

НЕЧІТКА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОГО ТЕРМІНУ РОБОТИ СИЛОВОГО СУХОГО ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМІ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

Відключення силових трансформаторів призводить до великих економічних збитків і негативно впливає на роботу електричної мережі. Одним з найважливіших параметрів, що впливають на тривалість роботи силового сухого трансформатора, є допустима тривалість перегріву ізоляції обмоток, яка визначається значенням температури найгарячішої точки ізоляції обмоток трансформатора. Проаналізовано літературні джерела для виявлення підходів визначення температури обмоток опосередкованими методами.

На основі аналізу запропоновано з використанням нечіткої логіки метод прогнозування та визначення ступеня перегріву обмоток силового сухого трансформатора за його паспортними даними, які дозволяють оцінювати стан та тривалість допустимої роботи в окремих режимах. Для цього використовувалось програмне середовище Matlab і нечітка інструментальна панель. За нечіткими правилами з урахуванням низки факторів, які впливають на ступінь перегріву сухого трансформатора, розроблена нечітка математична модель, що дозволяє отримувати прогнозовані ступені перегріву обмотки відповідно до режимів експлуатації сухого трансформатора. Під час побудови математичної моделі до уваги взято температуру охолоджувального повітря, вологість середовища, рівень перевантаження та значення навантаження трансформатора, яке мало місце безпосередньо перед моментом перевантаження.

Для налаштування розробленої нечіткої математичної моделі застосовано нейронну мережу у вигляді багатошарового перцептрона. Вхідними даними у такій нейронній мережі, окрім вищезазначених, використовувались параметри термів функцій належності та відомі значення допустимих тривалостей перевантаження сухого трансформатора у відповідних режимах його роботи.

В результаті розрахунків терми функцій належностей дещо змінились. Завдяки цьому при застосуванні отриманої моделі похибка в роботі нечіткої моделі суттєво знизилась і не перевищувала 5 %.

Запропонований підхід виявився ефективним, оскільки дозволяє прогнозувати тривалість роботи сухого трансформатора у розширеному діапазоні температури охолоджувального повітря в ході технологічного процесу.

Ключові слова: вплив, прогнозування, силовий сухий трансформатор, обмотка, перевантаження, нейронна мережа.

Вступ

Силові трансформатори відносяться до основного електрообладнання розподільних електричних мереж, тому від надійності їх роботи залежить електропостачання споживачів в цілому.

Відомо, що в останні десятиріччя разом із силовими масляними трансформаторами в електричних мережах широко використовуються силові сухі трансформатори. Це зумовлено тим, що сухі трансформатори, на відміну від інших типів, де використовується трансформаторне масло, мають низку переваг, зокрема підвищена пожежна безпека, краща екологічність, простота введення в експлуатацію, невисокі експлуатаційні витрати тощо [1], [2].

Стан ізоляції сухих трансформаторів, як і іншого електрообладнання, під впливом температури погіршується, а отже, з часом це може призвести до вичерпання робочого ресурсу ізоляції, внаслідок чого обладнання стає непридатним для експлуатації.

Зауважимо, що температура ізоляції обмоток трансформатора обумовлена як зміною його навантаження, так і впливом навколишнього середовища.

На сьогодні використання нечітких математичних моделей є достатньо поширеним способом для визначення залишкового ресурсу ізоляції трансформатора та діагностування несправностей трансформатора. Так, в роботі [3] проведено дослідження, яким несправності розподілені на п'ять категорій, кожна з яких порівнювалась за різними математичними моделями.

В роботі [4] наведені сімейства характеристик силових сухих трансформаторів, якими визначається тривалість їхньої роботи в залежності від навантаження, яке передувало моменту початку перевантаження, перевантаження та температури навколишнього середовища. Зазначається, що перевищення тривалості вказаного перевантаження є недопустимим, оскільки при цьому настає момент неконтрольованого погіршення стану ізоляції, що може призвести до виведення трансформаторів з ладу. Крім того, вказані дискретні значення температури навколишнього середовища не дозволяють оцінити допустиму тривалість перевантаження, а отже, погіршення стану ізоляції в проміжках між двома вказаними сусідніми значеннями температури.

