

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРІВ ЗОВНІШНЬОГО ВПЛИВУ

*В. В. Грабко, д.т.н., проф., І. В. Бальзан, асп.  
Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Україна  
E-mail: vgrabko@gmail.com*

З використанням математичного апарату теорії нечітких множин розроблено математичну модель урахування впливу зовнішніх чинників при визначенні найбільшої температури обмоток силового масляного трансформатора в задачі його діагностування.

**Ключові слова:** силовий масляний трансформатор, математична модель, ваговий коефіцієнт, нечітка логіка.

**Вступ.** Відомо, що надійність електропостачання споживачів визначається кожною складовою всього тракту передачі електроенергії. Ця надійність суттєво залежить у тому числі й від технічного стану силових масляних трансформаторів, роботоздатність яких у свою чергу визначається технічним станом обмоток, високовольних вводів, пристрою регулювання під навантаженням, системою охолодження тощо.

Так, зокрема робочий ресурс обмоток силового масляного трансформатора витрачається [1] в залежності від навантаження трансформатора, короткотривалих перевантажень, температури навколишнього середовища та інших факторів зовнішнього впливу.

**Аналіз попередніх досліджень.** У роботі [2] запропоновано мікропроцесорний пристрій, який дозволяє враховувати спрацювання робочого ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора шляхом вимірювання параметрів режиму роботи трансформатора та найвищої температури обмоток. Традиційно в якості найвищої температури обмоток силового масляного трансформатора враховується найвища температура верхніх шарів трансформаторного масла. Але очевидно, що ця температура відрізняється від реальної температури обмоток, що обумовлено додатковим впливом зовнішніх чинників, зокрема, швидкості вітру, кута прямого впливу сонячного випромінювання та ін.

Так, наприклад, під впливом повітряного потоку температура верхніх шарів трансформаторного масла, що вимірюється відповідним сенсором, буде відрізнятися від реальної температури ізоляції обмоток трансформатора в залежності від швидкості вітру.

Тому виникає задача врахування впливу зовнішніх чинників на точність визначення температури ізоляції обмоток масляного трансформатора, що в свою чергу дозволить підвищити точність у визначенні залишкового робочого ресурсу силового масляного трансформатора.

**Мета роботи.** Розробити математичну модель, за допомогою якої можна врахувати вплив зовнішніх чинників при визначенні температури обмоток силових масляних трансформаторів у задачі їх діагностування.

**Матеріал і результати дослідження.** Припустимо, що на точність визначення найбільшої темпе-

ратури обмоток силового масляного трансформатора впливають температура навколишнього середовища, швидкість вітру та кут прямого впливу сонячного випромінювання на об'єкт дослідження.

Побудуємо математичну модель, що оснований на методах нечіткої логіки [3], яка дозволила б вводити ваговий коефіцієнт для коригування значення найвищої температури обмоток силового масляного трансформатора, що визначається за допомогою сенсора температури верхніх шарів трансформаторного масла.

На першому етапі побудови моделі потрібно визначити можливий діапазон зміни контрольованих параметрів впливу зовнішніх чинників на визначення температури обмоток силового масляного трансформатора і проаналізувати їх. Вихідним показником моделі буде ваговий коефіцієнт, за допомогою якого буде визначатись відповідне значення температури.

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

**Таблиця 1 – Вхідні параметри моделі**

Параметри	Назва	Діапазон зміни	Терми
$x_1$	Температура навколишнього середовища ( $T_n$ )	$-20^{\circ}\text{C} \dots 40^{\circ}\text{C}$	низька (Н), середня (С), висока (В)
$x_2$	Швидкість вітру ( $V$ )	$0 \dots 32$ м/с	низька(Н), середня(С), висока (В)
$x_3$	Кут прямого впливу сонячного випромінювання ( $A$ )	$0^{\circ} \dots 90^{\circ}$	низький(Н), середній(С), високий (В)

Згідно з [3] задача полягає в тому, щоб кожному сполученню значень параметрів поставити у відповідність одне із значень вагового коефіцієнта  $d_j$  ( $j = \overline{1,5}$ ).

