

УДК 621.311.62.19

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.;

О. Є. Рубаненко, к. т. н., доц.;

І. А. Жук, студ.

ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Запропоновано математичну модель визначення залишкового ресурсу силового трансформатора з використанням методів теорії нечітких множин при побудові нейро-нечіткої мережі, яка використовується для знаходження параметрів моделі.

Вступ

Діагностування силового електротехнічного устаткування зокрема силових трансформаторів сьогодні стає звичним технічним заходом підвищення надійності і якості електропостачання. Для цього є всі передумови: з одного боку це економічна необхідність і доцільність, а з іншого — технічні можливості. Перше обумовлено високою вартістю трансформаторів і автотрансформаторів, складнощами і значними витратами на їх транспортування та монтаж, а також збитками, викликаними порушеннями технологічних процесів через обмеження електропостачання. Друге пояснюється потенційними можливостями сучасного апаратного і програмного забезпечення. В той же час актуальним є розроблення методів діагностування, які б відповідали вимогам, що суттєво зросли до систем діагностики, і в повній мірі використовували можливості комп'ютерного моделювання. В даній статті розглядається метод діагностування силових трансформаторів на основі математичного моделювання процесів старіння з використанням апарату нечітких множин.

Об'єкт моделювання і постановка задачі

Оскільки трансформатори і автотрансформатори є одними з найскладніших і відповідальніших видів електрообладнання електроенергетичних систем, то для оцінки їх технічного стану створені і розвиваються спеціальні системи контролю [1, 2]. Вони обслуговують підвищувальні трансформатори великої потужності на електростанціях і крупних вузлових підстанціях. Для таких трансформаторів доцільно застосовувати навіть складні і дорогі контрольно-діагностичні системи, наприклад, автоматичну систему відбору проб масла, аналізу газів, що містяться в них, і систему визначення діагнозу [3]. Вартість такої системи складає до 10 % вартості всього трансформатора. Трансформатори меншої потужності, як правило, легше резервуються, їх вихід з ладу відображається на конкретних споживачах, але не на всій мережі. Відповідно і системи контролю охоплюють меншу кількість дефектів. Основна оцінка стану проводиться під час періодичних обстежень з відключенням трансформатора.

Найефективнішими в попередженні аварій трансформаторів є мікропроцесорні системи безперервного контролю і діагностики, що використовують комплекс датчиків [4—7]. Характерним для таких систем є мета — виявлення на ранній стадії розвитку небезпечних для трансформатора дефектів безпосередньо під час роботи, а також обробка, аналіз і відображення параметрів стану трансформатора в зручному для експлуатаційного персоналу вигляді. Різними є комплекси чутливих до дефектів датчиків, методи виявлення небезпечного стану вузлів трансформатора.

Для безперервного контролю стану найбільш відповідальних трансформаторів в світовій практиці найчастіше використовуються: газохроматографічний аналіз розчинених в маслі газів (ГХА), вимірювання і локалізація часткових розрядів, визначення температури найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора [6—9].

До періодичних випробувань без відключення трансформаторів відносять такі основні випробування: вимірювання часткових розрядів (ЧР); вібраційний контроль; тепловізорний контроль; ультразвукова локація; вимірювання опору КЗ (Z_k) під навантаженням; вимірювання тангенса

кута втрат, ємності остову і струму небалансу трифазної системи для введів; вимірювання струмів і навантаження електродвигунів маслорасосів і приводів РПН; відбір проб масла для проведення різних аналізів.

Тому актуальною задачею є розробка математичних моделей, які можуть бути використані при побудові алгоритмів функціонування мікропроцесорних систем моніторингу стану трансформаторів. Такі моделі повинні враховувати вплив багатьох контрольованих параметрів не лише на шуканий параметр, а і їх взаємний вплив. Перспективним напрямком в цьому є використання теорії нечітких множин та вдосконалених засобів комп'ютерного моделювання [1, 4, 10].

