигляді нечіткої імплікації

$$R_i^{(j)}: U_i^{(j)} \rightarrow K_i^{(j)}. \quad (12)$$

Це означає, що правило (12) можна інтерпретувати як нечітке відношення на множині $X_i \times K_i$, тобто $R_i^{(j)} \subseteq X_i \times K_i$ – нечітке відношення з функцією належності

$$\mu_{R_i^{(j)}} = \mu_{U_i^{(j)} \rightarrow K_i^{(j)}}(x_i, k_i). \quad (13)$$

На основі нечітких правил (11) необхідно прийняти певне рішення стосовно технічного стану ГПА. У відповідності з правилом modus ponens таке рішення визначається співвідношенням [3]:

$$k_i^{(j)} = U_i^{(j)} \circ R_i^{(j)}, \quad (14)$$

де " \circ " – символ операції композиції.

Якщо відомі функції належності $\mu_i(x_i^{(k)})$, $i = \overline{1, N}$, то знайти функцію належності (13) можна за одним із правил [3]. Найчастіше використовують правило Мамдані, у відповідності з яким

$$\mu_{R_i^{(j)}} = \mu_i(x_i^{(1)}) \wedge \mu_i(x_i^{(2)}) \wedge \dots \wedge \mu_i(x_i^{(M)}) = \\ = \min(\mu_i(x_i^{(1)}), \mu_i(x_i^{(2)}), \dots, \mu_i(x_i^{(M)})). \quad (15)$$

Формули (13)–(15) лежать в основі алгоритму нечіткого виводу Мамдані, основними етапами якого є [5]:

- формування бази правил системи нечіткого виводу;
- фазифікація вхідних змінних;

