

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.315.615.2

О.Р. Проценко, Є.О. Троценко

РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА ВОЛОГОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

This article outlines the method of calculating the sensor coefficients based on the sensory element of the insulating paper and highlighting features of this calculation. The sensitive element of the sensor belongs to conductometric type of the transducer “moisture–resistance”. The sensor is designed for use in the automated control moisture in transformer oil power transformers and reactors. To calculate the empirical coefficients that define the relation between the resistance of the sensing element sensor, humidity and temperature of transformer oil, use of least-squares procedure has been proposed. We approximate measurements results of electrical resistance sensor as an exponential function of two variables – temperature and humidity oil. Using the proposed method, we calculate the coefficients of samples and humidity sensor. The calculations reveal that measurement of the temperature of transformer oil and impedance sensing element can help determine moisture content of transformer oil in which it is located. We outline the results and recommend how main characteristics of the humidity sensor of this type of transformer oil can be calculated. Hence it can be used as an algorithm for automated humidity control transformer oil of power equipment.

Вступ

Одним із основних показників якості трансформаторних масел, що застосовуються в маслonaповненому електрообладнанні на електроенергетичних підприємствах, є їх вологовміст, який визначається як відношення маси води до маси масла. Перевищення встановленого існуючими нормами [1] припустимого значення в 0,002 % маси (або 20,0 г/т) свідчить про наявність проблем і зростання ризику відмови електрообладнання. Контролювати зволоження трансформаторного масла можна через аналіз відібраних проб або за допомогою відповідних датчиків вологості.

На відміну від першого, другий метод не є лабораторним і тому може бути покладений в основу автоматизованих систем безперервного моніторингу вологості трансформаторного масла. Необхідною умовою його застосування є забезпечення безперервної циркуляції трансформаторного масла через датчик.

В основу таких датчиків можуть бути покладені різноманітні принципи перетворення фізичних величин, наприклад, це можуть бути перетворення “вологість–ємність” [2] або “вологість–опір” [3]. Розрахунок основних характеристик таких датчиків у кожному окремому випадку має свої особливості та, відповідно, потребує встановлення математичної залежності тієї чи іншої величини (електричної ємності або електричного опору) від зміни вологовмісту трансформаторного масла.

У [3] було встановлено, що основними характеристиками датчика вологості трансформа-

торного масла, в якому як чутливий елемент використовується просочений у трансформаторному маслі електроізоляційний папір, виступають залежності його опору від вологості та температури трансформаторного масла.

Також у [3] було доведено, що якщо напруженість електричного поля в електроізоляційному папері при вимірюванні його опору підтримується незмінною, то опір чутливого елемента датчика можна оцінити за формулою

$$R = R_0 \cdot \exp(\alpha \cdot \theta + \beta \cdot \varphi), \quad (1)$$

де θ – температура трансформаторного масла, φ – відносна вологість трансформаторного масла, R_0 , α , β – коефіцієнти, які мають бути визначені експериментально, оскільки вони залежать від конструкції чутливого елемента датчика, його геометричних розмірів і типу трансформаторного масла, в якому він буде розміщений. Ці коефіцієнти є індивідуальними для кожного датчика. На сьогодні загальноприйнятого порядку їх розрахунку немає.

Постановка задачі

Метою роботи є формулювання порядку розрахунку основних характеристик датчика вологості ізоляційного трансформаторного масла, в якому реалізований принцип кондуктометричного перетворювача типу “вологість–опір”, та висвітлення особливостей цього розрахунку.

Використання методу найменших квадратів для визначення основних характеристик датчика вологості трансформаторного масла

Порівняння різних методів обчислень [4] показує, що для розв'язання поставленої задачі найбільш раціональним є застосування методу найменших квадратів [4].

Розглянемо випадок, коли відомі результати n вимірювань опору $R = R_i$ за температур $\theta = \theta_i$ і вологостей $\varphi = \varphi_i$ (при $i = 1, 2, \dots, n$). Для цього залежність (1) запишемо у вигляді

$$R_i = R_0 \cdot \exp(\alpha \cdot \theta_i + \beta \cdot \varphi_i). \quad (2)$$

Логарифмуванням перетворимо рівняння (2) в лінійну форму:

$$\ln R_i = \ln(R_0 \cdot \exp(\alpha \cdot \theta_i + \beta \cdot \varphi_i)). \quad (3)$$

Після спрощення виразу (3) маємо

$$\ln R_i = \ln R_0 + \alpha \cdot \theta_i + \beta \cdot \varphi_i.$$

У цьому випадку згідно з методом найменших квадратів [4] необхідно, знаючи експериментальні дані θ_i , φ_i і $\ln R_i$, знайти такі невідомі параметри $\ln R_0$, α і β , щоб сума

$$S = \sum_{i=1}^n (\ln R_i - (\ln R_0 + \alpha \cdot \theta_i + \beta \cdot \varphi_i))^2 \quad (4)$$

була мінімальною.

