

## ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У СИСТЕМАХ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

*З метою підвищення рівня діагностування силових трансформаторів розроблено математичні моделі аналізу діагностичних параметрів температури та вологості масла, які передбачають параметричну ідентифікацію теплової моделі та моделі вологовмісту методом рою частинок. На основі запропонованого підходу розроблено відповідні алгоритми та програмне забезпечення. Перевірку працездатності запропонованих математичних моделей здійснено на основі аналізу результатів, отриманих після обробки експериментальних даних, що були отримані на діючому силовому трансформаторі.*

**Ключові слова:** силовий трансформатор, діагностичний параметр, температура масла у верхніх шарах, вологовміст масла, параметрична ідентифікація.

### Вступ.

Основною задачею системи діагностування силових трансформаторів є визначення поточного стану за всіма доступними діагностичними параметрами. Сучасні апаратні засоби дають змогу автоматично вимірювати основну частину поточних діагностичних параметрів під робочою напругою завдяки використанню встановлених безпосередньо на обладнанні датчиків, з'єднаних цифровими або аналоговими лініями зв'язку з блоками збору та обробки інформації. Застосування методів постійного контролю на робочому обладнанні дає змогу виявляти навіть дефекти, які швидко розвиваються, з періодом розвитку від декількох хвилин.

Для оцінювання технічного стану силових трансформаторів у робочих режимах зручним є метод порівняння поточних значень діагностичних параметрів з базовими даними [1]. Вимірювання діагностичних параметрів відбувається з певною дискретизацією за весь час роботи в різних режимах. Проте нормовані значення параметрів відповідають тільки певним встановленим режимам випробувань обладнання (наприклад, режим номінального навантаження, неробочого ходу) і не можуть використовуватися для порівняння з параметрами, виміряними за інших режимів роботи (наприклад, при іншому навантаженні трансформатора). Необхідно визначати базові значення діагностичних параметрів як функції часу та інших вхідних змінних, що характеризують поточний режим роботи трансформатора.

**Мета та завдання.** Моделі для визначення базових значень діагностичних параметрів у загальному випадку містять певний набір коефіцієнтів (параметрів)  $\Lambda$ . Ці коефіцієнти визначають поведінку моделі на різних вхідних даних і залежать від характеристик конкретного трансформатора. Безпосереднє визначення цих коефіцієнтів за допомогою лабораторних вимірювань чи експериментальних досліджень для кожного трансформатора не завжди доцільне. Натомість пропонується застосувати метод параметричної ідентифікації моделей з використанням даних, вимірянних за нормального режиму роботи обладнання, коли відсутність дефектів підтверджена нещодавнім комплексним обстеженням чи капітальним ремонтом.

Основна задача параметричної ідентифікації моделей полягає у пошуку з простору рішень  $\Omega$  множини коефіцієнтів моделі  $[\lambda]_{opt}$ , яка для типового режиму навантаження трансформатора мінімізує сумарну похибку між реалізаціями вимірянних та змодельованих значень діагностичних параметрів [2]. Ця задача може розглядатися як мінімізація без обмежень для цільової функції, визначеної у вигляді зваженої суми похибок оцінок:

$$\begin{cases} \min_{\lambda \in \Omega} f([\lambda]); \\ f([\lambda]) = \sum_i w_i (x_{i,P} - x_{i,M}([\mathbf{u}]_i, [\lambda]))^2. \end{cases} \quad (1)$$

Для розв'язання оптимізаційної задачі вибрано метод рою частинок [3], який оптимізує функцію, підтримуючи популяцію можливих розв'язків (так званих «частинок») і переміщаючи ці частинки в просторі розв'язків. Кожній частинці в рою відповідають її координати  $[\lambda]_i$ , швидкість  $[v]_i$  та краще з

відомих положень цієї частинки  $[p]_i$  з простору рішень  $\Omega$ . Переміщення підпорядковуються принципу найкращого знайденого в цьому просторі положення, що постійно змінюється при знаходженні частинками вигідніших положень.

Побудуємо моделі аналізу, що передбачають параметричну ідентифікацію, для кожного з первинних діагностичних параметрів стану трансформатора.

