

Є.І. Бардик, М.П. Болотний

Розробка нечіткого класифікатора для ранжування технічного стану силового трансформатора

Розглянуто питання обґрунтування і розробки інтелектуальної системи для підтримки прийняття рішень щодо визначення рангу технічного стану силового трансформатора. Запропоновано підхід для встановлення рангу силового трансформатора шляхом застосування класифікатора, розробленого на базі системи нечіткого виведення Такаґі – Сугено. Побудовано ієрархічні структурні схеми визначення рівнів факторів технічного стану окремих функціональних вузлів та силового трансформатора в цілому. Розроблено нечіткий класифікатор для ранжування технічного стану силового трансформатора за результатами окремих випробувань і вимірювань. Виконана адаптація нечітких моделей оцінки технічного стану шляхом навчання нечіткого класифікатора на вибірках з протоколів обстеження парку силових трансформаторів різних типів і класу напруг. Виконано комплексну оцінку технічного стану та класифікацію рангу за сукупністю контрольованих параметрів силових трансформаторів енергокомпанії. Бібл. 36, табл. 8, рис. 12.

Ключові слова: нечіткий класифікатор, електрообладнання, оцінка технічного стану, дефект, силовий трансформатор.

Вступ. Сучасний стан електроенергетики промислово розвинених країн світу характеризується значним ступенем зношення силових трансформаторів (СТ) як найбільш поширеного елемента електроенергетичної системи. Прискорене оновлення парку СТ потребує колосальних інвестицій в електроенергетику та визначає необхідність комплексного підходу до вирішення цих задач, не обмежуючись тільки заміною обладнання [1-3]. В табл. 1 представлено статистичні дані щодо розподілу характерних пошкоджень СТ 110-500 кВ за функціональними вузлами [4, 5].

Таблиця 1

Статистичні дані щодо розподілу пошкоджень СТ за функціональними вузлами згідно тривалості експлуатації

Функціональний вузол СТ	Кількість пошкоджень згідно тривалості експлуатації СТ					Загалом
	10 років	10-20 років	20-30 років	30-40 років	>40 років	
Магнітопровід	0	0	1	0	0	1
Система охолодження	2	14	13	1	0	30
Обмотки	23	25	23	28	12	111
Пристрій РПН	12	28	21	10	0	71
Високовольтні вводи	15	37	38	31	9	130
Витік оливи	12	16	19	11	3	61
Вандалізм	3	6	10	1	1	21
Упуск оливи	12	22	22	14	5	75
Загалом	79	148	147	96	30	500

На рис. 1 наведена статистика основних причин відмов СТ по даним СІГРЕ станом на 2015 за період 1950 по 2009 [6].

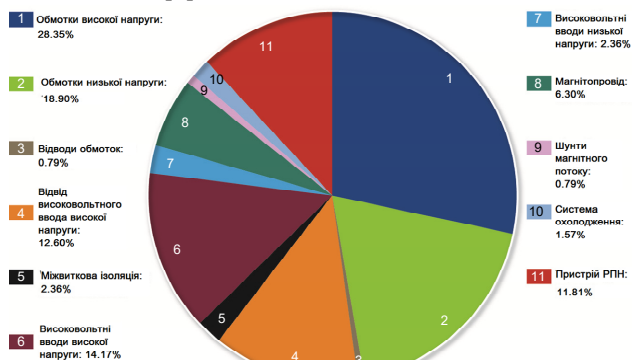


Рис. 1. Статистика основних причин відмов блочних СТ напругою вище 110 кВ

Крім того, більша частина парків СТ зберігає роботу здатність понад проектний термін експлуатації. Актуальним є вдосконалення методів діагностики технічного стану обладнання для визначення можливостей його експлуатації для 2-х кратних та понад нормативні терміни експлуатації [7-9].

Хибне визначення рангу технічного стану СТ може призвести до помилкового розрахунку складу необхідних об'ємів діагностичних випробувань і заходів щодо подальшої експлуатації [10].

Таким чином, очевидна економічна недоцільність попередньої заміни обладнання, а також важливість своєчасного виявлення загрозливих дефектів, їх подальший контроль із підвищенням достовірності визначення рангу технічного стану СТ.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Сучасне програмно-алгоритмічне забезпечення дозволяє істотно підвищити достовірність рішення таких задач в умовах невизначеності діагностичної інформації. Більш достовірні рішення щодо ранжування технічного стану СТ вдається отримати при використанні інтелектуальних систем підтримки прийняття рішення [11].

В даний час для діагностики СТ широко застосовують хроматографічний аналіз газів розчинених (ХАРГ) у оливі СТ. За умови виникнення та розвитку дефекту всередині трансформатора склад і концентрації газів розчинених у трансформаторній оливі інтенсивно змінюються як кількісно, так і якісно [12].

Практично всі наявні методики оцінки результатів ХАРГ не дозволяють чітко класифікувати технічний стан СТ на основі зміни концентрацій газів і, відповідно, не можуть бути використані для оцінки технічного стану трансформатора на інтервалі часу спостереження [13].

У табл. 2 представлені певні результати деяких систем, розроблених для діагностики трансформаторів на основі ХАРГ [14-16].

Кількісні показники точності діагностики представлених систем відображають необхідність застосування методів, що дозволяють мінімізувати похибку оцінки технічного стану СТ.

Складність вирішення цієї задачі визначається наявністю множини чинників, які одночасно впливають на концентрації газів в оливі: детерміновані чинники,

що визначаються конструкцією СТ, а також стохастичні фактори, що залежать від умов експлуатації СТ.

Таблиця 2

Отримані результати для деяких систем діагностики дефектів СТ

Кількість СТ, шт.	Точність діагностики розроблених систем, %
711	90,3 – навчальна вибірка 93,81 – тестова вибірка
210	95,72 – навчальна вибірка 95,34 – тестова вибірка
711	96,2
33	90,91 – метод Дорненбурга 87,88 – модифікований метод Роджерса 90,91 – метод Роджерса 93,94 – метод ІЕС/ІЕЕЕ
820	90,49 – навчальна вибірка 93,54 – тестова вибірка

Було проведено узагальнення результатів основних і перспективних наукових праць для вибору програмно-алгоритмічного забезпечення інтелектуальних систем, які дозволяють отримувати достовірні результати прогнозування в умовах невизначеності [8-12].

За результатами узагальнення була проведена техніко-економічна оцінка продукційних моделей (ПМ), семантичних мереж (СМ), логічних моделей (ЛМ), штучних нейронних мереж (ІНМ), нечіткої логіки (НЛ), нечітких нейронних мереж (ННМ) і ін. [13-20].

В табл. 3 наведено характеристики моделей представлення знань для інтелектуальних систем підтримки прийняття рішення.

Таблиця 3

Техніко-економічна оцінка моделей представлення знань

Найменування критерія	Модель представлення знань					
	ЛМ	ПМ	СМ	ІНМ	НЛ	ННМ
1. Можливість оперування нечіткими даними	-	+	-	+	+	+
2. Універсальність	-	-	-	+	-	+
3. Наочність представлення знань	-	+	+	-	+	+
4. Модульність	+	+	-	+	-	+
5. Допустимі витрати часу на побудову моделі	+	+	-	+	+	+
6. Допустима вартість	+	+	-	+	+	+
7. Здатність до самонавчання	-	-	-	+	-	+
8. Коефіцієнт ефективності	0,5	0,7	0,1	0,9	0,6	1

Очевидно, що з перерахованих моделей розв'язуваної задачі найкращим чином підходять моделі на основі нечітких нейронних мереж [21]. Вони об'єднують переваги таких моделей подання знань, як НЛ і ІНМ, що дозволяє компенсувати недоліки, властиві кожній окремій моделі.

На підставі отриманих результатів аналізу було вирішено використовувати ННМ для побудови нечіткого класифікатора на основі застосування моделі нечіткої системи Такагі – Сугено [22].