Як приклад, графіки тривалості можливого перевантаження (хвилини, години) в залежності від допустимого перевантаження (%) для трифазних сухих трансформаторів потужністю 630–2500 кВ·А з литою ізоляцією типу «Geafol» за температури охолоджувального повітря 20 °С показані на рис. 1.

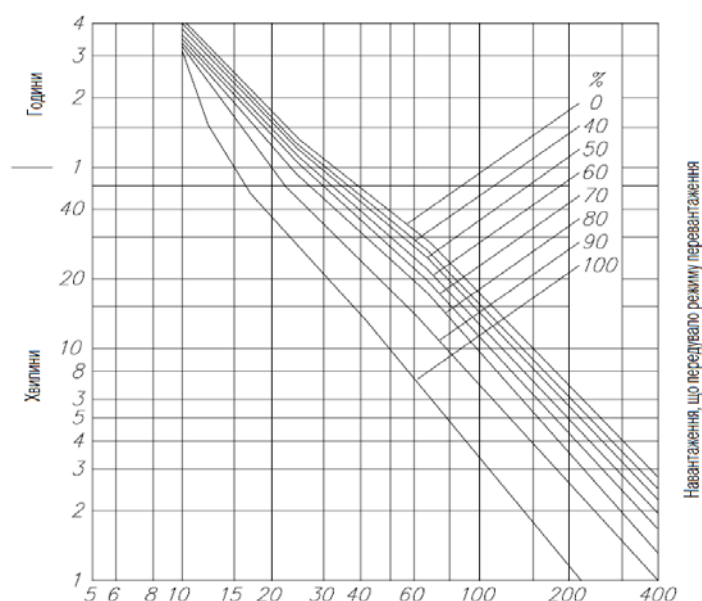


Рис. 1. Графік тривалості можливого перевантаження в залежності від допустимого перевантаження для трифазних сухих трансформаторів потужністю 630–2500 кВ·А з литою ізоляцією типу «Geafol» за температури охолоджувального повітря 20 °С

Підкреслимо, що зазначені характеристики окреслюють роботу трансформаторів в режимі перевантаження. Але, очевидно, що і в процесі роботи силового трансформатора в режимі, що не перевищує номінальне навантаження, ресурс ізоляції, який більшою мірою визначається його тепловим режимом роботи, теж витрачається нерівномірно. І, враховуючи той факт, що завод-виробник трансформаторів надає їм гарантійний термін експлуатації, можливо гарантовано експлуатувати трансформатори понад нормативний строк експлуатації у разі відслідковування процесу старіння та погіршення стану ізоляції трансформаторів під час їхньої роботи.

Зазначимо також, що на стан ізоляції сухих трансформаторів впливають вологість середовища, а в окремих випадках — наявність впливу вітру, рівень сонячної радіації тощо.

Нормативні документи [5], [6] не містять рекомендацій з урахування впливу, наприклад, вологості навколишнього середовища або швидкості вітру (за використання трансформаторів у відповідних умовах) на температуру поверхні обмоток сухого трансформатора, хоча вплив таких чинників очевидний. Виникає питання, як враховувати вплив зазначених та інших зовнішніх чинників на коректне врахування спрацьовування робочого ресурсу ізоляції сухого трансформатора відповідно до умов його експлуатації?

Метою роботи є розробка математичної моделі, яка враховуватиме основні фактори впливу на процес старіння ізоляції обмоток силових сухих трансформаторів, що дозволить визначати допус-

тиму тривалість роботи в режимі перевантаження а, отже, своєчасне відслідковування вичерпання робочого ресурсу ізоляції та виведення трансформаторів з експлуатації.

Для розв'язання поставленої задачі в роботі пропонується такий підхід. Побудуємо математичну модель, основу на методах нечіткої логіки [7], [8], яка дозволяла б визначати допустиму тривалість роботи сухого трансформатора в режимі перевантаження в умовах відсутності проміжних табличних даних поміж заданими значеннями температури згідно з паспортом трансформатора. Враховуватимемо тільки основні параметри впливу на стан ізоляції трансформатора, зокрема навантаження, яке передувало моменту початку перевантаження, перевантаження, температуру охолоджувального повітря та вологість навколишнього середовища. Очевидно, що в разі необхідності експерт може в математичну модель ввести і інші додаткові фактори впливу.