Математичне моделювання трансформаторів в середовищі MatLab

Автоматична система безперервного контролю і діагностики силових трансформаторів на основі даних вимірювань дозволяє дати об'єктивну оцінку стану трансформаторів, виявити дефекти всіх систем і вузлів в них, а також розробити рекомендації з усунення дефектів, проведення ремонтних робіт і подальшої експлуатації трансформаторів. В своїх розрахунках система спирається на вже наявні математичні моделі трансформаторів, але класичні моделі мають досить суттєвий недолік — вони не можуть визначити і врахувати функціональні зв'язки між всіма вхідними величинами [1]. Тобто залежність між зростанням концентрації розчинених в трансформаторному маслі газів і опором КЗ, наприклад, такі математичні моделі встановити неможливо. Для таких випадків технологія нечіткого моделювання є досить конструктивною [11—12]. Нечітке моделювання дозволяє одержувати більш адекватні результати в порівнянні з результатами, які ґрунтуються на використанні традиційних аналітичних моделей і алгоритмів керування. Розглянемо можливості використання таких методів в діагностиці трансформаторів.

Для цих цілей було використано пакет MATLAB, а саме Fuzzy Logic Toolbox, в якому реалізовані десятки функцій нечіткої логіки [11].

Для відображення динамічних властивостей трансформатора використовуємо нелінійну авторегресійну модель з зовнішнім входом, яка встановлює нелінійне перетворення між попереднім значенням входів-виходів моделі, та майбутнім значенням виходу [10]

$$y(k) = F\{y(k-1), y(k-k_y), u(k-k_d), \dots, u(k-k_u)\}, \quad (1)$$

де $y(k)$ — вихід моделі в k -й момент часу, k_y — максимальний крок зміни врахованих попередніх значень вектора виходу системи контролю показника якості функціонування трансформатора, k_u — максимальний крок зміни врахованих попередніх значень вектора вхідного контрольованого параметра (наприклад опору короткого замикання $z_{к.з.}$); k_d — крок запізнення зміни вектора виходу відносно до зміни вектора входу, значення вектора вхідних величин $u(k-k_d), \dots, u(k-k_u)$ і вихідної величини $y(k-1), \dots, y(k-k_y)$, F — «нечітке» функціональне перетворення.

Попередні значення можна отримати, якщо використати оператор зсуву s . Тоді: $s^{-1} u_k = u_{k-1}$; $s^{-2} u_k = u_{k-2}$; $s^{-3} u_k = u_{k-3}$; $s^{+1} u_k = su = su_{k+1}$; $s^{+2} u_k = u_{k+2}$; $s^{+3} u_k = u_{k+3}$ і т.п з урахуванням цього

$$y = F(s^{-1}y, s^{-2}y, s^{-3}y, \dots, s^{-k_y}y, s^{-k_d}u, s^{-k_u}u). \quad (2)$$

Для отримання виходу об'єкта використовується система нечіткого висновку типу Сугено, яка вміщує в собі множину логічних нечітких правил [12]:

$$\begin{aligned} & IF(u(k-k_d) IS A_{i1}) AND \dots AND(u(k-k_u) IS A_{ik_u}) \dots AND(y(k-1) IS B_{i1}) AND \dots \\ & \dots AND(y(k-k_y) IS B_{ik_y}) \\ & THEN y_k = a_{i1}(u(k-k_d)) + \dots a_{ik_u}(u(k-k_u)) + b_{i1}(y(k-1)) + \dots + b_{ik_y}(y(k-k_y)) + c_i, \end{aligned} \quad (3)$$

де $i = 1, \dots, L$, L — кількість можливих комбінацій взаємодій вхідних параметрів трансформатора, які визначають кількість правил; $(A_{i1} \dots A_{ik_u})$ і $(B_{i1} \dots B_{ik_y})$ — позначення «нечітких» множин і відповідних їм функцій приналежності для i -го правила, в якому враховуються попередні $(k_u - 1)$

значення вектора входу; $(a_{i1} \dots a_{ik_u})$ і $(b_{i1} \dots b_{ik_y})$, c_i – параметри виходу нейро-нечіткої моделі.