**Матеріал і результати досліджень.** Диференціальне рівняння для процесу зміни температури у верхніх шарах масла має такий вигляд [4]:

$$\Delta\theta_o = k_{11}\tau_0 \frac{d\theta_o}{dt} + \theta_o - \theta_a, \quad (2)$$

де  $\theta_o$  – температура масла;  $\theta_a$  – температура навколишнього середовища;  $\Delta\theta_o$  – перевищення температури масла над температурою навколишнього середовища;  $\tau_0$  – постійна часу нагрівання масла;  $k_{11}$  – коефіцієнт, який залежить від потужності та типу охолодження трансформатора.

Це рівняння не може бути розв'язане аналітично у вигляді елементарних функцій, тому безпосередньо використовувати його для визначення базових значень діагностичного параметра недоцільно. У стандарті [4] запропоновано використовувати різницеву форму запису рівняння (2), яка має такий вигляд:

$$D\theta_o = \frac{Dt}{k_{11}\tau_0} \left[ \Delta\theta_{or} \left( \frac{1+RK^2}{1+R} \right)^n - (\theta_o - \theta_a) \right], \quad (3)$$

де оператор « $D$ » означає зміну відповідної величини за час  $Dt$ .

На кожному інтервалі часу величина  $D\theta_o$  розраховується на основі  $(n-1)$ -го значення за формулою:

$$\theta_{o(n)} = \theta_{o(n-1)} + D\theta_{o(n-1)}. \quad (4)$$

Апаратна частина системи діагностування може включати датчики для вимірювання температури масла в різних частинах баку, а в деяких випадках і температури його найбільш нагрітої точки обмотки. Проте, зважаючи на економічну доцільність та технічну можливість, найчастіше виконують вимірювання тільки температури масла у верхніх шарах.

Виходячи з рівняння (4) визначаємо відносно відхилення виміряного значення температури масла  $\theta_{o.i.P}$  від базового  $\theta_{o.i.M}$ , отриманого за допомогою імітаційного моделювання:

$$v_{i,\theta} = \frac{\theta_{o.i.P} - \theta_{o.i.M}}{\theta_{o.i.M}}. \quad (5)$$

Множину коефіцієнтів моделі, які підлягають параметричній ідентифікації представимо такими величинами: перевищення температури масла за номінального навантаження  $\Delta\theta_{or}$ ; відношення втрат короткого замикання до втрат неробочого ходу  $R$ ; постійна часу масла  $\tau_0$ ; показник степеня масла  $\eta$ , тобто:

$$\lambda_\theta = \{\tau_0 \quad \Delta\theta_{or} \quad R \quad \eta\}. \quad (6)$$

Цільова функція набуде такого вигляду:

$$f([\lambda]) = \sum_i w_i (\theta_{o.i.P} - \theta_{o.i.M})^2 \quad (7)$$

де в якості вагових коефіцієнтів  $w_i$  приймемо значення коефіцієнта завантаження  $K_i$  на  $i$ -му інтервалі.

Для аналізу ефективності процедури параметричної ідентифікації виконано порівняння відмінностей результатів імітаційного моделювання температури масла від вимірних значень для трансформаторів з різними тепловими характеристиками і типами охолодження.

Перший дослід виконано для трансформатора з типом охолодження ONAN. На основі параметричної ідентифікації з використанням даних, вимірних за нормального режиму роботи трансформатора, визначено уточнені коефіцієнти, які входять у множину  $\lambda_\theta$ . Отримані значення та їх відмінності від типових наведено в табл. 1.

Використання уточнених значень теплових характеристик дало змогу для даного трансформатора зменшити на 3,4% середньоквадратичне відхилення вимірних значень від змодельованих.