На першому етапі побудови моделі визначаємо можливий діапазон зміни її вхідних параметрів. Вихідним параметром моделі буде допустима тривалість увімкнення сухого трансформатора в режимі перевантаження.

З урахуванням зазначених зауважень вхідні параметри моделі та їхня лінгвістична оцінка наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Вхідні параметри моделі та їхня лінгвістична оцінка

Параметри	Назва	Діапазон зміни	Терми
x_1	Навантаження, яке передувало моменту початку перевантаження	0...100 %	дуже низьке (ДН), низьке (Н), середнє (С), високе (В), дуже високе (ДВ)
x_2	Перевантаження	0% ... 400%	дуже низьке (ДН), низьке (Н), середнє (С), високе (В), дуже високе (ДВ)
x_3	Температура охолоджувального повітря	-25°C ... 40°C	дуже низька (ДН), низька (Н), середня (С), висока (В)
x_4	Вологість повітря	40 ... 80 %	низька (Н), середня (С), висока (В)

Згідно з [7], [8] задача полягає у тому, щоб кожному сполученню значень параметрів поставити у відповідність одне зі значень допустимої тривалості увімкнення сухого трансформатора в режимі перевантаження d_j ($j = \overline{1,5}$).

Для побудови моделі використано чотири вхідних параметри. Всі ці параметри x_1 — x_4 кількісні та піддаються вимірюванням, однак параметри x_1 та x_2 будемо задавати у відсотках.

У відповідності до теорії нечітких множин [7], [8] необхідно визначити рівні зміни вихідного показника. Вважатимемо, що допустиму тривалість увімкнення сухого трансформатора будемо визначати на таких рівнях (термах): d_1 — дуже висока, d_2 — висока, d_3 — середня, d_4 — низька, d_5 — дуже низька.

Наведені рівні d_1 ... d_5 будемо вважати характеристиками, за якими визначається допустима тривалість увімкнення трансформатора в режимі перевантаження.

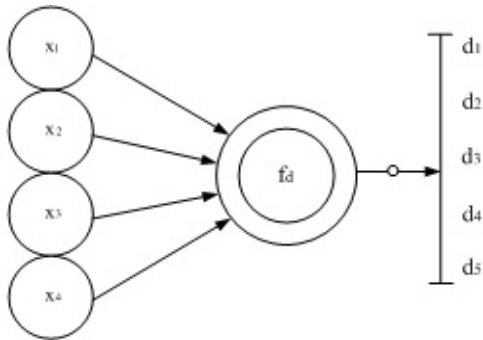


Рис. 2. Дерево логічного висновку

Структура моделі показана на рис. 2 у вигляді дерева логічного висновку (це граф, структура якого відображає класифікацію чинників $\{x_1 \dots x_n\}$, що впливають на прогнозований показник $\{d\}$), який відповідає співвідношенню

$$d = f_d(x_1, x_2, x_3, x_4). \quad (1)$$

Подальшим кроком моделювання є складання експертної бази знань. Нечітка база знань є носієм експертної інформації про причинно-наслідкові зв'язки між вихідними змінними.

Користуючись уведеними термами і знаннями експертів, представимо співвідношення (1) у вигляді нечіткої бази знань, що подана в табл. 2.

Для лінгвістичної оцінки вхідних чинників x_1 — x_4 використовуються нечіткі терми. Представимо терми у вигляді нечітких множин, використовуючи модель функцій належності [7]

$$\mu^T(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}, \quad (2)$$

де c і σ — параметри функції належності: c — координата максимуму функції; σ — коефіцієнт концентрації-розтягування.

Значення коефіцієнтів c і σ для всіх термів подані в табл. 3.

