



ЛІТВІНОВ В.В., канд. техн. наук; в.о. нач. ВТС Дніпровської ГЕС ПАТ "Укргідроенерго"; доцент кафедри гідроенергетики Запорізької державної інженерної академії,
МАНУКЯН К.А., інженер служби перспективного розвитку відокремленого підрозділу НЕК "Укренерго" "Дніпровська Електроенергетична система"

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЧІТКОГО АЛГОРИТМУ СУГЕНО ПРИ ОЦІНЮВАННІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

В статті запропоновано використання алгоритму нечіткого виводу Сугено для вирішення задачі комплексного оцінювання технічного стану гідрогенератора в умовах нечіткої інформації. Для визначення вагових коефіцієнтів бази правил прийняття рішення використано метод парних порівнянь Сааті. Розроблено нечітку модель оцінювання стану генератора, яка дозволяє ефективно використовувати знання експертів щодо процесів, що відбуваються в обладнанні ГЕС.

К л ю ч о в і с л о в а: гідрогенератор, технічний стан, нечітка модель, алгоритм Сугено, метод Сааті.

Вступ. Важливою задачею, яка постає перед вітчизняною електроенергетикою є забезпечення надійної роботи електроенергетичної системи (ЕЕС). Однією з умов для її розв'язання є забезпечення надійної роботи вузлів генерації ЕЕС. Для цього треба мати моделі оцінювання надійності генеруючого обладнання, зокрема гідрогенераторів ГЕС, які відіграють важливу роль в ЕЕС як завдяки значному дольовому складу у сумарній встановленій потужності ЕЕС України так і завдяки власній маневреності.

Інтегральним критерієм оцінювання надійності генеруючого обладнання є ризик, який враховує імовірність виникнення аварії, сценарій її розвитку та можливі наслідки [1, 2]. Для достовірного оцінювання ризику необхідно мати адекватну модель комплексного оцінювання технічного стану (ТС) гідрогенератора, яка б враховувала такі фактори:

- структурну складність гідрогенератора як підсистеми ЕЕС;
- значну кількість різнорідних діагностичних ознак;
- відсутність математичного зв'язку між окремими діагностичними ознаками стану гідрогенератора та його окремих вузлів;
- використання тільки тих діагностичних параметрів, отримання яких можливе в режимі "on-line" без виведення генератора в ремонт.

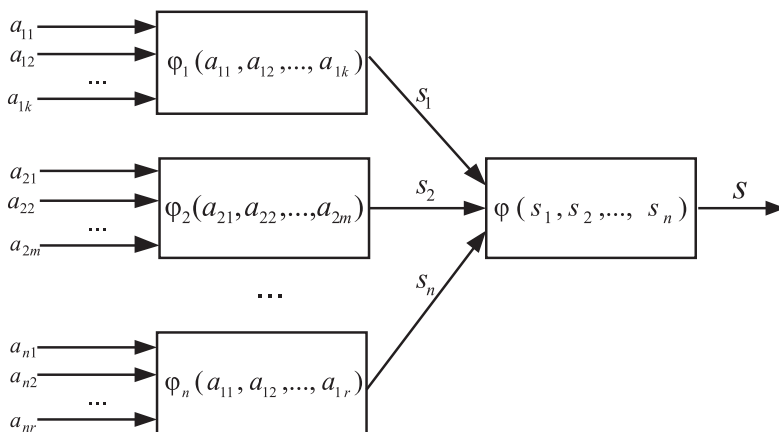


Рис. 1. Багаторівнева нечітка модель для оцінювання ТС гідрогенератора

Рішення комплексної задачі з такою кількістю невизначеностей знаходиться в області нечітких моделей та алгоритмів, які їх враховують.

Постановка задачі. В умовах значної кількості різнорідних діагностичних ознак гідрогенератор доцільно представляти багаторівневим об'єктом, що складається з окремих вузлів та підсистем, таких як [3]:

- осердя статора,
- обмотка статора,
- обмотка збудження,
- система збудження,
- система управління,
- підшипники,
- підп'ятник,
- ротор,
- система охолодження.

В [1] запропоновано оцінювання ТС гідрогенератора шляхом створення багаторівневої нечіткої моделі, яка має структуру, представлену на Рис. 1: a_{ij} – j -а вхідна ознака стану i -го вузла гідрогенератора, φ_i – нечітка функція оцінювання ТС i -го вузла гідрогенератора, S_i – ТС i -го вузла гідрогенератора, φ – нечітка функція оцінювання загального ТС гідрогенератора, S – загальний ТС гідрогенератора.