У відповідності з теорією нечітких множин [3] необхідно визначити рівні зміни вихідного показника. Ваговий коефіцієнт будемо визначати на таких рівнях (термах):  $d_1$  – дуже низький,  $d_2$  – низький,  $d_3$  – середній,  $d_4$  – високий,  $d_5$  – дуже високий.

Наведені рівні  $d_1 \dots d_5$  будемо вважати характеристиками вагового коефіцієнта, а вихідним парамет-

ром розробленої моделі буде зміна вагового коефіцієнта, з використанням якого здійснюється коригування температури об'єкта дослідження.

Структура моделі визначення вагового коефіцієнта зображена на рис. 1 у вигляді дерева логічного висновку (це граф, структура якого відображає класифікацію чинників  $\{x_1...x_n\}$ , які впливають на прогнозований чинник  $\{d\}$ ), що відповідає співвідношенню

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

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

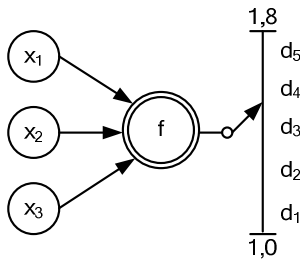


Рисунок 1 – Дерево логічного висновку

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

Таблиця 2 – Нечітка база знань

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$d$
В	Н	В	d <sub>1</sub>
В	Н	С	
В	Н	Н	
В	С	В	
В	С	С	
В	В	В	
В	С	Н	d <sub>2</sub>
В	В	С	
В	В	Н	
С	Н	В	
С	Н	С	
С	С	В	d <sub>3</sub>
С	С	С	
С	В	В	
С	С	Н	d <sub>4</sub>
С	В	С	
С	В	Н	
Н	Н	В	
Н	Н	С	
Н	С	В	d <sub>5</sub>
Н	С	С	
Н	С	Н	
Н	В	В	
Н	В	С	
Н	В	Н	

Представимо лінгвістичну оцінку вхідних чинників  $x_1-x_3$  термами у вигляді нечітких множин, використовуючи модель функцій належності (ФН) [3]

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

де  $c$  і  $\sigma$  – параметри ФН:  $c$  – координата максимуму функції;  $\sigma$  – коефіцієнт концентрації розтягування.

На основі бази знань і ФН термів, використовуючи операції  $\cdot$  (I – min) і  $\vee$  (АБО – max), складаємо нечіткі логічні рівняння, що описують цю модель. Нечіткі логічні рівняння необхідні для виконання процедури дефазифікації, тобто отримання результатів моделювання.

Нечіткі логічні рівняння моделі знаходження вагового коефіцієнта мають вигляд:

$$\mu^{d1}(d) = [(\mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_3)) \vee (\mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^C(x_3)) \vee (\mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3)) \vee (\mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3)) \vee (\mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3)))]; \quad (3)$$

$$\mu^{d2}(d) = [(\mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3)) \vee (\mu^B(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^C(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_3)) \vee (\mu^C(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^C(x_3)) \vee (\mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3)))]; \quad (4)$$

$$\mu^{d3}(d) = [(\mu^C(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3)) \vee (\mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3))]; \quad (5)$$

$$\mu^{d4}(d) = [(\mu^C(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3)) \vee (\mu^C(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^C(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3))]; \quad (6)$$

$$\mu^{d5}(d) = [(\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^H(x_3))]; \quad (7)$$

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

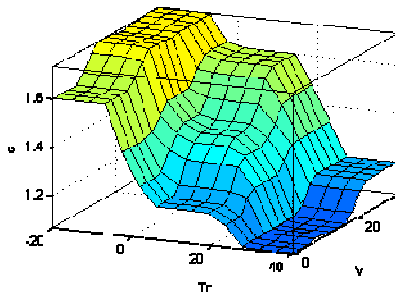
Тепер, фіксуючи конкретні вхідні параметри моделі та застосовуючи запропоновану модель, для визначення чіткого значення вагового коефіцієнта необхідно застосовувати один із відомих методів дефазифікації [3], наприклад, метод «центра ваги».

Дослідження показують, що різні чинники по-різному впливають на результат вимірювання.

Результат математичного моделювання із застосуванням компонентів теорії нечітких множин з визначенням коригувального коефіцієнта зображено на рис. 2. Моделювання здійснювалось у середовищі Matlab [4].