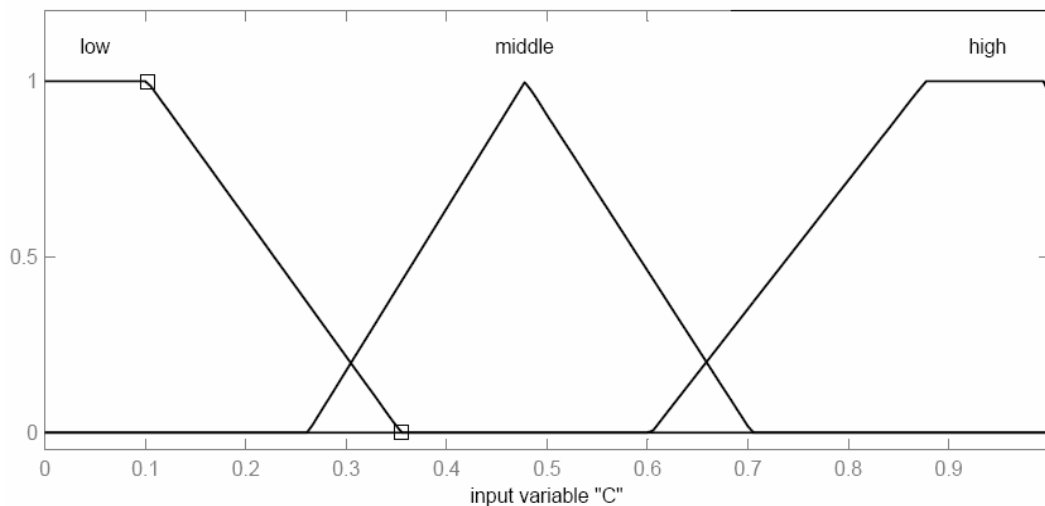


Рисунок 1 — Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної C_i

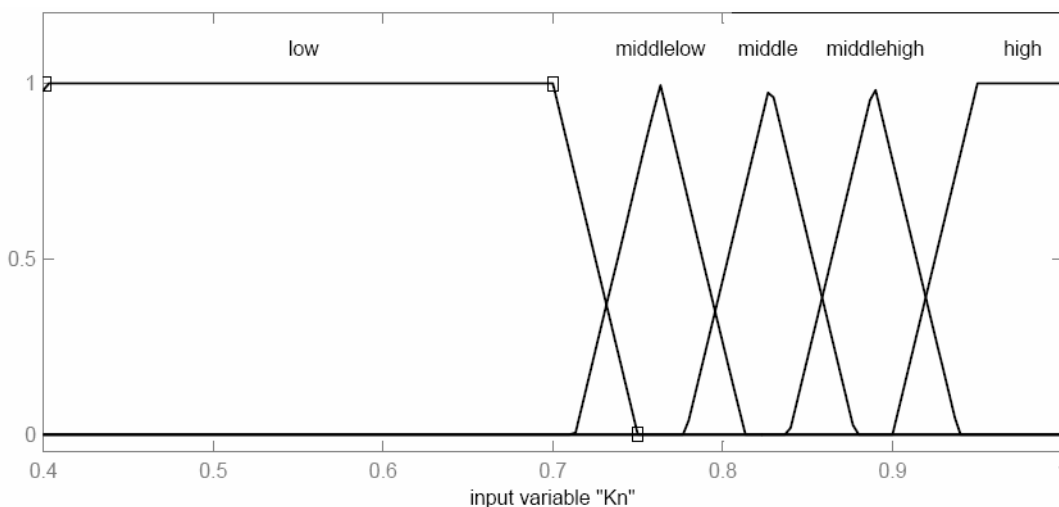


Рисунок 2 — Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної $K_i^{(h)}$

- агрегування підумов в нечітких правилах продукцій;
- активізація або композиція в нечітких правилах продукцій;
- акумулювання правил продукцій;
- дефазифікація.

Як терм-множини першої лінгвістичної змінної «швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі» будемо використовувати множину $C_i = \{ \text{"низька"} (low), \text{"середня"} (middle), \text{"висока"} (high) \}$ з функціями належності, зображеними на рис. 1.

Як терм-множини другої лінгвістичної змінної «коефіцієнт технічного стану нагнітача» використовуватимемо множину $K_i^{(h)} = \{ \text{"низький"} (low), \text{"середньо-низький"} (middlelow), \text{"середній"} (middle), \text{"середньо-високий"} (middlehigh), \text{"високий"} (high) \}$ з функціями належності, зображеними на рис. 2.

Як терм-множини третьої лінгвістичної змінної «коефіцієнт технічного стану ГТД» використовуватимемо множину $K_i^{(T)} = \{ \text{"низький"} (low), \text{"середньо-низький"} (middlelow), \text{"середній"} (middle), \text{"середньо-високий"} (middlehigh), \text{"високий"} (high) \}$ з функціями належності, зображеними на рис. 3.

Для четвертої лінгвістичної змінної «віброшвидкість» як терм-множини з функціями належності, зображеними на рис. 4, використовуватимемо множину $V_i^{(v)} = \{ \text{"низька"} (low), \text{"середньо-низька"} (middlelow), \text{"середня"} (middle), \text{"середньо-висока"} (middlehigh), \text{"висока"} (high) \}$

П'ята лінгвістична змінна «вібропереміщення» характеризується множиною $S_i^{(v)} = \{ \text{"низьке"} (low), \text{"середньо-низьке"} (middlelow), \text{"середнє"} (middle), \text{"середньо-високе"} (middlehigh), \text{"високе"} (high) \}$ з функціями належності, які зображені на рис. 5.

Як терм-множини вихідної лінгвістичної змінної використовуватимемо множину «узгальнений коефіцієнт технічного стану ($k_i^T \in \{0;1\}$)» $k_i^T = \{ \text{"низький"} (low), \text{"середній"} (middle), \text{"високий"} (high) \}$ з функціями належності, зображеними на рис. 6.