Вектор прогнозування

$$D = [u(k - k_d) \dots u(k - k_u)] \cup [y(k - 1) \dots y(k - k_y)] \tag{4}$$

Для цього вектора враховуються такі значення виходу моделі $y_m(k)$, як сума висновків правил, отриманих з використанням системи нечіткого висновку, яка реалізує алгоритм Сугено [10]

$$y_m(k) = \sum_{i=1}^L \beta_i y_m^i(k), \tag{5}$$

де $0 \leq \beta_i \leq 1$ — нормалізований ступінь виконання i -го правила, який визначає ступінь відповідності реальних змін вектора D змінам, відображеним в i -му правилі. Цей коефіцієнт визначається як

$$\beta_i(s) = \frac{\prod_{j \in D} A_{i,j}(s_j)}{\sum_{i=1}^L \prod_{j \in D} A_{i,j}(s_j)}. \tag{6}$$

Модель, побудована з використанням алгоритму Сугено, є нейрон-нечіткою мережею прямого поширення, яка містить в собі адаптивні вузли, вхід яких залежить від параметрів основних вузлів трансформатора. Правила навчання налаштовують ці параметри так, щоб максимально мінімізувати похибку. Застосовується гібридний навчальний алгоритм, кожна епоха (ітерація) якого складається з прямого та зворотного оптимізаційного розрахунків. При прямому розрахунку вхідна інформація про значення векторів входу та виходу, використовується для отримання методом найменших квадратів параметрів виводу, після чого розраховується помилка мережі. При зворотному розрахунку методом градієнтного спуску визначаються параметри посилань, які мінімізують середньоквадратичне відхилення результатів моделювання від початкових даних.

Нижче пропонуємо методику оцінювання ефективності функціонування силового трансформатора, яка передбачає побудову адаптованої нейро-нечіткої моделі з використанням алгоритму Сугено.

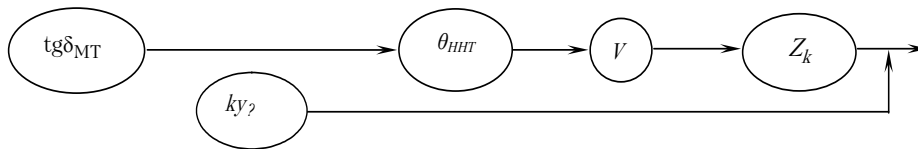


Рис. 1. Блок-схема взаємозв'язків параметрів частин обладнання силового трансформатора

Показники технічного стану трансформаторів, які використовуються в даній моделі і вимірюються під час роботи трансформатора:

ky_{BB} — коефіцієнт якості функціонування трансформаторних вводів, який враховує $\text{tg } \delta_{BB}$ — тангенс кута діелектричних втрат ізоляції вводів, C — ємність ізоляції вводів, Δq — зміну величини уявного заряду часткових розрядів у вводах, θ_{HBB} — найбільшу температуру вводу [4]; θ_{HHT} — температура найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора та елементів РПН; W — вологість трансформаторного масла в баку трансформатора; $\text{tg } \delta_{MT}$ — тангенс кута діелектричних втрат (ТКВ) масляної ізоляції трансформатора; Z_k — опір струму короткого замикання.

Запишемо рівняння, які визначають перелік взаємовпливових параметрів, від яких залежить якість функціонування трансформатора:

1. Оцінка якості функціонування трансформаторних вводів:

$$ky_{BB}(k) = F\{ky_{BB}(k-1), \text{tg } \delta_{BB}(k-1), C(k-1), \Delta q(k-1), \theta(k-1)\}. \tag{7}$$

Враховуючи те, що узагальнені результати контролю ky_{BB} за станом трансформаторних вводів можна отримати від спеціалізованих контролерів [1, 4], які обробляють результати вимірювання $\text{tg } \delta_{BB}$, C , Δq , θ_{HBB} , то

$$ky_{BB}(k) = F\{ky_{BB}(k-1)\}. \tag{8}$$

2. Оцінка нагріву обмоток та вбудованих в бак трансформатора РПН

$$\theta_{\text{ННТ}}(k) = F\{\theta_{\text{ННТ}}(k-1), T(k-1), V(k-1)\}. \quad (9)$$

3. Оцінка старіння масла

$$V(k) = F\{V(k-1), \theta_{\text{ННТ}}(k-1), T(k-1), \text{tg}\delta_{\text{MT}}(k-1)\}. \quad (10)$$

4. Оцінка обмоток

$$Z_k(k) = F\{Z_k(k), V(k-1), \theta(k-1), T(k-1)\}. \quad (11)$$

4. Ці залежності отримані з відомих.