Таблиця 1 – Теплові характеристики трансформатора з типом охолодження ONAN

Назва характеристики	Типове значення	Розраховане значення	Відносне відхилення, %
Номінальне перевищення температури масла у верхніх шарах $\Delta\theta_{or}, ^\circ\text{C}$	52	54,67	-5,1
Відношення втрат $R$	6	5,33	11,2
Показник степеня масла, $\eta$	0.8	0,91	-13,8
Постійна часу $\tau_0, \text{хв}$	210	183,1	12,8

Крім температури масла у верхніх шарах, одним з найважливіших діагностичних параметрів, які доцільно контролювати для трансформаторів середньої потужності, є вологовміст масла та целюлозно-паперової ізоляції [5]. Наявність вологи в ізоляційній системі силового масляного трансформатора призводить до старіння його ізоляції, зменшуючи її електричну і механічну міцність. У загальному випадку вважається, що збільшення вмісту вологи в два рази, зменшує ресурс ізоляції вдвічі [6], а швидкість термічного зносу пропорційна до вмісту вологи [7]. Наявність води в маслі також збільшує ймовірність виникнення бульбашок під час процесу десорбції вологи з целюлози.

Допустимі значення вмісту вологи, які не призводять до прискореного старіння ізоляції та не викликають аварійного виходу трансформатора з ладу, визначаються відповідно до нормативних документів. Згідно з IEEE Std 62 – 1995 [8] вміст вологи в твердій ізоляції ранжується таким чином: суха ізоляція 0 – 2%; волога ізоляція 2 – 4% ; дуже волога ізоляція – більше 4,5%. В більш сучасному стандарті IEEE Std C57.106 – 2002 [9] допустимий рівень вологи визначається залежно від вмісту води в маслі, враховуючи припущення про стабільність температури і рівноважний стан процесів передачі вологи між папером і маслом.

Визначення вмісту вологи в паперовій ізоляції відбувається за допомогою спеціальних кривих рівноваги процесів обміну вологи між папером та маслом. Застосування цих кривих передбачає, що трансформатор знаходиться в тепловій рівновазі.

Для отримання базових значень діагностичного параметра вологовмісту пропонується використовувати модель, описану в [10]. Рівняння процесу зміни вологовмісту мають такий вигляд:

- маслонасос ввімкнений

$$M_m(t) = k_{1hf} M_m(t-1) + k_{2hf} M_m(t-2) + k_{3hf} M_{oil-ss}(t) + k_{4hf} M_{oil-ss}(t-1); \quad (8)$$

- природне охолодження

$$M_m(t) = k_{1hm} M_m(t-1) + k_{2hm} M_m(t-2) + k_{3hm} M_m(t-3) + k_{4hm} M_{oil-ss}(t) + k_{5hm} M_{oil-ss}(t-1). \quad (9)$$

У рівняннях (8) та (9) прийняті такі позначення:  $M_m(t)$  – вміст вологи в маслі в певний момент часу;  $M_{oil-ss}(t)$  – рівноважний вміст вологи в маслі за стаціонарного стану, знайдений за відповідними кривими;  $k_{i,hf}$  та  $k_{j,hf}$  – коефіцієнти, що характеризують конкретний трансформатор та відповідають за точне настроювання моделі.

Для знаходження величини  $M_{oil-ss}(t)$  за кривими рівноважного вологовмісту необхідно на початковому етапі роботи з даними визначити величину вмісту вологи в паперовій ізоляції за стаціонарного стану. Для цього запропоновано такий алгоритм.

За обраного в якості базового режиму реєструємо масив записів розміру  $N$  величин вологовмісту  $M_{m,i}$  та температури  $\theta_{o,i}$ .

Задаємося сукупністю  $l$  можливих значень вмісту вологи в папері:

$$M_{pap-ss,k} = \{M_{pap-ss,\min} : M_{pap-ss,\max}\}, k = 1, 2, \dots, l.$$

Для кожного зі значення  $M_{pap-ss,k}$  визначаємо за допомогою кривих рівноважного вологовмісту значення  $M_{oil-ss,i}$  як функцію температури масла  $\theta_{o,i}$ :

$$M_{oil-ss,i,k} = f(\theta_{o,i}, M_{pap-ss,k}). \quad (10)$$

Отримуємо сукупність  $l$  реалізацій вологовмісту в маслі за різних можливих значень вологовмісту в паперовій ізоляції.