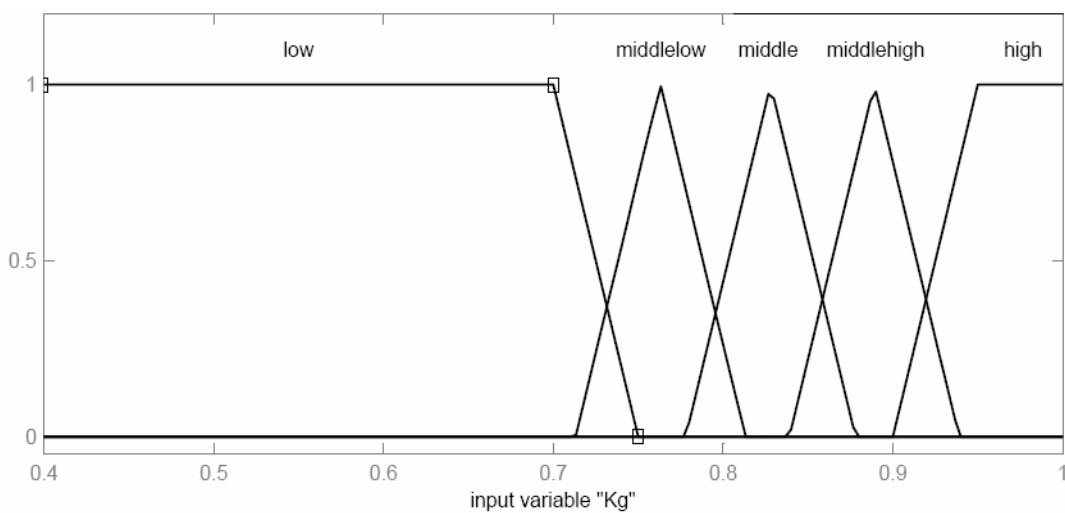


Рисунок 3 — Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної $K_i^{(T)}$

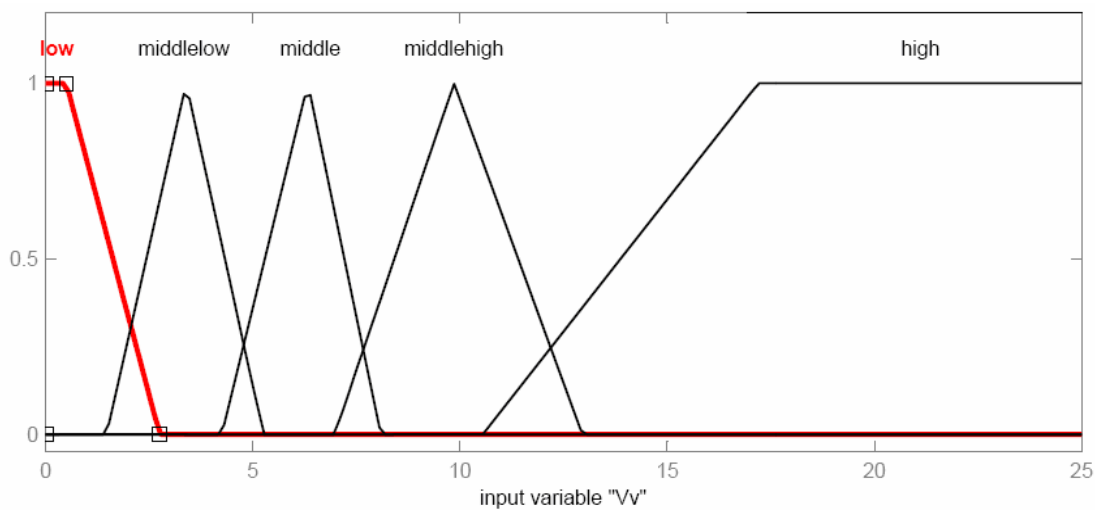


Рисунок 4 — Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної $V_i^{(v)}$

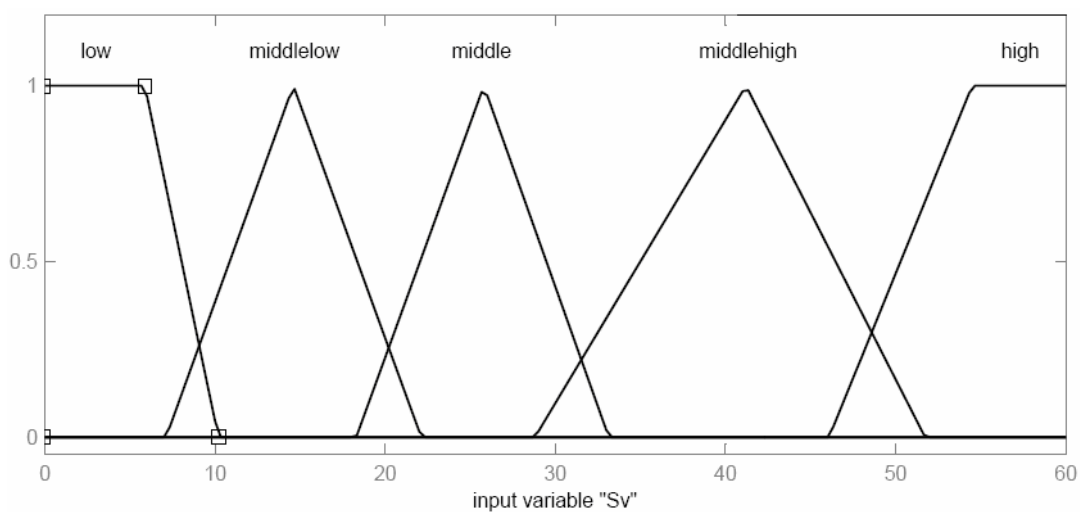


Рисунок 5 — Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної $S_i^{(v)}$

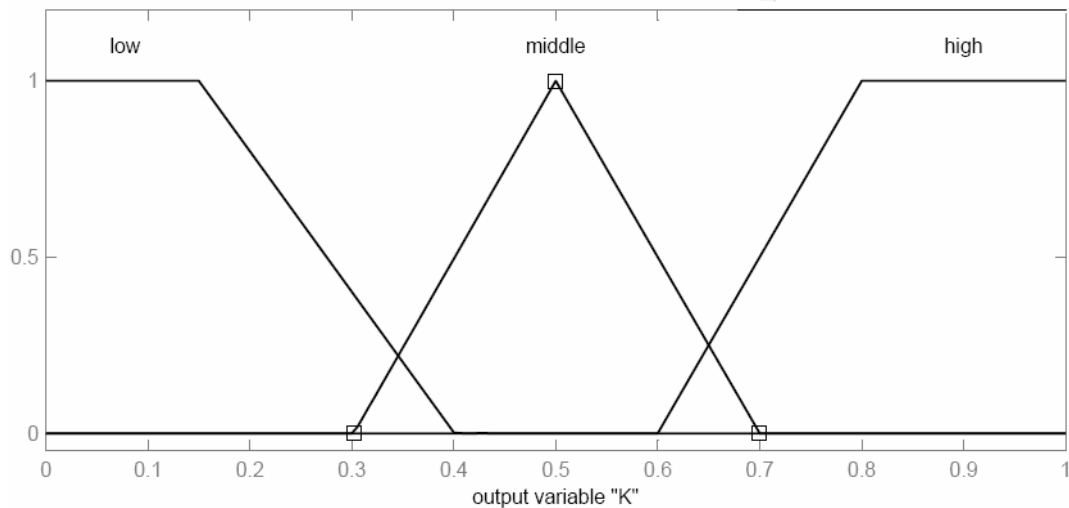


Рисунок 6 — Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної k_i^T

Таблиця 1 – Результат фазифікації лінгвістичних змінних

| Лінгвістична змінна | Значення вхідних змінних | Значення функції належності | Терм |
|---|--------------------------|-----------------------------|------------------|
| швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі, C_i | 0,1 | 1 | "low" (низький), |
| коефіцієнт технічного стану нагнітача, $K_i^{(h)}$ | 0,95 | 1 | "high" (високий) |
| коефіцієнт технічного стану ГТД, $K_i^{(r)}$ | 0,95 | 1 | "high" (високий) |
| віброшвидкість, $V_i^{(v)}$ | 1,3 | 0,505 | "low" (низька) |
| вібропереміщення, $S_i^{(v)}$ | 3 | 1 | "low" (низький). |

При цьому швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі вимірюється в мг/год, віброшвидкість – в мм/с, вібропереміщення – в мк.