Таблиця 2

Нечітка база знань				
x_1	x_2	x_3	x_4	d
ДН	ДН	С	С	d_1
Н	Н	Н	Н	
Н	Н	С	С	d_2
С	Н	В	С	
С	С	Н	Н	
В	Н	Н	С	
С	Н	С	В	
С	Н	В	Н	
Н	С	Н	С	d_3
С	С	С	С	
В	С	Н	С	
С	С	Н	Н	
С	С	ДН	В	
Н	С	С	С	d_4
С	В	С	С	
С	В	В	С	
В	В	Н	Н	
С	С	В	В	
В	С	В	С	
ДВ	С	С	Н	d_5
ДВ	С	С	В	
В	В	В	В	d_5
В	ДВ	С	Н	
В	ДВ	Н	Н	
ДВ	В	С	С	
ДВ	В	В	С	
ДВ	ДВ	В	В	
ДВ	ДВ	ДН	С	

Таблиця 3

Коефіцієнти c і σ			
Параметри	Терми	c	σ
x_1	(ДН)	-20	8,496
	(Н)	-10	
	(С)	10	
	(В)	30	
	(ДВ)	50	
x_2	(ДН)		12,74
	(Н)	40	
	(С)	70	
	(ДВ)	100	
x_3	(ДН)	0	1,062
	(Н)	2,5	
	(С)	5	
x_4	(В)	7,5	21,23
	(Н)	0	
	(С)	50	
	(В)	100	

На основі бази знань і функцій належності термів, використовуючи операції \bullet ($I - \min$) і \vee ($A \vee B - \max$), складемо нечіткі логічні рівняння, що описують цю модель.

Ці логічні рівняння моделі визначення допустимої тривалості увімкнення сухого трансформатора в режимі перевантаження мають такий вигляд:

$$\mu^{d_1}(d) = [\mu^{\text{ДН}}(x_1) \cdot \mu^{\text{ДН}}(x_2) \cdot \mu^{\text{С}}(x_3) \cdot \mu^{\text{С}}(x_4)] \vee [\mu^{\text{Н}}(x_1) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_2) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_3) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_4)]; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_2}(d) = & [\mu^{\text{Н}}(x_1) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_2) \cdot \mu^{\text{С}}(x_3) \cdot \mu^{\text{С}}(x_4)] \vee [\mu^{\text{С}}(x_1) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_2) \cdot \mu^{\text{В}}(x_3) \cdot \mu^{\text{С}}(x_4)] \vee \\ & \vee [\mu^{\text{С}}(x_1) \cdot \mu^{\text{С}}(x_2) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_3) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_4)] \vee [\mu^{\text{В}}(x_1) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_2) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_3) \cdot \mu^{\text{С}}(x_4)] \vee \\ & \vee [\mu^{\text{С}}(x_1) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_2) \cdot \mu^{\text{С}}(x_3) \cdot \mu^{\text{В}}(x_4)] \vee [\mu^{\text{С}}(x_1) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_2) \cdot \mu^{\text{В}}(x_3) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_4)] \vee \\ & \vee [\mu^{\text{Н}}(x_1) \cdot \mu^{\text{С}}(x_2) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_3) \cdot \mu^{\text{С}}(x_4)]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_3}(d) = & [\mu^{\text{С}}(x_1) \cdot \mu^{\text{С}}(x_2) \cdot \mu^{\text{С}}(x_3) \cdot \mu^{\text{С}}(x_4)] \vee [\mu^{\text{В}}(x_1) \cdot \mu^{\text{С}}(x_2) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_3) \cdot \mu^{\text{С}}(x_4)] \vee \\ & \vee [\mu^{\text{С}}(x_1) \cdot \mu^{\text{С}}(x_2) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_3) \cdot \mu^{\text{С}}(x_4)] \vee [\mu^{\text{В}}(x_1) \cdot \mu^{\text{С}}(x_2) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_3) \cdot \mu^{\text{Н}}(x_4)] \vee \\ & \vee [\mu^{\text{С}}(x_1) \cdot \mu^{\text{С}}(x_2) \cdot \mu^{\text{ДН}}(x_3) \cdot \mu^{\text{В}}(x_4)] \vee [\mu^{\text{Н}}(x_1) \cdot \mu^{\text{В}}(x_2) \cdot \mu^{\text{С}}(x_3) \cdot \mu^{\text{С}}(x_4)]; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_4}(d) = & \left[\mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \right] \vee \left[\mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \right] \vee \\ & \vee \left[\mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \right] \vee \left[\mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \right] \vee \\ & \vee \left[\mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \right] \vee \left[\mu^{DB}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \right] \vee \\ & \vee \left[\mu^{DB}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \right]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_5}(d) = & \left[\mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \right] \vee \left[\mu^B(x_1) \cdot \mu^{DB}(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \right] \vee \\ & \vee \left[\mu^B(x_1) \cdot \mu^{DB}(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \right] \vee \left[\mu^{DB}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \right] \vee \\ & \vee \left[\mu^{DB}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \right] \vee \left[\mu^{DB}(x_1) \cdot \mu^{DB}(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \right] \vee \\ & \vee \left[\mu^{DB}(x_1) \cdot \mu^{DB}(x_2) \cdot \mu^{DH}(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Зауважимо, що ваги правил не зазначені, оскільки під час грубого налагодження їхні значення дорівнюють одиницям.