Наприклад,

$$\text{tg}\delta_{\text{MT}}(\theta_2) = \text{tg}\delta_{\text{MT}}(\theta_1) e^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}, \quad (12)$$

де температурний коефіцієнт $\beta = 0,04 \div 0,025$ для $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C} \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$, або

$$\text{tg}\delta_{\text{BB}} = \frac{1}{2\pi f C R_{i3}}, \quad (13)$$

де R_{i3} — активний опір ізоляції, частота $f = 50$ Гц. Але аналітичні вирази відповідно до (7)...(11) невідомі. А (7)...(11) відомі за результатами вибірок контрольних вимірювань, які є нечіткими входними даними і містять похибку конкретного вимірювання та особливості досліджуваного трансформатора.

Вводячи трансформатор в експлуатацію, контрольовані параметри задовольняють вимоги виробника та [13]. Кількісні показники цих параметрів вважаємо такими, що відповідають одиниці показника якості функціонування. Наприклад, після ремонту для ТКВ $\text{tg}\delta_{\text{MT п.р.}} = 0,2\%$. У разі переходу до системи відносних одиниць приймаємо, що $0,2\%$ для цього трансформатора будуть відповідати 1 в системі відносних одиниць. Якщо цей показник зростає до $\text{tg}\delta_{\text{MT макс}} = 10\%$, то у відповідності до [13], це буде відповідати 0. Якщо погіршується цей параметр до поточного значення $\text{tg}\delta_{\text{MT поточне}} = 5\%$ (параметр зростає), то пропонуємо використовувати коефіцієнт якості функціонування за параметром $\text{tg}\delta$

$$k_{\text{яф tg}} = (\text{tg}\delta_{\text{MT макс}} - \text{tg}\delta_{\text{MT поточне}}) / (\text{tg}\delta_{\text{MT макс}} - \text{tg}\delta_{\text{MT п.р.}}) = (10 - 5) / (10 - 0,2) = 0,510204 \text{ в. о.} \quad (14)$$

Так само зростання температури, вмісту вологи до максимально допустимих значень викликає зменшення показника якості до 0. Що стосується опору короткого замикання то зменшення або зростання цього параметра викликають зменшення показника якості. Наприклад, після ремонту $Z_{\text{К п.р.}} = 0,14$ в. о. У разі переходу до запропонованої системи відносних одиниць це значення $Z_{\text{К п.р.}}$ стане 1. Якщо цей показник зменшується до $Z_{\text{Кмін}} = 0,1358$ в.о., то згідно з [13] це буде відповідати 0. З погіршенням цього параметра до поточного значення $Z_{\text{К поточне}} = 0,1379$ в. о. (параметр зменшується) пропонуємо використовувати коефіцієнт якості функціонування за параметром $Z_{\text{К}}$

$$k_{\text{яфz}} = (Z_{\text{К поточне}} - Z_{\text{Кмін.}}) / (Z_{\text{К п.р.}} - Z_{\text{Кмін.}}) = (0,1379 - 0,1358) / (0,14 - 0,1) = 0,5 \text{ в. о.} \quad (15)$$

Фрагменти результатів випробовувань автотрансформатора і автотрансформаторного вводу наведені в таблицях 1, 2.

Критерієм оцінки якості функціонування трансформатора є кількісний показник $k_{\text{яф}}$, який ґрунтується на вітчизняних нормативних документах, рекомендаціях МЕК та СІПРЕ, матеріалах вітчизняних та закордонних публікацій, стандартах енергосистем; знаннях експертів (багаторічному досвіді діагностики, накопиченому спеціалістами в енергосистемах, співробітниками галузевих наукових інститутів); результатах науково-дослідних робіт ВНТУ. Цей показник є вихідним показником моделі і змінюється від 0 до 1. При введенні трансформатора в експлуатацію він приймається за одиницю. При виведенні з експлуатації, внаслідок погіршення значень параметрів, — за 0.