Використовуючи як алгоритм виводу алгоритм Мамдані, розглянемо приклад його використання для випадку, коли швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі рівна 0,1; коефіцієнт технічного стану нагнітача – 0,95; коефіцієнт технічного стану ГТД – 0,95; віброшвидкість – 1,3 мм/с; вібропереміщення – 3 мк.

У таблиці 1 наведено результати фазифікації лінгвістичних змінних C_i , $K_i^{(h)}$, $K_i^{(r)}$, $V_i^{(v)}$ та $S_i^{(v)}$.

Активними вважаються правила, в яких використовуються відповідні підумови і ці правила використовуються в поточному процесі нечіткого виводу.

Всього база знань містить більше восьмидесяти правил. Для прикладу розглянемо чотири з них:

Правило_1: якщо " $V_i^{(v)}$ низька" і " $S_i^{(v)}$ низьке" і " C_i низька" і " $K_i^{(h)}$ високий" і " $K_i^{(r)}$ високий" тоді " k_i^T високий"

Правило_2: якщо " $V_i^{(v)}$ висока" і " $S_i^{(v)}$ високе" і " C_i висока" і " $K_i^{(h)}$ низький" і " $K_i^{(r)}$ низький" тоді " k_i^T низький"

Правило_3: якщо " $V_i^{(v)}$ середня" і " $S_i^{(v)}$ середнє" і " C_i середнє" і " $K_i^{(h)}$ середній" і " $K_i^{(r)}$ середній" тоді " k_i^T середній"

Правило_4: якщо " $V_i^{(v)}$ висока" або " $S_i^{(v)}$ високе" або " C_i висока" або " $K_i^{(h)}$ низький" або " $K_i^{(r)}$ низький" тоді " k_i^T низький"