При розробленні моделі за запропонованою структурою постає задача визначення нечітких функцій оцінювання стану локальних вузлів генератора φ_i та загального стану φ . В роботах [3–5] при оцінюванні ТС локальних вузлів гідрогенератора використано нечіткий алгоритм Мамдані [6, 7], який дає задовільні результати за невеликої кількості діагностичних ознак та використовує базу правил, складену з якісних правил "ЯКЩО-ТО", які є зручними для формування експертом в умовах відсутності аналітичних зв'язків між діагностичними ознаками.

Визначення нечіткої функції φ загального стану гідрогенератора є складнішою задачею через значну кількість вузлів гід-



рогенератора за якими оцінюється його загальний стан. Оскільки алгоритм Мамдані є ефективним за кількості вхідних змінних від двох до п'яти, за більшої кількості вхідних величин необхідно визначити інший підхід до формування нечіткої функції ϕ .

Нечітка модель для комплексного оцінювання ТС гідрогенератора. З урахуванням вищезазначеного, вирішенням проблеми комплексної оцінки ТС гідрогенератора за результатами оцінки стану його локальних вузлів (загальна кількість яких сягає 6–10 шт.) є використання алгоритму нечіткого виводу Сугено, згідно з яким рішення приймається не за якісними правил, як у алгоритмі Мамдані, а у вигляді лінійної функції від ступенів приналежності вхідних ознак [6].

Нечіткий вивід Сугено організується за наступним алгоритмом [7]:

- формується база правил прийняття рішення, яка складається з правил наступного виду:

ЯКЩО " $b_1 \in s_1$ ", " $b_2 \in s_2$ ", ..., " $b_n \in s_n$ "

ТО $w = b_1 \cdot w_1 + b_2 \cdot w_2 + \dots + b_n \cdot w_n$,

де w_1, w_2, \dots, w_n – вагові коефіцієнти;

- фазифікація вхідних величин виконується з використанням функцій приналежності нечітких термів, побудованих за експертними оцінками;

- агрегування підумов в нечітких правилах виконується за логічною операцією кон'юнкції: ті правила ступінь приналежності умов яких є відмінною від нуля вважаються активними та беруть участь у нечіткому виводі;

- акумуляція висновку за нечіткими правилами виконується з використанням дійсних чисел w_i та $\mu(s_i)$;

- дефазифікація виконується у вигляді центроїдного методу для одноточкових множин.

Розглянемо ієрархічну нечітку модель для комплексного оцінювання ТС гідрогенератора, перший рівень якої (Рис. 1) складається з 6 моделей оцінювання стану його локальних вузлів. Вхідними величинами другого рівня такої моделі будуть:

- 1) b_1 = "ТС обмотки статора";
- 2) b_2 = "ТС заліза статора";
- 3) b_3 = "ТС обмотки збудження";
- 4) b_4 = "ТС ротора";
- 5) b_5 = "ТС направляючого підшипника";
- 6) b_6 = "ТС підп'ятника".

Лінгвістичні змінні, що відповідають вхідним ознакам стану вузлів генератора, описуються наступними нечіткими термами:

- b_1 : $\{s_{11} = \text{"Задовільний"}, s_{12} = \text{"Незадовільний"}\}$;

- b_2 : $\{s_{21} = \text{"Задовільний"}, s_{22} = \text{"Незадовільний"}\}$;

- b_3 : $\{s_{31} = \text{"Задовільний"}, s_{32} = \text{"Незадовільний"}\}$;

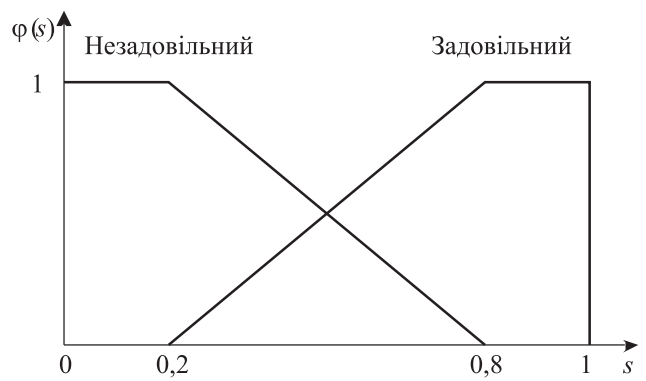


Рис. 2. Функції приналежності нечітких термів вхідних величин

- b_4 : $\{s_{41} = \text{"Задовільний"}, s_{42} = \text{"Незадовільний"}\}$;

- b_5 : $\{s_{51} = \text{"Задовільний"}, s_{52} = \text{"Незадовільний"}\}$;

- b_6 : $\{s_{61} = \text{"Задовільний"}, s_{62} = \text{"Незадовільний"}\}$.