Фрагмент результатів випробовувань вводів АТДЦТН-200000 п/ст Козятин-330 кВ АТ-1 зав.№ 118555

Дата	tg Δ	Вміст вологи, г/т	Газовміст, %
19.12.83	0,51	8,9	0,1
10.11.84	0,83	9,6	0,28
04.10.85	1,60	9,9	0,44
.....			
18.10.93	4,10	10,9	0,93
.....			
06.07.94	Виведено в капітальний ремонт		
24.07.95	2,20	16,5	0,12
07.08.96	3,30	17,2	0,13
14.04.97	4,10	18,6	0,15
03.07.97	5,20	18,9	0,20
.....			
01.09.00	Замінено ввід на інший		

Таблиця 2

Фрагмент результатів випробовувань автотрансформатора АТДЦТН-200000 п/ст Чернівці-330 кВ АТ-1 зав. № 95413

Дата	Схема вимірювання (ВН+СН)-(НН+К)		
	tg δ, %	Коефіцієнт абсорбції $K_{аб}$	С, пФ
19.15.76	0,30	2,00	16936
20.05.76	0,40	1,48	16963
04.10.96	0,50	1,50	16972

Фрагмент кількісних значень показників якості функціонування автотрансформаторів, які відповідають результатам вимірювань під час їх випробувань та кількісних значень результатів експертних оцінок коефіцієнта якості функціонування автотрансформаторів в цілому подано в таблиці 3.

Таблиця 3

Фрагмент даних для навчання системи нечіткого висновку

$k_{y_{ВВ}}$	$K_{яф\ tg}$	$K_{яф\ \Theta\ ннт}$	$K_{яф\ w}$	$K_{яф\ Zk}$	$K_{яф\ тр}$
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0
1	1	1	0	1	0
1	1	1	0	0	0
1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0,5	0,64
1	0,5	1	0,5	0,5	0,37
1	0,5	0,5	1	1	0,46
1	0,5	0,5	1	0,5	0,37
1	0,5	0,5	0,5	1	0,37
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,33
0,5	1	1	1	1	0,85
0,5	1	1	1	0,5	0,5
0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,23
0,5	0,5	1	1	1	0,5
0,5	0,5	1	1	0,5	0,32
0,5	0,5	1	0,5	1	0,32
1	1	0,8	1	0,8	0,74
1	1	0,8	0,8	1	0,74
1	1	0,8	0,8	0,8	0,65
1	0,8	1	1	1	0,86
1	0,8	1	1	0,8	0,74
1	0,8	1	0,8	1	0,74
1	0,8	1	0,8	0,8	0,65
1	0,8	0,8	1	1	0,74

Продовження таблиці 3

KY_{BB}	$k_{яФ TG}$	$k_{яФ \theta ННТ}$	$k_{яФ W}$	$k_{яФ ZK}$	$k_{яФ TP}$
1	0,8	0,8	1	0,8	0,65
1	0,8	0,8	0,8	1	0,65
1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,58
0,8	1	1	1	1	0,94
0,8	1	1	1	0,8	0,8
0,8	1	1	0,8	1	0,8
0,8	0,8	0,8	1	0,8	0,59
0,8	0,8	0,8	0,8	1	0,59

Нейро-нечітка модель діагностування трансформатора була побудована у відповідності до таких етапів:

1. Створення навчальної вибірки.
2. Вибір архітектури нейро-нечіткої мережі.
- 3 Навчання нейронної мережі на основі наявної інформації про вплив параметрів трансформатора на його роботу.
4. Перевірка нейронної мережі на основі використання контрольного прикладу.

Для розробки моделі було сформовано таблицю навчальних даних, які передбачається отримувати від датчиків, що встановлені на трансформаторі (таблиця 3). Вхідні дані представлені у вигляді матриці розмірності $m \times (n + 1)$, в якій кількість рядків m відповідає кількості серій вимірювань, n — кількість датчиків, останній стовпець ($n + 1$) відповідає значенню вихідної змінної, а інші — значенню вхідних змінних. Об'єм вибірки для навчання: $m = 352$ для $n + 1 = 6$.

Завантаженням редактора ANFIS система нечіткого висновку для моделі трансформатора була визначена як Сугено. Були введені дані для навчання, вибрано кількість і тип функцій належності для окремих термів.

