

# ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.311

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.6.112488

Є.І. Бардик, М.В. Костерев, М.П. Болотний\*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ У СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НАСТРОЮВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ

**Background.** Problem of ensuring reliability and safety operation of thermal, nuclear and hydro power plants is exacerbated under increasing accident in modern electric power systems due to power equipment failures. Therefore, development of adequate mathematical models for technical condition determination and risk assessment of power transformer failure in power plants is relevant.

**Objective.** The aim of the paper is to improve the diagnostic fuzzy model of power transformer technical condition by setting parameters and risk failure assessment under presence damage.

**Methods.** The mathematical model of power transformer used approaches based on fuzzy sets theory, fuzzy logic and nonlinear optimization methods. Risk assessment of power transformer failure under presence damage was solved based on formed hierarchy factors and parameters of influence on integral risk indicator of power transformer failure.

**Results.** The necessity of complex simulation of technical condition of power transformer and electric power system modes is substantiated. The fuzzy model of power transformer technical condition evaluation was upgraded by parametrically identifying the optimal function values of fuzzy terms of linguistic variables.

**Conclusions.** A mathematical model of risk assessment of power transformer failure with presence damage was proposed for emergency risk estimation in electric power systems under electrical equipment failures.

**Keywords:** model; fuzzy logic; electrical equipment; risk assessment; damage; failure.

### Вступ

Аналіз умов функціонування сучасних енергосистем України та інших промислово розвинених країн показує, що існує стійка тенденція до підвищення їх аварійності. Це пов'язано насамперед зі збільшенням частки зношеного електрообладнання, низькими темпами його заміни, складними метеоумовами і напруженим режимом роботи оперативного персоналу, що в підсумку збільшує імовірність відмови електрообладнання [1, 2].

Тому важливим є визначення тих елементів енергосистеми, які мають найбільший ризик відмови, і тих, відмови яких призводять до каскадного розвитку аварії системи з тяжкими наслідками. Це дає можливість здійснити пріоритетний контроль цих елементів, спрогнозувати строки можливих відмов, сформувати перелік необхідних дій персоналу, а також виконати превентивне й адаптивне залежно від розвитку ситуацій керування системою та її елементами [3].

Силові трансформатори (СТ) є одними з найвідповідальніших і найбільш вартісних елементів основного електрообладнання сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС), від надійності функціонування яких значною мірою залежить надійність складної ЕЕС у цілому. Збільшення частки СТ зі строком експлуатації понад 25–30 років за-

гострює проблему забезпечення контролю, об'єктивної комплексної оцінки технічного стану (ТС) і прогнозування ресурсу працездатності СТ та визначення кількісних показників ризику експлуатації ЕЕС [1, 2, 4, 5].

Розв'язання зазначених вище задач потребує розробки адекватних моделей оцінки ТС електрообладнання ЕЕС.

Комплексна оцінка ТС СТ зазвичай включає діагностування стану такої сукупності окремих елементів: обмотки, магнітопровода, твердої ізоляції, трансформаторного масла, системи охолодження, високовольних вводів, бака, контактних з'єднань, системи регулювання під навантаженням (РПН) [1, 2, 5].

У задачах оцінки ризику виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС при відмовах електрообладнання, коли СТ розглядається як елемент складної багатомашинної системи, доцільно розглядати ТС найбільш значущих з точки зору впливу на ризик відмови елементів СТ: трансформаторного масла, магнітопровода, обмоток тощо.

Складність задачі оцінки ТС і прогнозування ресурсу працездатності визначається періодичністю виконуваних вимірювань і тим, що не завжди існуючі СТ оснащені відповідними системами моніторингу. Крім того, критеріальні значення параметрів ТС, що відділяють один стан СТ від ін-

\* corresponding author: nickolai2007@ukr.net

шого, часто отримані на основі обмежених статистичних даних і суб'єктивної інформації ремонтного та експлуатаційного персоналу [2, 5, 6]. Тому для розв'язання цих задач необхідна розробка декількох типів математичних моделей, що ґрунтуються на використанні статистичних даних відмов, експертних оцінок і апарату теорії нечітких множин [2, 7], які становлять основу бази знань відповідних прототипів експертних систем і дають змогу визначати ризик відмови СТ як елемента ЕЕС та оцінити ризик виникнення аварійних ситуацій при відмовах електрообладнання.

Наразі існує багато праць [2, 6, 8–13], у яких розглянуто питання діагностування ТС СТ за результатами комплексу вимірювань і випробувань. У [2, 5, 6, 14] розв'язувались задачі визначення індексу ТС, ідентифікації та рівня розвитку дефекту в умовах детермінованого та ймовірнісного і нечіткого характеру інформації. Визначення кількісних показників ризику виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС імовірно-статистичним моделюванням режиму енергосистеми при відмовах електрообладнання наведено в [15]. Разом із цим питання діагностування ТС, ідентифікації дефектів і визначення ризику відмови СТ в умовах нечіткої інформації та комплексного моделювання ТС СТ і режимів ЕЕС не є повністю пропрацьованим.

### Постановка задачі

Метою роботи є нечітке моделювання СТ для оцінки ТС, адаптація моделей до реальних умов експлуатації та визначення ризику відмови за наявності дефекту.

### Нечітка математична модель діагностування технічного стану силового трансформатора

Для визначення ТС силового масляного трансформатора на базі результатів окремих випробувань і вимірювань розроблена нечітка математична модель, яка містить правила нечіткого логічного висновку, терм-множини та функції належності вхідних параметрів до тієї чи іншої лінгвістичної величини. База знань відповідного прототипу експертної системи діагностування ТС СТ ґрунтується на ієрархічному поданні і складається із системи вкладених одна в одну баз знань меншої розмірності. Інтегральна оцінка ТС здійснюється агрегуванням висновків щодо виду і характеру дефекту СТ за результатами окремих випробувань і вимірювань із використанням відповідних баз знань. Розроблена нечітка модель діагностування ТС СТ дає змогу визначати і виявляти такі найважливіші види дефектів: часткові розряди з низькою та високою щільністю енергії; розряди малої та високої потужності; термічні дефекти низької, середньої та високої температури; оцінка стану твердої ізоляції; оцінка механічного стану обмоток; оцінка стану масла і паперово-масляної ізоляції; оцінка стану пристроїв РПН і трансформаторних вводів. Ієрархічна структурна схема розробленої моделі й алгоритм нечіткого логічного виводу про ТС силового масляного трансформатора (рис. 1) докладно описані в [2, 6, 14].