Для кожної з реалізацій обчислюємо середньоквадратичну похибку від масиву вимірних значень:

$$\varepsilon_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_{m,i} - M_{oil-ss,i})^2}, \quad k = 1, 2, \dots, l. \quad (11)$$

В якості дійсного значення вологовмісту паперової ізоляції вибираємо значення, для якого виконується умова

$$M_{pap-ss,p} : p, \varepsilon_p = \min_{k=1,2,\dots,l} \varepsilon_k. \quad (12)$$

За великих значень середньоквадратичної похибки  $\varepsilon_p$  повторюємо обчислення для нової сукупності значень вологовмісту в папері, близьких до  $M_{pap-ss,p}$  :

$$M_{pap-ss,k} = \{M_{pap-ss,p} - \Delta M_{pap-ss} : M_{pap-ss,p} + \Delta M_{pap-ss}\}, \quad k = 1, 2, \dots, l. \quad (13)$$

Під час реалізації цього алгоритму за допомогою комп'ютерної техніки виникає проблема використання кривих рівноважного вологовмісту, оскільки в літературі вони наводяться тільки в графічному вигляді. Для її вирішення була здійснена їх оцифровка у вигляді таблиці значень з подальшою побудовою двовимірної регресивної моделі  $M_{pap} = f(\theta_o, M_m)$ .

В якості регресивної моделі була вибрана сплайн-інтерполяція тонкими поверхнями (thin-plate spline interpolation), оскільки її використання дало змогу отримати найкращі результати згладжування і найменшу середньоквадратичну похибку. Результати обчислення оптимальних значень згладжувального сплайна  $f$  показані на рис. унок 1.

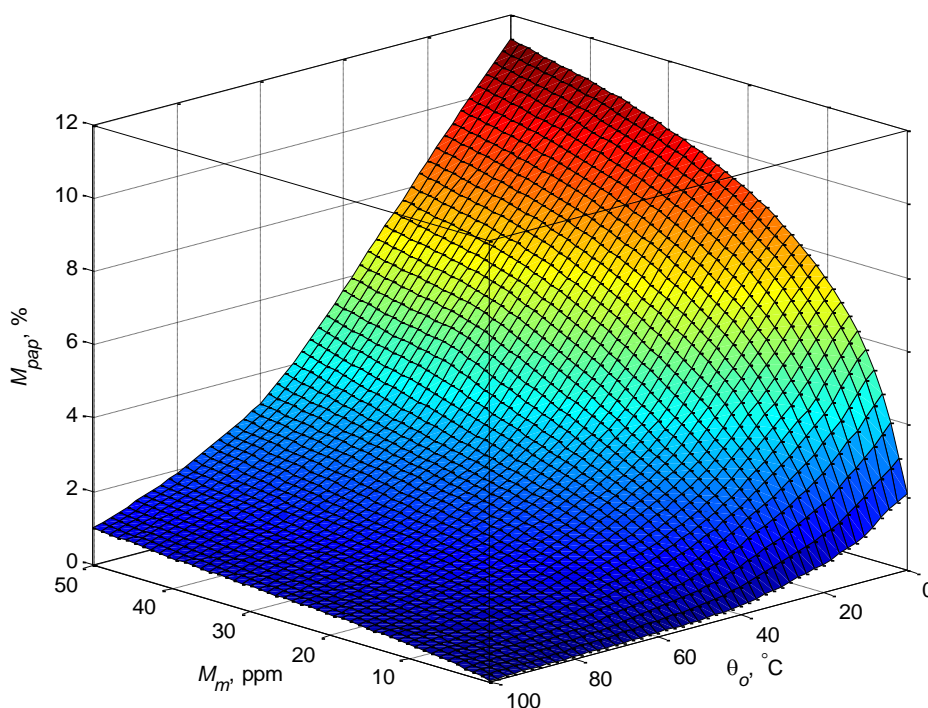


Рисунок 1 – Вміст води в паперовій ізоляції

Множину коефіцієнтів моделі, які підлягають параметричній ідентифікації представимо значеннями  $k_{i,hn}$  та  $k_{i,hf}$ . Тобто для трансформатора з природною циркуляцією масла