Отже, **метою статті** є підвищення ефективності оцінки технічного стану силового трансформатора шляхом розробки нечіткого класифікатора для забезпечення достовірності визначення рангу технічного стану силового трансформатора.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- розробити ієрархію нечіткої оцінки технічного стану СТ на основі агрегування найбільш значимих рівнів факторів впливу на технічний стан;

- розробити алгоритм проведення нечіткої оцінки технічного стану СТ за сукупністю контрольованих параметрів;

- розробити нечіткий класифікатор для ранжування технічного стану СТ;

- провести комплексну нечітку оцінку технічного стану СТ в умовах невизначеності інформації для прийняття ефективних превентивних рішень щодо стратегії подальшої експлуатації.

Концепція вибору параметрів, що впливають на визначення рангу технічного стану СТ. Існує низка діагностичних методик визначення стану СТ, проте непросто інтегрувати їх результати в єдину комплексну оцінку. Метод, заснований на нечіткій логіці для обчислення індексу здоров'я запропонований в [23], дозволяє визначити лише показник працездатності системи ізоляції. За останні десятиліття, було запропоновано різні алгоритми діагностики стану СТ із застосуванням інтелектуальної технології обробки інформації, наприклад метод Байєса [24], метод доказової аргументації [25], метод опорних векторних машин [26], метод штучної нейронної мережі [27]. Коли виникає дефект СТ, це часто супроводжується зміною деяких параметрів технічного стану [28]. Ці алгоритми досягли хороших результатів в інженерній практиці, проте бракує аналізу кореляції кожного параметра і класу технічного стану СТ. В [29] при оцінці стану трансформатора кожен з тестових індексів і рангу станів відповідає окремій парі набору даних. Але внутрішні взаємозв'язки між кожним тестовим індексом не було розглянуті в цих роботах, тому типи пошкодження СТ неможливо діагностувати. З іншого боку, методи оцінки стану трансформаторів на основі методу аналізу пар наборів є підґрунтям для комплексного бального методу оцінки технічного стану експертами. Це дає можливість побудувати нечіткі матриці експертних оцінок, використовуючи аналітичний ієрархічний процес для визначення вагових коефіцієнтів. Проте використання комплексного бального методу оцінки технічного стану та аналітичного ієрархічного процесу не дозволяють повністю уникнути суб'єктивних розбіжностей експертів щодо наявності дефекту в СТ [30].

З вищезазначених причин у цій статті зроблено спробу подолати недоліки розглянутих підходів та методів визначення комплексної оцінки технічного стану СТ.

Розробка нечіткого класифікатора передбачає виконання кількох основних етапів. На початковому етапі створення класифікатора необхідно провести вибірку факторів, найбільш значимих при встановленні рангу. Виділення основних параметрів також важливо, так як оцінка рангу технічного стану СТ характеризується великою кількістю чинників, що мають для різних класів технічного стану певні відмінності. Рішення даної задачі можливе за допомогою методу експертних оцінок для ранжування порівнюваних об'єктів.

Запропонований метод експертних оцінок базується на використанні нечіткої комплексної оцінки об'єкта, на функціонування якого впливають численні фактори.

Практика проведення діагностичних випробувань на СТ показує, що при постановці діагностичної гіпотези щодо наявності дефекту має бути декілька

факторів, що розглядаються та визначаються в процесі оцінки. Так як зазвичай дуже важко прийняти рішення, застосовуючи класичний математичний метод, нечітка комплексна оцінка здатна вирішувати задачу прийняття рішень оцінки з кількома факторами. Цей метод оцінки ґрунтується на основі існуючих стандартів оцінки та нечіткого перетворення фактично виміряних даних або даних зі значною невизначеністю, неповнотою інформації. Порівняно з іншими методами, він є комплексним, об'єктивним та інтегрованим методом оцінки результатів.

Алгоритм проведення нечіткої оцінки технічного стану СТ наступний.

1. Визначення множини X рівнів факторів впливу на технічний стан СТ, що потребує оцінки:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}; \quad (1)$$

де x_i – i -й фактор, який може впливати на технічний стан СТ та має певну ступінь нечіткості; n – загальна кількість факторів, що можуть впливати на технічний стан СТ.

2. Формування множини V експертних оцінок:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}; \quad (2)$$

де v_i – i -й комплексний результат всебічної оцінки експерта; n – загальна кількість оцінок експертів щодо технічного стану СТ.

3. Формування комплексної матриці нечітких відношень експертних оцінок R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{j1} & \dots & r_{ij} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $r_{ij} \in [0, 1]$ – елемент матриці нечітких відношень між пошкодженнями функціональних вузлів та наслідками цих пошкоджень.

4) Визначення системи вагових коефіцієнтів W :

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n), \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (4)$$

де w_i – i -й ваговий коефіцієнт, що відображає значущість кожного фактора оцінки x_i ; n – загальна кількість вагових коефіцієнтів оцінки значущості факторів щодо впливу на оцінку технічного стану СТ.

5) Визначення множини B нечіткої комплексної оцінки технічного стану СТ. Рівняння нечіткої всебічної оцінки експертів щодо технічного стану СТ

$$B = \max\{b_1, b_2, \dots, b_n\}, \quad (5)$$

де $b_j = \sum_{i=1}^m w_j \cdot r_{ij}$, $j = 1, 2, \dots, n$ – j -й нечітка комплексна оцінка технічного стану СТ; n – загальна кількість нечітких комплексних оцінок технічного стану СТ.

Для проведення роботи з нечіткої комплексної оцінки ТС за методом експертних оцінок формується експертна група із n висококваліфікованих спеціалістів з експлуатації та ремонту СТ. Формування групи починалося з вибору кандидатів і подальшої їх оцінки за допомогою методу Delphi [31].

Для визначення технічного стану оливного СТ на базі результатів окремих випробувань та вимірювань розроблена лінгвістична математична модель, яка містить в собі правила нечіткого логічного висновку, терм-множини та функції належності вхідних параметрів до тієї чи іншої лінгвістичної величини. На рис. 2 представлена фрагмент ієрархічної структурної схеми нечіткого логічного виводу про технічний стан оливного трансформатора на основі визначених окремих рівнів факторів технічного стану [32].

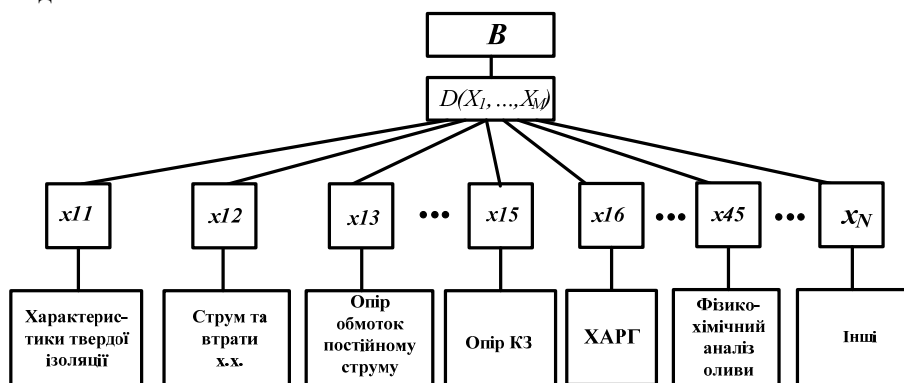


Рис. 2. Ієрархічна структурна схема нечіткого логічного виводу про технічний стан оливного трансформатора

Модель містить правила нечіткого логічного висновку Такагі – Сугено, терми і функції належності вхідних параметрів до того чи іншого лінгвістичного значення. База знань прототипу експертної системи для діагностики технічного стану СТ ґрунтується на ієрархічному представленні та складається з системи вбудованих баз знань. Інтегральна оцінка технічного стану здійснюється шляхом агрегування висновків щодо типу дефекту СТ за індивідуальними результатами випробувань, використовуючи відповідні бази знань.