У світовій практиці в енергокомпаніях, а також в енергосистемах України хроматографічний аналіз розчинених газів (ХАРГ) у маслі застосовують як основний вид діагностики, за допомогою якого виявляють більшість дефектів, і нині він

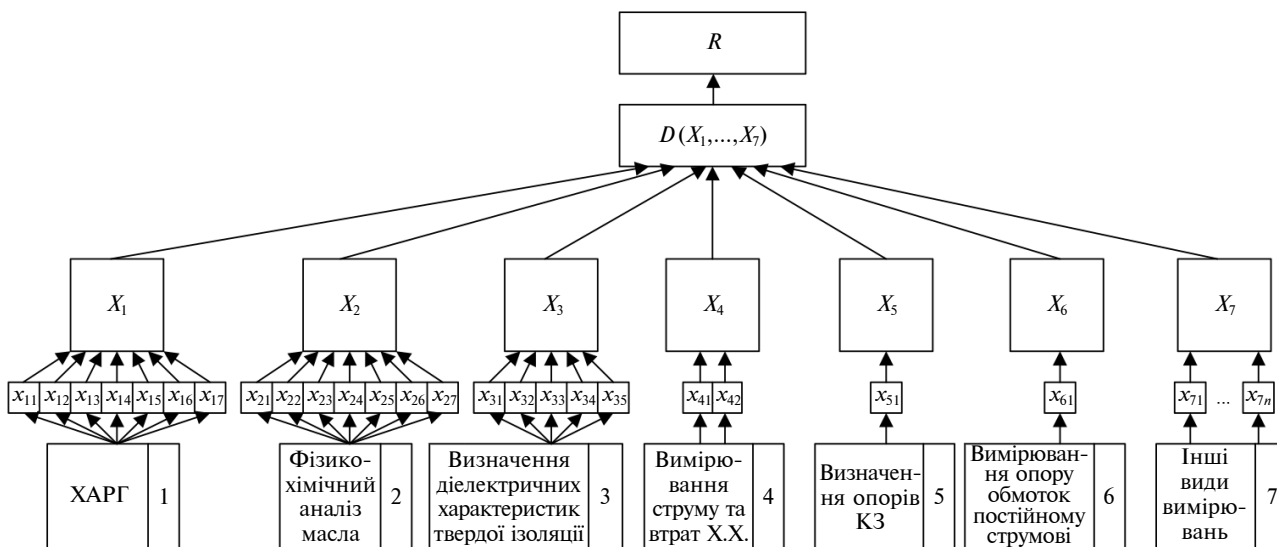


Рис. 1. Ієрархічна структурна схема нечіткого логічного виводу про технічний стан масляного трансформатора

**Таблиця 1.** База знань нечіткої моделі оцінки технічного стану силового масляного трансформатора за результатами ХАРГ

Лінгвістичні змінні відношень концентрацій газів			Діапазони зміни відношень концентрацій газів			Прогнозований характер дефекту	Терм-множина дефектів
$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$		
$T_H^1$	$T_C^2, T_B^2$	$T_H^3$	<0,1	0,1–1	≤1	Норма	$D_1$
$T_H^1$	$T_H^2$	$T_H^3$	<0,1	< 0,1	≤1	Частковий розряд низької щільності	$D_2$
$T_C^1$	$T_H^2$	$T_H^3$	0,1–3	< 0,1	≤1	Частковий розряд великої щільності	$D_3$
$T_C^1, T_B^1$	$T_C^2, T_B^2$	$T_C^3, T_B^3$	>0,1	0,1–1	≥1	Розряди низької щільності	$D_4$
$T_C^1$	$T_C^2, T_B^2$	$T_B^3$	0,1–3	0,1–1	≥3	Розряд великої щільності	$D_5$
$T_H^1$	$T_C^2, T_B^2$	$T_C^3$	<0,1	0,1–1	1–3	Температурний дефект при $T < 150$ °С	$D_6$
$T_H^1$	$T_B^2$	$T_H^3$	<0,1	≥1	≤1	Температурний дефект у діапазоні 150–300 °С	$D_7$
$T_H^1$	$T_B^2$	$T_C^3$	<0,1	≥1	1–3	Температурний дефект у діапазоні 300–700 °С	$D_8$
$T_H^1$	$T_B^2$	$T_B^3$	<0,1	≥1	≥3	Температурний дефект при $T > 700$ °С	$D_9$

використовується як базовий метод для оцінювання ТС трансформаторів [16]. Особливо ефективним для інтерпретації результатів ХАРГ та інших вимірювань і випробувань є використання апарату нечіткої логіки, що дає змогу на основі нечітких критеріїв оцінки об'єктивніше визначити стан трансформаторного обладнання [2, 5, 7, 11]. У табл. 1 наведено критерії для визначення характеру дефекту в СТ за відношеннями концентрацій характерних газів, терми лінгвістичних змінних відношень концентрації газів і правила бази знань. Лінгвістичні змінні відношень концентрацій пар газів  $C_i$  ( $i = 1, 3$ ), подані в табл. 1, мають такі терм-множини:

$$C_1 = \{T_H^1, T_C^1, T_B^1\} \rightarrow C_2H_2/C_2H_4,$$

$$C_2 = \{T_H^2, T_C^2, T_B^2\} \rightarrow CH_4/H_2,$$

$$C_3 = \{T_H^3, T_C^3, T_B^3\} \rightarrow C_2H_4/C_2H_6,$$

де  $T_H, T_C, T_B$  – терми що відповідають низьким, середнім і високим значенням параметрів.

Функції належності терм-множин лінгвістичних змінних  $C_i$  показано на рис. 2.

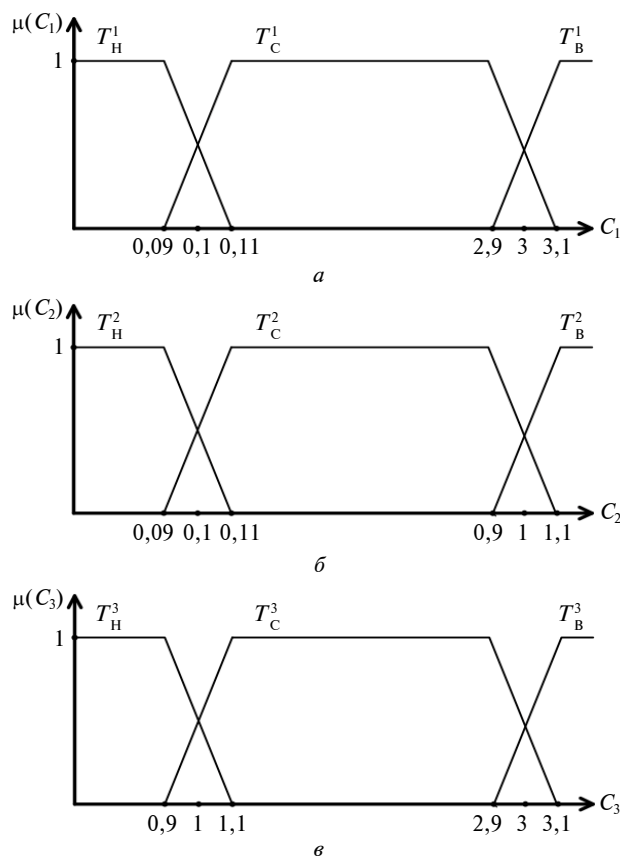


Рис. 2. Функції належності для терм-множин лінгвістичних змінних  $C_i$

### Адаптація нечітких моделей оцінки технічного стану функціональних вузлів силового трансформатора до реальних умов експлуатації