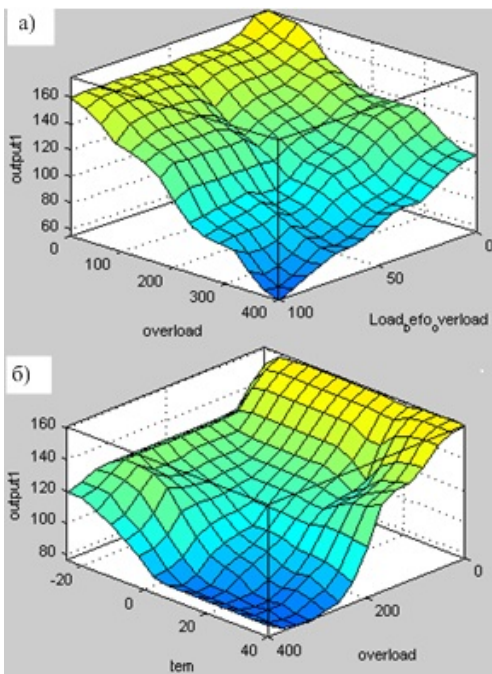


Рис. 3. Залежності допустимої тривалості увімкнення трансформатора в режимі перевантаження від впливу: а — перевантаження та навантаження, яке передувало моменту початку перевантаження; б — температури охолоджувального повітря та навантаження, яке передувало моменту початку перевантаження

в задачі прогнозування допустимих термінів роботи трансформатора в режимі перевантаження без зменшення загального терміну його експлуатації за відомими температурою навколишнього середовища, рівнем перевантаження та значенням навантаження, яке мало місце безпосередньо перед моментом перевантаження.

Для побудови нейронної мережі створено вибірку вхідних даних. Базуючись на графіках, які характеризують тривалість t допустимого перегріву ізоляції в залежності від температури навколишнього середовища T , інтенсивність перевантаження P^* та рівень навантаження P трансформаторів типу ТСГЛ потужністю 630–2500 кВА з ізоляцією “Geafol”, а також параметри функцій належності та відомі допустимі тривалості увімкнення силового сухого трансформатора в режимі перевантаження для наведених температур навколишнього середовища 10, 20, 30 та 40 °С [4] в роботі здійснено апроксимацію залежностей зазначених даних.

Фіксуючи конкретні вхідні параметри моделі та застосовуючи запропоновану модель, для визначення чіткого значення допустимої тривалості увімкнення сухого трансформатора в режимі перевантаження застосуємо метод дефазифікації «центра ваги» [8].

Результат математичного моделювання із застосуванням компонент теорії нечітких множин показано на рис. 3. Моделювання здійснювалось в середовищі Matlab 6.5 [9], [10].

Підкреслимо, що значення вихідного результату залежить від багатьох факторів, зокрема якості правил у нечіткій базі знань, форми функцій належності, методу дефазифікації та способів виконання нечітко-логічних операцій. Ця теза підтверджується тим, що на перших етапах налаштування математичної моделі похибка сягала майже 100%. Окрім того, дослідження показують, що різні чинники впливу по-різному відображаються на отриманому результаті.