Перед навчанням гібридної мережі були задані параметри навчання, для чого було вибрано метод навчання гібридної мережі — гібридний (hybrid), який представляє собою комбінацію методу найменших квадратів і методу зворотного поширення помилки (*back propagation*). Далі було встановлено рівень помилки навчання (*Error Tolerance*) — 0, та задано кількість циклів навчання (*Epochs*) — 118. Структура отриманої мережі зображена на рисунку 2.

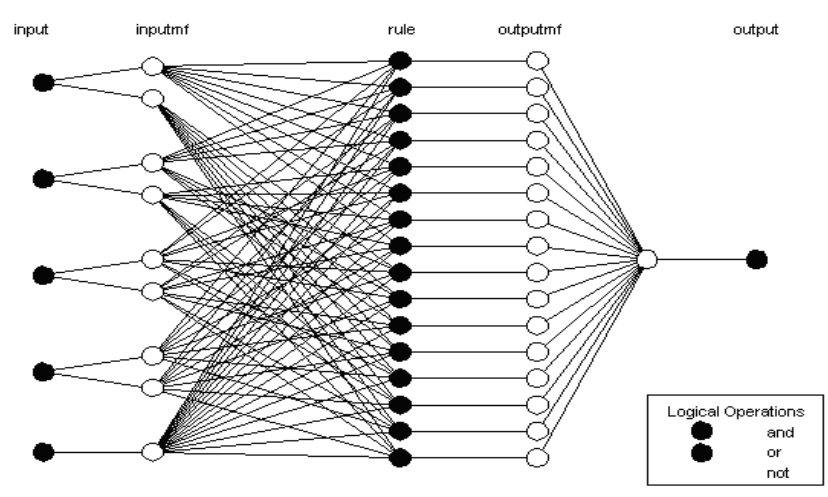


Рис. 2. Структура отриманої мережі

Слід зазначити, що від виду та структури мережі залежить, як адекватність моделі так і час її навчання.

Найменша похибка була отримана в результаті вибору для термів вхідних змінних функцій належності типу *gaussmf* [11]. Параметрам $k_{y_{BB}}$, $\text{tg } \delta_{MT}$, Θ_{HHT} , W пропонуємо по два терми з функціями належності типу *gaussmf*, а параметру Z_k — лише один терм, бо зменшення або зростання Z_k викликає зменшення вихідної величини $k_{яф.тр}$.

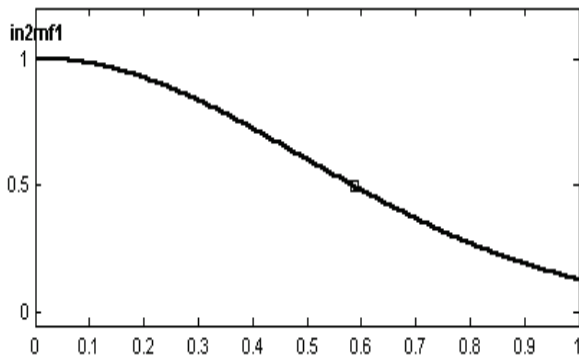


Рис. 3. Вигляд функції in2mf1

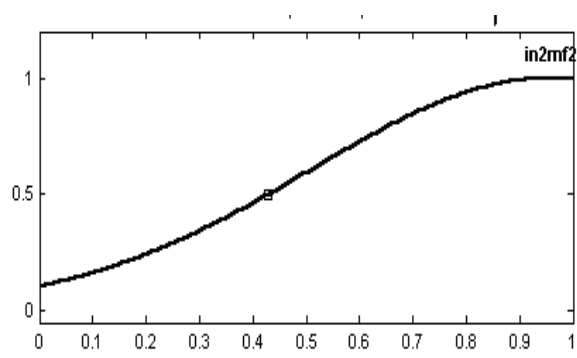


Рис. 4. Вигляд функції in2mf2

На рис. 3—4 показані функції належності для $\text{tg } \delta_{MT}$.