Використовувані в нечіткій математичній моделі критеріальні значення параметрів (див. табл. 1) є середньостатистичними для великої сукупності експлуатованих СТ. Реальні умови експлуатації кожного конкретного СТ можуть відрізнятися від регламентованих. Це зумовлює необхідність адаптації розроблених нечітких моделей до реальних умов експлуатації через настроювання їх параметрів [2, 7, 12].

Для побудови навчальної вибірки використано результати періодичних вимірювань виявлених у трансформаторному маслі газів при діагностуванні ТС 50 силових масляних трансформаторів напругою 110 кВ співмірної потужності та однотипної конструкції, що працюють в одному енергорайоні.

Навчальна вибірка, яка містить 825 позицій з відповідними відношеннями абсолютних концентрацій газів та ідентифікованим видом дефекту, представленим відповідним кодом прогнозованого дефекту згідно з методикою [16], наведена в табл. 2.

При навчанні нечіткої моделі настроювались 36 параметрів розробленої моделі, а саме: по 12 коефіцієнтів функцій належності терм-множин "низьке" (Н), "середнє" (С), "високе" (В) вхідних лінгвістичних змінних " $C_2H_2/C_2H_4$ ", " $CH_4/H_2$ ", " $C_2H_4/C_2H_6$ " відповідно;  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$  – концентрації ацетилену, етилену, метану, етану відповідно.

**Таблиця 3.** Результати настроювання параметрів функцій належності вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі оцінки ТС СТ за результатами ХАРГ

Найменування вхідної лінгвістичної змінної нечіткої моделі	Найменування терм-множин лінгвістичної змінної нечіткої моделі	Параметри функції належності терм-множини лінгвістичної змінної нечіткої моделі							
		Базові значення				Значення після настроювання			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	H <sub>1</sub>	0	0	0,09	0,11	0	0	0,0917	0,1028
	C <sub>1</sub>	0,09	0,11	2,9	3,1	0,0973	0,1116	2,8971	2,9865
	B <sub>1</sub>	2,9	3,1	1000	1000	2,8997	3,0538	1000	1000
$\frac{CH_4}{H_2}$	H <sub>2</sub>	0	0	0,09	0,11	0	0	0,0935	0,1119
	C <sub>2</sub>	0,09	0,11	0,9	1,1	0,0989	0,1135	0,8947	1,0442
	B <sub>2</sub>	0,9	1,1	1000	1000	0,9332	1,0939	1000	1000
$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	H <sub>3</sub>	0	0	0,09	0,11	0	0	0,8997	0,10793
	C <sub>3</sub>	0,09	0,11	2,9	3,1	0,9111	0,10997	2,8679	2,9977
	B <sub>3</sub>	2,9	3,1	1000	1000	2,8993	3,0698	1000	1000

**Таблиця 2.** Навчальна вибірка нечіткої моделі оцінки технічного стану силового масляного трансформатора за результатами ХАРГ

№	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	Код прогнозованого дефекту
1	0,01	0,117	0,269	1
2	0,033	0,156	1,084	6
3	0,125	0,1	4	5
...	...	...	...	...
825	0,0045	1	4	9

Параметрична ідентифікація оптимальних значень функцій належності зазначених вище нечітких термів розробленої нечіткої моделі виконувалась у програмному середовищі MatLab за допомогою методу нелінійної оптимізації, представленого в пакеті Optimization Toolbox [7]. Результати настроювання параметрів функцій належності нечітких термів розробленої нечіткої моделі оцінки ТС силового масляного трансформатора за результатами ХАРГ зведені в табл. 3.

Графіки базових функцій належності та функцій належності після настроювання на навчальній вибірці зображені на рис. 3, 5, 7 та на рис. 4, 6, 8 відповідно.

Перевірка коректності результатів ідентифікації параметрів нечіткої моделі оцінки ТС силового масляного трансформатора за результатами ХАРГ після оптимізації виконувалась на тестовій вибірці, яка складається зі сформованих 20 пар "входи-вихід".