Нечіткий логічний аналіз включає в себе три послідовні процеси, а саме: фазифікація, нечіткі висновки та дефазифікація. Фазифікація перетворює, наприклад, чітке співвідношення газу до нечіткої вхідної множини.

Вибрана система нечіткого логічного висновку відповідає за отримання висновків з нечітких правил на основі знань «якщо-то» лінгвістичних висловлювань. Кожне правило складається з двох компонентів, в яких є попередня частина («якщо») та наступна частина («то»). За допомогою нечіткого підходу часткова належність до певного класу технічного стану (визначається значенням функції належності) може збільшити кількість відповідних висновків порівняно з традиційними критеріями оцінки технічного стану СТ, які регламентуються нормативно-технічною документацією [6, 32].

Наприклад лінгвістичне правило для визначення оцінки показників технічного стану за результатами ХАРГ має наступний вигляд: якщо «C2H2/C2H4 дорі-

вноє 0, C_{H4}/H_2 становить 2, а C_{2H4}/C_{2H_6} також 0, тоді тип дефекту, який відповідає даній комбінації співвідношень є D7», тобто низькотемпературний дефект (перегрів) $T < 300$ °С.

Функція дефазифікації потім перетворює вихідні значення назад у чіткі значення.

Всі входи системи нечіткого логічного висновку мають функції належності, базові форми і параметри яких детально представлені в [32]. Для врахування об'єктивно існуючої толерантності розпізнаваного дефекту до зміння параметрів у визначеному діапазоні, використанні трапецієподібні функції належності.

На початковому етапі кожному експерту було запропоновано 7 показників по їх значимості для ранжування технічного стану СТ:

- x_1 – рівень фактора технічного стану обмоток СТ (рис. 3);
- x_2 – рівень фактора технічного стану осердя магнітопровода СТ (рис. 4);

- x_3 – рівень фактора технічного стану високовольтних вводів СТ (рис. 5);
- x_4 – рівень фактора ізоляційних характеристик трансформаторної оливи (ФХАМ) СТ (рис. 6);
- x_5 – рівень фактора перемикача відгалуджень РПН СТ (рис. 7);
- x_6 – рівень фактора технічного стану інших вузлів СТ (рис. 8);
- x_7 – рівень фактора інших показників експлуатації СТ (рис. 9).

Оцінка технічного стану СТ експертами залежить від подолання невизначеності інформації:

- неможливо визначити стан по одному вимірюванню, на основі одного методу;
- надійний діагноз ґрунтується на: декількох видах діагностики; динаміці змін характеристик;
- неможливість застосування самих критеріїв діагнозу для різних конструкцій і класів напруги;
- надійність результатів діагнозу повинна досягатися при мінімумі витрат на їх отримання.

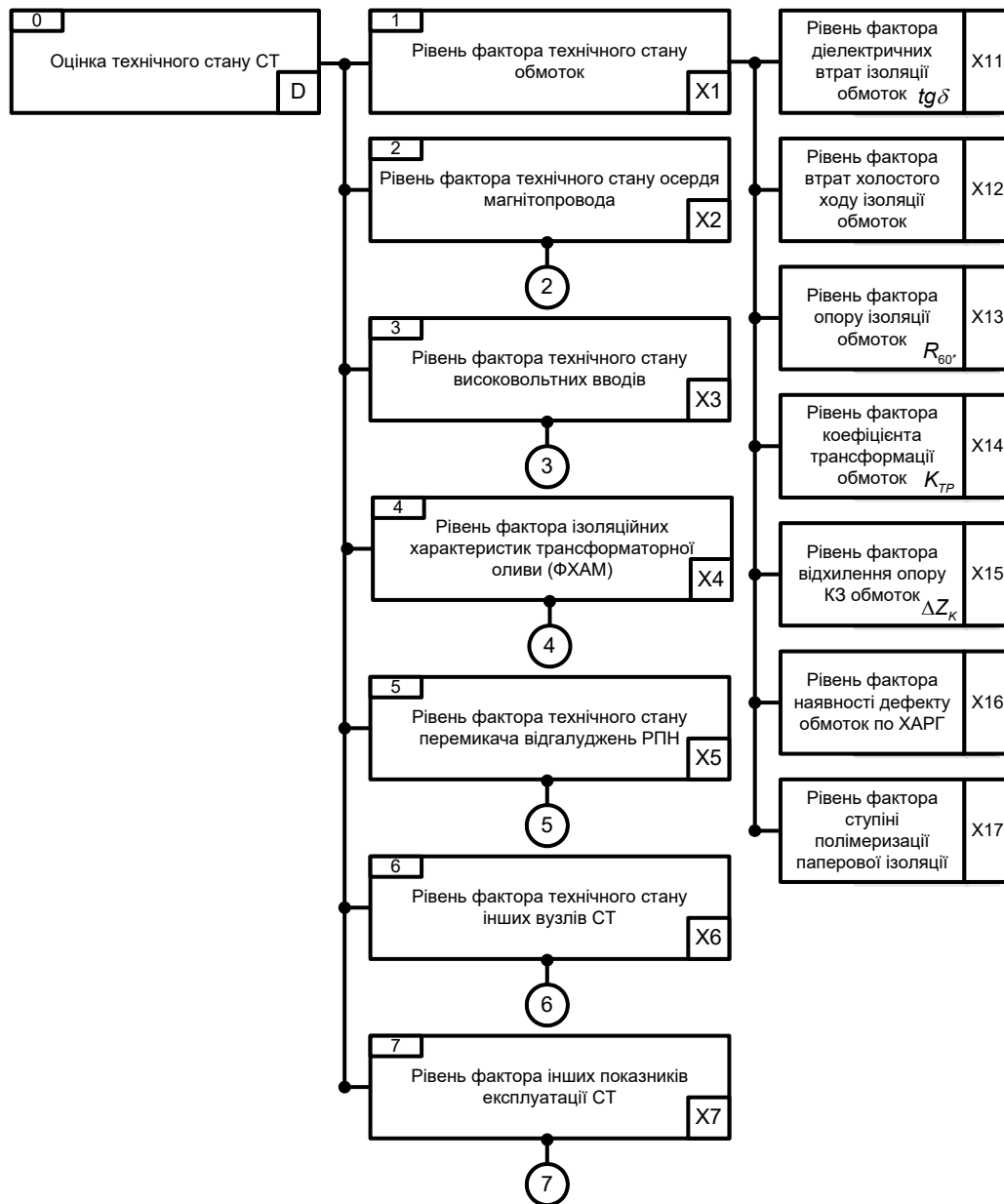


Рис. 3. Ієрархічна структурна схема оцінки технічного стану СТ

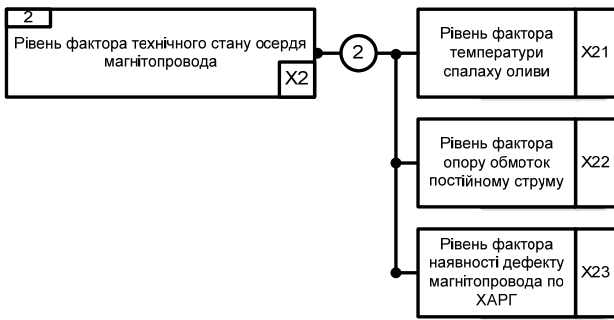


Рис. 4. Ієрархічна структурна схема оцінки рівня фактора технічного стану осердя магнітопровода СТ

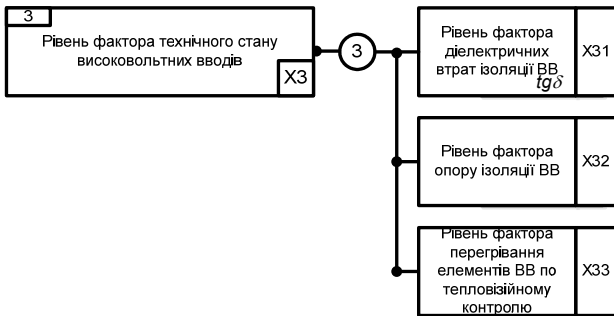


Рис. 5. Ієрархічна структурна схема оцінки рівня фактора технічного стану високовольтних ввідів СТ