Реалізуючи запропоновану математичну модель, наприклад, на базі Fuzzy контролера, можна доповнити пристрій для діагностики силового масляного трансформатора, опис якого подається, наприклад, у [5] блоком для знаходження вагового коефіцієнта з метою відновлення значення температури досліджуваного об'єкта. Очевидно, що відновлення значення

а)



б)

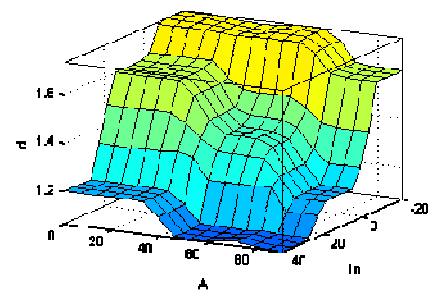


Рисунок 2 – Залежності коригувального коефіцієнта від впливу (d): а) температури навколишнього середовища ( $T_n$ ) та швидкості вітру ( $V$ ); б) температури навколишнього середовища ( $T_n$ ) та кута прямого впливу сонячного випромінювання ( $A$ )

температури об'єкта діагностування можна здійснити й на програмному рівні при обробці вхідних даних на ПЕОМ.

Слід зазначити, що цікавим є також визначення впливу на температуру ізоляції обмоток таких факторів, як наявність примусової циркуляції масла в системі охолодження трансформатора, місце розташування об'єкта досліджень тощо.

**Висновки.** З використанням математичного апарату теорії нечітких множин розроблено математичну модель урахування впливу зовнішніх чинників при визначенні найбільшої температури обмоток силового масляного трансформатора в задачі його діагностування. Переваги запропонованої математичної моделі полягають у підвищенні точності визначення реальної температури ізоляції обмоток силового трансформатора, що в свою чергу дозволяє підвищити точність у задачі визначення їх залишкового робочого ресурсу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Технический каталог. Трансформаторы. – ОАО «Укрэлектроаппарат», 2009. – 159 с.

2. Грабко В.В., Грабко В.В., Бальзан І.В. Мікропроцесорний пристрій для діагностування обмоток силового масляного трансформатора // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 28. – С. 551–552.

3. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.

4. Леоненко А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БВХ-Петербург, 2003. – 736 с.: ил.

5. Пат. 57767 України, М. кл. G 01 R 31/06. Пристрій для вимірювання спрацювання обмоток силового масляного трансформатора.: Пат. 57767 України, М. кл. G 01 R 31/06 / В.В.Грабко, В.В.Грабко, І.В.Бальзан (Україна) Укрпатент. - u201010340; Заявл. 25.08.10; Опубл. 10.03.11; бюл. № 5. – 6 с.

Стаття надійшла 06.06.2011 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕГО ВЛИЯНИЯ

*В. В. Грабко, д.т.н., проф., И. В. Бальзан, асп.*

*Винницкий национальный технический университет*

*Хмельницкое шоссе, 95, 21021, г. Винница, Украина*

*E-mail: vgrabko@gmail.com*

С использованием математического аппарата теории нечетких множеств разработана математическая модель, позволяющая учитывать влияние внешних факторов при определении самой высокой температуры обмоток силового масляного трансформатора в задаче его диагностирования.

**Ключевые слова:** силовой масляный трансформатор, математическая модель, весовой коэффициент, нечеткая логика.

## MATHEMATICAL MODEL FOR DIAGNOSING OF WINDINGS OF THE POWER OIL TRANSFORMER WITH CONSIDERATION OF THE FACTORS OF EXTERNAL ACTION

*V. Grabko, D.Sc. (Eng.), Prof., I. Balzan, post-grad.*

*Vinnitsia National Technical University*

*Khmelnytske shose, 95, 21021, Vinnitsa, Ukraine*

*E-mail: vgrabko@gmail.com*

With the use of mathematical apparatus of fuzzy logic there was developed a mathematical model. It allows to consider influence of external factors at determination of the heat of windings of the power oil transformer in a problem of its diagnosing.

**Key words:** power transformer oil, the mathematical model, the weighting factor, fuzzy logic.