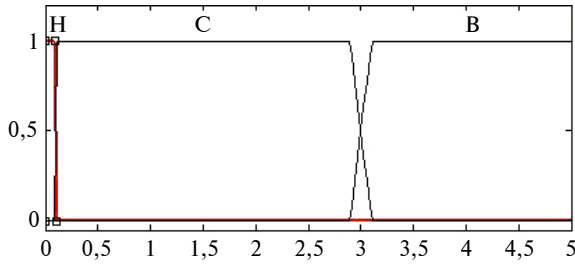


Рис. 3. Функції належності параметра  $C_2H_2/C_2H_4$  до настроювання

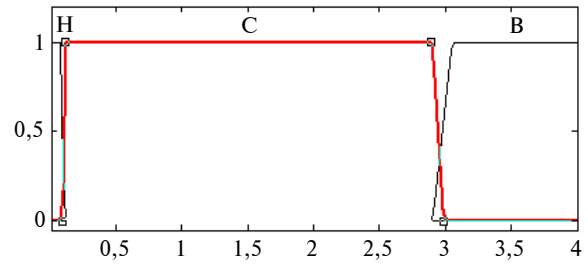


Рис. 4. Функції належності параметра  $C_2H_2/C_2H_4$  після настроювання

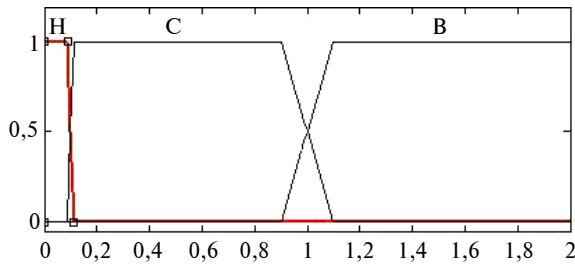


Рис. 5. Функції належності параметра  $CH_4/H_2$  до настроювання

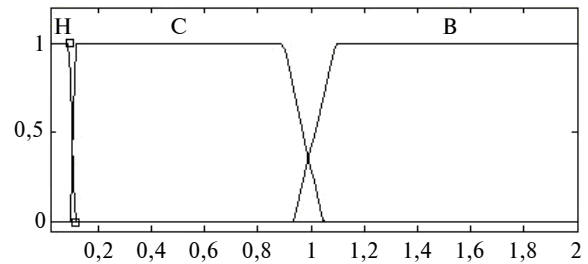


Рис. 6. Функції належності параметра  $CH_4/H_2$  після настроювання

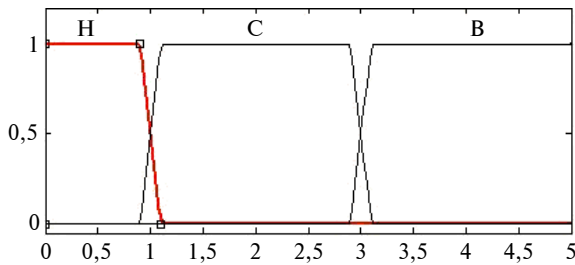


Рис. 7. Функції належності параметра  $C_2H_4/C_2H_6$  до настроювання

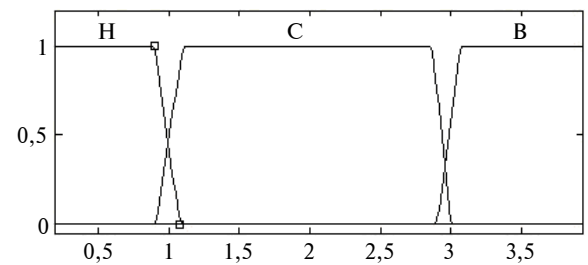


Рис. 8. Функції належності параметра  $C_2H_4/C_2H_6$  після настроювання

**Таблиця 4.** Результати моделювання оцінки технічного стану силового масляного трансформатора за результатами ХАРГ на тестовій вибірці

№	Тип трансформатора	Постановка діагнозу	
		СОУ-Н ЕЕ 46.501–2006	Нечітка модель
1	ТДЦГ-400000/330	Термічний дефект $t > 700$ °С	Термічний дефект $t > 700$ °С; $\mu(D) = 1,00$
2	ТДЦГ-10000/110	Невизначено	Розряди малої потужності; $\mu(D) = 0,6$
3	ТДЦГ-315000/110	Розряд великої потужності	Розряди малої потужності; $\mu(D) = 0,30$ ; Розряд великої потужності; $\mu(D) = 0,7$
4	ТРДЦН-63000/110	Термічний дефект $t = 300-700$ °С	Термічний дефект $t = 150-300$ °С; $\mu(D) = 0,24$ . Термічний дефект $300-700$ °С; $\mu(D) = 0,76$
...	...	...	...
98	ТДТГ-10000/110	Невизначено	Розряд великої потужності; $\mu(D) = 1,00$
99	ТДТН-63000/110	Невизначено	Розряд великої потужності; $\mu(D) = 1,00$
100	ТДЦ-400000/330	Невизначено	Розряд великої потужності; $\mu(D) = 0,1$

У табл. 4 наведено результати нечіткого моделювання оцінки ТС СТ за результатами ХАРГ на тестовій вибірці. Середня квадратична похибка ідентифікації наявних дефектів у СТ становить  $RMSE = 1,6986 \cdot 10^{-6}$ , що є прийнятним.

Було проведено оцінку ТС СТ із використанням тестових вибірок для експлуатованих трансформаторів у енергосистемах України різної конструкції та номінальної потужності класом напруги 110 кВ. Достовірність ідентифікації дефектів за настроєною нечіткою моделлю оцінки ТС СТ становить 96 %, що підтверджує адекватність розробленої нечіткої моделі.

**Моделювання й оцінка ризику відмови силового трансформатора за наявності дефекту**

Важливою задачею, крім необхідності адекватної оцінки ТС СТ, ідентифікації виду і характеру дефекту, є визначення ризику відмови СТ [2, 8, 15]. Неможливість встановлення аналітичного зв'язку між змінними стану, факторами ризику відмови СТ із дефектом потребує при моделюванні використання експертних оцінок і теорії нечітких множин для визначення ризику відмови СТ [14].

Задача оцінки ризику відмови СТ у математичній моделі розв'язується в два етапи: на першому етапі на основі зафіксованих поточних даних ТС та "історії життя" СТ здійснюється ідентифікація виду і місця розташування дефекту; на другому етапі на основі аналізу даних щодо ступеня розвитку і рівня небезпеки виявленого дефекту оцінюється ризик відмови СТ. Найбільш інформативними ознаками для кількісної оцінки ризику відмови СТ за наявності дефекту, що визначається на основі результатів ХАРГ, є рівні концентрації газів  $C_i$ , розчинених у трансформаторному маслі, і зміна відносної швидкості їх зростання  $V_{C_i}$ , функції належності яких до відповідних термів лінгвістичних змінних зображені на рис. 9.

Лінгвістичні змінні для  $C_i$  і  $V_{C_i}$  представлені 5-ма терм-множинами:

$$C_i = \{T_{C_i}^{ДН}, T_{C_i}^H, T_{C_i}^C, T_{C_i}^B, T_{C_i}^{ДВ}\},$$

$$V_{C_i} = \{T_{V_{C_i}}^{ДН}, T_{V_{C_i}}^H, T_{V_{C_i}}^C, T_{V_{C_i}}^B, T_{V_{C_i}}^{ДВ}\},$$

де  $i = \overline{1,7}$ ,  $T_{C_i}^{ДН}, T_{V_{C_i}}^{ДН}$ ;  $T_{C_i}^H, T_{V_{C_i}}^H$ ;  $T_{C_i}^C, T_{V_{C_i}}^C$ ;  $T_{C_i}^B, T_{V_{C_i}}^B$ ;  $T_{C_i}^{ДВ}, T_{V_{C_i}}^{ДВ}$  – дуже низьке, низьке, середнє, високе, дуже високе значення параметрів  $C_i$  і  $V_{C_i}$  відповідно.

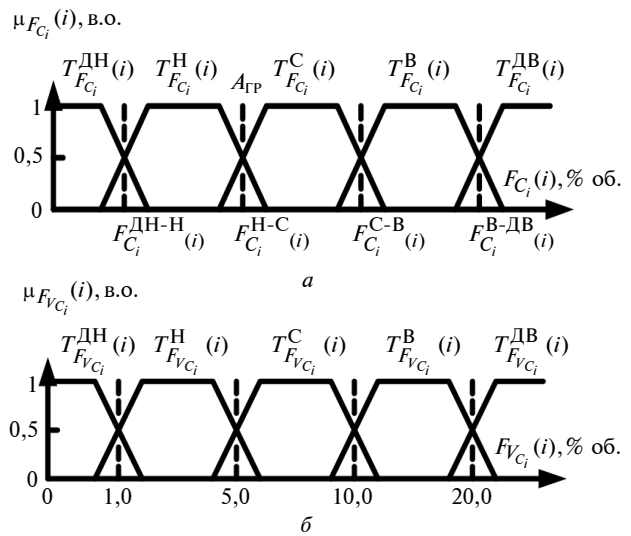


Рис. 9. Функції належності лінгвістичних змінних: а –  $F_{C_i}(i)$ , б –  $F_{V_{C_i}}(i)$

Ієрархія впливу параметрів ТС СТ  $C_i, V_{C_i}$  та факторів ризику  $R_{C_i}, R_{V_{C_i}}$  на ризик відмови  $R_{ТР}$  СТ за наявності дефекту зображена на рис. 10. Множини вершин факторів ризику  $R_{C_i}, R_{V_{C_i}}$  відповідають впливу зміни сукупності окремих параметрів ТС:  $C_i - (F_{C_1}, \dots, F_{C_n})$  та  $V_{C_i} - (F_{V_{C_1}}, \dots, F_{V_{C_n}})$ , які визначаються за результатами ХАРГ.

Кількісна оцінка ризику відмови СТ здійснюється агрегуванням даних, які одержані для кожного рівня ієрархії (рис. 10) із застосуванням ОWA – оператора Ягера [14–16].

Рівні факторів ризику відмови  $R_{C_i}, R_{V_{C_i}}$  унаслідок зміни концентрацій  $C_i$ , відносної швидкості  $V_{C_i}$  та ризику відмови СТ  $R_{ТР}$  є лінгвістичними змінними з 5-ма терм-множинами. Функції належності до терм-множин "дуже низьке", "низьке", "середнє", "високе", "дуже високе" значення рівнів факторів ризику  $R_{C_i}, R_{V_{C_i}}$  ризику відмови СТ  $R_{ТР}$  і матриця для оцінки ризику відмови показані на рис. 11 і в табл. 5.

Множини функцій належності нечітких термів для лінгвістичних змінних  $R_{C_i}, R_{V_{C_i}}$  і  $R_{ТР}$  побудовані на основі стандартного 01 класифікатора із трикутними або трапецієдними функціями належності, а також із використанням вербально-числової шкали Харінгтона [2].

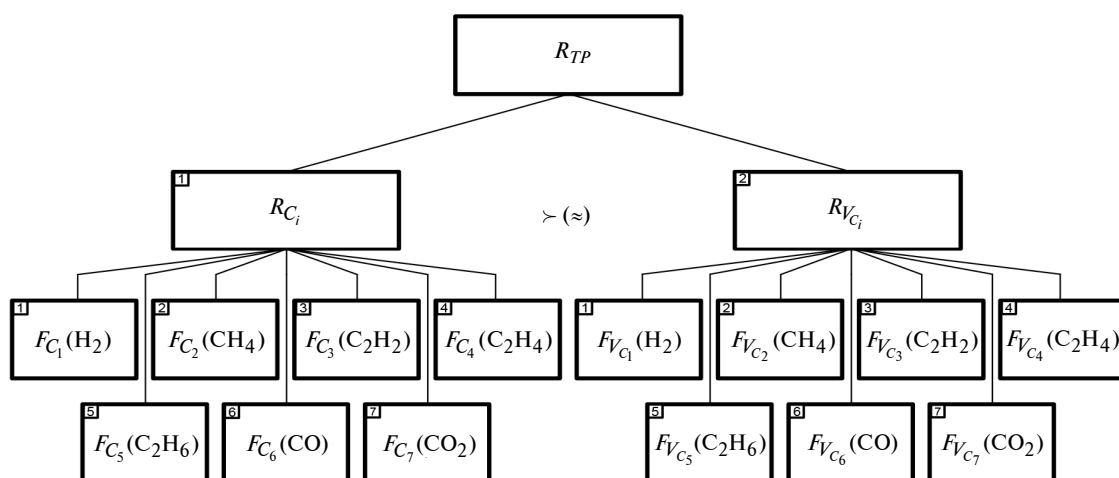


Рис. 10. Ієрархія факторів впливу і параметрів силового трансформатора на інтегральний показник ризику відмови

Не всі параметри  $C_i, V_{C_i}, R_{C_i}, R_{V_{C_i}}$  ієрархії впливу однаковою мірою впливають на ризик відмови СТ  $R_{TP}$ . Ранжування вказаних параметрів здійснюється відповідно до виду ідентифікованого дефекту, стадії його розвитку та рівнів значущості щодо впливу на рівень ризику відмови  $R_{TP}$ . Вагові коефіцієнти впливу  $p_i$   $i$ -го параметра  $C_i, V_{C_i}$  або факторів  $R_{C_i}, R_{V_{C_i}}$  на загальний ризик  $R_{TP}$  у випадку, коли в ієрархічній системі разом із перевагами входять у відношення байдужості, визначаються за правилом Фішберна [15, 17, 18]:

$$K_{i-1} = \begin{cases} K_i, & F_{i-1} \approx F_i, \\ K_{i+1}, & F_{i-1} > F_i, \\ K_N = 1, & i = N \dots 2, \end{cases}, \quad p_i = \frac{K_i}{K}, \quad K = \sum_{i=1}^M K_i,$$

де  $\{F\}$  – множина вершин факторів впливу на ризик відмови СТ за наявності дефекту ( $C_i, V_{C_i}, R_{C_i}, R_{V_{C_i}}$ ), що знаходиться на одному рівні ієрархії;  $N$  – відповідна кількість параметрів для одного рівня ієрархії.

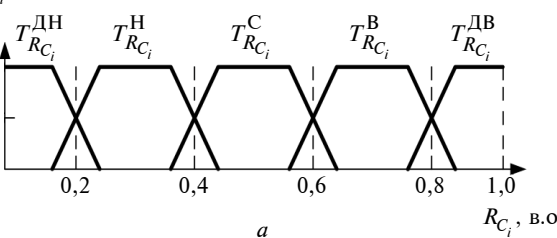
Агрегований рівень ризику відмови СТ визначається [15, 16]

$$R_{TP} = \sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot \sum_{i=1}^N p_i \cdot \mu_{ij}(X_i),$$

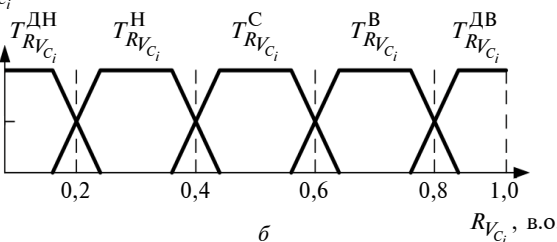
$$\alpha_j = 0,2i - 0,1, \quad X_i = [R_{C_i}, R_{V_{C_i}}],$$

де  $\alpha_j$  – вузлові точки стандартного класифікатора;  $p_i$  – ваговий коефіцієнт;  $\mu_{ij}(X_i)$  – рівень належності параметрів нечітким множинам.

$\mu(R_{C_i}),$  в.о.



$\mu(R_{V_{C_i}}),$  в.о.



$\mu(R_{TP}),$  в.о.

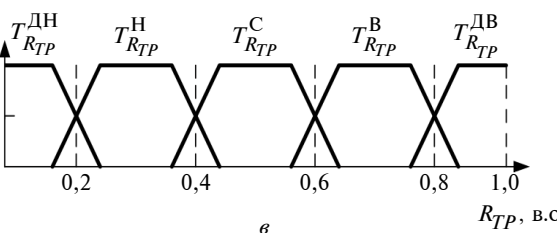


Рис. 11. Функції належності лінгвістичних змінних: а –  $R_{C_i}$ , б –  $R_{V_{C_i}}$ , в –  $R_{TP}$

Таблиця 5. Матриця для оцінки складового фактора "Ризик відмови СТ за результатами ХАРГ"

Позначення	Терм-множини лінгвістичних змінних "Рівні факторів ризику відмови внаслідок зміни $C_i$ та $V_{C_i}$ "				
	Дуже низький	Низький	Середній	Високий	Дуже високий
	$\mu_1^{ДН}$	$\mu_2^H$	$\mu_3^C$	$\mu_4^B$	$\mu_5^{ДВ}$
$R_{C_i}$	$T_{R_{C_i}}^{ДН}$	$T_{R_{C_i}}^H$	$T_{R_{C_i}}^C$	$T_{R_{C_i}}^B$	$T_{R_{C_i}}^{ДВ}$
$R_{V_{C_i}}$	$T_{R_{V_{C_i}}}^{ДН}$	$T_{R_{V_{C_i}}}^H$	$T_{R_{V_{C_i}}}^C$	$T_{R_{V_{C_i}}}^B$	$T_{R_{V_{C_i}}}^{ДВ}$
Терм-множини лінгвістичної змінної $R_{ТП}$ "ризик відмови СТ"	$T_{R_{ТП}}^{ДН}$	$T_{R_{ТП}}^H$	$T_{R_{ТП}}^C$	$T_{R_{ТП}}^B$	$T_{R_{ТП}}^{ДВ}$

### Тестове моделювання

При черговому випробуванні та вимірюванні параметрів ТС СТ 500/220 кВ за результатами ХАРГ були зареєстровані концентрації газів, розчинених у трансформаторному маслі. Перевищення граничних значень концентрацій та відносних швидкостей зростання розчинених газів більш ніж на 10 % за місяць, зафіксоване в декількох останніх вимірюваннях, свідчить про наявність у трансформаторі прогресуючого дефекту.

З допомогою програмного забезпечення, в якому реалізовано розроблену математичну модель [2, 6, 9, 14] і методику [2, 16], у СТ було ідентифіковано дефект "термічного характеру в діапазоні високих температур (понад 700 °С)".

У табл. 6 для визначених моментів часу спостереження відображена динаміка зміни параметрів  $C_i$ ,  $V_{C_i}$ ,  $R_{C_i}$ ,  $R_{V_{C_i}}$ . Зокрема, для моменту часу

спостереження 06.03.2009 р. за результатами ХАРГ розраховані складові  $R_{C_i}$ ,  $R_{V_{C_i}}$  інтегрального ризику відмови СТ  $R_{ТП}$ , які становлять 0,323 та 0,567 відповідно. За результатами розрахунків визначення ризику відмови СТ характеризують рівень ризику відмови трансформатора як "середній" зі ступенем 0,485.

Динаміку зміни рівнів факторів ризику відмови СТ за наявності дефекту на основі даних вимірювань ХАРГ зображено на рис. 12.

На основі результатів розрахунків було сформульовано такі рекомендації: зменшення строку експлуатації в режимах перевантаження, скорочення періоду повторного проведення ХАРГ, дослідження впливу відмови або виведення в ремонт СТ на ризик виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС.

Таблиця 6. Результати нечіткого моделювання оцінки ризику відмови силового трансформатора за наявності дефекту на основі даних вимірювань ХАРГ

Шкала терміну спостереження, дні	Дата проведення ХАРГ	$R_{C_i}$	$R_{V_{C_i}}$	$R_{ТП}$	Класифікація технічного стану силового трансформатора
0	21.10.03	0,211	0,100	0,137	Норма
268	15.07.04	0,228	0,300	0,276	Норма з відхиленнями
339	24.09.04	0,306	0,900	0,702	Передаварійний стан
589	01.06.05	0,262	0,200	0,221	Норма
766	25.11.05	0,240	0,100	0,147	Норма
1008	25.07.06	0,236	0,167	0,190	Норма
1963	06.03.09	0,323	0,567	0,485	Норма з відхиленнями
2394	11.05.10	0,274	0,150	0,191	Норма



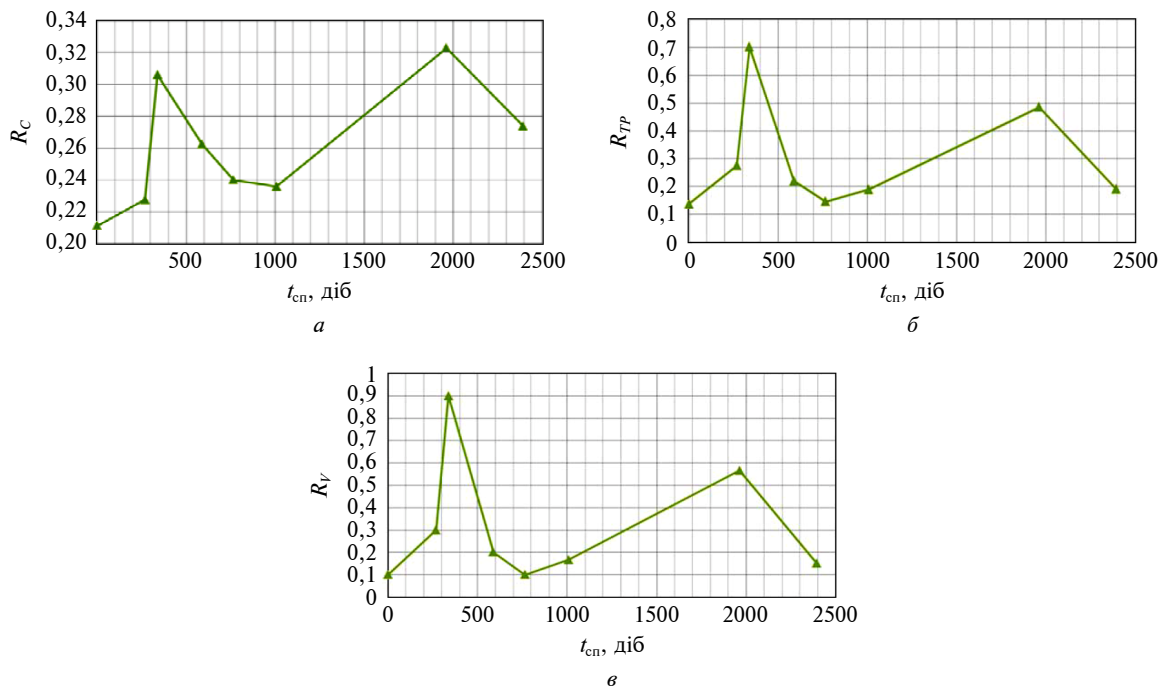


Рис. 12. Динаміка зміни рівнів факторів ризику силового трансформатора: а –  $R_{C_i}$ ; б –  $R_{TP}$ ; в –  $R_{V_{C_i}}$

## Висновки

Запропоновано нечітку математичну модель оцінки ТС та ідентифікації виду, характеру рівня розвитку дефектів СТ і метод та модель оцінки ризику відмови СТ в умовах наявності дефекту. Виконано параметричну ідентифікацію оптимальних значень функцій належності нечітких термів лінгвістичних змінних параметрів розробленої нечіткої моделі й адаптацію до реальних умов експлуатації. Проведено порівняльний аналіз результатів нечіткого моделювання ТС з результатами, отриманими на діючих СТ. Досто-

вірність ідентифікації дефектів за настроєною нечіткою моделлю оцінки ТС СТ становить 96 %. Подальші дослідження будуть спрямовані на створення гібридних нечітко-статистичних моделей відмов СТ, формування бази нечітких моделей оцінки ТС СТ різних типів, класів напруг і потужностей, адаптованих до реальних умов експлуатації, та інтеграцію їх програмної реалізації до єдиного комплексу “RISK-EPS-NPP” для оцінки режимної надійності та управління ризиком експлуатації підсистем ЕЕС з АЕС, ТЕС і ГЕС.

## Список літератури

1. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.
2. Костерев М.В., Бардик Є.І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. – К.: НТУУ “КПІ”, 2011. – 148 с.
3. Інтелектуальні електричні мережі: досвід і перспективи України / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, А.В. Праховник, С.П. Денисюк // Праці ІЕД НАН України. – 2011. – Спец. вип. – С. 5–19.
4. CIGRE Working Group A2.18, Guide for Life Management Techniques For Power Transformers. – Paris: CIGRE, 2003. – 128 с.
5. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Жук І.А. Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин // Вісник Вінницького політех. ін-ту. – 2005. – № 1. – С. 43–51.
6. Костерев Н.В., Бардик Є.І. Нечеткое моделирование электрооборудования для оценки технического состояния и принятия решений о стратегии дальнейшей эксплуатации // Технічна електродинаміка. Темат. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2006. – Ч. 3. – С. 39–43.
7. Штоуба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Телеком, 2007. – 288 с.
8. Шутенко О.В., Абрамов В.Б., Баклан Д.Н. Методика определения среднего риска при использовании граничных значений концентраций растворенных в масле газов // Энергетика и электрофикация. – 2012. – № 2. – С. 5–19.

9. Спосіб діагностування технічного стану силового трансформатора по моделі об'єкта в умовах нечіткої інформації: Пат. 65667 Україна, МПКНО1F27/00 / Є.І. Бардик, Р.В. Вожаков, М.В. Костерев. – Опубл. 12.12.2011.
10. Bardyk E., Bolotnyi N. Electric power system simulation for risk assessment of power transformer failure at an external short-circuit fault // 2017 IEEE 1st Ukraine Conf. Electrical Comp. Eng. – 2017. – P. 452–456.
11. Huan Y.-C., Sun H.C. Dissolved gas analysis of mineral oil for power transformer fault diagnosis using fuzzy logic // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. – 2013. – **20**, № 3. – P. 974–981.
12. Hooshmand R.A., Parastegari M., Forghani Z. Adaptive neuro-fuzzy inference system approach for simultaneous diagnosis of the type and location of faults in power transformers // IEEE Electr. Insul. Mag. – 2012. – **28**, № 5. – P. 32–42.
13. IEEE Guide for Interpretation of Gases Generated in Oil Immersed Transformer ANSI/IEEE: Standard C57.104.TM 2008.
14. Бардик Є.І., Костерев М.В., Болотний М.П. Нечітке моделювання силового трансформатора для оцінки ризику відмови за наявності дефекту // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2013. – С. 189–198.
15. Бардик Є.І., Костерев М.В., Болотний М.П. Підвищення надійності функціонування енергокомпаній на основі ризику виникнення аварійних ситуацій при відмовах електрообладнання // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2014. – С. 13–20.
16. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених в ізоляційному маслі: СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – К., 2007. – 92 с.
17. Недосекин А.О. Нечеткий финансовый менеджмент. – М.: Аудит и финансовый анализ, 2003. – 76 с.
18. Yager R. Families of OWA operators // Fuzzy Sets and Systems. – 1993. – **59**. – P. 53–59.

## References

- [1] B. Alekseev, *Control of State of Power Transformers*. Moscow, Russia: NC ENAS, 2002 (in Russian).
- [2] N. Kosterev and E. Bardyk, *The Issue of Building Fuzzy Models of the Technical Condition Evaluation of the Objects of Electrical Systems*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2011 (in Ukrainian).
- [3] B. Stogniy et al., “Intelligent electricity networks: experience and prospects of Ukraine”, *Pratsi IE NASU*, spec. issue, pp. 5–19, 2011 (in Ukrainian).
- [4] *CIGRE Working Group A2.18. Guide for Life Management Techniques For Power Transformers*, CIGRE, Paris, 2003.
- [5] P. Lezhnuk et al., “Diagnosis of power transformers using fuzzy sets”, *Visnyk Vinnytskogo Politekhnicznego Instytutu*, no. 1, pp. 43–51, 2005 (in Ukrainian).
- [6] N. Kosterev and E. Bardyk, “Fuzzy modeling of electrical equipment for technical condition assessment and decision-making about the strategy of further exploitation”, *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi Vypusk. Problemy Suchasnoi Elektrotekhniki*, part 3, pp. 39–43, 2006 (in Russian).
- [7] S. Shtovba, *Design of Fuzzy Systems by MATLAB Means*. Moscow, Russia: Telekom, 2007 (in Russian).
- [8] O.V. Shutenko et al., “Method of average risk determination when using the limiting values of gas concentrations in oil”, *Energetika i Elektrifikacia*, no. 2, pp. 5–19, 2012 (in Ukrainian).
- [9] N. Kosterev et al., “A method of diagnosing technical condition of the power transformer on the model of an object under fuzzy information”, Patent Ukraine 65667, 2011 (in Ukrainian).
- [10] E.I. Bardyk and N.P. Bolotnyi, “Electric power system simulation for risk assessment of power transformer failure at an external short-circuit fault”, in *Proc. 2017 IEEE 1st Ukraine Conf. Electrical Comp. Eng.*, pp. 452–456, 2017. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100527
- [11] Y.-C. Huan and H.C. Sun, “Dissolved gas analysis of mineral oil for power transformer fault diagnosis using fuzzy logic”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 3, pp. 974–981, 2013. doi: 10.1109/TDEI.2013.6518967
- [12] R.A. Hooshmand et al., “Adaptive neuro-fuzzy inference system approach for simultaneous diagnosis of the type and location of faults in power transformers”, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 28, no. 5, pp. 32–42, 2012. doi: 10.1109/MEI.2012.6268440
- [13] *IEEE Guide for Interpretation of Gases Generated in Oil Immersed Transformer ANSI/IEEE*, IEEE Standard C57.104.TM–2008. doi: 10.1109/IEEESTD.2009.4776518
- [14] E.I. Bardyk et al., “Fuzzy power transformer simulation for risk assessment of failure at the damage presence”, *Pratsi IE NASU*, pp. 189–198, 2013 (in Ukrainian).
- [15] E.I. Bardyk et al., “Improving reliability of operation of power companies based on risk assessment of emergency situations at the failures of electrical equipment”, *Pratsi IE NASU*, pp. 13–20, 2014 (in Ukrainian).
- [16] *Diagnostics of Oil-Filled Transformer Equipment According to the DGA Results of Free Gases Selected from the Gas Relay and Gases Dissolved in the Insulating Oil*, SOU-N EE 46.501:2006, 2007.
- [17] A.O. Nedosekin, *Fuzzy Financial Management*. Moscow, Russia: Audit and Financial Analysis, 2003 (in Russian).
- [18] R. Yager, “Families of OWA operators”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 59, pp. 53–59, 1993.

Є.І. Бардик, М.В. Костерев, М.П. Болотний

#### ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ У СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НАСТРОЮВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ

**Проблематика.** В умовах об'єктивно існуючого зростання аварійності в сучасних електроенергетичних системах унаслідок відмов потужного силового електрообладнання загострюється проблема забезпечення надійності та безпеки функціонування теплових, атомних і гідроелектростанцій. Тому задача розробки адекватних математичних моделей оцінки технічного стану та визначення ризику відмови силових трансформаторів потужних енергоблоків електростанцій є актуальною.

**Мета дослідження.** Метою роботи є удосконалення нечіткої моделі діагностування технічного стану силового трансформатора настроюванням параметрів та визначення ризику відмови за наявності дефекту.

**Методика реалізації.** При розробці математичної моделі силового трансформатора використовувались підходи, що ґрунтуються на теорії нечітких множин, нечіткої логіки, та методи нелінійної оптимізації. Задача визначення ризику відмови силового трансформатора за наявності дефекту розв'язувалась на основі сформованої ієрархії факторів і параметрів впливу на інтегральний показник ризику відмови силового трансформатора.

**Результати дослідження.** Обґрунтовано необхідність комплексного моделювання технічного стану силового трансформатора і режимів електроенергетичної системи. Удосконалено розроблену нечітку модель оцінки технічного стану силового трансформатора завдяки параметричній ідентифікації оптимальних значень функцій належності нечітких термів лінгвістичних змінних параметрів та визначенню ризику відмови силового трансформатора.

**Висновки.** Для оцінки ризику виникнення аварійних ситуацій в електроенергетичних системах при відмовах електрообладнання запропоновано математичну модель визначення ризику відмови силового трансформатора за наявності дефекту.

**Ключові слова:** модель; нечітка логіка; електрообладнання; оцінка ризику; дефект; відмова.

Е.И. Бардик, Н.В. Костерев, Н.П. Болотный

#### ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НАСТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ

**Проблематика.** В условиях объективно существующего роста аварийности в современных электроэнергетических системах вследствие отказов мощного силового электрооборудования обостряется проблема обеспечения надежности и безопасности функционирования тепловых, атомных и гидроэлектростанций. Поэтому задача разработки адекватных математических моделей оценки технического состояния и определения риска отказа силовых трансформаторов мощных энергоблоков электростанций является актуальной.

**Цель исследования.** Целью работы является совершенствование нечеткой модели диагностирования технического состояния силового трансформатора настройкой параметров и определение риска отказа при наличии дефекта.

**Методика реализации.** При разработке математической модели силового трансформатора использовались подходы, которые основываются на теории нечетких множеств, нечеткой логики, и методы нелинейной оптимизации. Задача определения риска отказа силового трансформатора при наличии дефекта решалась на основе сложившейся иерархии факторов и параметров влияния на интегральный показатель риска отказа силового трансформатора.

**Результаты исследования.** Обоснована необходимость комплексного моделирования технического состояния силового трансформатора и режимов электроэнергетической системы. Усовершенствована разработанная нечеткая модель оценки технического состояния силового трансформатора путем параметрической идентификации оптимальных значений функций принадлежности нечетких термов лингвистических переменных параметров и определения риска отказа силового трансформатора.

**Выводы.** Для оценки риска возникновения аварийных ситуаций в электроэнергетических системах при отказах электрооборудования предложена математическая модель определения риска отказа силового трансформатора при наличии дефекта.

**Ключевые слова:** модель; нечеткая логика; электрооборудование; оценка рисков; дефект; отказ.

Рекомендована Радою  
факультету електроенерготехніки  
та автоматики  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
09 жовтня 2017 року