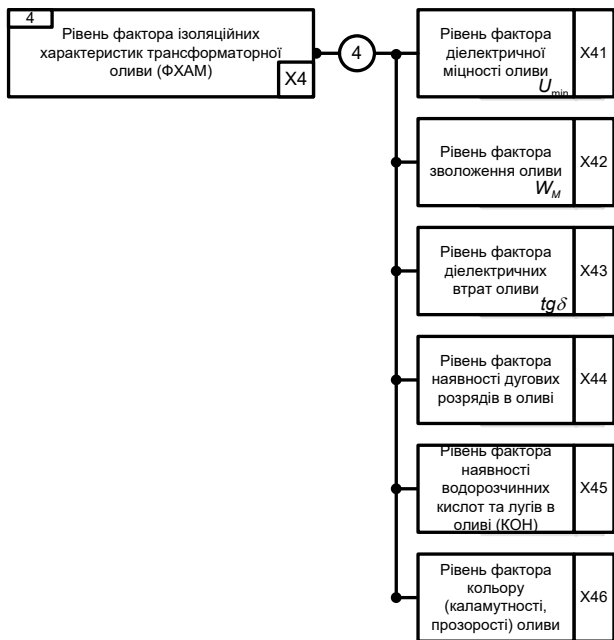


Рис. 6. Ієрархічна структурна схема оцінки рівня фактора ізоляційних характеристик трансформаторної оливи (ФХАМ) СТ

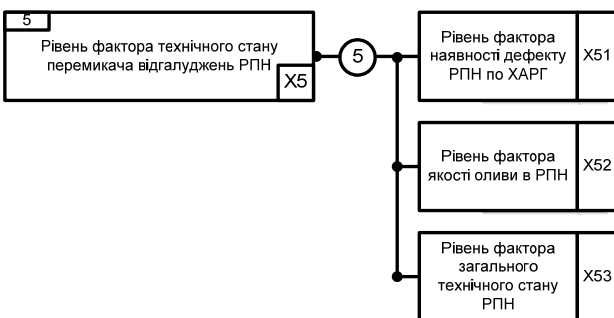


Рис. 7. Ієрархічна структурна схема оцінки рівня фактора технічного стану перемикача відгалуджень РПН СТ

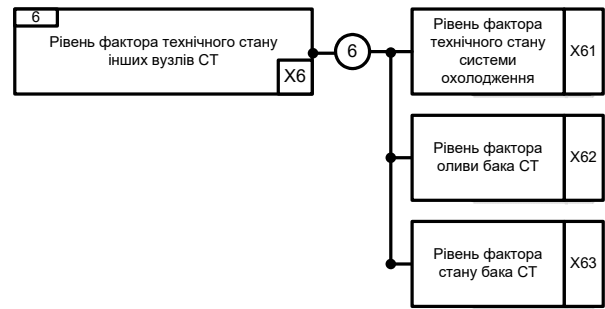


Рис. 8. Ієрархічна структурна схема оцінки рівня фактора технічного стану інших вузлів СТ

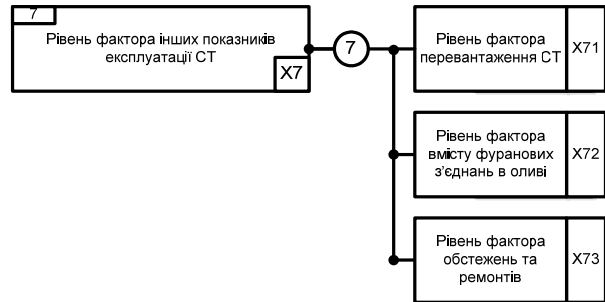


Рис. 9. Ієрархічна структурна схема оцінки рівня фактора інших показників експлуатації СТ

Побудова нечіткого класифікатора для ранжування технічного стану СТ. Після визначення рівнів факторів технічного стану СТ, умови експлуатації СТ класифікуються з метою встановлення оцінки кожного фактора для комплексної нечіткої оцінки [33]. Умови експлуатації СТ класифікуються як хороші, прийнятні, потребують обережності та ризиковані у цій статті виражено як множину експертних оцінок $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{добре, прийнятно, потребує обережності, ризиковано}\}$.

Умова експлуатації «добре» означає, що тестова вибірка даних роботи трансформатора є нормальною, і кожні параметри технічного стану незначно відхиляються від контрольованих значень. Ймовірність виникнення дефекту низька і довготривала робота в межах гранично-допустимих відхилень контрольованих параметрів доступна.

Умови експлуатації «прийнятно» означають, що СТ експлуатувався протягом певного часу, і задовільні дані випробувань або достовірність певної індивідуального контрольованого параметра технічного стану дещо менше за межі гранично-допустимих відхилень. Оскільки дані достовірні, експлуатацію СТ можна продовжувати, а ймовірність відмови низька.

Умова експлуатації «Потребує обережності» означає, що під час випробувального періоду дані тесту відхилялися від нормального стану. Деякі параметри технічного стану відображають те, що дефект може існувати, таким чином, ймовірність виникнення пошкодження збільшується, і хоча трансформатор може продовжувати працювати, проте інтервал експлуатації повинен бути скорочений.

Умова експлуатації «ризиковано» означає, що загальні експлуатаційні властивості СТ є нижче середнього. Більшість отриманих контрольованих параметрів перевищують регламентовані стандартами значення, а ймовірність виникнення відмови велика.

В табл. 4 представлено семантичне визначення відношення рангу технічного стану та умов експлуатації СТ.

Таблиця 4

Семантичне визначення діапазону зміни рангу технічного стану СТ

Діапазон зміни величини B	Семантичне визначення оцінки технічного стану СТ
0...0,25	Хороший технічний стан СТ. Продовження експлуатації без обмежень. Дуже низький рівень відмови (VL)
0,25...0,5	Низька ступінь погіршення технічного стану СТ. Продовження експлуатації без обмежень. Низький рівень відмови (L)
0,5...0,75	Середня ступінь погіршення технічного стану СТ. Незначний ступінь розвитку дефекту. Частіший контроль параметрів технічного стану СТ. Середній рівень відмови (M)
0,75...1,0	Технічний стан змістився від стану погіршення до стану відмови. Значний ступінь розвитку дефекту. Високий рівень відмови (H)

Лінгвістична змінна B «нечітка комплексна оцінка технічного стану СТ», що подана в табл. 4 представлена базовою терм-множиною $T = \{T_{VL}, T_L, T_M, T_H\}$, де T_{VL}, T_L, T_M, T_H – терми що відповідають дуже низькому, низькому, середньому і високому рівням погіршення технічного стану СТ. Графіки функцій належності терм-множини лінгвістичної змінної B показано на рис. 10.

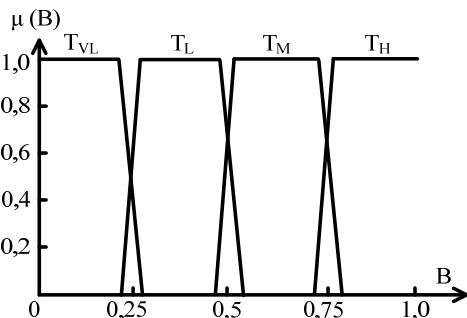


Рис. 10. Графіки функцій належності терм-множини лінгвістичної змінної B

Таким чином, результати по кожному виду діагностики класифікуються незалежно, і далі підсумковий висновок виконується з урахуванням всіх експертних оцінок.

Для визначення рангу технічного стану оливного СТ була розроблена лінгвістична модель класифікатора, що ґрунтується на використанні апарату нечіткої логіки [32, 34, 35].

Нечітка модель класифікатора комплексної оцінки стану СТ побудована на основі адаптивної нейро-нечіткої мережі ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System), яка є гібридною багатошаровою штучною нейронною мережею спеціальної структури без зворотного зв'язку і дозволяє реалізувати моделі систем у формі правил нечітких продукцій.

Нечіткий класифікатор для ранжування технічного стану СТ представлений у вигляді

$$B = F(X, V, C, W), \quad (6)$$

де $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – вхідний вектор рангових оцінок показників рівнів факторів нечіткої моделі класифікатора; $V = \{v_1, v_2, \dots, v_q\}$ – вектор параметрів функцій належності всебічної оцінки експертом показників

рівнів факторів нечіткої моделі класифікатора; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_q\}$ – вектор параметрів нечітких термів з бази знань нечіткої моделі класифікатора; $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ – вектор вагових коефіцієнтів нечітких правил нечіткої моделі класифікатора; n – загальна кількість нечітких правил в базі знань нечіткої моделі класифікатора; q – загальна кількість термів нечіткої моделі класифікатора; F – оператор зв'язку «вхід-вихід» нечіткої моделі класифікатора.

Значення входів, виходів та синаптичних вагових коефіцієнтів гібридної нейронної мережі знаходяться в діапазоні $[0, 1]$.

На рис. 11 зображено приклад нейромережеве представлення правил нечіткого класифікатора для 2-х рівнів факторів впливу на технічний стан СТ.

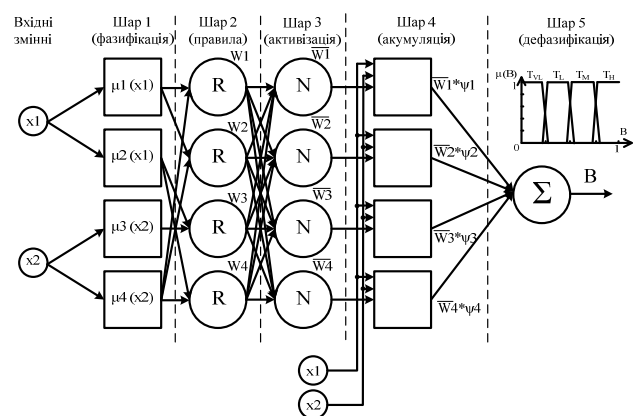


Рис. 11. Нейромережеве представлення правил нечіткого класифікатора для 2-х рівнів факторів впливу на технічний стан СТ

Мережа ANFIS використовує гібридний алгоритм навчання. Нейрони у мережі ANFIS мають різну структуру та призначення, що відповідають системі нечіткого висновку та реалізують основні наступні етапи її роботи.

Шар 1. Фазифікація (введення нечіткості) за допомогою функцій належності вхідних змінних. Перший адаптивний шар мережі ANFIS містить нейрони, які обчислюють значення функцій належності вхідних змінних $\mu_i(x_1)$ та $\mu_j(x_2)$, де x_1 та x_2 – вхідні змінні, $i=1, 2$ та $j=3, 4$. Адаптивність шару досягається шляхом підбору типу функцій належності вхідних змінних.

Шар 2. Агрегування (визначення ступеня істинності умов) за допомогою обробки основи нечітких лінгвістичних правил. Другий фіксований шар мережі ANFIS містить нейрони, які обчислюють добутки отриманих на першому шарі значень функцій належності:

$$W_i = \mu_i(x_1) \cdot \mu_j(x_2), \quad (7)$$

де W_i – синаптичні вагові коефіцієнти мережі.

Шар 3. Активізація (визначення ступенів істинності висловлювань) шляхом нормалізації рівнів активізації нечітких правил. Третій фіксований шар мережі ANFIS містить нейрони, які обчислюють нормовані рівні активізації нечітких правил:

$$\bar{W}_i = W_i / (W_1 + W_2 + W_3 + W_4). \quad (8)$$

Шар 4. Акумуляція (об'єднання ступенів істинності) за допомогою функцій належності вихідних змінних. Четвертий адаптивний шар мережі ANFIS містить нейрони, які обчислюють значення функцій належності

вихідних змінних, а також добутку значень синаптичних вагових коефіцієнтів та функцій належності:

$$\bar{W}_i \cdot \psi_i = \bar{W}_i \cdot \psi_i(x_1, x_2, c_i), \quad (9)$$

де ψ_i – значення функцій належності вихідних змінних; c_i – параметри нечітких термів функцій належності із бази знань.

Шар 5. Дефазифікація (перехід до чіткості) з отриманням чіткого значення вихідної змінної. П'ятий фіксований шар мережі ANFIS містить нейрон, який обчислює суму добутку значень функцій належності вихідних змінних та синаптичних вагових коефіцієнтів

$$\sum_{i=1}^M \bar{W}_i \cdot \psi_i. \quad (10)$$

Шар 6 складається з елементів, що визначають максимальне значення належності серед усіх правил, що задають мітку рангу технічного стану СТ.

Шар 7 складається з одного елемента, що містить індекс рангу технічного стану СТ з максимальним значенням належності.

На рис. 12 представлена загальна структура нейронної мережі, побудованої для нечіткого класифікатора оцінки технічного стану СТ. В окремі групи винесені відповідні правилам нейрони, що задають мітки конкретного рангу.

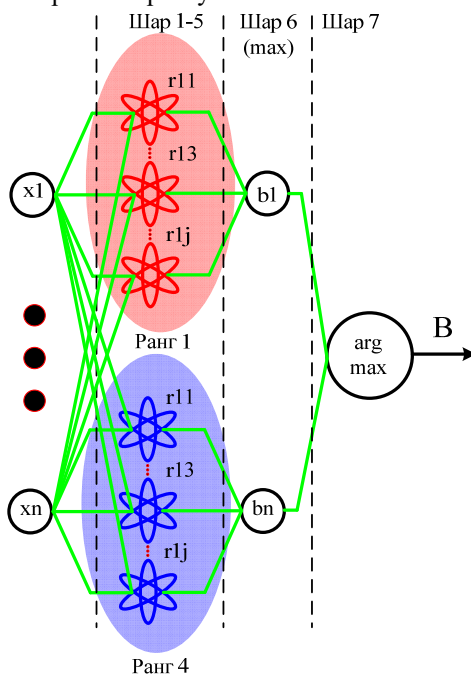


Рис. 12. Архітектура нечіткого класифікатора для ідентифікації рангу технічного стану СТ

Критеріальні значення параметрів, що використовуються в нечіткій моделі, є статистично середніми для великого набору експлуатованих СТ. Реальні режими роботи кожного конкретного СТ можуть відрізнятися. Це вимагає адаптації нечітких моделей до реальних умов роботи шляхом налаштування параметрів.

В повному обсязі вхідні аргументи невідомі, тобто існує невизначеність в оцінці технічного стану СТ. У цьому випадку рекомендується застосовувати алгоритми машинного навчання, в яких немає явних логічних зв'язків між параметрами, проте необхідно мати навчальну вибірку. Дослідження проводилось з вико-

ристанням статистичної інформації про відмови СТ та результатів діагностичних процедур від функціонуючих СТ, які реєструвались в енергосистемі України.

Налаштування нечіткої моделі полягає в знаходженні таких параметрів, які мінімізують відхилення між бажаною і дійсною поведінкою моделі. Алгоритм налаштування адаптивної нейро-нечіткої мережі ANFIS складається з двох етапів [32, 35].

Етап 1 (прямий хід алгоритму). Задаємо початкові значення параметрів першого адаптивного шару, робимо обчислення на другому та третьому шарі, визначаємо параметри четвертого адаптивного шару та обчислюємо значення функції похибки ідентифікації. Якщо значення функції похибки ідентифікації знаходиться в допустимих межах, то навчання адаптивної нейро-нечіткої мережі ANFIS закінчено, інакше переходимо до другого етапу.

Етап 2 (зворотний хід алгоритму). За допомогою методу зворотного розповсюдження похибки ідентифікації уточнюємо параметри першого адаптивного шару.

Передбачається, що параметри функцій належності повинні підбиратися таким чином, щоб зберегти лінійну упорядкованість термів.

Передбачено поліпшення розробленої системи шляхом налаштування вагових коефіцієнтів оцінки значимості факторів щодо впливу на оцінку технічного стану СТ. Під налаштуванням тут розуміється рішення задачі оптимізації вагових коефіцієнтів оцінки значимості факторів щодо впливу на оцінку технічного стану СТ.

Задача налаштування нечіткої моделі класифікатора виконується в [32]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \cdot \sum_{r=1, M} [B^r - F(X^r, V, C, W)]^2} \rightarrow \min.$$

де X^r – вхідний вектор в r -му рядку нечіткої вибірки; B^r – вихідний вектор в r -му рядку нечіткої вибірки у вигляді нечіткого числа; r – номер рядка в нечіткій вибірці, що використовується в процесі оптимізації параметрів нечіткої моделі класифікатора, причому $r = 1, M$; де M – кількість пар даних, якими представлена нечітка вибірка.

Для цього використовуються функція `fmincon` пакета Optimization Toolbox системи MATLAB [32]. Тобто, береться вибірка з протоколів діагностичних вимірювань та випробувань досліджуваних СТ компаній-постачальників електроенергії із чітким висновком.

Після навчання нечіткої моделі класифікатора його ефективність аналізується за допомогою використання тестової вибірки. Порівняння результатів нечіткої моделі класифікатора із фактичним дефектом обґрунтовує високу ефективність та точність ідентифікації запропонованої моделі.

Навчання нечіткого класифікатора проводилося на тестовій вибірці 250 протоколів обстеження СТ, до складу яких входили 100 протоколів із відсутністю дефектів і 150 протоколів із наявними ознаками дефектів різних видів. Результати тестування достовірності нечіткого класифікатора на навчальних вибірках показали, що класифікатор правильно визначив 241 з 250 технічного стану СТ. Помилка класифікації технічного стану СТ RMSE склала 1,6 %, що є прийнятним результатом.

В табл. 5 представлено фрагмент результатів визначення оцінки технічного стану СТ за результатами ХАРГ на контрольній вибірці. Розроблена система

нечіткого класифікатора при тестуванні показала досить високу точність. Помилка класифікації не перевищила 5 %.

Таблиця 5

Результати оцінки технічного стану оливного СТ за результатами ХАРГ на контрольній вибірці групою експертів

№ п/п	Тип трансформатора	Ідентифікація стану СТ по результатам вимірювання ХАРГ	
		СОУ-Н ЕЕ 46.501-2006	Класифікатор на основі теорії нечітких множин
1	ТДЦГ-400000/330	Термічний дефект $T > 700$ °С	Термічний дефект $T > 700$ °С. $\mu^H(B)=1,00$
2	ТДЦГ-10000/110	Невизначено	Розряди малої потужності. $\mu^M(B)=0,6$
3	ТДТГ-10000/110	Невизначено	Розряд великої потужності. $\mu^H(B)=1,00$
4	ТДЦ-400000/330	Невизначено	Термічний дефект $T > 700$ °С. $\mu^H(B)=1,00$
5	ТРДЦН-63000/110	Термічний дефект $T = 300-700$ °С	Термічний дефект $T = 150-300$ °С. $\mu^L(B)=0,24$; Термічний дефект $T = 300-700$ °С. $\mu^H(B)=0,76$
6	АТДЦТГ-240000/220	Термічний дефект $T > 700$ °С	Термічний дефект $T > 700$ °С. $\mu^H(B)=1,00$
7	ТДТН-63000/110	Невизначено	Розряд великої потужності. $\mu^H(B)=1,00$
8	АТДЦТН-250000/500	Термічний дефект $T > 700$ °С	Термічний дефект $T > 700$ °С. $\mu^H(B)=1,00$
9	ТДЦГ-315000/110	Розряд великої потужності	Розряди малої потужності. $\mu^L(B)=0,30$; Розряд великої потужності. $\mu^M(B)=0,7$
10	ТДТН-40000/110	Термічний дефект $T > 700$ °С	Термічний дефект $T > 700$ °С. $\mu^H(B)=1,00$
11	ОДТГА-80000/220	Розряд великої потужності	Розряд великої потужності. $\mu^H(B)=1,00$

Моделювання комплексної нечіткої оцінки технічного стану СТ в умовах невизначеності інформації. При черговому випробуванні і вимірюванні параметрів технічного СТ ТДЦ-400000/330 за результатами ХАРГ були зареєстровані концентрації газів, розчинених в трансформаторній оливі. Перевищення граничних значень концентрацій та відносних швидкостей зростання розчинених газів більш ніж 10 % на місяць зафіксованого в декількох останніх вимірюваннях свідчить про наявність у трансформаторі прогресуючого дефекту.

Для проведення роботи по методу експертних оцінок на основі нечіткої комплексної оцінки було створено експертну групу з 5-ти висококваліфікованих спеціалістів з експлуатації та ремонту СТ, кожному з яких було присвоєно власний номер (Е1,..., Е5). Фор-

мування групи починалося з вибору кандидатів і подальшої їх оцінки. На основі суб'єктивної оцінки експерт обирає сукупність параметрів кожного функціонального вузла СТ.

На початковому етапі кожному експерту було запропоновано 33 показників по їх значимості для визначення оцінки технічного стану СТ. Для оцінки експертів використовувалася методика, представлена в [34, 35].

На наступному етапі експерти здійснили оцінку технічного стану функціональних вузлів та умов експлуатації з відповідним визначенням вагових коефіцієнтів показників технічного стану СТ.

Відповідно до розробленого алгоритму проведення нечіткої оцінки технічного стану СТ результати визначення множини В нечіткої комплексної оцінки технічного стану СТ зведено в табл. 6-8.

Таблиця 6

Результати визначення оцінок показників технічного стану оливного СТ за результатами комплексного обстеження групою компетентних експертів

Шифр експерта	Рангові оцінки показників рівнів факторів ТС СТ X										
	X1	X11	X111	X12	X121	X13	X131	X16	X17	X2	X3
Е1	1	2	3	1	2	1	1	1	1	1	2
Е2	1	1	2	1	3	1	1	1	2	1	2
Е3	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1
Е4	1	3	5	1	3	1	1	1	2	1	2
Е5	1	1	3	1	2	1	1	2	1	1	1
Шифр експерта	Рангові оцінки показників рівнів факторів ТС СТ X										
	X4	X41	X42	X43	X5	X6	X61	X7	X71	X73	X731
Е1	1	1	3	2	3	3	1	1/3	1	2	1
Е2	1	1	3	3	1	5	1	1/4	1	2	1
Е3	1	1	3	3	2	4	2	1/3	1	2	1
Е4	1	1	3	2	3	5	1	1/3	1	2	1
Е5	2	1	3	3	2	4	1	1/4	1	1	1
Шифр експерта	Рангові оцінки показників рівнів факторів ТС СТ X										
	X7311	X7312	X7313	X7314	X732	X7321	X7322	X7323	X7324	X733	X734
Е1	1	1	5	1/2	3	4	1/4	3	2	1	2
Е2	1	2	4	1	3	1	1/4	2	2	1	1
Е3	1	1	4	1/3	3	3	1/4	2	1	1	2
Е4	1	1	5	1	3	3	1/5	3	2	1	1
Е5	1	2	3	1/2	2	5	1/3	3	3	1	1

Результати визначення вагових коефіцієнтів показників технічного стану оливного СТ за результатами комплексного обстеження групою компетентних експертів

Вагові коефіцієнти показників рівнів факторів ТС СТ W										
X1	X11	X111	X12	X121	X13	X131	X16	X17	X2	X3
0,2658	0,6167	0,3790	0,3833	0,3105	0,1337	0,5	0,35	0,1768	0,5	0,3233
X4	X41	X42	X43	X5	X6	X61	X7	X71	X73	X731
0,3039	0,1524	0,4571	0,3905	0,43	0,4285	0,2467	0,0803	0,1171	0,1822	0,1036
X7311	X7312	X7313	X7314	X732	X7321	X7322	X7323	X7324	X733	X734
0,1390	0,1948	0,5770	0,0892	0,2858	0,3391	0,0295	0,2916	0,2227	0,4333	0,5667

Таблиця 8

Результати визначення рангу технічного стану оливного СТ за результатами комплексного обстеження групою компетентних експертів

Найменування показника	Позначення показника	Терм-множини лінгвістичної змінної В			
		Дуже низький	Низький	Середній	Високий
		$\mu^{VL}(B)$	$\mu^L(B)$	$\mu^M(B)$	$\mu^H(B)$
Електричні випробування	B_{X1}	0,082422	0,405655	0,511922	0
<i>Ізоляційні властивості</i>					
<i>tg δ ізоляції</i>	X11	0,133658	0,39363	0,472712	0
<i>Електрична міцність</i>	X12	0	0,425	0,575	0
Струм витіку	X121	0	0,725	0,275	0
Рівень опору ізоляції	X13	1	0	0	0
Опір постійному струму	X131	0	0,025	0,975	0
ХАРГ	X16	0,195	0,495	0,31	0
Ступінь полімеризації паперової ізоляції DP	X17	0	0,4	0,6	0
Стан осердя магнітопроводу	B_{X2}	0	0,825	0,175	0
Високовольтні вводи	B_{X3}	0,1	0,65	0,25	0
Стан трансформаторної оливи	B_{X4}	0,030476	0,487505	0,482019	0
Напруга пробою оливи	X41	0,2	0,8	0	0
Вологість оливи	X42	0	0,4	0,6	0
tg δ оливи	X43	0	0,468	0,532	0
РПН	B_{X5}	0,2	0,8	0	0
Інші вузли	B_{X6}	0,167667	0,726833	0,1055	0
Система охолодження	B_{X61}	0,2	0,7	0,1	0
Інші фактори	B_{X7}	0,151045	0,651077	0,197878	0
Перевантаження	B_{X71}	0,2	0,6	0,2	0
<i>Ремонти та технічний огляд СТ</i>	B_{X73}	0,086667	0,556667	0,356667	0
<i>Фактори навколишнього середовища</i>	B_{X731}	0,249115	0,600815	0,15007	0
Температура навколишнього середовища	X7311	0,15	0,6	0,25	0
Вологість повітря	X7312	0,1	0,65	0,25	0
Агресивні гази	X7313	0,3	0,6	0,1	0
Швидкість вітру	X7314	0,4	0,5	0,1	0
<i>Історія експлуатації</i>	B_{X732}	0,131613	0,61589	0,252497	0
Температура оливи	X7321	0,15	0,7	0,15	0
Сторонні шуми	X7322	0,2	0,6	0,2	0
Кількість КЗ	X7323	0,1	0,5	0,4	0
Кількість спрацювань релейного захисту	X7324	0,1	0,65	0,25	0
Записи схожих за потужністю та конструкцією СТ	X733	0,2	0,5	0,3	0
Протоколи огляду та ремонтів	X734	0	0,6	0,4	0
Загальна оцінка технічного стану СТ	Якісна оцінка В	0,1115	0,4815	0,4069	0
	Кількісна оцінка В	0,279			

За результатами розрахунків визначення оцінки технічного стану СТ ранг характеризується як «Низька ступінь погіршення технічного стану СТ. Продовження експлуатації без обмежень» зі ступенем 0,279.

За результатами обстеження в енергокомпанію надіслано технічний звіт, що включає експертний висновок про технічний стан СТ, рекомендації за обсягом необхідних діагностичних, профілактичних, ремонтних заходів, протоколи за результатами контролю, а також карти-схеми, що наочно ілюструють поточний технічний стан.

Висновки.

1. Сформульовано задачу оцінки та ранжування технічного стану силових трансформаторів шляхом застосування класифікатора, розробленого на основі теорії нечітких множин. Розроблено ієрархічні структурні схеми визначення рівнів факторів технічного стану окремих функціональних вузлів та силового трансформатора в цілому.

2. Розроблено алгоритм та нечіткий класифікатор результатів оцінки технічного стану силового трансформатора, які ґрунтуються на основі багатопараметрич-

ного агрегування станів окремих функціональних вузлів, що дозволяє підвищити оперативність проведення оцінки технічного стану силового трансформатора. Це, в свою чергу, дає можливість спланувати фінансові витрати на виконання певного обсягу ремонтних робіт та мінімізацію ризику відмов на стадії життєвого циклу експлуатації силового трансформатора в умовах невизначеності діагностичної інформації.

3. Для підвищення ефективності розпізнавання класів технічного стану силових трансформаторів проведено адаптацію нечіткого класифікатора, розробленого на базі адаптивної нейромережі ANFIS та системи нечіткого виведення Такагі – Сугено до реальних умов роботи шляхом налаштування параметрів моделі з використанням статистичної інформації про відмови силових трансформаторів та результатів діагностичних процедур функціонуючих силових трансформаторів, які реєструвались в енергосистемі України. Відносна похибка ідентифікації технічного стану RMSE становить 1,6 %, що не більше 5 % та може слугувати прийнятним результатом підвищення достовірності визначення рангу технічного стану. Уникнення суб'єктивних розбіжностей експертів щодо наявності дефекту в силовому трансформаторі досягається за рахунок узгодження експертних оцінок за допомогою методу Delphi.

4. Проведено комплексну нечітку оцінку технічного стану реально функціонуючих силових трансформаторів енергокомпанії в умовах невизначеності інформації та сформовано перелік рекомендацій щодо стратегії їх подальшої експлуатації [36].

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Silva J., Sumaili J., Bessa R.J., Seca L., Matos M., Miranda V. The challenges of estimating the impact of distributed energy resources flexibility on the TSO/DSO boundary node operating points. *Computers & Operations Research*, 2018, vol. 96, pp. 294-304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.004>.
2. Shiwen Y., Hui H., Chengzhi W., Hao G., Hao F. Review on Risk Assessment of Power System. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 109, pp. 1200-1205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.399>.
3. Haes Alhelou H., Hamedani-Golshan M., Njenda T., Siano P. A Survey on Power System Blackout and Cascading Events: Research Motivations and Challenges. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 4, art. no. 682. doi: <https://doi.org/10.3390/en12040682>.
4. Bubenchikov A.A., Nurakhmet Y.Y., Molodikh V.O., Rudenok A.I. Are most characteristic faults in the power equipment. *International Research Journal*, 2016, vol. 5, pp. 56-58. doi: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.290>.
5. Alekseev B.A. *Condition monitoring (diagnostics) of large power transformers*. Moscow, Publishing House of the NTs ENAS, 2002. 261 p. (Rus).
6. CIGRE WGA2.37. *Transformer Reliability Survey*, CIGRE Technical Brochure 642, December 2015.
7. Pirotti O.Y., Balenko O.I., Brechko V.O., Huzin M.Y., Gontar J.G. Analysis of construction principles and functionality of high-voltage power transformer condition monitoring systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, 2020, no. 1, pp. 61-70. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2020.01.09>.
8. Shutenko O. V., Baklay, D. N. Analysis of the functionality of expert systems used to diagnose the condition. *Bulletin of the*

National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency, 2011, no. 3, pp. 179-193. (Rus).

9. Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 11-18. doi: <https://doi.org/10.15546/aei-2018-0002>.
10. Shutenko O., Kulyk O. Comparative Analysis of the Defect Type Recognition Reliability in High-Voltage Power Transformers Using Different Methods of DGA Results Interpretation. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240911>.
11. Velásquez R.M.A., Lara J.V.M. Principal Components Analysis and Adaptive Decision System Based on Fuzzy Logic for Power Transformer. *Fuzzy Information and Engineering*, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 493-514. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fiae.2017.12.005>.
12. Gouda O.E., Saleh S.M., Hamdy EL-Hoshy S. Power Transformer Incipient Faults Diagnosis Based on Dissolved Gas Analysis. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 409-416. doi: <https://doi.org/10.11591/tjee.v16i3.1630>.
13. Faiz J., Soleimani M. Dissolved gas analysis evaluation in electric power transformers using conventional methods a review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 1239-1248. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.005959>.
14. Castro A.R.G., Miranda V. An interpretation of neural networks as inference engines with application to transformer failure diagnosis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2005, vol. 27, no. 9-10, pp. 620-626. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2005.08.002>.
15. Taha I.B.M., Ghoneim S.S.M., Duaywah A.S.A. Refining DGA methods of IEC Code and Rogers four ratios for transformer fault diagnosis. *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741157>.
16. Li Z., Jiao Z., He A. Knowledge-based artificial neural network for power transformer protection. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, vol. 14, no. 24, pp. 5782-5791. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0542>.
17. Bondarenko V.E., Shutenko O.V. Development of fuzzy neural network for the interpretation of the results of dissolved in oil gases analysis. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 2, pp. 49-56. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.08>.
18. Yang H., Zhang Z., Yin X. A novel method of decision-making for power transformer maintenance based on failure-probability-analysis. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2018, vol. 13, no. 5, pp. 689-695. doi: <https://doi.org/10.1002/tee.22618>.
19. Faiz J., Soleimani M. Assessment of computational intelligence and conventional dissolved gas analysis methods for transformer fault diagnosis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, vol. 25, no. 5, pp. 1798-1806. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007191>.
20. Wang B., Li Y., Watada J. A New MOPSO to Solve a Multi-Objective Portfolio Selection Model with Fuzzy Value-at-Risk. *Lecture Notes in Computer Science*, 2011, vol. 6883, pp. 217-226. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-23854-3_23.
21. Tran Q.T., Davies K., Roose L., Wiriyakitikun P., Janjampop J., Riva Sanseverino E., Zizzo G. A Review of Health Assessment Techniques for Distribution Transformers in Smart Distribution Grids. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 22, art. no. 8115. doi: <https://doi.org/10.3390/app10228115>.
22. Das S., Guha D. A Centroid-based Ranking Method of Trapezoidal Intuitionistic Fuzzy Numbers and Its Application to MCDM Problems. *Fuzzy Information and Engineering*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 41-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fiae.2016.03.004>.
23. Abu-Elanien A.E.B., Salama M.M.A., Ibrahim M. Calculation of a Health Index for Oil-Immersed Transformers Rated

Under 69 kV Using Fuzzy Logic. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, vol. 27, no. 4, pp. 2029-2036. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2205165>.

24. Javier Quispe Carita A., Cambraia Leite L., Pedro Pires Medeiros A., Barros R., Sauer L. Bayesian Networks applied to Failure Diagnosis in Power Transformer. *IEEE Latin America Transactions*, 2013, vol. 11, no. 4, pp. 1075-1082. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2013.6601752>.

25. Tang W.H., Spurgeon K., Wu Q.H., Richardson Z.J. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, vol. 19, no. 4, pp. 1696-1703. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.822542>.

26. Ma H., Ekanayake C., Saha T.K. Power transformer fault diagnosis under measurement originated uncertainties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, vol. 19, no. 6, pp. 1982-1990. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6396956>.

27. Miranda V., Castro A.R.G., Lima S. Diagnosing Faults in Power Transformers With Autoassociative Neural Networks and Mean Shift. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, vol. 27, no. 3, pp. 1350-1357. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2188143>.

28. Shirai Y., Noda S., Yamabe K., Hattori K., Baba J., Nishihara T., Nitta T., Kobayashi S., Sato K. Current Limiting Performance of Three-Phase Concentric Transformer Type SFCL at Unbalanced Fault Conditions. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, vol. 23, no. 3, pp. 5601905-5601905. doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2233533>.

29. Li Lixiang. Research and application on Set Pair Analysis for E-government comprehensive evaluation model. *2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, 2010, pp. V1-70-V1-74. doi: <https://doi.org/10.1109/ICACTE.2010.5579062>.

30. Gao H., Sun Y., Li K., Zhou Q., Liu G., Ge H. An insulation condition assessment method of transformer based on set pair analysis and similarity clustering. *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2016, pp. 43-48. doi: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603549>.

31. Niederberger M., Spranger J. Delphi Technique in Health Sciences: A Map. *Frontiers in Public Health*, 2020, vol. 8, pp. 457-467. doi: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00457>.

32. Bardyk E., Bolotnyi N. Parametric identification of fuzzy model for power transformer based on real operation data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 6, no. 8(90), pp. 4-10. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118632>.

33. Bardyk Ye.I. Modelling and assessment of chances of failure of power systems electrical equipment taking into account the after repair resource restoration level. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2014, no. 3, pp. 82-90.

34. Bardyk E.I., Bolotnyi N. An Analysis of Uncertainty for Failure Risk Assessment of Power Transformer. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2022, pp. 31-35. doi: <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969341>.

35. Bardyk E.I., Bolotnyi N. Improved Power Transformer Condition Assessment under Uncertainty using Fuzzy Logic. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2022, pp. 53-58. doi: <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969327>.

36. Bardyk E., Bolotnyi N. Development of a mathematical model for cost distribution of maintenance and repair of electrical equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 6, no. 8(96), pp. 6-16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147622>.

cal equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 6, no. 8(96), pp. 6-16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147622>.

Надійшла (Received) 28.10.2022
Прийнята (Accepted) 24.01.2023
Опублікована (Published) 01.09.2023

Бардик Євген Іванович¹, к.т.н., доц.,

Болотний Микола Петрович¹, к.т.н., ст. викладач,

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 03056, Київ, пр. Берестейський, 37, e-mail: bardik1953@gmail.com; nickolai2007@ukr.net (Corresponding Author)

E.I. Bardyk¹, N.P. Bolotnyi¹

¹ National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Prospect Beresteiskiyy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

Development of fuzzy classifier for technical condition ranking of power transformer.

The work **aim** is to develop a fuzzy classifier for technical condition ranking of power transformer under condition of vagueness and ambiguity diagnostic information. **Methodology.** The fuzzy classifier developing for technical condition ranking of power transformer was based on approach of using fuzzy set theory and optimization methods. The proposed approach for power transformer rank assessment by using a classifier was developed on the basis of Takagi-Sugeno fuzzy inference system. The input indicators choice is justified and their efficiency for classifier is evaluated by expert evaluation method. This makes it possible to formalize expert assessments regarding the development of power transformer defects.

Results. The formalization of technical condition assessment of power transformer in knowledge base form, which implemented in expert system prototype for technical condition assessment, was carried out. The complex technical condition assessment for each functional unit of power transformer was determined based on expert evaluations with using the test and measurement parameters results. **Originality.** The considered approach to formalization of uncertainty regarding technical condition of power transformer allows building a deterministic decision-making scheme for further maintenance strategy, in which the ranking and decommissioning procedures for specific objects are implemented on the basis of objective criteria. **Practical value.** The proposed fuzzy classifier allows determination with a high probability degree of technical condition assessment of power transformer based on the test and measurement parameters results. Thus, an applied aspect of using the obtained scientific result is the possibility to objectively rank of power transformers park based on the identified possible defects and their development degree. This constitutes the prerequisites for determining the failure probability evaluation of power transformer at nearest observation period and emergency risk assessment in integrated electric power systems under power transformer failures. References 36, tables 8, figures 12.

Key words: fuzzy classifier, electrical equipment, technical condition assessment, defect, power transformer.

How to cite this article:

Bardyk E.I., Bolotnyi N.P. Development of fuzzy classifier for technical condition ranking of power transformer. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 5, pp. 3-13. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.01>