Згідно з рівняннями (7—13), які характеризують якість функціонування складових частин трансформатора і з встановленням нечіткої змінної $k_{яф.тр}$ складено правила нечіткої моделі. Правила відображають зміну $k_{яф.тр}$ трансформатора в точках вибірки відповідно до початкових значень.

Правила мають вигляд:

1. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf2) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf1);
2. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf2) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf2);
3. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf1) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf3);
4. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf2) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf4);
5. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf1) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf5);
6. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf2) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf6);
7. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf1) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf7);
8. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf2) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf8);
9. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf1) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf9);
10. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf2) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf10);
11. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf1) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf11);
12. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf2) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf12);
13. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf1) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf13);
14. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf2) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf14);
15. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf1) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf15);
16. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf2) and (input5 is in5mf1) then (output is out1 mf16).

де вхідні параметри трансформатора позначені відповідно: $k_{УВВ}$ — input1, $\text{tg } \delta_{MT}$ — input2, $\theta_{ННТ}$ — input3, W — input4, Z_k — input5, а вихідний параметр $k_{яф.тр}$ — output.

S та Z подібні функції належності для вхідних величин мають такі числові параметри, які забезпечують найменшу абсолютну середньоквадратичну похибку навчання 0,031039:

для $k_{УВВ}$ — параметри першої функції належності in1mf1 0,1266, — 0,25;

— параметри другої функції приналежності in1mf2 0,5348, 0,871;

для $\text{tg } \delta_{MT}$ — in2mf1 0,4594, — 0,01486; — in2mf2 0,3903, 0,9807;

для $\theta_{ННТ}$ — in3mf1 0,4936, — 0,003877; — in3mf2 0,4519, 0,9571;

для W — in4mf1 0,5951, 0,04348; — in4mf2 0,4791, 0,9128;

для Z_k — in5mf1 0,329 1.06.

Для тестування і перевірки моделі були завантажені два відповідні додаткові масиви даних, фрагмент з яких наведено в таблиці 4. Об'єми вибірок для тестування і перевірки вибрані по $m = 352$ для $n + 1 = 6$.

Таблиця 4

Фрагмент даних для перевірки моделі

$k_{УВВ}$	$k_{яф \text{ tg}}$	$k_{яф \theta_{ННТ}}$	$k_{яф W}$	$k_{яф Z k}$	$k_{яф тр}$
0	0	0,95	0	0,95	0
0	0	0,95	0	0	0
0	0	0	0,95	0,95	0
0	0	0	0,95	0	0
0	0	0	0	0,95	0
0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1,00
0,9	0,9	0,9	0,9	0,5	0,52
0,9	0,9	0,9	0,5	0,9	0,52
0,9	0,9	0,9	0,5	0,5	0,40
0,9	0,9	0,5	0,9	0,9	0,52
0,9	0,9	0,5	0,9	0,5	0,40
0,9	0,9	0,5	0,5	0,9	0,40
0,9	0,9	0,5	0,5	0,5	0,34

Проведений засобами Matlab 2001 регресійний аналіз за даними таблиці 3 дозволив отримати модель у вигляді поліному третього степеня:

$$y = e_0 x_1^1 x_5^2 + e_1 x_2^1 x_5^2 + e_2 x_3^1 x_5^2 + e_3 x_4^1 x_5^2 + e_4 x_5^3 + e_5 x_5^2 + e_6 x_1^1 x_4^1 x_5^1 + e_7 x_2^1 x_4^1 x_5^1 + e_8 x_3^1 x_4^1 x_5^1 + e_9 x_4^2 x_5^1 + e_{10} x_4^1 x_5^1 + e_{11} x_1^1 x_3^1 x_5^1 + e_{12} x_2^1 x_3^1 x_5^1 + e_{13} x_3^2 x_5^1 + e_{14} x_3^2 x_5^1 + \dots, \tag{16}$$

де $e_0 = -0,565$; $e_1 = -0,015$; $e_2 = -0,015$; $e_3 = -0,015$; $e_4 = 0,62$; $e_5 = -0,629$; $e_6 = 0,205$; $e_7 = 0,343$; $e_8 = 0,343$; $e_9 = -0,015$; $e_{10} = -0,254$; $e_{11} = 0,205$; $e_{12} = 0,343$; $e_{13} = 0,343$; $e_{14} = -0,254, \dots$

Середньоквадратичне абсолютне відхилення результатів, отриманих розрахунковим шляхом з використанням регресійної поліноміальної моделі (16) від тестових даних становить — 0,094 (похибка нейро-нечіткої моделі за цими даним — 0,04328). Середньоквадратичне відхилення розрахункових результатів за (16) від перевірочних даних моделі — 0,09 (похибка нейро-нечіткої моделі за цими даними — 0,073633).