Тому, очевидно, що параметри моделі доцільно налаштовувати одним з відомих методів оптимізації.

Потрібно зазначити, що раціональним є використання штучних нейронних мереж для налаштування моделі визначення допустимої тривалості увімкнення силового сухого трансформатора, який працює в режимі перевантажень.

В роботі запропонована штучна нейронна модель для параметричного налагодження функцій належності в

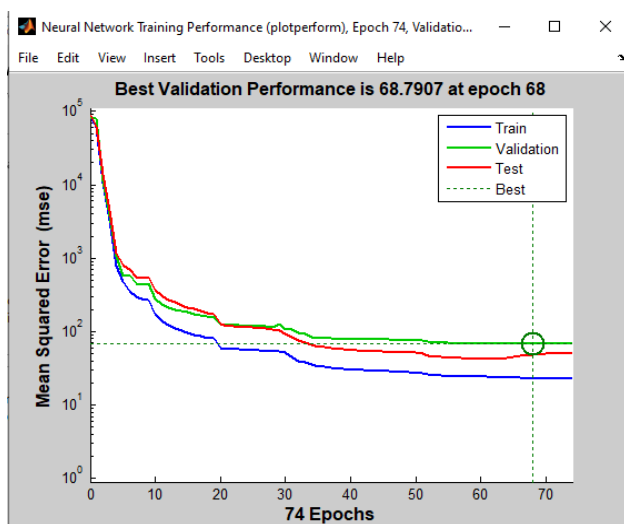


Рис. 4. Ілюстрація процесу навчання нейронної мережі на налаштованій нечіткій моделі (t_n) з табличними значеннями, наведеними в паспорті сухого трансформатора (t).

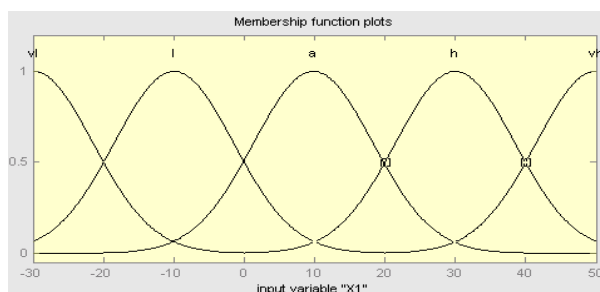


Рис. 5. Функції належності для параметра x_3 до застосування процедури оптимізації

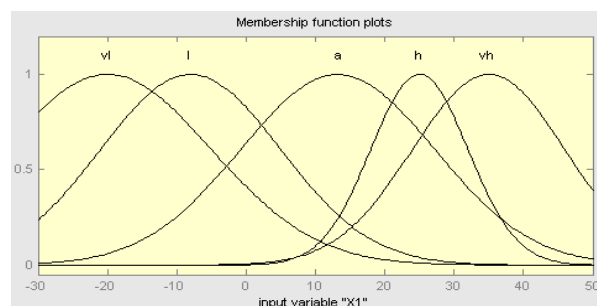


Рис. 6. Функції належності для параметра x_3 після застосування процедури оптимізації

Таблиця 4

Результати порівняння даних, отриманих з використанням налаштованої нечіткої моделі, з табличними даними з паспорта сухого трансформатора

$T, ^\circ\text{C}$	$P^*, \%$	$P, \%$	$t, \text{хв}$	$t_n, \text{хв}$
10	15	0	240	247
10	20	40	150	144
10	30	50	68	66
10	40	60	46	45
10	50	70	31	32
10	60	80	23	23
10	80	90	13	12
10	100	100	6	5.5
10	150	80	5	5
10	200	80	4,2	4,4
10	300	40	3,6	3,5
10	400	60	2	2,1

Висновки

Розроблено нечітку математичну модель, застосування якої дозволяє визначати тривалість допустимого увімкнення силового сухого трансформатора за відомими навантаженням, яке передувало моменту початку перевантаження, перевантаженням, температурою та вологістю навколишнього середовища. Перевагою реалізації зазначеної моделі є можливість визначення тривалості допустимого увімкнення силового сухого трансформатора поміж даними, наведеними у паспорті трансформатора.