Для розв'язання задачі мінімізації виразу (4) необхідно знайти частинні похідні по всіх трьох невідомих $\ln R_0$, α і β та прирівняти їх до нуля [4]. Отримані рівняння утворюють так звану систему нормальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial \ln R_0} = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial \alpha} = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial \beta} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Підставивши (4) у (5) та виконавши диференціювання, отримаємо

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (2 \cdot (\ln R_0 + \alpha \cdot \theta_i + \beta \cdot \varphi_i - \ln R_i)) = 0; \\ \sum_{i=1}^n (2 \theta_i \cdot (\ln R_0 + \alpha \cdot \theta_i + \beta \cdot \varphi_i - \ln R_i)) = 0; \\ \sum_{i=1}^n (2 \varphi_i \cdot (\ln R_0 + \alpha \cdot \theta_i + \beta \cdot \varphi_i - \ln R_i)) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Після всіх перетворень системи рівнянь (6) і з урахуванням, що $\sum_{i=1}^n \ln R_0 = \ln R_0 \cdot n$, отримуємо систему з трьох лінійних алгебричних рівнянь з невідомими $\ln R_0$, α і β :

$$\begin{cases} \ln R_0 \cdot n + \alpha \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i + \beta \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i = \sum_{i=1}^n \ln R_i; \\ \ln R_0 \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i + \alpha \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i^2 + \beta \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \theta_i = \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \theta_i; \\ \ln R_0 \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i + \alpha \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \theta_i + \beta \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 = \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \varphi_i. \end{cases} \quad (7)$$

Наведемо розв'язок цієї системи рівнянь повністю.

Розв'язання системи нормальних рівнянь

Для розв'язання системи нормальних рівнянь (7) за допомогою детермінантів запишемо її в матричній формі:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B},$$

де \mathbf{A} – основна матриця системи, \mathbf{X} – матриця-стовпець невідомих; \mathbf{B} – матриця-стовпець вільних членів:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n \theta_i & \sum_{i=1}^n \varphi_i \\ \sum_{i=1}^n \theta_i & \sum_{i=1}^n \theta_i^2 & \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \theta_i \\ \sum_{i=1}^n \varphi_i & \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \theta_i & \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \ln R_0 \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \ln R_i \\ \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \theta_i \\ \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \varphi_i \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Тоді, згідно з правилом Крамера [5], невідомі R_0 , α і β обчислюються за такими формулами:

$$\ln R_0 = \frac{\det A_1}{\det A}, \quad (9)$$

$$R_0 = \exp\left(\frac{\det A_1}{\det A}\right), \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\det A_2}{\det A}, \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\det A_3}{\det A}, \quad (12)$$

причому (10) отримують із (9). У формулах (9)–(12) $\det A_1$, $\det A_2$, $\det A_3$ – детермінанти, отримані із $\det A$ заміною i -го стовпця ($i = 1, 2, 3$) стовпцем вільних членів (8):

$$\begin{aligned} \det A &= 2 \sum_{i=1}^n \varphi_i \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i - n \left(\sum_{i=1}^n \varphi_i \theta_i \right)^2 - \\ &- \sum_{i=1}^n \theta_i^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \varphi_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \theta_i \right)^2 + n \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i^2; \\ \det A_1 &= \\ &= \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i - \left(\sum_{i=1}^n \varphi_i \theta_i \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \ln R_i + \\ &+ \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i + \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i^2 - \\ &- \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i^2 - \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i^2; \\ \det A_2 &= n \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 - \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 - \\ &- \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \theta_i \cdot \left(\sum_{i=1}^n \varphi_i \right)^2 + \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i + \\ &+ \sum_{i=1}^n \varphi_i \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i - n \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \theta_i; \\ \det A_3 &= \\ &= n \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i^2 - \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i^2 - \\ &- \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \varphi_i \cdot \left(\sum_{i=1}^n \theta_i \right)^2 + \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i + \\ &+ \sum_{i=1}^n \varphi_i \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i - n \sum_{i=1}^n \ln R_i \cdot \theta_i \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i \theta_i. \end{aligned}$$

Результати експериментальних досліджень і їх обробка

На кафедрі техніки та електрофізики високих напруг НТУУ “КПІ” для датчика з чутливим елементом діаметром 22 см і довжиною 30 см при товщині шару паперу 0,012 см експериментально було отримано значення опору чутливого елемента R за різних значень температури θ й абсолютного вологовмісту W трансформаторного масла Т-1500 (табл. 1).

Таблиця 1. Експериментальні значення опору R чутливого елемента датчика вологості

$\theta, ^\circ\text{C}$	$R, \text{МОм}$	
	$W = 6 \text{ г/т}$	$W = 30 \text{ г/т}$
20	–	40
25	16000	–
42	3800	–

У тому вигляді, в якому експериментальні дані наведені в табл. 1, вони не придатні для безпосереднього розрахунку за формулами (10)–(12), тому потребують упорядкування до такого вигляду, як це показано в табл. 2.

Таблиця 2. Упорядковані вхідні дані для можливості розрахунку за формулами (10)–(12)

i	$R_i, \text{МОм}$	$\theta_i, ^\circ\text{C}$	$W_i, \text{г/т}$	$\varphi_i, \%$
1	40	20	30	35,54
2	16000	25	6	5,79
3	3800	42	6	3,02

У табл. 2 абсолютний вологовміст трансформаторного масла W_i було перераховано (з урахуванням температури θ_i) у відносну вологість φ_i таким чином [3]: спочатку було розраховано граничний вологовміст масла W_i^* (г/т) при його насиченні за формулою

$$W_i^* = W_{40} \cdot \exp\left(\frac{B}{313} - \frac{B}{T_i}\right), \quad (13)$$

де W_{40} – граничний вологовміст за температурі масла $\theta_i = 40 ^\circ\text{C}$; $T_i = 273 + \theta_i$ К – абсолютна температура.

Експериментально встановлено [6], що для масел ТКп, Т-750, Т-1500 та ГК: $B = 3598$ К, а W_{40} має різні значення для різних типів масла

й дорівнює 260 (для ТКп); 284 (для Т-750); 185 (для Т-1500); 148 (для ГК).

Потім абсолютний вологовміст W було перераховано у відносну вологість φ трансформаторного масла за формулою

$$\varphi_i = \frac{W_i}{W_i^*} \cdot 100 \% \quad (14)$$

й результати занесено в табл. 2.

Потім, підставивши R_i , θ_i і φ_i (див. табл. 2) у вирази (10)–(12), встановили, що для трансформаторного масла Т-1500 основні характеристики датчика вологості трансформаторного масла становлять $R_0 = 1,178 \cdot 10^6$ МОм; $\alpha = -1,207 \cdot 10^{-1}$ (1/°C); $\beta = -2,216 \cdot 10^{-1}$ (1/%) . Далі ці емпіричні коефіцієнти, своєю чергою, необхідно підставити у формулу (1) для можливості подальшого аналізу залежності опору чутливого елемента датчика від температури й вологості трансформаторного масла.

Таблиця 3. Оцінка за формулою (1) опору R чутливого елемента датчика залежно від температури θ й абсолютного W вологовмісту трансформаторного масла

θ , °C	R , МОм					
	$W = 5$ г/г	$W = 10$ г/г	$W = 15$ г/г	$W = 20$ г/г	$W = 25$ г/г	$W = 30$ г/г
20	28366	7632	2054	553	149	40
25	19811	6807	2339	803	276	95
30	13143	5477	2282	951	396	165
35	8381	4072	1978	961	467	227
40	5184	2848	1564	859	472	259
45	3131	1899	1152	699	424	257
50	1856	1220	802	527	346	228
55	1084	761	534	375	263	184
60	626	463	343	254	188	139
65	358	277	214	166	128	99
70	203	163	131	105	84	68

Результати розрахунків, які наведені в табл. 3, показують, що за фіксованої температури опір R чутливого елемента датчика монотонно зменшується зі збільшенням вологості трансформаторного масла. Отже, заміряючи температуру трансформаторного масла й опір чутливого елемента датчика, можна однозначно оцінити вологість трансформаторного масла.

Для уточнення емпіричних коефіцієнтів R_0 , α і β , які входять у формулу (1), необхідно використати більшу кількість контрольних

вимірювань R_i , θ_i , φ_i та повторно застосувати метод найменших квадратів.

Рекомендований порядок розрахунку основних характеристик датчика вологості трансформаторного масла

Узагальнюючи отримані вище результати та використовуючи основні положення [3], можна запропонувати порядок розрахунку основних характеристик датчика вологості трансформаторного масла.

1. Проводять натурні вимірювання R_i , θ_i та W_i , де $i = 1, 2, \dots, n$. Бажано, щоб кількість вимірювань була не менше 3 та не більше 15 (тобто $3 \leq n \leq 15$).

2. Якщо тип трансформаторного масла не відрізняється від ТКп, Т-750, Т-1500 або ГК, то абсолютний вологовміст трансформаторного масла W_i перераховують у відносну вологість φ_i за формулами (13) і (14). У випадку, якщо тип масла відрізняється від ТКп, Т-750, Т-1500 та ГК, то для визначення коефіцієнтів W_{40} і B у формулі (13) необхідно два значення граничного вологовмісту W_1^* і W_2^* цього масла за двох температур θ_1 і θ_2 в діапазоні 20–80 °C підставити у формули

$$B = \frac{(273 + \theta_1) \cdot (273 + \theta_2)}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \ln \frac{W_1^*}{W_2^*},$$

$$W_{40} = \frac{W_1^*}{\exp\left(\frac{B}{313} - \frac{B}{273 + \theta_1}\right)}.$$

Якщо ж W_1^* і W_2^* невідомі, то покладають, що $B = 3598$ К, а $W_{40} = 284$ г/г, як для масла Т-750.

3. Підставляють отримані значення R_i , θ_i і φ_i у вирази (10)–(12) і знаходять невідомі емпіричні коефіцієнти R_0 , α , β . За відсутності надійних експериментальних даних можна в першому наближенні покласти, що зазначені коефіцієнти дорівнюють отриманим у цій роботі: $R_0 = 1,178 \cdot 10^6$ МОм; $\alpha = -1,207 \cdot 10^{-1}$ (1/°C); $\beta = -2,216 \cdot 10^{-1}$ (1/%) . У подальшому ці коефіцієнти необхідно уточнити на підставі нових

експериментальних даних, отриманих у процесі експлуатації датчика на об'єкті контролю.

4. Отримані значення R_0 , α і β підставляють у формулу (2) для розрахунку відносної вологості φ за відомими значеннями опору R чутливого елемента датчика й температури θ , використовуючи таку формулу:

$$\varphi_i = \frac{(\ln R - \ln R_0 - \alpha \cdot \theta_i)}{\beta}.$$

Обернена задача – визначення опору R чутливого елемента датчика, якщо відомі температура θ та відносна вологість φ трансформаторного масла, – застосовується для калібрування датчика на об'єкті контролю з використанням формули (1).

Абсолютний вологовміст W_i можна розрахувати за формулою

$$W_i = \frac{W_i^* \cdot \varphi_i}{100},$$

яка впливає безпосередньо з (14).

Висновки

За допомогою методу найменших квадратів визначено емпіричні коефіцієнти (1), що є

основними характеристиками датчика вологості трансформаторного масла, в основі якого є чутливий елемент з електроізоляційного паперу, що реалізує перетворення “вологість–опір”. Запропоновано порядок і підкреслено особливості проведення такого розрахунку.

Продемонстрована в роботі можливість застосування методу найменших квадратів за невеликої кількості вхідних експериментальних даних вигідно вирізняє його, з огляду на тривалий і витратний характер натурних вимірювань у лабораторних умовах.

Збільшення кількості експериментальних даних дає можливість уточнити отримані коефіцієнти R_0 , α , β датчика, використовуючи той же самий порядок розрахунку, який запропонований у дійсній роботі, й підвищити тим самим точність визначення вологості трансформаторного масла. Причому процес такого уточнення може проводитись протягом усього часу експлуатації датчика на енергетичному обладнанні.

Метою подальших досліджень є аналіз динамічних характеристик чутливого елемента датчика на основі електроізоляційного паперу, обумовлених перебігом абсорбційних процесів у ізоляційному середовищі типу “масло–папір”.

1. *СОУ–Н ЕЕ 43.101:2009*. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості. – К.: КВИЦ, 2009. – 152 с.
2. *Осадчук О.В., Звягін О.С., Євсєєва М.В.* Ємнісний сенсор для вимірювання вологості нафтопродуктів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – № 2 – С. 40–43.
3. *Проценко О.Р., Троценко Є.О.* Оцінка можливості використання електроізоляційного паперу як чутливого елемента датчика вологості трансформаторного масла // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2013. – № 2. – С. 34–38.
4. *Львовский Е.Н.* Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1988. – 239 с.
5. *Основные математические формулы: Справочник / В.Т. Воднев, А.Ф. Наумович, Н.Ф. Наумович; Под ред. Ю.С. Богданова.* – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн.: Высш. школа, 1988. – 269 с.
6. *Соколов В.В.* Разработка методов повышения эффективности диагностики состояния изоляции мощных силовых трансформаторов высокого напряжения: Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.12. – К.: НТУУ “КПІ”, 1982. – 285 с.