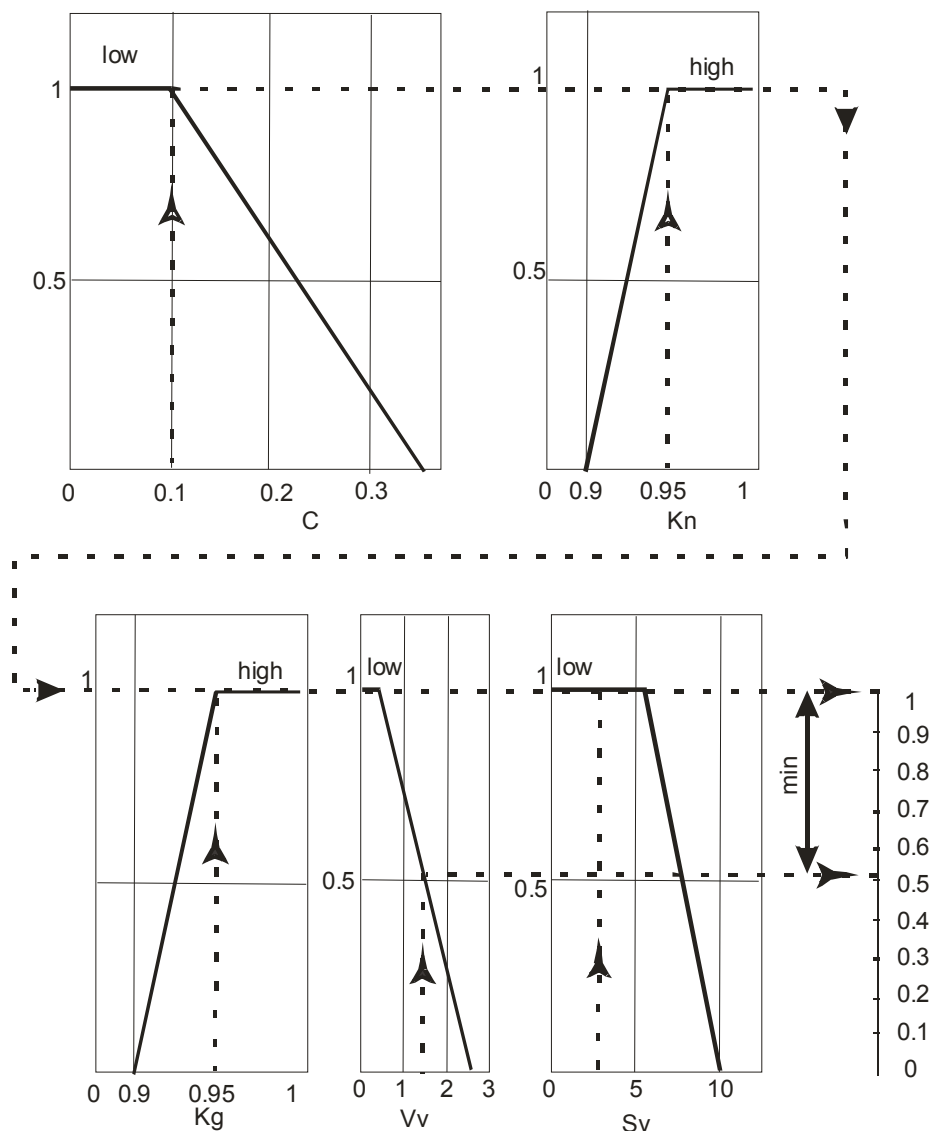


Рисунок 7 — Агрегація підумов нечіткого виводу

В цьому випадку фазифікація відповідних лінгвістичних змінних приводить до значення ступеня істинності для: першої змінної – 1.0, терм "low" (низький); другої нечіткої змінної – 1, терм "high" (високий); третьої змінної – 1, терм "high" (високий); четвертої – 0.505, терм "low" (низький); п'ятої нечіткої змінної – 1, терм "low" (низький). Відповідні підумови використовуються в правилі нечітких продукцій з номером 1. Це правило вважається активним і використовується в поточному процесі нечіткого виводу.

Агрегація підумов правила 1 з використанням операції нечіткої кон'юнкції (рис. 7) дає в результаті число 0.505.

Наступним етапом нечіткого виводу є активізація висновків у нечітких правилах продукцій. Оскільки всі висновки правил 1-4 задані у формі нечітких лінгвістичних висловів першого роду, а вагові коефіцієнти правил за замовчуванням рівні 1, то активізація правила 1 призводить до нечіткої множини, зображеної на рис. 8, а.

Акумуляція висновків нечітких правил продукцій із використанням операції мажоризації для правила 1 приводить в результаті до нечіткої множини, функція належності якої зображена на рис. 8, б.

Дефазифікація вихідної лінгвістичної змінної "узагальнений коефіцієнт технічного стану" методом центру площі для значень функції приналежності, зображеної на рис. 8, б, приводить до значення 0.83 (наближене значення). Це значення є результатом рішення задачі нечіткого виводу і вказує на те, що значення узагальненого коефіцієнта технічного стану ГПА $k_i^T = 0,83$.

Аналогічну процедуру ранжування можна здійснити і для інших газоперекачувальних агрегатів природного газу. Тоді коефіцієнти завантаження для кожного i -го ГПА, які входять в обмеження (5) знайдемо за формулою