Висновки

Отже, використання математичних моделей, що є, по суті, моделями постановки і обробки експериментальних і аналітичних досліджень, що проводяться, здатні значною мірою полегшити та спростити розв'язування задач діагностування силового обладнання, а також виключити багато труднощів, що виникають при цьому.

Впровадження запропонованої цифрової моделі визначення залишкового ресурсу силових трансформаторів в реальному масштабі часу, яка базується на теорії нейронних мереж (що мають властивість самонавчатись на вибірках результатів вимірювань основних параметрів, які визначають технічний стан трансформаторів) та нечіткої логіки, значно підвищує інформативність розра-

хунків. Використання цих моделей в алгоритмах мікропроцесорних систем дозволить покращити їх ефективність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алексеев Б. А. Основное электрооборудование в энергосистемах — М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2004. — 216 с.
2. Ванин Б. И., Неклепаев Б. Н., Чичинский М. И. и др. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ в эксплуатации // Электрические станции. — 2001. — № 9. — С. 53—58.
3. Турпан С. В. Причины повреждаемости и меры по повышению надежности мощных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов // Тезисы докладов X международной науч.-техн. конф. «Трансформаторостроение-2000» (19—21.09.2000 г.). — Запорожье: ПО ЗТВ. — С. 122—126.
4. Мокин Б. И., Грабко В. В., Динь Тхань Вьет Математические модели и информационно-измерительные системы для технической диагностики трансформаторных вводов. — Винница: «УНІВЕРСУМ — Вінниця», 1997. — 130 с.
5. А. с. № 1656435 А1 кл. 01 27/02. Влагочувствительный датчик / Баранник Е. Я., Иерусалимов М. Е., Григорьев А. В., Соколов В. В. Оpubл. 1991.
6. Lewand I., Finnan E. EffectiWe means of the control - the analysis of particles in oil of the transformer // Electrical World. — 2001. — Vol. 215. — № 1. — P. 16—18.
7. Marks J. The continuous control of the equipment and diagnostics over substation // Electrical World. — 1999. — Vol. 213. — № 6, 7, 16, 17, 20, 21.
8. The continuous control of power transformers over the tendencies, the new development, the first experience of the control of transformers 300 MVA / W. Knorr, T. Leibfried, K. Wiereck et al. // Доклад СИГРЭ 12-211. 1998.
9. Leibfried Th Continuous supervision over power transformers - intelektualnaja the monitoring system of a condition // Elektrizitaetswirtschaft. — 1998. — № 15. — S. 23, 24, 26 — 30.
10. Агамалов О. Н., Костерев Н. В., Лукаш Н. П. Методика оценки технического состояния электрооборудования в реальном времени с помощью нечетких моделей // Электричество. — 2004. — № 1. — С. 42—49.
11. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ. — Петербург. — 2003. — 736 с.
12. Агамалов О. Н. Оценка технического состояния электрооборудования в реальном масштабе времени методом нейро-нечёткой идентификации // Exponenta Pro. Математика в приложениях. — 2003. — № 2. — С. 36—44.
13. ГКД 34.20.302-2002 Норми випробовування електрообладнання. — Затв. Мінпаливенерго України 28.08.2002.
14. Гречко О. Н., Калачева Н. И. Современные тенденции в развитии системы контроля и диагностики состояния силовых трансформаторов 110—750 кВ // Известия академии наук. Энергетика. — 1996. — №5. — С. 98—111.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Надійшла до редакції 14.09.04.
Рекомендована до друку 4.01.05.

Лежнюк Петро Дем'янович — завідувач кафедри, *Рубаненко Олександр Євгенович* — доцент, Жук Ігор Анатолійович — студент.

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет