

УДК 621.311.001.57

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.180211

Розроблення моделей для оцінювання технічного стану гідрогенератора з використанням нечітких даних про стан його локальних вузлів

М. В. Костерев, В. В. Літвінов, К. А. Кільова

Розв'язано задачу оцінювання технічного стану гідрогенератора в умовах нечіткої інформації. Для цього розроблено ряд моделей комплексного оцінювання технічного стану гідрогенератора за даними про стани його локальних вузлів. Технічні стани локальних вузлів визначаються за раніше розробленими нечіткими моделями типу Мамдані і представляють собою нечіткі величини, що враховано в моделі оцінювання технічного стану гідрогенератора.

Для розроблення моделей було використано нечіткі методи Мамдані, Сугено, Заде та спрощеного нечіткого виводу. Нечітка модель Мамдані має тільки якісну базу правил, що спрощує її побудову експертом. Моделі, побудовані за нечітким алгоритмом Сугено передбачають базу правил з ваговими коефіцієнтами, які визначаються за методом Сааті. Спрощений метод та метод Заде потребують мінімальної участі експерта при побудові нечіткої моделі. Розглянуто приклади оцінки технічного стану гідрогенератора за п'ятьма розробленими нечіткими моделями та перевірено чутливість моделей до якості та достовірності вхідної інформації.

Визначено що найбільш достовірний результат оцінки стану гідрогенератора з похибкою 1,5–2 % дають моделі побудовані за методом Заде та за спрощеним нечітким виводом, оскільки вони мають найменшу залежність від нечіткості вхідних даних про стани локальних вузлів, які самі отримані за нечіткими моделями. Висока точність цих моделей та низька залежність від якості вхідної інформації пояснюється мінімальною участю експерта під час її налагодження. Нечіткі моделі, побудовані за алгоритмами Мамдані та Сугено, дають більшу похибку 3–4 %. Отримані результати можуть бути використані для оцінювання залишкового або спрацьованого ресурсу гідрогенераторів, імовірності їхньої відмови на інтервалі часу та організації ризик-орієнтованого управління електроенергетичною системою та її підсистемами.

Ключові слова: гідрогенератор, нечітка логіка, модель Мамдані, модель Сугено, метод Заде, спрощений метод.

1. Вступ

Сучасні умови експлуатації електроенергетичних систем (ЕЕС) вимагають комплексного підходу до оцінки технічного стану (ТС) обладнання в умовах реального часу без відключення від мережі. Основними вимогами до діагностичних параметрів є їхня інформативність та можливість їхнього вимірювання та спостереження в он-лайн режимі [1].

Одним з найбільш важливих об'єктів ЕЕС є гідрогенератор. Оцінка його ТС є складною задачею, оскільки гідрогенератор є багаторівневим об'єктом, що складається з окремих вузлів та підсистем [2].

В цих умовах важливо розробити комплексний підхід до оцінки працездатності гідрогенераторів та їхніх вузлів. Цей підхід має брати до уваги реальний стан генератора, імовірнісний характер його пошкоджень та можливі наслідки пошкоджень [2].

Для оцінювання надійності роботи гідрогенератора необхідно мати адекватну модель комплексного оцінювання його ТС, яка б враховувала такі фактори:

- структурну складність гідрогенератора як об'єкта;
- значну кількість різномірних діагностичних ознак;
- нечіткість даних щодо ТС локальних вузлів гідрогенератора, які визначаються за нечіткими моделями;
- відсутність аналітичних зв'язків між окремими діагностичними ознаками стану гідрогенератора та його окремих вузлів.

Перераховані фактори свідчать, що задача комплексної оцінки стану гідрогенератора у своїй постановці містить значну кількість невизначеностей. Рішення задач з такими невизначеностями знаходиться в області нечітких моделей та алгоритмів, які спроможні їх врахувати.

Актуальність цієї задачі визначається тим, що без достовірної кількісної оцінки технічного стану гідрогенератора неможливе достовірне оцінювання надійності роботи ЕЕС та визначення ризику виникнення аварійної ситуації в ній. В той же час, генеруюче обладнання, зокрема гідрогенератори, є найбільш складними об'єктами ЕЕС з точки зору оцінки їхнього стану та імовірності відмови на інтервалі часу. В порівнянні з іншими елементами ЕЕС, гідрогенератори залишаються недостатньо дослідженими з точки зору їхнього ТС та надійності.

2. Аналіз літературних даних та постановка задачі

В роботах [2, 3] при оцінюванні ТС локальних вузлів гідрогенератора використано нечіткий алгоритм Мамдані [4], 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. Використання даного алгоритму при вирішенні задачі комплексного оцінювання стану генератора ускладнене через значну кількість його вузлів, що викликає труднощі у експертів під час формування якісної бази правил прийняття рішень.

Проаналізовано ряд інших підходів до оцінювання ТС гідрогенераторів та його вузлів. Так, в [5] для оцінювання магнітних властивостей машини запропоновано метод контролю синхронних опорів генератора X_d та X_q з використанням методу скінченних елементів. Перевагою цього методу є можливість перевірки та контролю значень синхронних опорів машини в режимі on-line. Недоліком є те, що при цьому одночасно відбувається контроль стану «заліза» статора та магнітного зазору між ротором та статором. Більш ефективним рішенням цієї задачі є метод діагностики ексцентриситету ротора синхронного генератора, запропонований в [6]. Цей метод використовує функціональну залеж-

ність індуктивності обмотки статора від ексцентриситету повітряного зазору, яка будується на основі порівняння характеристик машин одного типу, які мають різні значення ексцентриситету. Недоліком цього методу є необхідність наявності великої кількості однотипних генераторів для побудови функціональної залежності.

В роботі [7] виконано оцінювання технічного стану обмотки статора за результатами вимірювань його електричних характеристик. Важливою перевагою цієї моделі є застосування нечіткої моделі для оцінювання її стану. В той же час, в роботі не приділено достатньої уваги техніці побудови бази правил прийняття рішень та обґрунтуванню вихідної величини оцінювання стану. Головним недоліком цієї моделі передбачається неврахування теплових та вібраційних впливів на обмотку статора, які могли б дати превентивну інформацію щодо її стану.

В [8] автори виконують діагностику частинних розрядів у статорних обмотках потужних генераторів з використанням системи постійного моніторингу, яка дозволяє контролювати стан ізоляції без виведення генератора в ремонт. Недоліком цього методу є висока ціна діагностичного обладнання та системи моніторингу та відсутність системи прийняття рішення за даними моніторингу.

В [9] автори виконують нечітку ідентифікацію параметрів синхронного генератора при його включенні в мережу, але при цьому не враховується його технічний стан. Даний підхід доцільно використати не тільки для визначення фактичних параметрів генератора а й для оцінки його ТС.

Нечіткі підходи до ідентифікації міжжиткових пошкоджень обмотки ротора генератора запропоновано в [10 – 12], але ці методи не адаптовано до комплексної оцінки ТС гідрогенератора.

В [13] ці ж методи застосовані для оцінювання ТС потужних електричних двигунів, але так само не визначено підходи до оцінювання стану електричної машини в цілому та не адаптовано модель до синхронних генераторів.

Слід відмітити, що розглянуті моделі дозволяють виконати аналіз стану електричної частини гідрогенератора. Стан механічних вузлів гідрогенератора [3] при цьому не оцінюється. Питання комплексної оцінки стану гідрогенератора при цьому також залишається недостатньо розглянутим.

Аналіз літературних джерел показав, що достовірні моделі комплексного оцінювання технічного стану потужних синхронних машин, зокрема гідрогенераторів, на теперішній час залишаються недопрацьованими. В той же час при аналізі надійності електроенергетичної системи необхідно розглядати гідрогенератор як єдину підсистему, що неможливо без наявності достовірної комплексної моделі оцінки його стану.

Вирішення цієї задачі є складною та багатофакторною проблемою через нечіткість інформації про ТС локальних вузлів гідрогенератора, отриманими за нечіткими моделями та відсутності аналітичних залежностей між цими станами.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розроблення моделі для комплексного оцінювання технічного стану гідрогенератора в умовах нечіткості вихідних даних про ТС

локальних вузлів гідрогенератора та відсутності аналітичних зв'язків між цими станами.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

- розробити нечіткі моделі оцінювання технічного стану гідрогенератора за методами Мамдані, Сугено, Заде та спрощеним методом нечіткого виводу;
- провести оцінювання ТС гідрогенератора за розробленими моделями в умовах нечіткості вхідної інформації про стани вузлів гідрогенератора;
- виконати порівняльного аналізу отриманих результатів та визначення моделей найменш чутливих до якості вхідної інформації.

4. Розроблення нечітких моделей для оцінювання технічного стану гідрогенератора

Гідрогенератор складається зі значної кількості вузлів, кожен з яких характеризується набором різнорідних діагностичних ознак. Через це його доцільно представляти багаторівневим об'єктом, що складається з окремих вузлів та підсистем. Найбільш пошкоджуваними вузлами генератора, згідно зі статистичними даними є [2]:

- осердя статора (8 % від загальної кількості пошкоджень),
- обмотка статора (18 % від загальної кількості пошкоджень),
- обмотка збудження (6 % від загальної кількості пошкоджень),
- система збудження (11 % від загальної кількості пошкоджень),
- система управління (9 % від загальної кількості пошкоджень),
- підшипники (13 % від загальної кількості пошкоджень),
- підп'ятник (17 % від загальної кількості пошкоджень – для вертикальних гідрогенераторів),
- ротор (5 % від загальної кількості пошкоджень),
- система охолодження (10 % від загальної кількості пошкоджень),
- інше (3 % від загальної кількості пошкоджень).

Оскільки генератор при рішенні поставленої задачі розглядається як багаторівневий об'єкт, нечітка модель, що описує його ТС також має ієрархічну структуру, представлену на рис. 1.

Під час синтезу моделі за запропонованою структурою постає задача визначення нечітких функцій оцінювання стану локальних вузлів генератора φ_i та загального стану φ . В роботах [2, 3] при оцінюванні ТС локальних вузлів гідрогенератора використано нечіткий алгоритм Мамдані, 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 гідрогенератора за якими оцінюється його загальний стан, а також через нечіткість оцінок локальних станів, отриманих за нечіткими моделями. За таких умов доцільно розглянути інші алгоритми нечіткого виводу та оцінити їхню ефективність.

Згідно з [9] найбільш ефективними методами нечіткого виводу за наявності великої кількості діагностичних ознак та нечіткості вхідних даних є:

- алгоритм Сугено «ТА»;
- алгоритм Сугено «АБО»;
- схема нечіткого виводу Заде;
- спрощений нечіткий вивід.

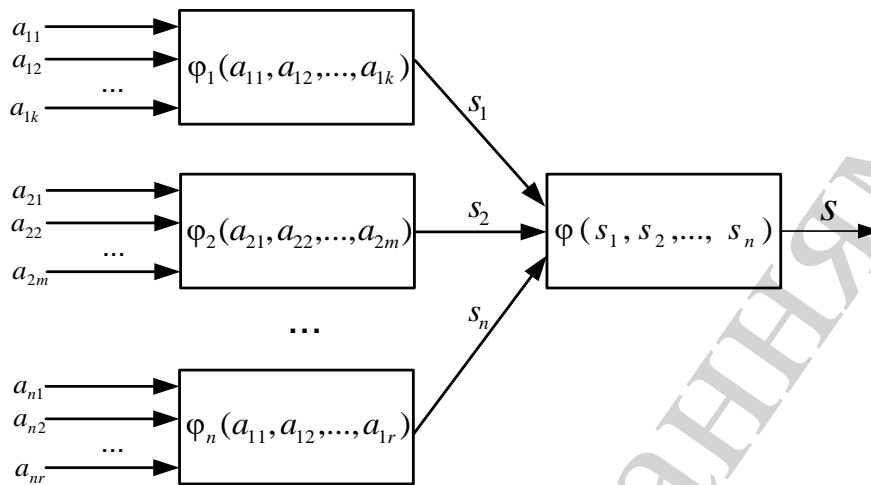


Рис. 1. Ієрархічна нечітка модель для оцінювання ТС гідрогенератора: a_{ij} – j -та вхідна ознака стану i -того вузла гідрогенератора, φ_i – нечітка функція оцінювання ТС i -того вузла гідрогенератора, s_i – ТС i -того вузла гідрогенератора, φ – нечітка функція оцінювання загального ТС гідрогенератора, s – загальний ТС гідрогенератора.

Нижче розроблено нечіткі моделі комплексної оцінки ТС гідрогенератора за нечіткими моделями, розробленими за трьома перерахованими вище методами та проведено оцінку їхньої ефективності в умовах нечіткості значень вхідних діагностичних ознак.

Модель Мамдані. Розглянемо ієрархічну нечітку модель Мамдані для комплексного оцінювання ТС гідрогенератора (рис.1). Перший рівень цієї моделі складається з 4 моделей оцінювання стану його локальних вузлів. Вхідними величинами другого рівня такої моделі будуть:

- 1) S_1 = «ТС статора»;
- 2) S_2 = «ТС підп'ятника»;
- 3) S_3 = «ТС направляючого підшипника»;
- 4) S_4 = «ТС ротора».

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

- $$S_1 : \{s_{11} = \text{«Задовільний»}, s_{12} = \text{«Незадовільний»}\};$$
- $$S_2 : \{s_{21} = \text{«Задовільний»}, s_{22} = \text{«Незадовільний»}\};$$
- $$S_3 : \{s_{31} = \text{«Задовільний»}, s_{32} = \text{«Незадовільний»}\};$$
- $$S_4 : \{s_{41} = \text{«Задовільний»}, s_{42} = \text{«Незадовільний»}\}.$$

Функції приналежності нечітких термів величин S_i , $i=1, \dots, 4$ представлені на рис. 2.

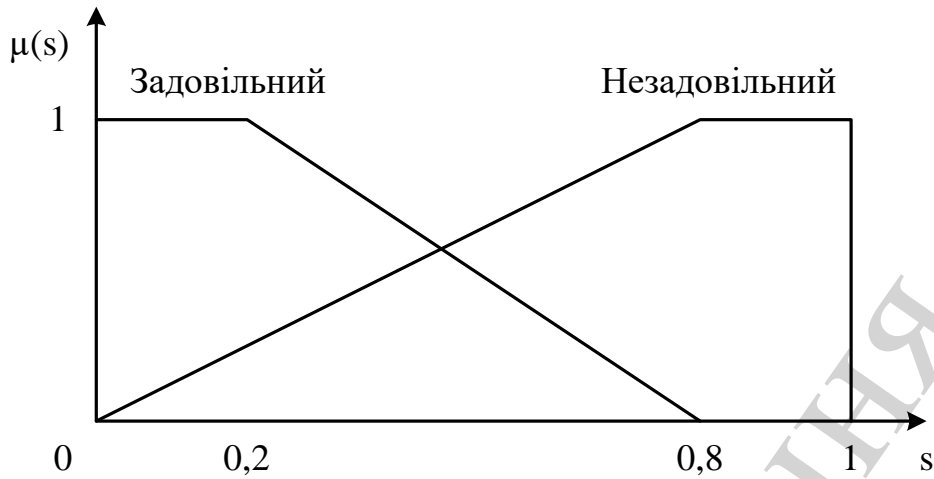


Рис. 2. Функції приналежності нечітких термів вхідних величин

Вихідною величиною є загальний ТС (спрацьований ресурс) генератора. Вихідна лінгвістична змінна описується п'ятьма нечіткими термами.

$S: \{s_1 = \text{«Дуже добрий»}, s_2 = \text{«Добрий»}, s_3 = \text{«Середній»}, s_4 = \text{«Поганий»}, s_5 = \text{«Дуже поганий»}\}.$

Функції приналежності вихідних лінгвістичних змінних визначаються на інтервалах Харрінгтона (рис. 3).

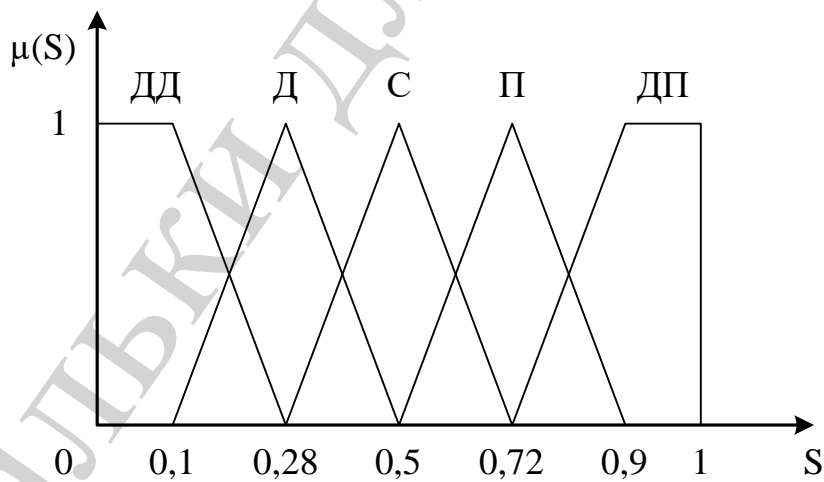


Рис. 3. Функції приналежності вихідних величин

База правил прийняття рішення будується експертом та має вигляд, представлений в табл. 1.

Таблиця 1
База правил нечіткої моделі Мамдані

$S_2 \backslash S_1$	S_{11}			S_{12}		
S_{21}	$S_3 \backslash S_4$	S_{31}	S_{32}	$S_3 \backslash S_4$	S_{31}	S_{32}
	S_{41}	ДД	Д	S_{41}	Д	С
	S_{42}	Д	С	S_{42}	С	П
S_{22}	$S_3 \backslash S_4$	S_{31}	S_{32}	$S_3 \backslash S_4$	S_{31}	S_{32}
	S_{41}	Д	С	S_{41}	П	ДП
	S_{42}	С	П	S_{42}	ДП	ДП

Дефазифікація виконується за центроїдним методом для неперервних множин.

$$s = \frac{\int \mu(s) \cdot s \cdot ds}{\int \mu(s) ds} \quad (1)$$

Модель Сугено. Нечіткий вивід Сугено організується за наступним алгоритмом [14, 15]:

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

$$\text{ЯКЩО } \langle b_1 \in s_1 \rangle, \langle b_2 \in s_2 \rangle, \dots, \langle b_n \in s_n \rangle \text{ ТО } w = b_1 \cdot w_1 + b_2 \cdot w_2 + \dots + b_n \cdot w_n,$$

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 точкових множин.

Розглянемо ієрархічну нечітку модель для комплексного оцінювання ТС гідрогенератора, перший рівень якої (рис. 1) складається з 4 моделей оцінювання стану його локальних вузлів. Вхідними величинами другого рівня такої моделі будуть:

- b_1 = «ТС статора»;
- b_2 = «ТС підп'ятника»;
- b_3 = «ТС направляючого підшипника»;
- b_4 = «ТС ротора».

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

- b_1 : $\{s_{11}$ = «Задовільний», s_{12} = «Незадовільний»};
- b_2 : $\{s_{21}$ = «Задовільний», s_{22} = «Незадовільний»};
- b_3 : $\{s_{31}$ = «Задовільний», s_{32} = «Незадовільний»};
- b_4 : $\{s_{41}$ = «Задовільний», s_{42} = «Незадовільний»}.

Функції приналежності нечітких термів величин b_i , $i=1, \dots, 4$ аналогічні функціям приналежності нечіткої моделі Мамдані (рис. 2).

Нечіткий вивід виконується за правилами наступного виду:

- правило № 1:

$$\text{ЯКЩО } b_1=s_{11} \text{ ТА } b_2=s_{21} \text{ ТА } b_3=s_{31} \text{ ТА } b_4=s_{41} \text{ ТО } w=b_1 \cdot w_{1-1} + b_2 \cdot w_{2-1} + b_3 \cdot w_{3-1} + b_4 \cdot w_{4-1};$$

- правило № 2:

$$\text{ЯКЩО } b_1=s_{12} \text{ ТА } b_2=s_{21} \text{ ТА } b_3=s_{31} \text{ ТА } b_4=s_{41} \text{ ТО } w=b_1 \cdot w_{1-2} + b_2 \cdot w_{2-1} + b_3 \cdot w_{3-1} + b_4 \cdot w_{4-1};$$

- правило № 3:

$$\text{ЯКЩО } b_1=s_{12} \text{ ТА } b_2=s_{22} \text{ ТА } b_3=s_{31} \text{ ТА } b_4=s_{41} \text{ ТО } w=b_1 \cdot w_{1-2} + b_2 \cdot w_{2-2} + b_3 \cdot w_{3-1} + b_4 \cdot w_{4-1};$$

– ...

- правило № 16:

$$\text{ЯКЩО } b_1=s_{22} \text{ ТА } b_2=s_{22} \text{ ТА } b_3=s_{32} \text{ ТА } b_4=s_{42} \text{ ТО } w=b_1 \cdot w_{1-2} + b_2 \cdot w_{2-2} + b_3 \cdot w_{3-2} + b_4 \cdot w_{4-2}.$$

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

$$w_1 = \{w_{1-1}; w_{2-1}; w_{3-1}; w_{4-1}\}; \tag{2}$$

$$w_2 = \{w_{1-2}; w_{2-2}; w_{3-2}; w_{4-2}\}. \tag{3}$$

Для визначення векторів вагових коефіцієнтів w_1 та w_2 застосовується метод Сааті з визначенням найбільшого власного числа та з обробкою інформації в первинних шкалах з використанням експертних оцінок [15].

За результатами опитування експерта щодо важливості ТС локальних вузлів гідрогенератора при визначенні його загального стану отримано співвідношення, представлені в табл. 2, 3.

Таблиця 2

Експертні переваги за шкалою Сааті для визначення вектору w_1

Параметр	b_1	b_2	b_3	b_4
b_1	1	1/2	3	4
b_2	2	1	3	2
b_3	1/3	1/3	1	1/4
b_4	1/4	1/2	4	1

Таблиця 3

Експертні переваги за шкалою Сааті для визначення вектору w_2

Параметр	b_1	b_2	b_3	b_4
b_1	1	3	1/2	1/4
b_2	1/3	1	2	3
b_3	2	1/2	1	2
b_4	4	1/3	1/2	1

Визначимо вектор коефіцієнтів w_1 . За отриманими експертними оцінками складається матриця парних порівнянь:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0,5 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & 2 \\ 0,333 & 0,333 & 1 & 0,25 \\ 0,167 & 0,143 & 3 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Визначаються власні числа матриці:

$$B_1 - \lambda E = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 0,5 & 3 & 4 \\ 2 & 1-\lambda & 3 & 2 \\ 0,333 & 0,333 & 1-\lambda & 0,25 \\ 0,167 & 0,143 & 3 & 1-\lambda \end{bmatrix} = 0. \quad (5)$$

Це рівняння має чотири корені:

$$\lambda_{1,2} = 0,1874 \pm j1,1818; \lambda_3 = 3,9984; \lambda_4 = -0,3733. \quad (6)$$

Найбільшим власним числом матриці є дійсний додатний корінь $\lambda_3=3,9984$ при підстановці якого в вихідне рівняння та заміні останнього рівняння умовою

нормування $\sum_{i=1}^6 \omega_{i-1} = 1$ формується система рівнянь для визначення вагових коефіцієнтів важливості оптимізаційних критеріїв:

$$\begin{cases} -2,9984\omega_{1-1} + 0,5\omega_{2-1} + 3\omega_{3-1} + 4\omega_{4-1} = 0; \\ 2\omega_{1-1} - 2,9984\omega_{2-1} + 3\omega_{3-1} + 2\omega_{4-1} = 0; \\ 0,333\omega_{1-1} + 0,333\omega_{2-1} - 2,9984\omega_{3-1} + 0,25\omega_{4-1} = 0; \\ \omega_{1-1} + \omega_{2-1} + \omega_{3-1} + \omega_{4-1} = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Рішенням системи рівнянь є вектор вагових коефіцієнтів w_1 :

$$w_1 = \{0,348; 0,419; 0,096; 0,137\}. \quad (8)$$

Визначимо вектор коефіцієнтів w_2 . За отриманими експертними оцінками складається матриця парних порівнянь:

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 0,5 & 0,25 \\ 0,333 & 1 & 2 & 3 \\ 2 & 0,5 & 1 & 2 \\ 4 & 0,333 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Визначаються власні числа матриці:

$$B_2 - \lambda E = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 3 & 0,5 & 0,25 \\ 0,333 & 1-\lambda & 2 & 3 \\ 2 & 0,5 & 1-\lambda & 2 \\ 4 & 0,333 & 0,5 & 1-\lambda \end{bmatrix} = 0. \quad (10)$$

Рівняння має чотири корені:

$$\lambda_{1,2} = -0,6903 \pm j2,8125; \lambda_3 = 5,5528; \lambda_4 = -0,1722. \quad (11)$$

Найбільшим власним числом матриці є дійсний додатний корінь $\lambda_3 = 5,5528$ при підстановці якого в вихідне рівняння та заміні останнього рівняння умовою

нормування $\sum_{i=1}^6 \omega_{i-2} = 1$ формується система рівнянь для визначення вагових коефіцієнтів важливості оптимізаційних критеріїв:

$$\begin{cases} -4,5528\omega_{1-2} + 3\omega_{2-2} + 0,5\omega_{3-2} + 0,25\omega_{4-2} = 0; \\ 0,333\omega_{1-2} - 4,5528\omega_{2-2} + 2\omega_{3-2} + 3\omega_{4-2} = 0; \\ 2\omega_{1-2} + 0,5\omega_{2-2} - 4,5528\omega_{3-2} + 2\omega_{4-2} = 0; \\ \omega_{1-2} + \omega_{2-2} + \omega_{3-2} + \omega_{4-2} = 1. \end{cases} \quad (12)$$

Рішенням системи рівнянь є вектор вагових коефіцієнтів w_2 :

$$w_2 = \{0,228; 0,285; 0,24; 0,247\}. \quad (13)$$

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

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(s_i) \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n \mu(s_i)}. \quad (14)$$

Метод Заде. Нехай існує множина Y станів локальних вузлів гідрогенератора. Оскільки гідрогенератор являє собою складну систему, кількість підсистем N , з яких він складається, в загальному випадку може бути досить великою:

- y_1 – технічний стан статора;
- y_2 – технічний стан підп'ятника;
- y_3 – технічний стан підшипника;
- y_4 – технічний стан ротора;
- y_5 – технічний стан системи збудження;
- y_6 – технічний стан системи управління;
- y_7 – технічний стан системи охолодження;
- ...
- y_N – технічний стан N -го вузла.

Нехай є матриця-вектор нечітких співвідношень (еталонна матриця станів) R , побудована експертами, яка визначає вплив стану i -того вузла на загальний ТС генератора:

$$R = [r_1 \quad r_2 \quad \dots \quad r_n]^T. \quad (15)$$

Кожний елемент матриці r_i визначається наступним чином:

$$r_i = \frac{m_i}{M}, \quad (16)$$

де m_i – кількість експертів, які визнали вплив стану i -того вузла на загальний стан «суттєвим», M – загальна кількість експертів.

Множина станів локальних вузлів також має вигляд матриці-вектора:

$$Y = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_n]. \quad (17)$$

ТС гідрогенератора S визначається шляхом композиційного перемноження двох матриць-векторів:

$$S = Y \circ R, \quad (18)$$

де \circ – означає максимінну композицію.

$M=10$ експертів дали оцінку суттєвості впливу стану кожного з локальних вузлів на загальний спрацьований ресурс:

– суттєвим вплив стану статора на загальний стан гідрогенератора визнали $m_1=9$ експертів;

– суттєвим вплив стану підп'ятника на загальний стан гідрогенератора визнали $m_2=8$ експертів;

– суттєвим вплив стану підшипника на загальний стан гідрогенератора визнали $m_3=7$ експертів;

– суттєвим вплив стану ротора на загальний стан гідрогенератора визнали $m_4=9$ експертів.

На підставі отриманих оцінок визначено елементи матриці нечітких співвідношень:

$$r_1 = \frac{m_1}{M} = \frac{9}{10} = 0,9, \quad (19)$$

$$r_2 = \frac{m_2}{M} = \frac{8}{10} = 0,8, \quad (20)$$

$$r_3 = \frac{m_3}{M} = \frac{7}{10} = 0,7, \quad (21)$$

$$r_4 = \frac{m_4}{M} = \frac{9}{10} = 0,9. \quad (22)$$

Матриця-стовбець R , має вигляд:

$$R = [0,9 \quad 0,8 \quad 0,7 \quad 0,9]^T. \quad (23)$$

Спрощений метод нечіткого виводу. Алгоритм спрощеного методу нечіткого виводу представлено в [16]. Нехай гідрогенератор може знаходитись у одному з п'яти станів:

- S_1 – дуже добрий;
- S_2 – добрий;
- S_3 – середній;
- S_4 – поганий;
- S_5 – дуже поганий.

Стан гідрогенератора оцінюється за ТС його основних вузлів. Основними вузлами гідрогенератора є: статор, ротор, підп'ятник та підшипники. Ці чотири локальні стани формують вхідні ознаки стану гідрогенератора:

- β_1 = «ТС статора»;
- β_2 = «ТС підп'ятника»;
- β_3 = «ТС направляючого підшипника»;
- β_4 = «ТС ротора».

Кожна вхідна ознака описується двома нечіткими термами ($i=1, \dots, 4$):

- β_{i1} = «Задовільний»,
- β_{i2} = «Незадовільний»,

які визначаються функціями приналежності $\mu(\beta)$, представленими вище на рис. 2.

На основі множини ознак стану гідрогенератору β сформульовані правила нечіткого виводу, які визначають матриці еталонних станів гідрогенератора. Кількість еталонних матриць дорівнює кількості прийнятих станів гідрогенератора.

Еталонні матриці станів приведено в табл. 4.

В результаті оцінки стану локальних вузлів гідрогенератора (статор, ротор, підп'ятник, підшипник) визначено вектор станів об'єкту $\beta_K = \{ \beta_{1K}, \beta_{2K}, \beta_{3K}, \beta_{4K} \}$. За функціями приналежності нечітких термів визначаються значення належності кожної ознаки її нечітким термам та формується матриця фактичного стану гідрогенератора S_K (табл. 5).

Для визначення до якого з еталонних станів належить фактичний стан, реалізується наступний алгоритм нечіткого висновку:

1) виконується операція логічного об'єднання за правилом мінімізації для матриці S_K та кожної з еталонних матриць $S_1 \dots S_5$.

2) визначається індекс порівняння I_i , $i=1, \dots, 5$, який визначає близькість матриці S_K до кожної з еталонних матриць $S_1 \dots S_5$:

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^4 \mu_{S_K \cap S_j}(\beta_{iK})}{\sum_{j=1}^4 \mu_{S_j}(\beta_{ij})}; \quad (24)$$

3) індекс порівняння з максимальним значенням визначає до якого з еталонних станів відноситься фактичний стан гідрогенератора:

$$S_K \in S_E = \{S_i | \max I_i\}. \quad (25)$$

Таблиця 4
Еталонні матриці станів гідрогенератора

S ₁ – дуже добрий				
$\mu(\beta_i)$ \ β_i	β_1	β_2	β_3	β_4
$\mu_1(\beta_i)$ =«Задовільний»	1	1	1	1
$\mu_2(\beta_i)$ =«Незадовільний»	0	0	0	0
S ₂ – добрий				
$\mu(\beta_i)$ \ β_i	β_1	β_2	β_3	β_4
$\mu_1(\beta_i)$ =«Задовільний»	1	1	1	0
$\mu_2(\beta_i)$ =«Незадовільний»	0	0	0	1
S ₃ – середній				
$\mu(\beta_i)$ \ β_i	β_1	β_2	β_3	β_4
$\mu_1(\beta_i)$ =«Задовільний»	0	1	1	0
$\mu_2(\beta_i)$ =«Незадовільний»	1	0	0	1
S ₄ – поганий				
$\mu(\beta_i)$ \ β_i	β_1	β_2	β_3	β_4
$\mu_1(\beta_i)$ =«Задовільний»	0	1	0	0
$\mu_2(\beta_i)$ =«Незадовільний»	1	0	1	1
S ₅ – дуже поганий				
$\mu(\beta_i)$ \ β_i	β_1	β_2	β_3	β_4
$\mu_1(\beta_i)$ =«Задовільний»	0	0	0	0
$\mu_2(\beta_i)$ =«Незадовільний»	1	1	1	1

Таблиця 5
Матриця фактичного стану гідрогенератора

$\mu(\beta_i)$ \ β_i	β_1	β_2	β_3	β_4
$\mu_1(\beta_i)$ =«Задовільний»	$\mu_1(\beta_{1K})$	$\mu_1(\beta_{2K})$	$\mu_1(\beta_{3K})$	$\mu_1(\beta_{4K})$
$\mu_2(\beta_i)$ =«Незадовільний»	$\mu_2(\beta_{1K})$	$\mu_2(\beta_{2K})$	$\mu_2(\beta_{3K})$	$\mu_2(\beta_{4K})$

Для визначення кількісного значення вихідної змінної $S_{вих}$, будемо вважати, що відношення індексу порівняння $I_{вих}$ до суми максимальних індексів порівняння вихідних термів визначає ступінь довіри до отриманого висновку. За великої кількості індексів порівняння в якості ступеня недовіри слід приймати середньоарифметичне значення від всіх індексів недовіри.

За такого підходу, кількісне значення вихідної змінної S_n визначається за наступним виразом:

$$S_{вих} = S_{вих-n} + \Delta S_{вих} \frac{I_{вих}}{\sum_{i=1}^n I_i + \frac{I_{вих}}{n}}, \quad (26)$$

де $S_{вих-n}$ – це нижня границя інтервалу вихідного терму, який визначено в якості рішення; $\Delta S_{вих} = S_{вих-в} - S_{вих-n}$ – ширина інтервалу вихідного терму, який визначено в якості рішення.

5. Оцінювання ТС гідрогенератора за розробленими нечіткими моделями

Необхідно виконати оцінку технічного стану вертикального гідрогенератора Дніпровської ГЕС-2 тип СВ-1230/140-56 за результатами оцінки стану 4-х локальних вузлів:

- $V_1=0,68$ – ТС (спрацьований ресурс) статора;
- $V_2=0,45$ – ТС (спрацьований ресурс) підп'ятника;
- $V_3=0,82$ – ТС (спрацьований ресурс) направляючого підшипника;
- $V_4=0,38$ – ТС (спрацьований ресурс) ротора.