$$k_i = \frac{k_i^{(T)}}{\sum_{i=1}^N k_i^{(T)}}.$$

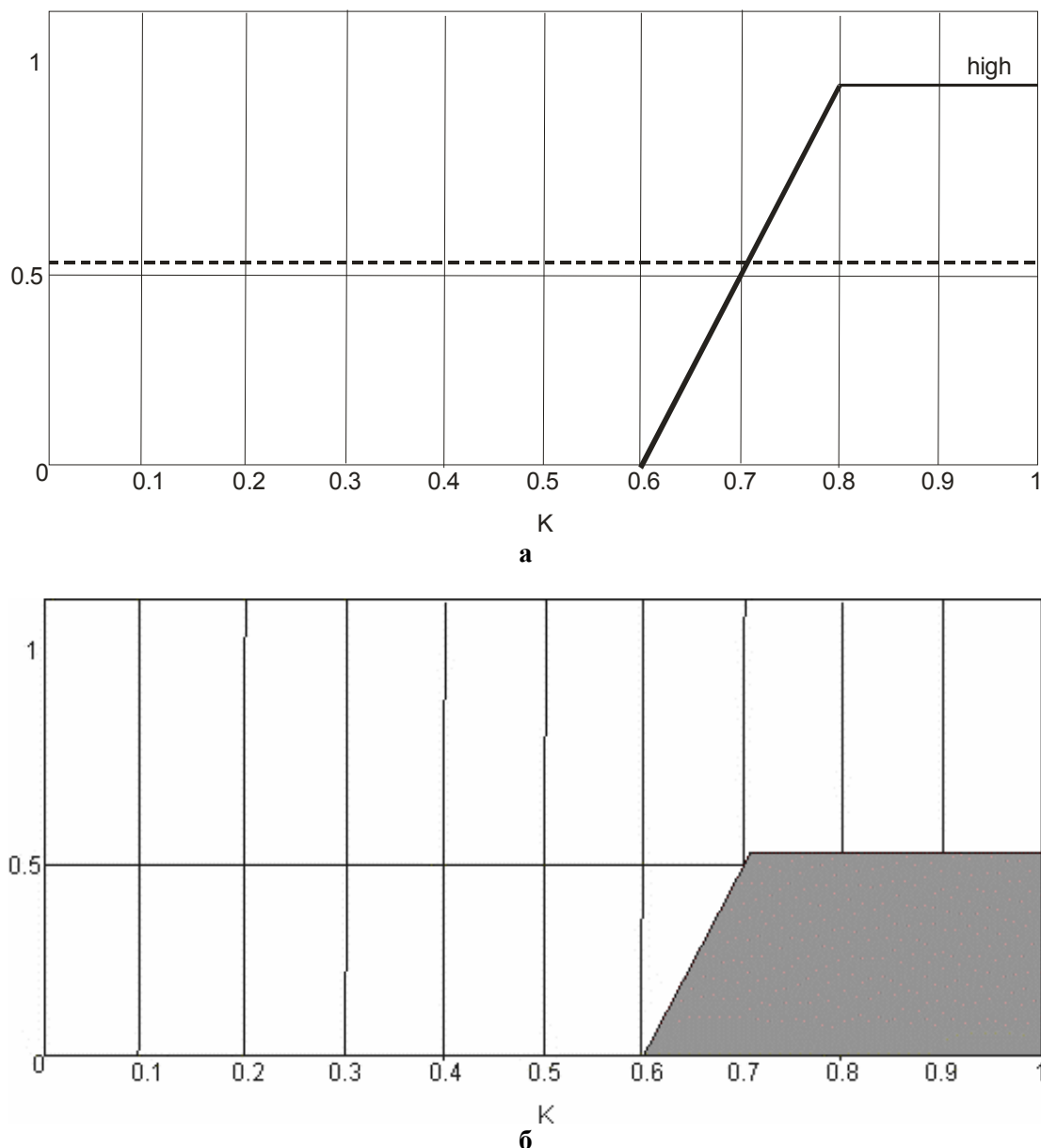


Рисунок 8 — Графіки функції належності для терма вихідної лінгвістичної змінної «узагальнений коефіцієнт технічного стану ГПА» (а) і функції належності після акумуляції (б)

Таким чином, запропонований метод ранжування ГПА за їх технічним станом дає можливість розробити спосіб оптимального розподілу навантаження між паралельно працюючими агрегатами з врахуванням як їх технічного стану, так і обмежень на технологічні параметри, що дасть змогу економити експлуатаційні затрати на перекачування природного газу.

Література

1 Горбійчук М.І., Когутяк М.І., Ковалів Є.О. Оптимізація технологічного режиму компримування природного газу // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 6. – С. 40–42.

2 Трубопровідний транспорт газу / М.П.Ковалко, В.Я.Грудз, В.Б.Михалків, Д.Ф.Тимків, Л.С.Шлапак, О.М.Ковалко. – К.: Арена-Ево, 2003. – 600 с.

3 Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. – М.: Горячая линия, 2004. – 452 с.

4 Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления: Монография. – К.: Радиоаматор, 2003. – 510 с.

5 Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MatLab и fuzzyTECH. – М.: Издательская группа ВHV, 2005. – 706 с.