Функції приналежності нечітких термів величин $b_i, i = 1, \dots, 6$ представлені на Рис. 2. Нечіткий вивід виконується за правилами наступного виду:

- правило №1: ЯКЩО $b_1 = s_{11}$ ТА $b_2 = s_{21}$ ТА $b_3 = s_{31}$

ТА $b_4 = s_{41}$ ТА $b_5 = s_{51}$ ТА $b_6 = s_{61}$ ТО $w = b_1 \cdot w_{1-1} + b_2 \cdot w_{2-1} + b_3 \cdot w_{3-1} + b_4 \cdot w_{4-1} + b_5 \cdot w_{5-1} + b_6 \cdot w_{6-1}$;

- правило №2: ЯКЩО $b_1 = s_{12}$ ТА $b_2 = s_{21}$ ТА $b_3 = s_{31}$

ТА $b_4 = s_{41}$ ТА $b_5 = s_{51}$ ТА $b_6 = s_{61}$ ТО $w = b_1 \cdot w_{1-2} + b_2 \cdot w_{2-1} + b_3 \cdot w_{3-1} + b_4 \cdot w_{4-1} + b_5 \cdot w_{5-1} + b_6 \cdot w_{6-1}$;

- правило №3: ЯКЩО $b_1 = s_{12}$ ТА $b_2 = s_{22}$ ТА $b_3 = s_{31}$

ТА $b_4 = s_{41}$ ТА $b_5 = s_{51}$ ТА $b_6 = s_{61}$ ТО $w = b_1 \cdot w_{1-2} + b_2 \cdot w_{2-2} + b_3 \cdot w_{3-1} + b_4 \cdot w_{4-1} + b_5 \cdot w_{5-1} + b_6 \cdot w_{6-1}$;

-

- правило №36: ЯКЩО $b_1 = s_{22}$ ТА $b_2 = s_{22}$ ТА $b_3 = s_{32}$

ТА $b_4 = s_{42}$ ТА $b_5 = s_{52}$ ТА $b_6 = s_{62}$ ТО $w = b_1 \cdot w_{1-2} + b_2 \cdot w_{2-2} + b_3 \cdot w_{3-2} + b_4 \cdot w_{4-2} + b_5 \cdot w_{5-2} + b_6 \cdot w_{6-2}$.

Зі сформованих правил очевидно, що для отримання достовірної кількісної оцінки загального стану гідрогенератора необхідне обґрунтоване визначення векторів вагових коефіцієнтів w_1 та w_2 :

$$w_1 = \{w_{1-1}; w_{2-1}; w_{3-1}; w_{4-1}; w_{5-1}; w_{6-1}\}; \quad (1)$$

$$w_2 = \{w_{1-2}; w_{2-2}; w_{3-2}; w_{4-2}; w_{5-2}; w_{6-2}\}. \quad (2)$$

Для визначення векторів вагових коефіцієнтів w_1 та w_2 застосовується метод Сааті з визначенням найбільшого власного числа та з оброб-

Таблиця 1. Експертні переваги за шкалою Сааті для визначення вектора w_1

Параметр	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
b_1	1	3	4	6	3	2
b_2	1/3	1	1/2	3	2	1/4
b_3	1/4	2	1	3	3	1/2
b_4	1/6	1/3	1/3	1	1/4	1/7
b_5	1/3	1/2	1/3	4	1	1/3
b_6	1/2	4	2	7	3	1



кою інформації в первинних шкалах [8] з використанням експертних оцінок.

За результатами опитування експерта щодо важливості ТС локальних вузлів гідрогенератора при визначенні його загального стану отримано співвідношення, представлені в Табл. 1.

За отриманими експертними оцінками складається матриця парних порівнянь:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 6 & 3 & 2 \\ 0,333 & 1 & 0,5 & 3 & 2 & 0,25 \\ 0,25 & 2 & 1 & 3 & 3 & 0,5 \\ 0,167 & 0,333 & 0,333 & 1 & 0,25 & 0,143 \\ 0,333 & 0,5 & 0,333 & 4 & 1 & 0,333 \\ 0,5 & 4 & 2 & 7 & 3 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Визначаються власні числа матриці:

$$B - \lambda E = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 3 & 4 & 6 & 3 & 2 \\ 0,333 & 1-\lambda & 0,5 & 3 & 2 & 0,25 \\ 0,25 & 2 & 1-\lambda & 3 & 3 & 0,5 \\ 0,167 & 0,333 & 0,333 & 1-\lambda & 0,25 & 0,143 \\ 0,333 & 0,5 & 0,333 & 4 & 1-\lambda & 0,333 \\ 0,5 & 4 & 2 & 7 & 3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = 0. \quad (4)$$

Рівняння (4) має шість коренів:

$$\lambda_{1,2} = -0,146 \pm j 0,497; \lambda_{3,4} = -0,015 \pm j 1,381; \lambda_5 = -0,022; \lambda_6 = 6,345. \quad (5)$$

Найбільшим власним числом матриці є дійсний додатний корінь при підстановці якого в (4) та заміні останнього рівняння умовою нормування $\sum_{i=1}^6 \omega_{i-1} = 1$ формується система рівнянь для визначення вагових коефіцієнтів важливості оптимізаційних критеріїв:

$$\begin{cases} -5,345\omega_{1-1} + 3\omega_{2-1} + 4\omega_{3-1} + 6\omega_{4-1} + 3\omega_{5-1} + 2\omega_{6-1} = 0; \\ 0,333\omega_{1-1} - 5,345\omega_{2-1} + 0,5\omega_{3-1} + 3\omega_{4-1} + 2\omega_{5-1} + 0,25\omega_{6-1} = 0; \\ 0,25\omega_{1-1} + 2\omega_{2-1} - 5,345\omega_{3-1} + 3\omega_{4-1} + 3\omega_{5-1} + 0,5\omega_{6-1} = 0; \\ 0,167\omega_{1-1} + 0,5\omega_{2-1} + 0,333\omega_{3-1} - 5,345\omega_{4-1} + 0,25\omega_{5-1} + 0,143\omega_{6-1} = 0; \\ 0,333\omega_{1-1} + 0,5\omega_{2-1} + 0,333\omega_{3-1} + 4\omega_{4-1} - 5,345\omega_{5-1} + 0,333\omega_{6-1} = 0 \\ \omega_{1-1} + \omega_{2-1} + \omega_{3-1} + \omega_{4-1} + \omega_{5-1} + \omega_{6-1} = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Рішенням системи (6) є вектор вагових коефіцієнтів w_1 :

$$w_1 = \{0,362; 0,105; 0,153; 0,041; 0,089; 0,25\} \quad (7)$$

Аналогічним чином визначається вектор вагових коефіцієнтів w_2 :

$$w_2 = \{0,128; 0,179; 0,169; 0,192; 0,182; 0,15\}. \quad (8)$$

Визначення загального ТС гідрогенератора (дефазифікація) виконується за центроїдним методом як суперпозиція лінійних законів [6]. Для цього визначається зважене середнє:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(s_i) w_i}{\sum_{i=1}^n \mu(s_i)}. \quad (9)$$

Висновки. Використання методу Сугено в задачі комплексного оцінювання стану гідрогенератора, який є складним об'єктом, що складається з великої кількості окремих вузлів дозволяє отримати кількісну оцінку стану (залишкового ресурсу) на підставі експертних переваг відповідальності локальних вузлів генератора. Формулювання цих переваг є простішим для експерта у порівнянні з формулюванням якісних правил Мамадані за значної кількості вхідних передумов, що дозволяє отримати більш достовірні результати моделювання стану гідрогенератора.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Літвінов В.В.* Оцінювання технічного стану гідрогенераторів в умовах нечіткої інформації / В.В. Літвінов, К.А. Манукян // Відновлювана енергетика XXI століття. Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції. – Крим, 2013. – С. 389–394.
2. *Літвінов В.В.* Оцінка ризику порушення стійкості двигунової навантаження при відмовах електрообладнання в підсистемі ЕЕС: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: (05.14.02 – електричні станції, мережі та системи) / Літвінов Володимир Валерійович. – К., 2012. – 20 с.
3. *Літвінов В.В.* Нечітко-статистичний підхід до оцінювання ризику пошкодження обмотки статора гідрогенератора / В.В. Літвінов // Гідроенергетика України. – 2014. – № 2–3. – С. 74–80.
4. *Litvinov V.V.* Fuzzy-Statistical Modeling of Hydrogenerator for Its Reliability Appreciation / V.V. Litvinov, K.A. Manukyan // The IJES. – Volume 3. – Issue 1. – 2014. – P. 85–95.
5. *Джуржій П.О.* Удосконалення системи групового регулювання активної потужності ГЕС з урахуванням технічного стану гідроагрегатів / П.О. Джуржій, В.В. Літвінов // Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів. Матеріали I міжнародної науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів. – Донецьк, 2013. – С.78–80.
6. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.
7. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ–Петербург, 2005. – 720 с.
8. *Домарев В.В.* Безопасность информационных технологий. Методология создания систем защиты / В.В. Домарев. – К.: ООО "ТИД "ДС", 2002. – 688 с.