За функціями приналежності нечітких термів (рис.2) визначаємо:

- $b_1: \{ \mu(s_{11})=0,21, \mu(s_{12})=0,79 \}$;
- $b_2: \{ \mu(s_{21})=0,58, \mu(s_{22})=0,42 \}$;
- $b_3: \{ \mu(s_{31})=0, \mu(s_{32})=1 \}$;
- $b_4: \{ \mu(s_{41})=0,71, \mu(s_{42})=0,29 \}$.

За розробленими вище методами виконано оцінку загального ТС гідрогенератора. Результати приведені в табл.6.

Таблиця 6
Результати оцінки ТС гідрогенератора за п'ятьма методами

Мамдані	Сугено («АБО»)	Сугено «ТАК»	Заде	Спрощений
0,611	0,632	0,655	0,7	0,746

Отримані результати мають значну відмінність один від одного. Для визначення найбільш достовірного та ефективного методу оцінювання ТС гідрогенератора визначимо за допомогою генератора випадкових чисел який з методів є найменш чутливим до якості вхідної інформації про стани локальних вузлів гідрогенератора.

6. Порівняльний аналіз чутливості розроблених нечітких моделей до якості вхідної інформації

Для оцінки чутливості кожної з п'яти моделей до якості вхідної інформації, яка в свою чергу отримана за нечіткими моделями оцінки стану локальних вузлів. Кожна з вхідних величин випадковим чином змінюється в діапазоні $\pm 10\%$. За допомогою генератора випадкових чисел отримано 20 пар значень вхідних величин. Для кожного набору значень $V_1 \dots V_4$ визначено загальний стан

генератора S за кожною з синтезованих моделей. Результати моделювання приведені в табл.7.

Таблиця 7

Нечітко-статистична оцінка стану гідрогенератора

№	B_1	B_2	B_3	B_4	S_{Mamd}	S_{SugOR}	S_{SugAND}	S_{Zadeh}	S_{Simple}
1	0,638	0,457	0,741	0,342	0,588	0,599	0,626	0,7	0,721
2	0,63	0,42	0,776	0,394	0,633	0,611	0,630	0,7	0,73
3	0,715	0,465	0,875	0,406	0,65	0,677	0,711	0,715	0,753
4	0,703	0,498	0,745	0,414	0,628	0,649	0,682	0,703	0,745
5	0,619	0,444	0,745	0,405	0,557	0,609	0,627	0,7	0,725
6	0,709	0,48	0,803	0,342	0,594	0,642	0,675	0,709	0,755
7	0,623	0,493	0,785	0,4	0,622	0,633	0,653	0,7	0,732
8	0,669	0,467	0,891	0,378	0,643	0,661	0,688	0,7	0,739
9	0,622	0,44	0,767	0,408	0,567	0,615	0,634	0,7	0,733
10	0,651	0,432	0,772	0,402	0,601	0,621	0,643	0,7	0,736
11	0,637	0,442	0,791	0,366	0,585	0,615	0,636	0,7	0,744
12	0,668	0,454	0,802	0,4	0,632	0,639	0,665	0,7	0,741
13	0,637	0,446	0,838	0,365	0,619	0,629	0,650	0,7	0,729
14	0,734	0,439	0,841	0,371	0,587	0,656	0,692	0,734	0,75
15	0,743	0,481	0,784	0,378	0,635	0,656	0,695	0,743	0,759
16	0,716	0,472	0,773	0,39	0,64	0,647	0,681	0,716	0,748
17	0,642	0,409	0,869	0,409	0,612	0,640	0,661	0,7	0,741
18	0,62	0,483	0,897	0,414	0,597	0,664	0,684	0,7	0,731
19	0,727	0,404	0,821	0,373	0,645	0,639	0,673	0,727	0,758
20	0,711	0,472	0,82	0,364	0,596	0,651	0,684	0,711	0,747
Математичне очікування				$M(S)$	0,612	0,638	0,665	0,708	0,741
Середньоквадратичне відхилення				$\sigma(S)$	0,027	0,021	0,026	0,015	0,011
				%	4,4	3,3	3,9	2,1	1,5

За отриманими результатами можна визначити наступне:

1) математичне очікування значення ТС гідрогенератора за 20 реалізацій нечітко-статистичного алгоритму відповідає рішенням, що отримані за дискретних значень вхідних величин для всіх п'яти нечітких моделей (див. табл. 6, 7);

2) середньоквадратичне відхилення значення технічного стану гідрогенератора за 20 реалізацій нечітко-статистичного алгоритму знаходиться в межах 3–4 % для моделей Мамдані та Сугено та в межах 1,5–2 % для моделей побудованих за спрощеним методом та методом Заде. Це дозволяє зробити висновок, що нечіткі моделі оцінювання комплексного ТС гідрогенератора, побудовані за спрощеним методом та методом Заде, завдяки своїм алгоритмам нечіткого виводу мають найменшу залежність від інтервальної варіативності вхідних величин локальних станів вузлів гідрогенератора.

7. Обговорення результатів дослідження ТС гідрогенератора

Розроблені нечіткі моделі оцінювання технічного стану гідрогенератора за методами Мамдані, Сугено, Заде та спрощеним методом нечіткого виводу дають можливість кількісної оцінки стану гідрогенераторів в умовах нечіткості вхідної інформації про стани вузлів гідрогенератора. На відміну від попередніх розробок, дані моделі використовують вхідну інформацію, яка також визначена за нечіткими моделями та алгоритмами в режимі «он-лайн». Застосування запропонованих моделей дозволяє отримувати кількісну оцінку стану гідрогенератора з точністю, яка залежить від застосованого методу побудови моделі. Найвищу точність оцінки стану гідрогенератора (1,5 %) дає спрощений метод нечіткого виводу. Це пояснюється тим, що побудова еталонних матриць потребує мінімальної кількості суб'єктивної експертної інформації. Високу точність результату (2,1 %) також має модель, побудована за методом Заде, що пояснюється використанням експертних оцінок від декількох експертів, що знижує суб'єктивність при налагодженні моделі. Інші моделі мають похибку оцінювання стану більшу за 3 % та більш чутливі від якості вхідної інформації через значну суб'єктивність експертних оцінок при побудові баз правил прийняття рішення.

Перевагами розроблених у дослідженні моделей є можливість використання нечітких даних про стани локальних вузлів гідрогенератора та отримання при цьому кількісної оцінки стану гідрогенератора як об'єкта з точністю 1,5 – 2 %. Недоліком підходу є складність формування баз правил прийняття рішення та еталонних матриць за великої кількості вхідних ознак (локальних вузлів гідрогенератора).

Розвиток даного дослідження передбачається в адаптації розроблених моделей до турбогенераторів та інших великих машин змінного струму, які наявні в ЕЕС.

8. Висновки

1. Розроблені в роботі нечіткі моделі оцінювання ТС гідрогенератора дають можливість з точністю 1,5–2% визначити загальний стан гідрогенератора. При цьому використовуються тільки доступні в «он-лайн» режимі параметри стану агрегату та експертні оцінки для визначення зв'язків між окремими діагностичними ознаками та станами локальних вузлів генератора.

2. Оцінювання загального ТС гідрогенератора відбувається в умовах нечіткості вихідних даних, які отримані за нечіткими моделями оцінки станів локальних вузлів гідрогенератора. Проведений аналіз чутливості розроблених моделей до якості вхідної інформації показав, що найменший вплив інтервальна варіативність вхідних величин локальних станів вузлів гідрогенератора має в моделях побудованих за методом Заде та за спрощеним методом нечіткого виводу, які мають прості алгоритми та мінімальну залежність від суб'єктивності експертних знань при їхній побудові.

3. Отримані за розробленими нечіткими моделями комплексні оцінки загального стану гідрогенераторів дозволяють в подальшому визначити імовірність відмови гідрогенератора на інтервалі часу з урахуванням його індивідуальних характеристик стану. Отримані значення імовірностей доцільно використовуву-

вати в задачах оцінювання надійності гідрогенераторів, планування їхніх ремонтів та здійснення ризик-орієнтованого управління ЕЕС.

Література

1. Kosterev, M., Litvinov, V. (2018). Priority events determination for the risk-oriented management of electric power system. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 21–32. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00643>
2. Litvinov, V. V., Manukian, K. A. (2014). Fuzzy-Statistical Modeling of Hydrogenerator for Its Reliability Appreciation. *The International Journal Of Engineering And Science*, 3 (1), 85–95.
3. Літвінов, В. В., Кільова, К. А. (2018). Оцінювання технічного стану механічних вузлів гідрогенератора. *Гідроенергетика України*, 1-2, 44–48.
4. Bellman, R. E., Zadeh, L. A. (1970). Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*, 17 (4). doi: <https://doi.org/10.1287/mnsc.17.4.b141>
5. Jagadeesh, B., Sanker, B. V. (2011). Evaluation of synchronous generator reactance using finite element method (FEM). *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 27 (2), 68–76. URL: <http://www.jatit.org/volumes/research-papers/Vol27No2/2Vol27No2.pdf>
6. Faiz, J., Ebrahimi, B. M., Valavi, M., Toliyat, H. A. (2009). Mixed eccentricity fault diagnosis in salient-pole synchronous generator using modified winding function method. *Progress In Electromagnetics Research B*, 11, 155–172. doi: <https://doi.org/10.2528/pierb08110903>
7. Duraisamy, V., Devarajan, N., Vinoth Kumar, P. S., Sivanandam, S. N., Somasundareswari, D. (2005). A fuzzy based fault detection scheme for synchronous generator. *Academic Open Internet Journal*, 14.
8. Xie, H., Bo, Y., Yanpeng, H. (2003). Diagnosis of Stator Winding Insulation of Large Generator. *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.03CH37417)*. doi: <https://doi.org/10.1109/icpadm.2003.1218405>
9. Frolov, M. Yu., Fishov, A. G. (2007). Identification of Synchronous Generator Electric Parameters Connected to the Distribution Grid. *Problemele Energeticii Regionale*, 1 (33), 32–39.
10. Wang, L., Li, Y., Li, J. (2018). Diagnosis of Inter-Turn Short Circuit of Synchronous Generator Rotor Winding Based on Volterra Kernel Identification. *Energies*, 11 (10), 2524. doi: <https://doi.org/10.3390/en11102524>
11. Yucui, W., Yonggang, L. (2015). Diagnosis of Rotor Winding Interturn Short-Circuit in Turbine Generators Using Virtual Power. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30 (1), 183–188. doi: <https://doi.org/10.1109/tec.2014.2339300>
12. Yucui, W., Minghan, M., Yonggang, L. (2018). A New Detection Coil Capable of Performing Online Diagnosis of Excitation Winding Short-Circuits in Steam-Turbine Generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33 (1), 106–115. doi: <https://doi.org/10.1109/tec.2017.2741503>
13. Maraaba, L., Al-Hamouz, Z., Abido, M. (2018). An Efficient Stator Inter-Turn Fault Diagnosis Tool for Induction Motors. *Energies*, 11 (3), 653. doi: <https://doi.org/10.3390/en11030653>

14. Klir, G. J., Yuan, B. (1995). Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Prentice Hall, 592.

15. Saaty, T. L. (1990). Eigenvector and logarithmic least squares. European Journal of Operational Research, 48 (1), 156–160. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90073-k](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90073-k)

16. Костерев, М. В., Бардик, Є. І. (2011). Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. К.: НТУУ «КПІ», 148.

Не є перевиданням