$$\lambda_{M_m} = \{k_{i,hn}\}, \quad (14)$$

а для примусової циркуляції масла

$$\lambda_{M_m} = \{k_{i,hf}\}. \quad (15)$$

Цільова функція набуде вигляду

$$f([\lambda]) = \sum_i w_i (M_{m.i.P} - M_{m.i.M})^2 \quad (16)$$

де в якості вагових коефіцієнтів  $w_i$  приймемо відношення виміряної температури масла до номінальної на  $i$ -му інтервалі:

$$w_i = \frac{\theta_o}{\theta_a + \Delta\theta_{or}} \quad (17)$$

Отже, використовуючи наведені вище рівняння можна отримати теоретичне значення вологовмісту масла. Для кожного інтервалу дискретизації визначається відносна величина відмінності від теоретичного значення:

$$v_{i.M} = \frac{M_{m.i.P} - M_{m.i.M}}{M_{m.i.M}}, \quad (18)$$

де  $M_{m.i.M}$  – змодельоване значення вологовмісту масла, знайдене за рівнянням (8) або (9), відповідно до режиму роботи системи охолодження;  $M_{m.i.P}$  – значення вологовмісту, виміряне відповідним датчиком.

Для перевірки працездатності запропонованих математичних моделей використано експериментальні дані, отримані на діючому силовому трансформаторі. Вихідні експериментальні дані представлені у вигляді зареєстрованих за допомогою інформаційно-діагностичного комплексу «Регіна» масивів значень вологовмісту і температури масла. Розрахунок діагностичних параметрів виконано враховуючи природну циркуляцію масла в баці трансформатора. Параметрична ідентифікація коефіцієнтів диференціальних рівнянь моделі виконана на вибірці, отриманій за три доби. Отримані значення коефіцієнтів  $k_{i,hf}$  рівняння (9) наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів рівняння моделі вологовмісту

Коефіцієнт	$k_{1,hf}$	$k_{2,hf}$	$k_{3,hf}$	$k_{4,hf}$	$k_{5,hf}$
Значення	-0,229	-0,052	0,364	0,553	0,490

Аналіз отриманих результатів розрахунку діагностичних параметрів для температури масла та вологовмісту масла підтверджує ефективність процедур зменшення впливу випадкових похибок та працездатність розроблених алгоритмів та вказує на можливість їх використання з даними, які отримані за допомогою датчиків, встановлених на трансформаторі.

**Висновки.** Розроблено математичні моделі аналізу діагностичних параметрів температури та вологості масла, які передбачають параметричну ідентифікацію теплової моделі та моделі вологовмісту методом рою частинок з використанням даних, виміряних за нормального режиму роботи обладнання, коли відсутність дефектів підтверджена нещодавнім комплексним обстеженням чи капітальним ремонтом. Запропоновано алгоритм параметричної ідентифікації теплової моделі та моделі вологовмісту. Використання розроблених моделей у складі систем діагностування силових трансформаторів в робочих режимах підвищує чутливість виявлення дефектів трансформатора.

#### Список використаної літератури

1. Вдовико В.П. Методология системы диагностики электрооборудования высокого напряжения / В.П. Вдовико // *Электричество*. – 2010. – № 2. – С.14–20.
2. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов / А.М. Дейч. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.
3. Eberhart R.C. Particle swarm optimization: developments, applications and resources / R.C. Eberhart, Yuhui Shi // *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*. 2001. – Vol. 1. – P. 81–86.
4. Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076–7:2005. – [Valid from 2010-12-31]. – Geneva: IEC, 2010. – 62 p. – (International standard).
5. Соколов В.В. Меры по повышению эффективности диагностики состояния трансформаторного оборудования / В.В. Соколов // *Перспективные технологии электроэнергетики: IX симпозиум «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА 2030»* [Електронний ресурс]. – М.: CD "ТРАВЭК", 2007.
6. Fabre J. Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers. / J. Fabre, A. Pichon. // *International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRE)*, Paris, France. – Paper 137. – 1960.
7. Morin A.J. Fluid Electrification Measurements of Transformer Pressboard Oil Insulation in a Couette Charger / A.J. Morin, M. Zahn, J.R. Melcher. // *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. – 1991. – Vol. 26. – No. 5. – P. 870-901.

8. IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators and Reactors: IEEE Std 62:1995. – [Valid from 1995-03-16]. – New York: IEEE, 1995. – 59 p. – (International standard).
9. Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil Equipment: IEEE Std C57.106:2006. – [Valid from 2006-12-06]. – New York: IEEE, 1995. – 36 p. – (International standard).
10. García B. A moisture-in-oil model for power transformer monitoring - Part I: Theoretical foundation / B. García, J. C. Burgos, Á. Alonso, J. Sanz // IEEE Transactions on Power Delivery – Vol. 20, № 2 – 2005. – P. 1417 – 1422.

**I. Prytyskach**

**National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»**

**PARAMETRIC IDENTIFICATION OF DIAGNOSTIC PARAMETERS MODELS IN POWER TRANSFORMERS DIAGNOSTIC SYSTEMS**

*Mathematical models of diagnostic parameters such as oil temperature and humidity of oil are developed in order to improve diagnosis of power transformers. An approach for parametric identification of thermal model and moisture model is proposed on the basis of particles swarm optimization method. Corresponding algorithms and software are developed. Testing of proposed mathematical models carried out by analyzing the results obtained after processing the experimental data obtained at the operating power transformer.*

**Keywords:** power transformer, diagnostic parameter, oil temperature in the upper layers, the moisture content of oil, parametric identification.

**References**

1. Vdoviko V.P. Methodology of high voltage electrical system diagnostics / V.P. Vdoviko // Electricity – 2010. – № 2. – P.14-20.
2. Deitch A.M. Methods of dynamic objects identification / A.M. Deitch. – M.: Energia, 1979. – 240 p.
3. Eberhart R.C. Particle swarm optimization: developments, applications and resources / R.C. Eberhart, Yuhui Shi // Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation. 2001. – Vol. 1. – P. 81–86.
4. Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7:2005. – [Valid from 2010-12-31]. – Geneva: IEC, 2010. – 62 p. – (International standard).
5. Sokolov V.V. Measures to improve the efficiency of transformers condition diagnosis / V.V. Sokolov // Advanced technologies Electricity: IX Symposium "ELECTRICAL 2030" [Electron resource]. – M.: CD "TRAVEK", 2007.
6. Fabre J. Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers. / J. Fabre, A. Pichon. // International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRE), Paris, France. – Paper 137. – 1960.
7. Morin A.J. Fluid Electrification Measurements of Transformer Pressboard Oil Insulation in a Couette Charger / A.J. Morin, M. Zahn, J.R. Melcher. // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1991. – Vol. 26. – No. 5. – P. 870-901.
8. IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators and Reactors: IEEE Std 62:1995. – [Valid from 1995-03-16]. – New York: IEEE, 1995. – 59 p. – (International standard).
9. Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil Equipment: IEEE Std C57.106:2006. – [Valid from 2006-12-06]. – New York: IEEE, 1995. – 36 p. – (International standard).
10. García B. A moisture-in-oil model for power transformer monitoring - Part I: Theoretical foundation / B. García, J. C. Burgos, Á. Alonso, J. Sanz // IEEE Transactions on Power Delivery – Vol. 20, № 2 – 2005. – P. 1417 – 1422.

**И.В. Прытыскач**, канд. техн. наук, ст. преп.

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»**

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

*С целью повышения уровня диагностики силовых трансформаторов разработаны математические модели анализа диагностических параметров температуры и влажности масла, которые предусматривают параметрическую идентификацию тепловой модели и модели влагосодержания методом роя частиц. На основе предложенного подхода разработаны соответствующие алгоритмы и программное обеспечение. Проверку работоспособности предложенных математических моделей осуществлен на основе анализа результатов, полученных после обработки экспериментальных данных, полученных на действующем силовом трансформаторе.*

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, диагностический параметр, температура масла в верхних слоях, влагосодержание масла, параметрическая идентификация.

Надійшла 11.05.2016

Received 11.05.2016