Розроблено нейронну мережу, використання якої дозволяє налаштувати нечітку математичну модель визначення тривалості допустимого увімкнення сухого трансформатора в режимі перевантаження.

В результаті розрахунків отримані дані, які відрізняються від табличних показників з похибкою, що не перевищує 5 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ТОВ «Укрелектроапарат», *Сухі трансформатори*. Хмельницький: НБУВ, 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uea.com.ua/product-category/dry-transformer/>. Дата звернення 01.08.2022.
- [2] *Переваги сухих трансформаторів*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eltiz.ua/uk/blog/perevagi-suhih-transformatoriv/>. Дата звернення 01.08.2022.
- [3] H. Mehdipour Picha, R. Bo, H. Chen, M. M. Rana, J. Huang, and F. Hu, "Transformer Fault Diagnosis Using Deep Neural Network," *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*. doi:10.1109/isgt-asia.2019.8881052.
- [4] ОАО «Укрелектроапарат», *Технический каталог. Трансформаторы*, 2007, 82 с.
- [5] ГКД 34.20.507-2003 *Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила* (у редакції наказу від 21.06.2019 № 271).
- [6] *Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29329.
- [7] Л. А. Заде, *Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений*. М.: Мир, 1976, 167 с.
- [8] А. П. Ротштейн, *Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети*. Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999, 320 с.
- [9] Д. Рутковська, М. Піліньскій, Л. Рутковський, *Нейронні мережі, генетичні алгоритми та нечіткі системи*, пер. з пол. І. Д. Рудинського. 2-е вид., 2013, 384 с.
- [10] Ю. А. Зак, *Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных. Fuzzy-технологии*. М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2016, 352 с.

Рекомендована кафедрою кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 29.08.2022

Грабо Володимир Віталійович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, e-mail: grabko@vntu.edu.ua ;

Паланюк Олександр В'ячеславович — аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, e-mail: oleksanderp020895@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. V. Grabko¹
O. V. Palaniuk¹

A Fuzzy Mathematical Model for Taking into Account the Factors Affecting the Aging Process of the Dry Power Transformer Insulation

¹Vinnitsia National Technical University

Disconnection of power transformers leads to large economic losses and negatively affects the operation of the electrical network. One of the most important parameters affecting the duration of operation of a power dry transformer is the permissible duration of overheating of the insulation of the windings, which is determined by the value of the most heated point of the insulation of the transformer windings. A review of the literature was conducted to identify approaches for determining the temperature of windings by indirect methods.

Based on the analysis, the paper proposes a method of forecasting and determining the degree of overheating of the windings of a dry-type power transformer based on its passport data using fuzzy logic, which allows assessing the condition and duration of permissible operation in individual modes. For this, the Matlab software environment and a fuzzy toolbar were used. According to fuzzy rules, taking into account a number of factors that affect the degree of overheating of a dry-type transformer, a fuzzy mathematical model has been developed, which allows to obtain predicted degrees of overheating of the winding according to the operating modes of the dry-type transformer. When constructing a mathematical model, the temperature of the cooling air, the humidity of the environment, the level of overload and the value of the load of the transformer, which occurred immediately before the moment of overload, were taken into account.

A neural network in the form of a multilayer perceptron was used to adjust the developed fuzzy mathematical model. As input data in such a neural network, in addition to those mentioned above, the parameters of the membership function terms and the known values of the allowable durations of the overload of the dry transformer in the corresponding modes of its operation were used.

As a result of the calculations, the terms of the property functions changed slightly, as a result of which, when applying the obtained model, the error in the operation of the fuzzy model significantly decreased and did not exceed 5 %.

The proposed approach turned out to be effective, as it allows predicting the duration of operation of a dry transformer in an extended range of cooling air temperature at the pace of the technological process.

Keywords: influence, prediction, power dry transformer, winding, overload, neural network.

Grabko Volodymyr V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, e-mail: grabko@vntu.edu.ua ;

Palaniuk Oleksandr V. — Post-Graduate Student of the Chair of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, e-mail: oleksanderp020895@gmail.com